



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ανάπτυξη έξυπνου επιχειρησιακού συστήματος 3-διάστατης σάρωσης LASER για την μέτρηση μετεωρολογικών παραμέτρων στην ατμόσφαιρα με συστήματα τηλεπισκόπησης LASER (τεχνική 3D LIDAR) με εφαρμογή στην ασφάλεια πτήσεων σε αεροδρόμια

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Ν. ΠΑΝΤΑΖΗΣ

MSCs Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
ΕΜΠ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Αλέξανδρος Παπαγιάννης

Καθηγητής ΕΜΠ

Μάρτιος 2020



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ανάπτυξη έξυπνου επιχειρησιακού συστήματος 3-διάστατης σάρωσης LASER για την μέτρηση μετεωρολογικών παραμέτρων στην ατμόσφαιρα με συστήματα τηλεπισκόπησης LASER (τεχνική 3D LIDAR) με εφαρμογή στην ασφάλεια πτήσεων σε αεροδρόμια

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Ν. ΠΑΝΤΑΖΗΣ

MSCs Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών ΕΜΠ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Α. Παπαγιάννης, Καθ. ΕΜΠ (Επιβλέπων)
2. Π. Ζάννης, Καθ. ΑΠΘ
3. Ε. Γιαννακάκη, Λέκτορας, ΕΚΠΑ

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Α. Παπαγιάννης, Καθ. ΕΜΠ (Επιβλέπων)
2. Π. Φράγκος, Καθ. ΕΜΠ
3. Π. Ζάννης, Καθ. ΑΠΘ
4. Μ. Τόμπρου, Καθ. ΕΚΠΑ
5. Ε. Φλόκα, Καθ. ΕΚΠΑ
6. Π. Στεφανέας, Επίκ. Καθ. ΕΜΠ
7. Ε. Γιαννακάκη, Λέκτ. ΕΚΠΑ

Αθήνα, Μάρτιος 2020

στους γονείς μου, Νικόλαο και Μυρσίνη και τη σύζυγό μου Ευθυμία

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Ν. ΠΑΝΤΑΖΗΣ

Απόφοιτος Σχολής Ικάρων, MSCs ΕΜΠ

Copyright © ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Ν. ΠΑΝΤΑΖΗΣ

Επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διδακτορική αυτή διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο "Οπτοηλεκτρονικής, Laser και Εφαρμογών τους" του Τομέα Φυσικής, της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (ΣΕΜΦΕ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Κύριος επιβλέπων ήταν ο Καθηγητής κ. Αλέξανδρος Παπαγιάννης και μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, ο Καθηγητής του ΑΠΘ κ. Π. Ζάννης και η Λέκτορας του ΕΚΠΑ κα Ε. Γιαννακάκη.

Ευχαριστίες οφείλω προς τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Α. Παπαγιάννη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου έδωσε αρχικά, με το να με αναλάβει στο Διδακτορικό μου, την οποία ελπίζω κατά πολύ πως επιβεβαίωσα με την εργασία μου. Ευχαριστώ, επίσης, τα μέλη των Επιτροπών για τις χρήσιμες επισημάνσεις τους στις εργασίες μου, καθώς και την Υ.Δ. Ουρανία Σουπιωνά, για την συνολική βοήθεια που μου πρόσφερε σε κάθε μου αίτημα.

Θερμότερες ευχαριστίες οφείλω στη σύζυγό μου Ευθυμία, η οποία με συνοδεύει και με στηρίζει καθημερινά ακόμη και στις απαιτήσεις της Διδακτορικής αυτής διατριβής, παρ'όλες τις δυσκολίες και τον κατά πολύ μειωμένο χρόνο που τελικά της προσέφερα, αυτό το διάστημα. Επίσης, ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου, για τις σωστές αρχές και στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια. «Χωρίς σωστή παιδεία από το σπίτι, είναι δύσκολο κάποιος να σταθεί ακέραιος σε αρχές και αξίες και σωστός, στη σημερινή εποχή».

Για το τέλος, αφήνω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου στον Θεό και τις τόσες ευκαιρίες που μου έδωσε να γνωρίσω σε βάθος και να ασχοληθώ με το Διδακτορικό μου, εντός ενός τεράστιου πεδίου εφαρμογών και ανάλυσης, ώστε να μπορώ να αποθέτω εκεί, τώρα αλλά και στο μέλλον, το «ζιζάνιο» της ανακάλυψης που ταλαιπωρεί τους ανθρώπους κάθε επιστήμης. Τον ευχαριστώ επίσης για τις όμορφες στιγμές που μου προσέφερε και τους θαυμάσιους ανθρώπους που γνώρισα ανά την υφήλιο σε αυτό μου το ταξίδι, καθώς και τα «μαθήματα» ζωής που μου προσέφερε μέσα σε έναν, κατά τα άλλα, Αγγελικά πλασμένο κόσμο!

Αλέξανδρος Ν. Πανταζής

Αθήνα, Μάρτιος 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη ενός έξυπνου συστήματος Light Detection And Ranging (LIDAR), τριών διαστάσεων (3D), με βασική εφαρμογή στη μέτρηση μετεωρολογικών και ατμοσφαιρικών παραμέτρων και εφαρμογές στις μεταφορές (Αεροπλοΐα-ασφάλεια των πτήσεων-διαχείριση εναέριας κυκλοφορίας, ναυσιπλοΐα, Διαστημική κλπ.), και τη Μετεωρολογία (μέτρηση ορατότητας και ταχύτητας ανέμου, καταγραφή ομίχλης κλπ.).

Το σύστημα αυτό βασίζεται στην ενεργό τηλεπισκόπηση (active Remote Sensing) με χρήση δέσμης laser, προκειμένου να παρέχει πληροφορίες παραμέτρων της ατμόσφαιρας, εξάγοντας «προϊόντα» - πληροφορίες όπως: Κάθετη - Οριζόντια και Επικλινή Ορατότητα (3D Visibility or Slant Visual Range - SVR), Ορατότητα διαδρόμου Απο-Προσγείωσης αεροδρομίων (Runway VisualRange - RVR) ή οδικού δικτύου, διάταξη νεφών και οπτική γεωμετρία τους, εντοπισμός ατμοσφαιρικών στρωματώσεων και ακριβής κατηγοριοποίησή τους (πχ.υγρά αχλύς, ομίχλη), ύψος και πάχος αυτών, 3D καταγραφή του ύψους του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (ΑΟΣ ή Planetary Boundary Layer Height), αλλά και την ταχύτητα ανέμου σε 2D / 3D χωρίς την αναγκαστική χρήση επιπλέον ακριβού εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα συστήματα Doppler lidar ή radar. Τα οφέλη μιας τέτοιας συσκευής lidar, ανάγονται στην ικανότητά της να πραγματοποιεί μετρήσεις ατμοσφαιρικών παραμέτρων ακόμα και σε ανομοιογενείς ατμόσφαιρες από απόσταση και σε 3D, σε αντίθεση με την υπάρχουσα συμβατική οργανολογία που στηρίζεται σε επιτόπιες (in situ) μετρήσεις.

Ειδικότερα, με τον τρόπο αυτό, μπορεί να βοηθηθούν σημαντικά οι Ελεγκτες Εναερίου Κυκλοφορίας (ΕΕΚ) των αεροδρομίων και οι μετεωρολόγοι αυτών και έχει ως αποτέλεσμα, την σημαντική μείωση του συνολικού χρόνου πτήσης και της κατανάλωσης καυσίμων από τα αεροσκάφη, τη μείωση των εκπομπών CO₂ και άλλων αέριων ή σωματιδιακών ρύπων στο περιβάλλον, αλλά την μείωση του κόστους πτήσης. Παράλληλα, το όλο εγχείρημα συμβάλλει στην βιώσιμη ανάπτυξη και την ενίσχυση της οικονομίας, καθώς και την αύξηση ικανότητας των αεροδρομίων να ελέγχουν περισσότερα αεροσκάφη στον ίδιο χρόνο.

Η υλοποίηση μίας τέτοιας συσκευής στα αεροδρόμια, προβλέπεται να αλλάξει μελλοντικά, με θετικό τρόπο, τα όρια -προτυποποίηση των συσκευών ατμοσφαιρικών μετρήσεων από τον International Civil Aviation Organization (ICAO) ή / και International Maritime Organization (IMO), Weather Meteorological Organization (WMO), όπως στην περίπτωση μέτρησης της ορατότητας από scatterometer, όπου σήμερα γίνεται αποδεκτό ότι η συσκευή αυτή, μπορεί να παρέχει την ορατότητα σε αποστάσεις έως 10 km με επιτόπιες μετρήσεις, καθώς και τον αξιόπιστο, αλλά αρκετά κοστοβόρο και τοπικό σε χώρο και χρόνο, τρόπο εύρεσης ύψους του ΑΟΣ με την τεχνική των ραδιοβολίσεων.

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή αναπτύσσεται υπό το πρίσμα των παραπάνω εφαρμογών και με στόχο την ολοκληρωμένη έρευνα. Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η δομή της Ατμόσφαιρας και ορίζεται η ατμοσφαιρική ορατότητα. Συνεχίζοντας στο 2^ο Κεφάλαιο αναφέρεται μία βιβλιογραφική έρευνα της τεχνικής lidar και εφαρμογών αυτής. Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι υφιστάμενες τεχνικές μέτρησης της μετεωρολογικής ορατότητας, του ύψους του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (ΑΟΣ) και της ταχύτητας του ανέμου. Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται το σύστημα lidar ως μετεωρολογική συσκευή, καθώς και το είδος (και το μήκος κύματος εκπομπής) του laser που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναφερόμενη συσκευή, με αντίστοιχες προσομοιώσεις. Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 5, αναλύονται οι αναπτυχθέντες τεχνικές και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι επεξεργασίας σημάτων lidar στο πλαίσιο του Διδακτορικού αυτού, ενώ, τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα βασικότερα συμπεράσματα και προοπτικές όλων των ανωτέρω.

Τέλος, στο Παράρτημα καταγράφονται οι κυριότερες συσκευές μέτρησης ατμοσφαιρικών παραμέτρων, που είναι διαθέσιμες σήμερα, παγκοσμίως.

ABSTRACT

The subject of this Doctoral Thesis is the study of a new innovative three-dimensional (3D) Light Detection And Ranging (LIDAR) system for measuring meteorological and atmospheric parameters with applications in transportation (Aviation-Flight Safety-Air Aviation Management, Marine Navigation, Space applications, etc) and Meteorology (Visibility and wind speed measurement, fog detection, etc).

This system is based on the laser remote sensing technique with laser transmittance, able to provide information on atmospheric parameters, by exporting user "products" such as: Vertical - Horizontal and Slant Visual Range (3D Visibility or Slant Visual Range - SVR), Runway Visual Range (RVR) or road network Visibility, height - thickness and cloud layout as well as their optical geometry, detection of Atmospheric Layers and their precise categorization (such as fog, haze) as well as height and width of those, 3D Planetary Boundary Layer Height (Vertical or 3D PBLH) and 2D / 3D wind velocity without any necessary use of additional expensive equipment, such as the Doppler lidar or radar device. Such a device is based on its ability to perform measurements of atmospheric parameters remotely and in 3D, even in inhomogeneous atmospheric conditions, in contrast to the existing conventional instrumentation, to the above mentioned applications, where in situ measurements are performed as main way of measurement.

This greatly helps Airport Air Traffic Controllers and their Meteorologists and it results in a significant reduction in aircraft overall flight time and fuel consumption, a reduction in CO₂ emissions and other pollutants in the area, a reduction in flight costs and so in this way this project contributes to the ecology of the area and to the economy and increases the capacity of the Airport to be able to control a lot more aircrafts at the same time.

The implementation of such a device at the airports is about to change the future, but in a positive way, of the standardization and its limits, of atmospheric measurements devices by the International Civil Aviation Organization (ICAO) and / or International Maritime Organization (IMO) and Weather Meteorological Organization (WMO), as in the case of visibility and scatterometer, where it now

accepts as such a device can provide visibility up to distances of 10 km with only in situ (local) measurements. It will also challenge the formal, reliable but expensive way, that PBLH is produced today with the radiosondes method and the limitations that in situ measurements are bound from in space and time.

This Doctoral Thesis is developed under the prism of the above mentioned applications and with the aim of integrated research. In the 1st Chapter, the structure of the Atmosphere and definition of visibility is presented. Continuing to Chapter 2, a bibliographical survey around lidar technique and its applications is presented. In Chapter 3, the currently existing techniques for measuring the visibility, the PBLH and wind speed are presented. In Chapter 4, the lidar system is presented as a meteorological device through corresponding simulations, for the type (and emission wavelength) of the laser that can be used for the device under investigation. Then, in Chapter 5, lidar signal processing techniques and algorithms developed in this PhD are analyzed, while in Chapter 6, the conclusions and perspectives of all, of this Thesis, are presented.

Finally, in the Appendix, we present the atmospheric measuring devices present today worldwide.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|---------------|
| 1.ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΓΗΙΝΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ..... | - 3 - |
| 1.1 Εισαγωγή | - 3 - |
| 1.2 Δομή της Γήινης ατμόσφαιρας | - 3 - |
| 1.3 Ατμοσφαιρική Ορατότητα και Ομίχλη | - 8 - |
| 1.3.1 Ατμοσφαιρική Ορατότητα | - 8 - |
| 1.3.2 Ορατότητα και Ομίχλη | - 13 - |
| | |
| 2. ΤΕΧΝΙΚΗ LIDAR..... | - 17 - |
| 2.1 Τεχνικές Ενεργούς Τηλεπισκόπησης | - 17 - |
| 2.2 Τεχνική LIDAR..... | - 18 - |
| 2.3 Ατμοσφαιρική Σκέδαση | - 20 - |
| 2.4 Εξίσωση LIDAR..... | -22 - |
| 2.5 Σκέδαση Rayleigh..... | - 24 - |
| 2.6 Σκέδαση Raman..... | - 27 - |
| 2.7 Ανίχνευση Αιωρούμενων Σωματιδίων..... | - 28 - |
| 2.8 Τεχνική Doppler LIDAR..... | - 33 - |
| 2.9 Εφαρμογή Τεχνικής LIDAR στην Ανίχνευση νεφών..... | - 36 - |
| 2.10 Μέτρηση θερμοκρασίας με την χρήση της Τεχνικής LIDAR..... | - 37 - |
| 2.11 Πειραματική διάταξη συστήματος LIDAR του ΕΜΠ..... | - 38 - |
| 2.12 Σκοπός παρούσας Διδακτορικής Διατριβής..... | - 41 - |

| | |
|--|-------------|
| 3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΟΡΑΤΟΤΗΤΑΣ, ΥΨΟΥΣ ΑΟΣ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ..... | 45 - |
| 3.1 Τεχνικές Μέτρησης Ορατότητας στην Ατμόσφαιρα | - 45 - |
| 3.1.1 Υφιστάμενες Τεχνολογίες και Μεθοδολογίες Μετρήσεων με Χρήση Συστημάτων LIDAR για την καταγραφή της Ατμοσφαιρικής Ορατότητας..... | - 45 - |
| 3.1.2 Συμβατικές Τεχνικές Μέτρησης της Ατμοσφαιρικής Ορατότητας | - 53 - |
| 3.2 Τεχνικές Εύρεσης Ύψους ΑΟΣ | - 60 - |
| 3.2.1 Ραδιοβολίσεις..... | - 53 - |
| 3.2.2 Τεχνική LIDAR..... | - 55 - |
| 3.3 Μέθοδοι μέτρησης Ταχύτητας του Ανέμου..... | - 57 - |
| | |
| 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ..... | 59 - |
| 4.1 Προσομοιώσεις Ατμοσφαιρικής Ορατότητας..... | - 59 - |
| | |
| 5. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΥΡΕΣΗΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ..... | 73 - |
| 5.1 Εισαγωγή..... | - 73 - |
| 5.2 Τεχνική 3D Stepping ή LADDER..... | - 73 - |
| 5.3 Αλγόριθμοι Denoising - 1/2 ή NOSUB - S/R..... | - 81 - |
| 5.4 Αλγόριθμος Weather Phenomena ή METCON | - 87 - |
| 5.5 Αλγόριθμος Visibility ή NAVIS..... | - 93 - |
| 5.6 Αλγόριθμος MUSTI - L/D ή VASPAT - L/D και Ατμοσφαιρική Διαστρωμάτωση | - 101 - |
| 5.7 Αλγόριθμος MUSTI - PBLH ή VASPAT - PBLH | - 112 - |
| 5.8 Αλγόριθμος DECIS ή VERDE..... | - 122 - |

| | |
|---|----------------|
| 5.9 Φίλτρο KALMAN Vs MUSTI ή VASPAT..... | - 129 - |
| 5.10 Αλγόριθμος Weather Phenomena - PBLH ή METCON - PBLH..... | - 136 - |
| 5.11 Τεχνική Fastplan ή Uniform..... | - 139- |
| 5.12 Αλγόριθμος SIBESMEA | - 145 - |
| 5.13 Αλγόριθμος WIND Weather Phenomena ή WIND METCON | - 151 - |
| 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ | - 157 - |
| ΕΠΙΛΟΓΟΣ | - 163- |
| ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ | - 165 - |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | - 167 - |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ | - 189 - |

1.

ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΓΗΙΝΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ

1.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα βασικά χαρακτηριστικά της δομής ατμόσφαιρας και των αιωρούμενων σωματιδίων και πώς αυτά επηρεάζουν την ατμοσφαιρική ορατότητα. Ακολούθως, θα γίνει αναφορά στο Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ) και τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού σε σχέση με τον ρόλο του στην ατμόσφαιρα και τον καιρό περιοχής, καθώς και την πρόβλεψη του τελευταίου. Τέλος, αφού γίνει αναφορά στη σύσταση της ατμόσφαιρας και βασικών ορισμών που αφορούν την ατμοσφαιρική ορατότητα και το ΑΟΣ, θα οριστεί η ομίχλη καθώς και ο τρόπος που επηρεάζει τα διάφορα είδη ατμοσφαιρικής ορατότητας.

1.2 Δομή της γήινης ατμόσφαιρας

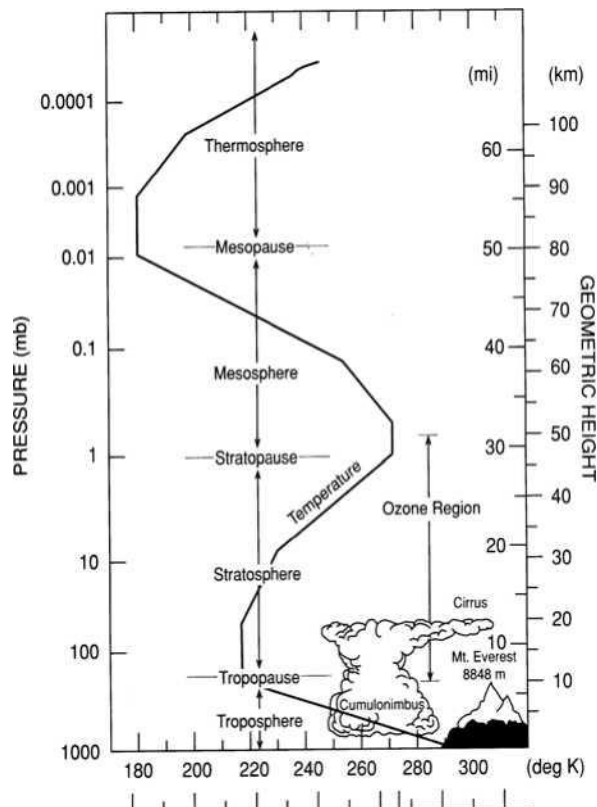
Η γήινη ατμόσφαιρα χωρίζεται σε τέσσερις βασικές περιοχές, αναλόγως μεταβολής της θερμοκρασίας με το ύψος. Το ακριβές ύψος κάθε ατμοσφαιρικής περιοχής μεταβάλλεται κυρίως αναλόγως εποχής και γεωγραφικού πλάτους. Οι τέσσερις περιοχές στις οποίες χωρίζεται η ατμόσφαιρα είναι οι εξής (Σχήμα 1.1):

i) η τροπόσφαιρα, η οποία εκτείνεται από το έδαφος και έως την τροπόπαυση. Η τελευταία βρίσκεται σε ύψος 10-18 km ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του χρόνου. Στους πόλους η τροπόπαυση εμφανίζεται στα 6-8 km, ενώ στον Ισημερινό περίπου στα 18 km. Η τροπόσφαιρα αποτελεί περίπου το 85-90% της μάζας της ατμόσφαιρας και φέρει τα παρακάτω χαρακτηριστικά [Παπαγιάννης Σημειώσεις (2005, 2013-14)]:

- ο Μειώνεται η θερμοκρασία με την αύξηση του ύψους (κατά μέσο όρο

θερμοβαθμίδα (lapse rate) είναι $-9.7^{\circ} \text{ K / km}$ για ξηρό αέρα).

- Έχει δυναμική αστάθεια και η ατμόσφαιρά της είναι τυρβώδης.
- Υπάρχει έντονη καταφύρση ανάμειξη αερίων μαζών με έντονο ρυθμό και την παράλληλη διανταλλαγή ενέργειας μέσω συναγωγής.
- Η τροπόσφαιρα εμπεριέχει και το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ) (Planetary Boundary Layer - PBL) το οποίο και εκτείνεται σε ύψος 0.5-4 km, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του χρόνου. Αποτελεί μετεωρολογικό δεδομένο παρόντος καιρού και “κρίσιμο” δεδομένο εισαγωγής σε μοντέλα πρόβλεψης.



Σχήμα 1.1: Η δομή της γήινης ατμόσφαιρας [Atmospheric Chemistry and Global Change (1999)].

Το ΑΟΣ έρχεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια της Γης και είναι εκείνη που επηρεάζει άμεσα το ύψος του ή αλλιώς το Planetary Boundary Layer Height – PBLH (Σχήμα 1.2). Στο τμήμα αυτό της τροπόσφαιρας, αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής μεταξύ της επιφάνειας της Γης και του ρευστού ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συμβαίνουν συνεχείς αλλαγές στο στρώμα αυτό και να προκαλούνται φαινόμενα όπως της εξάτμισης, της μεταφορά θερμότητας, διάφορες εκπομπές αερίων και στερεών ρύπων, κυρίως αναλόγως τοπογραφίας της περιοχής (πχ

θάλασσα, πεδιάδα, χαμηλοί λόφοι, βουνά κλπ) [[Stull (1988, 2013), Λαζαρίδης 2010]].

Ο ατμοσφαιρικός αέρας ως ρευστό, δημιουργεί δυνάμεις τριβής μέσω της τυρβώδους ροής λόγω της κίνησής του. Με αυτό τον τρόπο η όποια μεταβολή συμβαίνει εντός του ΑΟΣ λόγω ακτινοβολίας, αύξησης θερμοκρασίας κτλ «επιλύεται» σχεδόν άμεσα μέσω της ανάπτυξης της τυρβώδους αυτής ροής και το «κενό» καλύπτεται άμεσα από λοιπό ατμοσφαιρικό αέρα δημιουργώντας ένα πεδίο ανέμων. Συγκεκριμένα, με την επίδραση του ανάγλυφου της επιφάνειας της Γης, ο άνεμος μέσα στο ΑΟΣ στρέφεται από τις υψηλές προς τις χαμηλές πιέσεις, ενώ πάνω από το ΑΟΣ πνέει παράλληλα προς τις ισοβαρείς.

Η στροφή αυτή του ανέμου εντός του ΑΟΣ δημιουργεί μια σπειροειδή κίνηση γνωστή και ως σπείρα Eckman. Το ύψος στο οποίο ο άνεμος σταματάει κατά βάσει να περιστρέφεται κατά αυτόν τον τρόπο, θεωρείται ως το μέγιστο ύψος του ΑΟΣ της Γης και το χαρακτηριστικό αυτό του ΑΟΣ, θα μας φανεί χρήσιμο αργότερα στην εύρεση του PBLH.

Οι τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το ύψος του οριακού στρώματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι η ύπαρξη πολλών νεφών έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερα ύψη του οριακού στρώματος σε σχέση με τις περιπτώσεις καθαρού ουρανού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μικρότερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει στο έδαφος με αποτέλεσμα οι τυρβώδεις ροές που αναπτύσσονται από τις λοιπές μετεωρολογικές συνθήκες, να είναι ασθενέστερες.

Πάνω δε από τους ωκεανούς, το ύψος του ΑΟΣ μεταβάλλεται πιο αργά, τόσο τοπικά όσο και χρονικά [Stull (1988, 2013), Λαζαρίδης (2010)]. Η μεταβολή της θερμοκρασίας της θάλασσας είναι αρκετά μικρή εξαιτίας της μεγάλης θερμοχωρητικότητας. Αντίθετα, στην ξηρά η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα ο αέρας της στεριάς να είναι θερμότερος σε σύγκριση με τον θαλάσσιο αέρα.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο θερμότερος αέρας που είναι και αραιότερος να ανέρχεται και στην θέση του να εισέρχεται ο ψυχρότερος και πυκνότερος αέρας της θάλασσας. Αυτό το σύστημα κυκλοφορίας ονομάζεται θαλάσσια αύρα. Λόγω της θαλάσσιας αύρας συχνά δημιουργείται θερμοκρασιακή αναστροφή, αύξηση δηλαδή της θερμοκρασίας με το ύψος, με αποτέλεσμα να εμποδίζονται οι κατακόρυφες κινήσεις των αέριων μαζών.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της τροπόσφαιρας τα οποία επηρεάζουν εν μέρει και το ύψος εύρεσης του ΑΟΣ, είναι [Stull (1988, 2013), Λαζαρίδης (2010)]:

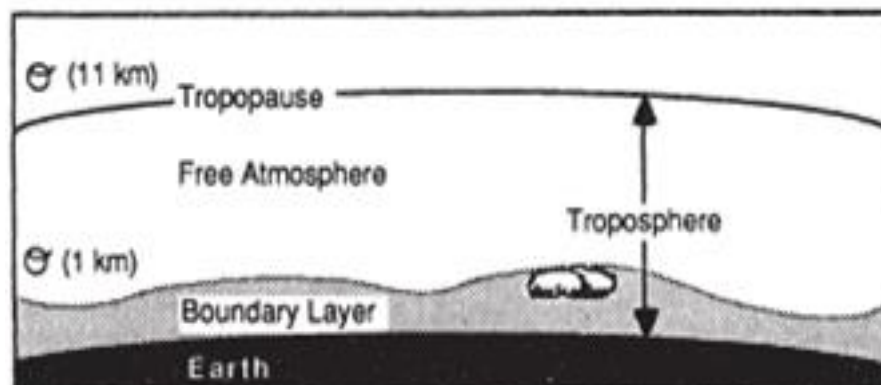
i) η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος με σταθερό σχεδόν ρυθμό της τάξης των $6.5^{\circ} \text{ C / km}$ (υγρή κατακόρυφη θερμοβαθμίδα).

ii) η ταχύτητα του αέρα αυξάνεται με το ύψος με τις μεγαλύτερες τιμές του να εμφανίζονται στην τροπόσφαιρα.

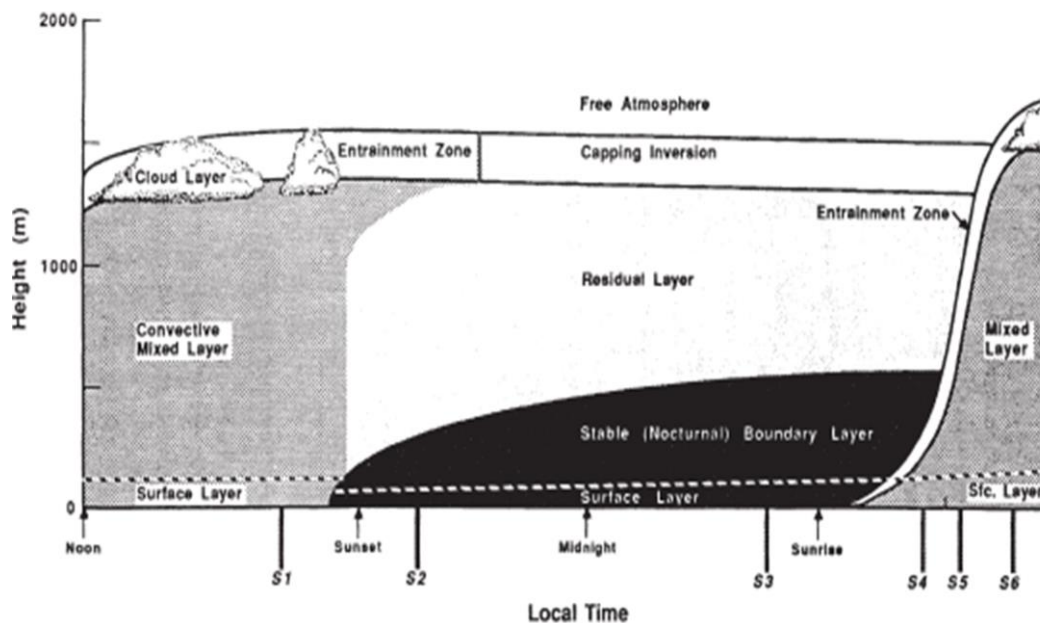
iii) το σύνολο σχεδόν της ποσότητας του νερού στην ατμόσφαιρα (στερεό, υγρό και αέριο) βρίσκεται μέσα στην τροπόσφαιρα και ειδικότερα στα κατώτερα στρώματά της εντός του ΑΟΣ.

iv) το σύνολο των μετεωρολογικών - καιρικών φαινομένων συμβαίνουν μέσα στην τροπόσφαιρα και κατά βάση κάτωθεν του ύψους του ΑΟΣ.

Σύμφωνα με έναν άλλο ορισμό από τον Stull [Stull (1988, 2013)] το ΑΟΣ είναι το κατώτερο τμήμα της τροπόσφαιρας που επηρεάζεται περισσότερο από την παρουσία της Γης και ανταποκρίνεται - «αντιδρά» στην κίνηση της επιφάνειας της Γης στην επαφή της με τις αέριες μάζες, σε χρονική κλίμακα μίας (1) ώρας ή και λιγότερο. Χαρακτηριστικό δηλαδή της «χρονικής» τοποθέτησης του PBL σε ορισμένο ύψος και της δυναμικής αλλαγής αυτού, το οποίο αφορά αυτή τη Διδακτορική διατριβή και θα μας απασχολήσει αυτό αργότερα στην ανάπτυξη Αλγορίθμων PBLH στο Κεφάλαιο 5.



Σχήμα 1.2: Η τροπόσφαιρα μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μέρη: Στο ΑΟΣ που βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια της Γης (με γκριζο χρώμα) και στην ελεύθερη τροπόσφαιρα πάνω από αυτό. Ως ύψος του ΑΟΣ ορίζεται ως το άνω μέρος – κορυφογραμμή του ΑΟΣ [Stull (1988, 2013)].



Σχήμα 1.3: Ημερήσια μεταβολή του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος [Stull(1988)].

Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα σε περιοχές υψηλής πίεσης πάνω από το έδαφος αποτελείται από τρία κύρια μέρη (Σχήμα 1.3): ένα πολύτροβιλώδες (Mixed layer), ένα λιγότερο τυρβώδες (Residual layer) που περιέχει προηγούμενο ατμοσφαιρικό αέρα Mixed layer και ένα σταθερό οριακό στρώμα σποραδικής αναταραχής (Stable Boundary layer). Το μεικτό ατμοσφαιρικό στρώμα μπορεί να υποδιαιρεθεί στο στρώμα με σύννεφα (Cloud Layer) και ένα στρώμα Sub-cloud. Εκτός από αυτά υπάρχει και το επιφανειακό στρώμα (Surface layer) που είναι ένα μικρού πάχους και αποτελεί το κατώτερο τμήμα του ΑΟΣ.

Κύριο χαρακτηριστικό του τελευταίου στρώματος είναι ότι η τυρβώδης ροή μεταβάλλεται σε ποσοστό μικρότερο του 10%. Το ονομαζόμενο «ύψος του ΑΟΣ» (PBL Height - PBLH) τοποθετείται στο υψηλότερο τμήμα του PBL, ακριβώς κάτω από τη λεγόμενη ζώνη μεταφοράς ή συλλογής (Entrainment Zone), δηλαδή στο υψηλότερο σημείο του Mixed Layer κατά την διάρκεια της ημέρας ή του Stable Boundary layer κατά την διάρκεια της νύχτας, κάτω δηλαδή από το εναπομένον στρώμα (Residual layer) [Stull (1988)].

1.3 Ατμοσφαιρική Ορατότητα και Ομίχλη

1.3.1 Ατμοσφαιρική Ορατότητα

Η **Ορατότητα** ορίζεται ως μια «τοπική» μεταβλητή της ατμόσφαιρας που περιορίζεται άμεσα από την θολότητα της. Γενικότερα, όσο μεγαλύτερη είναι η θολότητα της ατμόσφαιρας τόσο μικρότερη είναι η ορατότητα από τον παρατηρητή. Η ορατότητα περιορίζεται «φυσικά» από έξι κύριες παραμέτρους:

i) την ατμοσφαιρική απορρόφηση ακτινοβολίας από τα συστατικά της ατμόσφαιρας (αιωρούμενα σωματίδια και μόρια) λόγω των φυσικών και οπτικών ιδιοτήτων τους.

ii) από τη σκέδαση που υφίσταται μία ακτινοβολία κατά τη διάδοσή της στη γήινη ατμόσφαιρα.

iii) από την ένταση ακτινοβολίας της πηγής του φωτός (luminance).

iv) από το μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο ορατό φάσμα (400 – 700 nm) ώστε αυτή να γίνει αντιληπτή από τον άνθρωπο.

v) από τη συνολική οπτική διαδρομή διάδοσης (όπου υφίστανται φαινόμενα σκέδασης ή πολλαπλής σκέδασης) στην ατμόσφαιρα από την φωτεινή πηγή εκπομπής έως τον παρατηρητή, καθώς και:

vi) από την φωτεινότητα ή αλλιώς την ένταση ακτινοβολίας (luminance) του ατμοσφαιρικού υποβάθρου της υπό εξέταση πηγής του φωτός.

Με άλλα λόγια, ένα αντικείμενο δεν μπορεί πλέον να γίνει διακριτό από έναν παρατηρητή εάν η αμιγής ένταση φωτεινότητάς του (self-luminance) πλησιάζει την ένταση φωτεινότητας του ατμοσφαιρικού υποβάθρου. Η διαφορά που πρέπει να έχει η ένταση της φωτεινής πηγής του σε σχέση με το φωτεινό της υπόβαθρο ώστε η πηγή αυτή να μπορεί να γίνει αντιληπτή, δίνεται από τις διάφορες μελέτες από μεγάλους διεθνείς οργανισμούς, όπως τον International Civil Aviation Organization [ICAO, (2008)] και τον World Meteorological Organization [WMO, (2010)] και αναλύεται παρακάτω.

Το μέγεθος της ατμοσφαιρικής απορρόφησης εκφράζεται από τον συντελεστή απορρόφησης ή εξασθένησης $\alpha(\lambda, R)$ της δέσμης του φωτός και οφείλεται στην

ύπαρξη των μορίων και των αιωρούμενων σωματιδίων. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την απόσταση διάδοσης (R) της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και είναι συνάρτηση του μήκους κύματος (λ) της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Στην περίπτωση που μελετάται - ανιχνεύεται η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία, εισάγεται η έννοια του συντελεστή οπισθοσκέδασης $\beta(\lambda, R)$ ο οποίος εξαρτάται και αυτός από την απόσταση διάδοσης (R) της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και είναι συνάρτηση του μήκους κύματος (λ) της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Οι συντελεστές $\alpha(\lambda, R)$ και $\beta(\lambda, R)$ συνδέονται μεταξύ τους, μέσω του λόγου lidar $C(\lambda, R)$:

$$C(\lambda, R) = \frac{\alpha(\lambda, R)}{\beta(\lambda, R)} \quad (1)$$

που για την περίπτωση της σκέδασης ή της απορρόφησης από τα μόρια της ατμόσφαιρας είναι ίσος με $8\pi/3$. Για την περίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων το $C(\lambda, R)$ ποικίλλει κατά μία τάξη μεγέθους αναλόγως της χημικής σύστασης των αιωρούμενων σωματιδίων, του μεγέθους και της κατανομής τους, καθώς και από την ατμοσφαιρική υγρασία κλπ. [Weitkamp(2005)].

Σύμφωνα με τη θεωρία του Koschmieder [ICAO(2005)], η ορατότητα (V) προσδιορίζεται μόνο από τον συντελεστή αντίθεσης (K), όταν ένας παρατηρητής μπορεί να διακρίνει ένα αντικείμενο στην ατμόσφαιρα από το υπόβαθρό του και από τον συντελεστή εξασθένησης $\alpha(\lambda, R)$. Επιδράσεις στη σχέση μεταξύ των $\alpha(\lambda, R)$ και $\beta(\lambda, R)$ και λοιπών παραγόντων, παραμελούνται στον παρακάτω απλό αυτό ορισμό:

$$V = \frac{1}{\alpha(\lambda, R)} \ln \frac{1}{K} \quad (2)$$

Έτσι, η μέση ορατότητα μεταξύ δύο σημείων σε απόσταση R_1 και R_2 δίνεται από την σχέση:

$$\bar{V} = \frac{R_2 - R_1}{\int_{R_1}^{R_2} \alpha(\lambda, r) dr} \ln \frac{1}{K} \quad (3)$$

Το $\alpha(\lambda, R)$ υπολογίζεται για $\lambda=550$ nm, όπου η οπτική ευαισθησία μεγιστοποιείται στο ανθρώπινο μάτι κατά την περίοδο της ημέρας. Η θεωρία του Koschmieder ορίζει το $K=0.02$, σαν το όριο αντίθεσης για έναν παρατηρητή. Με αυτή τη σύμβαση μέσω της Εξ. 3 μπορεί να οριστεί η **Τυπική Ορατότητα** (Normal Optical Range - NOR):

$$V_{NOR} = \frac{1}{a(\lambda,R)} \ln \frac{1}{0.02} = \frac{3.912}{a(\lambda,R)} \quad (4)$$

Για πρακτικούς λόγους, ένα πιο συντηρητικό κατώφλι αντίθεσης $K=0.05$ μπορεί να θεωρηθεί, λαμβανομένων υπόψη των ψυχολογικών επιπτώσεων και του στρες στην οποία μπορεί να εκτεθεί ένας παρατηρητής και δίνει την ορατότητα γνωστή ως **Μετεωρολογική Ορατότητα** (Meteorological Optical Range - MOR) [ISO(2011)]:

$$V_{MOR} = \frac{1}{a(\lambda,R)} \ln \frac{1}{0.05} = \frac{3}{a(\lambda,R)} \quad (5)$$

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Μετεωρολογίας [WMO, (2010)], η **Ορατότητα**, κατά τη διάρκεια της ημέρας ορίζεται ως η μεγαλύτερη απόσταση, προς μια ορισμένη κατεύθυνση, στην οποία, ένα «μαύρο» αντικείμενο, μπορεί να ειδωθεί και να αναγνωρισθεί στον ορίζοντα (όχι απλά σαν κουκίδα), κατά την διάρκεια της ημέρας [WMO(2010)].

Κατά την διάρκεια της νύχτας, η ορατότητα ορίζεται ως η μεγαλύτερη απόσταση κατά την οποία ένα «μαύρο» αντικείμενο, σε μια ορισμένη κατεύθυνση, μπορεί να ειδωθεί και να αναγνωρισθεί (όχι απλά σαν κουκίδα), αν ο λοιπός φωτισμός της περιοχής παραμείνει στα επίπεδα φωτισμού της ημέρας.

Η **μετεωρολογική οπτική εμβέλεια** (V_{MOR}) [WMO (1990, 2010)] είναι το μήκος της ατμοσφαιρικής διαδρομής που απαιτείται για τη μείωση της φωτεινής ροής παράλληλης δέσμης λαμπτήρα πυράκτωσης (θερμοκρασίας χρώματος 2700K), στο 5% της αρχικής τιμής της.

Γενικά και στις δύο περιπτώσεις ημέρας και νύχτας για την V_{MOR} πρέπει η ένταση φωτός του αντικειμένου, ειδικά για “self luminance targets”, να διαφέρει από την ένταση φωτός του περιβάλλοντα χώρου, κατά το ελάχιστο 5%, στην απόσταση την οποία βρίσκεται ο παρατηρητής.

Σύμφωνα με τον ICAO [ICAO(2005)], ως ορατότητα, για αεροναυτικούς σκοπούς, ορίζεται η μεγαλύτερη από τα παρακάτω:

α) τη μεγαλύτερη απόσταση από την οποία μπορεί να παρατηρηθεί και να αναγνωρισθεί ένα μαύρο αντικείμενο κατάλληλων διαστάσεων, το οποίο βρίσκεται κοντά στο έδαφος όταν παρατηρείται σε φωτεινό υπόβαθρο.

β) τη μεγαλύτερη απόσταση στην οποία μπορούν να φανούν και να ταυτοποιηθούν φώτα φωτεινότητας ~ 1.000 candelas σε ένα μη-φωτισμένο υπόβαθρο.

Γενικότερα, μπορούμε να πούμε ότι ως ορατότητα ορίζεται η μεγαλύτερη απόσταση στην οποία ένα δεδομένο αντικείμενο μπορεί να αναγνωρισθεί σε συγκεκριμένες περιστάσεις, όταν περιορίζεται μόνο από την ατμοσφαιρική διαπερατότητα και από το οπτικό όριο αντίθεσης ($K=0.02$ για ICAO ή $K=0.05$ για WMO). Βέβαια, σύμφωνα με τους [Vieeze et al. (1972)] το όριο αντίθεσης $K=0.02$ φαίνεται να είναι η ορθότερη μέθοδος που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την ορατότητα, σε σχέση με εκείνη του $K=0.05$.

Η ορατότητα V_{MOR} χρησιμοποιείται ως μεταβλητή για οριζόντιες μετρήσεις ορατότητας, αλλά και για τις κεκλιμένες μετρήσεις, όπου η κεκλιμένη / πλάγια ορατότητα (Slant Visual Range - SVR) στην οριζόντια προβολή της είναι η μέγιστη απόσταση στην οποία ένας μέλαν στόχος σε ένα επίπεδο μπορεί να αναγνωρισθεί από έναν παρατηρητή, σε ύψος h πάνω από το επίπεδο, με αντίθεση 5%. Έτσι, το όριο αντίθεσης για την κεκλιμένη οπτική εμβέλεια είναι 5% και είναι ίδιο με το κατώτατο όριο της μετεωρολογικής ορατότητας (V_{MOR}) [WMO(2010), Leroy (2010)].

Η ορατότητα διαδρόμου (Runway Visual Range - RVR) είναι το εύρος στο οποίο ο χειριστής ενός αεροσκάφους το οποίο βρίσκεται στην κεντρική γραμμή ενός διαδρόμου μπορεί να διακρίνει τα σημάδια επιφανείας του διαδρόμου ή τα φώτα που οριοθετούν τον διάδρομο ή προσδιορίζουν την κεντρική του γραμμή. Ενώ, κεκλιμένη ορατότητα (SVR) είναι η ορατότητα συγκεκριμένου αντικειμένου ή φωτός κατά μήκος μιας οπτικής γραμμής που διαφέρει σημαντικά από την οριζόντια. Για παράδειγμα, την οπτική «γκάμα» αντικειμένων εδάφους ή φώτων όπως φαίνονται από έναν πιλότο κατά την προσέγγισή του στο αεροδρόμιο [Vieeze et al.(1972)].

Η οριζόντια ατμοσφαιρική διαστρωμάτωση ή η έντονη διακύμανση του συντελεστή εξασθένησης με το ύψος, είναι ένα συχνό φαινόμενο που παρατηρείται στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Ένας παρατηρητής που κοιτάζει από το έδαφος προς τα επάνω, μπορεί να διακρίνει ένα αντικείμενο μέχρι ένα ύψος VOR (Vertical Optical Range – VOR) και ορίζεται από τη σχέση [ISO(2011)]:

$$V_{VOR} = \int_0^{VOR} a(\lambda, r) dr = 3 \quad (6)$$

Η κάθετη οπτική εμβέλεια (V_{VOR}) είναι το ύψος από το έδαφος μέχρι το ύψος VOR όπου το χωρικό ολοκλήρωμα του συντελεστή εξασθένησης $a(\lambda, R)$ λάβει την τιμή 3 (Εξ. 6), εκεί δηλαδή όπου το $1/20$ του φωτός που ξεκινά από το έδαφος φθάνει σε έναν παρατηρητή σε ύψος VOR [ICAO (2005)].

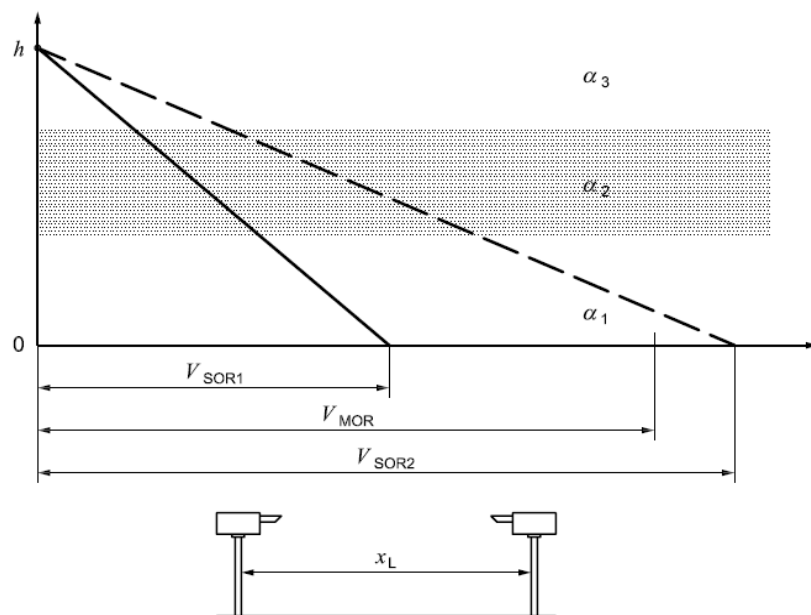
Αντίστοιχα, εάν υποθέσουμε ότι ο παρατηρητής βρίσκεται σε ύψος h πάνω από ένα ορισμένο οριζόντιο επίπεδο, το οποίο μπορεί να είναι ένας διάδρομος ή,

γενικότερα το έδαφος, τότε η κεκλιμένη / πλάγια οπτική εμβέλεια (V_{SOR}) είναι η μέγιστη οριζόντια απόσταση από το σημείο ακριβώς κάτω από τον παρατηρητή στο επίπεδο του εδάφους, έως το σημείο σε ένα άλλο σημείο του εδάφους που μπορεί να δει από τη θέση του στο ύψος h [ICAO (2005)]. Με βάση το Πυθαγόρειο θεώρημα (βλ. Σχήμα 1.4), μπορούμε να πάρουμε:

$$V_{SOR} = h \left[\left(\frac{3}{\int_0^h a(\lambda, r) dr} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Η κεκλιμένη οπτική εμβέλεια λαμβάνεται ως η προβολή μιας κεκλιμένης γραμμής επάνω από το οριζόντιο επίπεδο. Σαφώς, η V_{SOR} εξαρτάται από το ύψος h και στις περισσότερες περιπτώσεις η V_{SOR} μειώνεται όσο αυξάνεται το ύψος.

Κατά την διάρκεια της ημέρας, εκτός εάν τα φώτα διαδρόμου είναι πολύ φωτεινά, η $RVR = MOR$ και αντίστοιχα, αν δεν υπάρχουν φωτεινές πηγές κατά την προσγείωση, τότε, $SVR = SOR$ σε συνθήκες φυσικού φωτός [ICAO (2005)].



Σχήμα 1.4: (Επάνω) V_{SOR} και V_{MOR} κατά την φάση της προσέγγισης για προσγείωση, μέσα από ατμοσφαιρικά στρώματα διαφορετικών συντελεστών εξασθένησης. (Κάτω) Διαπερατόμετρο που μετρά την V_{MOR} , θεωρώντας ομοιογενή ατμόσφαιρα, η οποία είναι μεγαλύτερη από την απόσταση x_L μεταξύ πομπού και δέκτη [ISO (2011)].

Ακολούθως, στο Σχήμα 1.4 – επάνω, παρουσιάζονται οι μεταβλητές V_{SOR} και

V_{MOR} κατά την φάση της προσέγγισης αεροσκάφους για προσγείωση, μέσα από ατμοσφαιρικά στρώματα διαφορετικών συντελεστών εξασθένησης α_i ($i=1,2,3\dots$), ενώ κάτω (Σχήμα 1.4 - κάτω), παρουσιάζεται η διάταξη ενός διαπερατόμετρου (transmissometer) που μετρά τη V_{MOR} , θεωρώντας ομοιογενή ατμόσφαιρα, η οποία είναι μεγαλύτερη από την απόσταση x_L μεταξύ πομπού και δέκτη [ISO (2011)].

1.3.2 Ορατότητα και Ομίχλη

Η ορατότητα, είναι στενά συνδεδεμένη και με την ομίχλη με ανταγωνιστικό ρόλο. Οι δύο αυτές έννοιες, εξαρτώνται από δύο βασικές παραμέτρους: την πυκνότητα των υδρατμών (Liquid Water Concentration - LWC) μετρούμενη σε gr/m^3 και την αριθμητική πυκνότητα των σταγόνων των υδρατμών αυτών (Number Density - ND), δηλαδή, τον αριθμό αυτών ανά μονάδα όγκου [ICAO (2005)].

Όσο αυξάνει ο αριθμός ND ή το LWC, τόσο αυξάνεται η ένταση της ομίχλης και επομένως, μειώνεται και η ορατότητα. Οι έρευνες δείχνουν ότι αυξάνοντας τον αριθμό ND, αυξάνεται και το LWC [Gulterpe et. al. (2006), ICAO (2005)]. Η ικανή απόκριση ορατότητας με ομίχλη, είναι 2-5% κατ'ελάχιστο, της έντασης φωτός ενός αντικειμένου σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο, στην απόσταση του παρατηρητή. Η ανθρώπινη ορατότητα ορίζεται κυρίως στα 515 nm (τη νύχτα) και 555 nm (την ημέρα) για μονοχρωματική ακτινοβολία [ICAO (2005)]. Ακολούθως, παρουσιάζονται μερικοί βασικοί ορισμοί:

Ομίχλη: Μείωση της ορατότητας που προκαλείται από υδροσταγονίδια σε μετεωρολογική οπτική περιοχή $V_{MOR} < 1$ km και σχετική υγρασία $\sim 100\%$ [David et al. (2015)].

Πυκνή Ομίχλη: Μείωση της ορατότητας που προκαλείται από υδροσταγονίδια (υγρής ή στερεάς μορφής) με σχετική υγρασία $\geq 80\%$ ή διαφορά σημείου δρόσου $\leq 3^\circ$ K για μετεωρολογική οπτική περιοχή $V_{MOR} \geq 1$ km. (Ο ορισμός του ανώτατου ορίου των 5 km δίδεται από ICAO [ICAO (2005)]).

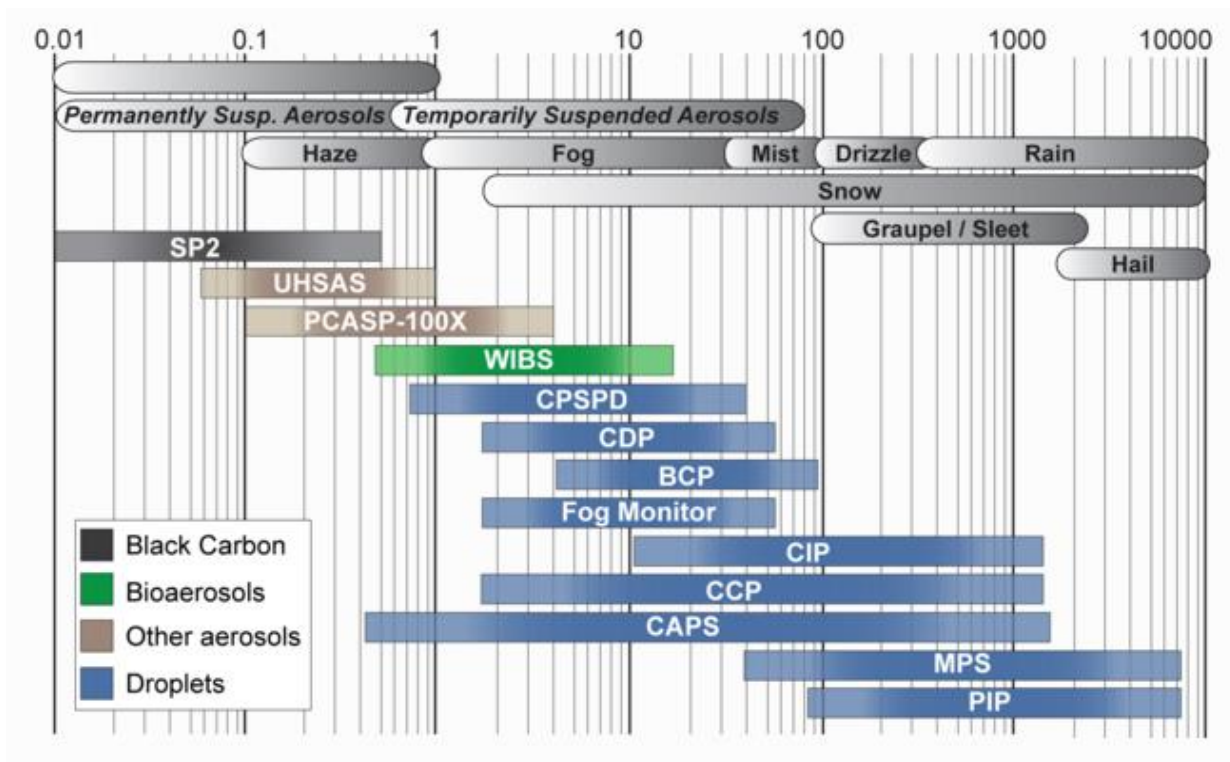
Λεπτή Ομίχλη: Μείωση της ορατότητας που προκαλείται από ξηρά αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα) με σχετική υγρασία $< 80\%$ ή διαφορά σημείου δρόσου $> 3^\circ$ K για μετεωρολογική οπτική περιοχή $V_{MOR} \geq 1$ km. (Ο ορισμός του ανώτατου ορίου των 5 km δίδεται από ICAO [ICAO (2005)]).

Σημείο Δρόσου: Το σημείο δρόσου (θερμοκρασία σημείου δρόσου ή σημείο

δρόσου) είναι η θερμοκρασία στην οποία εμφανίζεται η έναρξη δημιουργίας υδρατμών στην ατμόσφαιρα και αποτελεί, ένα μέτρο της ατμοσφαιρικής υγρασίας, δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία εάν ψυχθεί ο ατμοσφαιρικός αέρας (υπό σταθερή πίεση και περιεκτικότητα σε υγρασία) θα επέλθει κορεσμός της ατμοσφαιρικής αυτής μάζας.

Σωματίδια στην ατμόσφαιρα: Στην γήινη ατμόσφαιρα παρατηρούνται τα ακόλουθα μεγέθη αιωρούμενων σωματιδίων [Seinfeld and Pandis (1998)] (βλ. Σχήματα 1.5, 1.6):

- πυρήνες Aitken, με διαμέτρους $\sim 0.01 \mu\text{m}$,
- Fine Aerosols, με διαμέτρους $< 2.5 \mu\text{m}$,
- Coarse Aerosols, με διαμέτρους από 2.5 έως 10 μm ,
- ελαφριά ομίχλη – Haze, με διαμέτρους από 0.1 έως 1 μm ,
- ομίχλη, με υδροσταγονίδια με διαμέτρους από 1 έως 50 μm (κυρίως, από 1-25 μm) με αντίστοιχες ορατότητες $< 1 \text{ km}$,
- παγωμένοι υδρατμοί – παγωμένη ομίχλη (Ice Fog), με διαμέτρους 20 έως 100 μm ,
- σταγονίδια βροχής – υδρατμοί, με διαμέτρους 10^2 έως $10^4 \mu\text{m}$,
- χιόνι, με μεγέθη διαμέτρου από περίπου 1 έως $10^4 \mu\text{m}$,
- ερημική άμμος, σωματίδια από καύση βιομάζας, ηφαιστειακή τέφρα, μαύρος-καστανός άνθρακας με μεγέθη από 0.05 έως 6 mm ,
- χαλάζι, με διαμέτρους $\sim 1 \text{ cm}$.

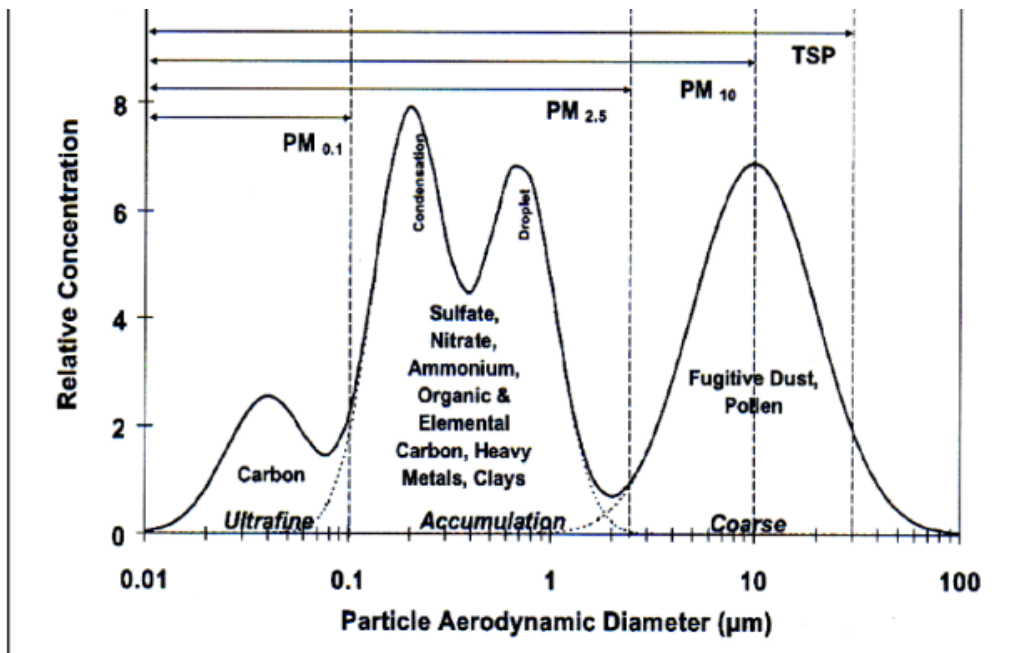


Σχήμα 1.5: Απεικόνιση μεγέθους σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.
<http://www.dropletmeasurement.com/products>

Αντίστοιχα, τα κυριότερα σωματίδια που κυριαρχούν στα αεροδρόμια όπου θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένα 3-διάστατο (3D) σύστημα lidar στο πλαίσιο Ασφάλειας Πτήσεων και Εδάφους αλλά και για Μετεωρολογικούς σκοπούς, είναι <http://www.dropletmeasurement.com/products>:

- CO₂ ($n_R = 1.1120$ | 0.770 g/mL at 0°C, 1.977 g/L at 1 Atm)
- CO ($n_R = 1.0003364$ | 1.25 Kg/m³ at 0°C, 1.145 at 25°C)
- NO_x ($n_R = 1.149$ at 20°C (for NO₂) | 1.88 g/L)
- SO_x (2.6288 g/m³)
- O₃ ($n_R = 1.2226$ σε υγρή φάση, $n_R = 1.00052$ σε αέρια φάση | 2.144 mg/cm³ at 0°C,
- PM_{2.5}
- PM₁₀

όπου, n_R είναι ο δείκτης διάθλασης του ατμοσφαιρικού αέρα.



Σχήμα 1.6: Απεικόνιση μεγέθους σωματιδίων στην χαμηλότερη τροπόσφαιρα [Watson and Chow (1999)].

2.

ΤΕΧΝΙΚΗ LIDAR

2.1 Τεχνικές ενεργούς τηλεπισκόπησης

Η ενεργός τηλεπισκόπηση laser (τεχνική lidar) χρησιμοποιείται για την παρατήρηση από απόσταση (τηλεπισκόπηση) σύμφωνα με τις αρχές και χρήση των LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) και ονομάζεται τεχνική LIDAR από τα αρχικά των Αγγλικών όρων "Light Detection And Ranging". Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου, μοιάζει με αυτή των radar γι' αυτό και είναι περισσότερο γνωστή με την ονομασία "οπτικό radar" που συχνά αποδίδεται στην μέθοδο lidar. Η τεχνική lidar εφαρμόζεται ως εξής: ένας παλμός laser κατάλληλα επιλεγμένου μήκους κύματος εκπέμπεται προς τη μελετούμενη ατμόσφαιρα - στόχο. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία συλλέγεται από ένα τηλεσκόπιο, διαχωρίζεται φασματικά και ακολούθως καταγράφεται από οπτικούς ανιχνευτές.

Το σήμα που συλλέγεται, εμπεριέχει πληροφορίες για τις ιδιότητες του «στόχου», και επιτρέπει την ανάκτηση των φυσικών και οπτικών του ιδιοτήτων, την σύστασή του, την απόστασή του από την πηγή laser καθώς και την χωροταξική κατανομή του. Έτσι, με την μέθοδο lidar επιτυγχάνουμε την παρακολούθηση της διάχυσης διαφόρων αέριων ρύπων και σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Δηλαδή, την χωρική και την χρονική εξέλιξη και τη δυναμική συμπεριφορά ενός ατμοσφαιρικού φαινομένου.

Επίσης, η χρήση της τεχνικής lidar επιτρέπει την ανίχνευση και μέτρηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Τέλος, η χρήση των συστημάτων lidar είναι δυνατή και σε σημεία χωρίς τη δυνατότητα εύκολης πρόσβασης όπως για παράδειγμα σε βραχώδη σημεία με βλάστηση, στην περίπτωση ανίχνευσης αέριων ρύπων ή σωματιδίων πυρκαγιάς. Γενικότερα, επιτυγχάνεται η τρισδιάστατη χωροταξική παρακολούθηση της κατανομής των αερίων ρύπων και μάλιστα με τρόπο, που δεν επιφέρει την διατάραξη του μελετούμενου αέριου δείγματος, το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει σε εσφαλμένες μετρήσεις.

Οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: την παθητική (με χρήση κυρίως της ηλιακής ακτινοβολίας) και την ενεργητική (με χρήση κυρίως της

ακτινοβολίας laser). Κατά την πρώτη μέθοδο, χρησιμοποιείται ως φωτεινή πηγή ο ήλιος, όπου μετράται η απορρόφηση που υφίσταται η ακτινοβολία του όταν διέρχεται από την γήινη ατμόσφαιρα (π.χ. μέτρηση της ολικής στήλης του όζοντος). Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί ως φωτεινή πηγή μια δέσμη laser (τεχνική lidar) που εκπέμπει παλμούς laser σε διάφορα μήκη κύματος. Σκοπός είναι η καταγραφή ατμοσφαιρικών παραμέτρων στην τροπόσφαιρα ή την στρατόσφαιρα, κυρίως των αιωρούμενων σωματιδίων, των υδρατμών, του όζοντος, καθώς και ορισμένων άλλων αερίων ρυπαντών όπως των SO₂, CH₄, CO₂, κλπ. [Robinson et al. (1995), Robinson et al. (1998), Chibaudo and Krawczyk (1992), Nicolae et al. (2009), Gaudio et al. (2015), κλπ.].

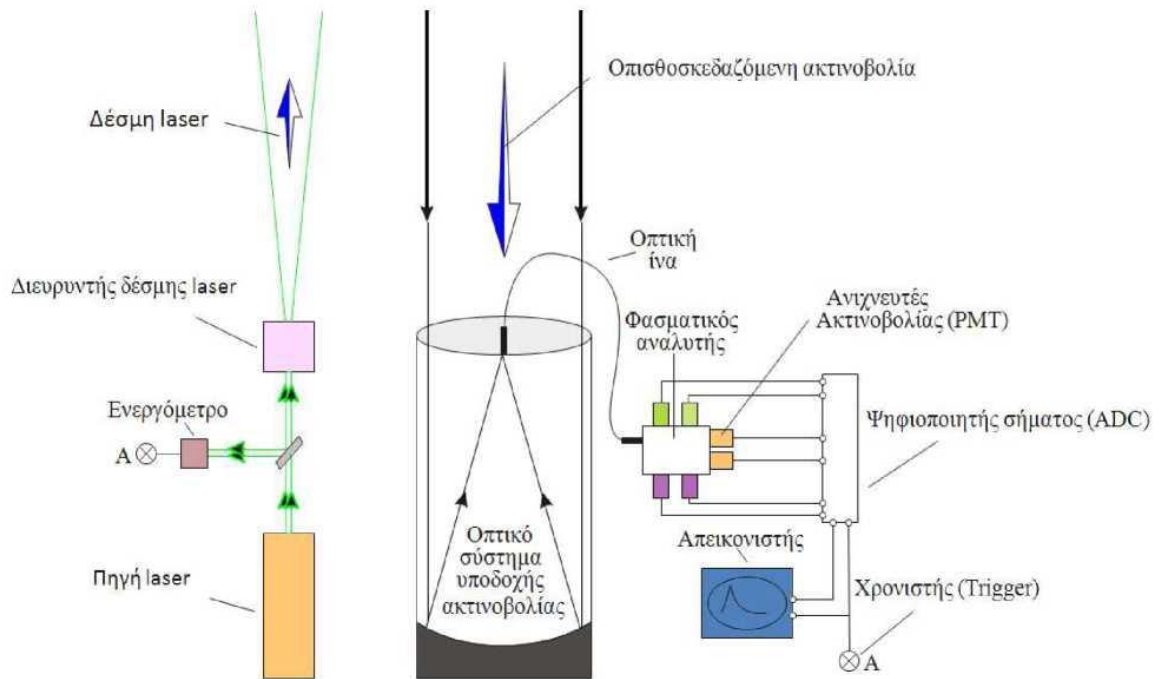
2.2 Τεχνική LIDAR

Η αρχή λειτουργίας των παλμικών laser "radar" είναι η ίδια με αυτή των παλμικών radar ραδιοσυχνοτήτων, δηλαδή βασίζονται στη μέτρηση της χρονικής καθυστέρησης επιστροφής των εκπεμπόμενων, μικρής χρονικής διάρκειας, φωτεινών παλμών, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων. Τα συστήματα CW (Continuous Wave) για τη μέτρηση της απόστασης, βασίζονται στη μέτρηση της καθυστέρησης (χρονικής διαφοράς) μεταξύ εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου διαμορφωμένου σήματος.

Η δομή ενός συστήματος lidar αποτελείται κυρίως από τον πομπό (συσκευή laser) και ένα σύστημα που αποτελεί τον οπτικό δέκτη (τηλεσκόπιο), (Σχήμα 2.1). Παρά τις ομοιότητες των συστημάτων lidar με τα κοινά radar, υπάρχουν και σημαντικές διαφορές στην λειτουργία και την απόδοση των δύο συστημάτων. Για παράδειγμα, συστατικό στοιχείο του φωτός είναι τα φωτόνια (μήκους κύματος ~2.6 x 10⁻¹ έως ~10 μm), ενώ στην περίπτωση των radar τα ονομαζόμενα «ραδιόνια» βρίσκονται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος (> 10³ μm).

Συγκεκριμένα, κατά την σκέδαση του φωτός, ένα τμήμα της εισερχόμενης δέσμης διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις με ένταση που ποικίλλει ανάλογα με τη γωνία του εισερχόμενου φωτός και ένα άλλο τμήμα απορροφάται από το σωματίδιο της ατμόσφαιρας [Kovalev et al. (2004)] το οποίο ποικίλλει αναλόγως των διαστάσεων (βλ. Εξ. 8 παρακάτω) και τη φύσης του σωματιδίου. Η ένταση της σκέδασης σε μια δεδομένη γωνία εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του σκεδαστή (σφαιρικός, πολυεπίπεδος κτλ) και όμοια, η ένταση της απορρόφησης φωτός εξαρτάται από το είδος του σωματιδίου ή του ορίου, όπως είναι τα σωματίδια που περιέχουν άνθρακα, οι υδρατμοί ή το όζον. Σε αντίθεση με το φαινόμενο της σκέδασης του φωτός (βλ. σκεδάση Mie, ή Reyleigh παρακάτω) η διαδικασία απορρόφησης έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια του αερίου ή σωματιδιακού απορροφητές (βλ. σκέδαση Raman παρακάτω). Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά σκέδασης και απορρόφησης του φωτός, καθιστούν τα συστήματα lidar τα ιδανικά εργαλεία στην ανίχνευση αιωρούμενων μικρο-σωματιδίων ή / και μορίων, της ατμόσφαιρας.

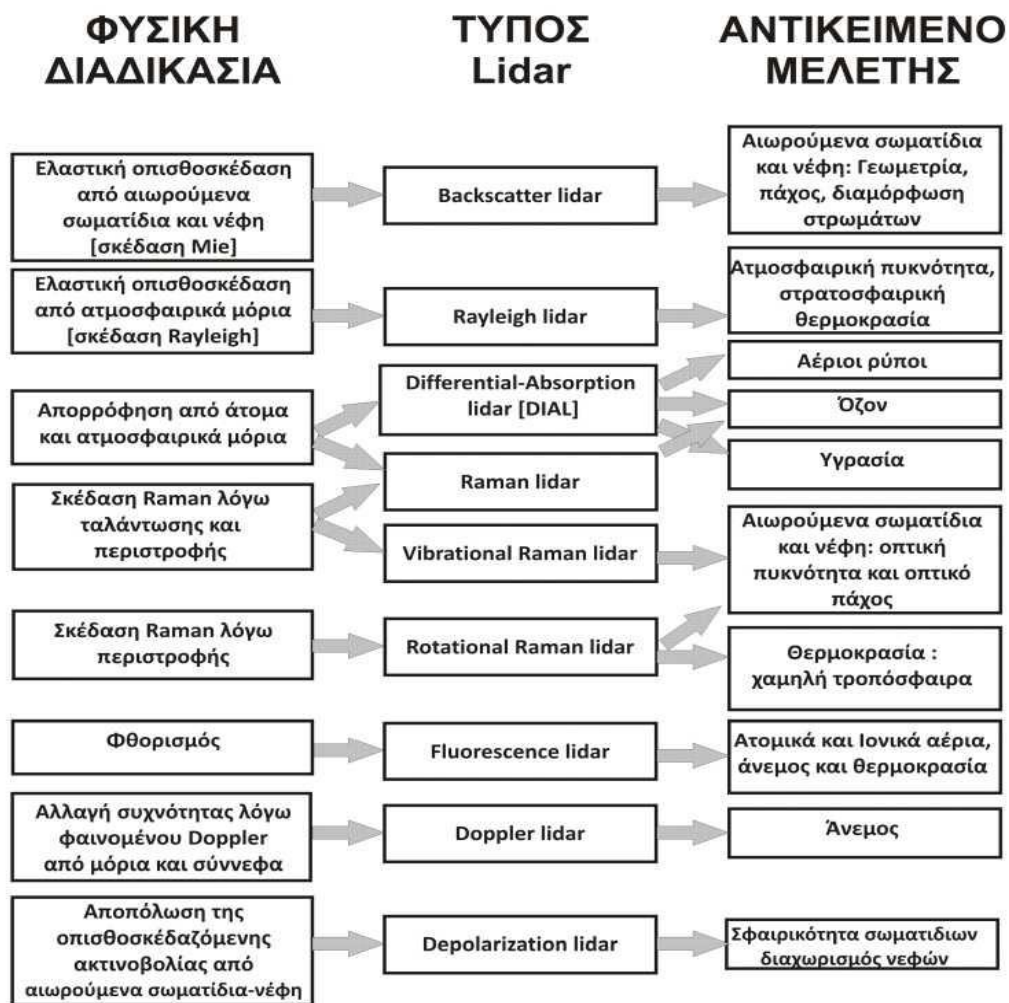
Γενικά τα συστήματα lidar, μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες σύμφωνα με τον τρόπο ανίχνευσης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας: Τα μη συμφασικά (incoherent) και τα συμφασικά (coherent). Στην πρώτη περίπτωση γίνεται απευθείας καταγραφή της ενέργειας των επιστροφών, όπως η περίπτωση καταμέτρησης φωτονίων (photon counting). Αυτός ο τρόπος ανίχνευσης χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο για ανίχνευση μικρού αριθμού φωτονίων, δηλαδή σε πολύ ασθενή σήματα lidar και στον δέκτη τα παραγόμενα φωτοηλεκτρόνια είναι διακριτά χρονικά και ανιχνεύσιμα ένα προς ένα. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση, η οποία ονομάζεται αναλογική μέθοδος και είναι αποτελεσματικότερη στις περιπτώσεις ανίχνευσης μεγάλου αριθμού φωτονίων και ισχυρά σήματα lidar, γίνεται διαφορετική επεξεργασία. Για την ανίχνευση των σημάτων lidar γενικότερα χρησιμοποιούνται φωτοπολλαπλασιαστές και φωτοδίοδοι χιονοστοιβάδας, ανάλογα με το ανιχνεύσιμο μήκος κύματος [Weitkamp (2005)].



Σχήμα 2.1: Η αρχή της μεθόδου lidar μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων. Η εφαρμογή βασίζεται στην αλληλεπίδραση ακτινοβολίας laser με τον στόχο και την οπισθοσκέδασή της. Η ανίχνευση και επεξεργασία των επιστρεφόμενων παλμών γίνεται από την μονάδα επεξεργασίας του συστήματος [Μαμούρη (2009)].

2.3 Ατμοσφαιρική σκέδαση

Στην αλληλεπίδραση ακτινοβολίας και ύλης επικρατούν δύο κύρια είδη σκέδασης, η ελαστική και η μη ελαστική (ανελαστική). Στην πρώτη περίπτωση το μήκος κύματος της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας παραμένει το ίδιο κατά την οπισθοσκέδαση της δέσμης προς τον δέκτη, ενώ, στην δεύτερη περίπτωση (περίπτωση ατμοσφαιρικών μορίων), το ανιχνευόμενο μήκος κύματος αλλάζει λόγω μοριακών μεταπτώσεων .



Πίνακας 2.1: Είδη σκεδάσεων στην ατμόσφαιρα και τύπου lidar που χρησιμοποιείται αναλόγως επιθυμητών παραμέτρων μέτρησης προς μελέτη [Measures (1984), Weitkamp (2005)].

Στην παρούσα Διδακτορική εργασία γίνεται χρήση, κυρίως της ελαστικής

σκέδασης Mie αλλά τα αποτελέσματα αυτής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κατά την ανελαστική σκέδαση Raman, όπως και κατά την μοριακή ελαστική σκέδαση Rayleigh. Κατά τη σκέδαση Mie, το μέγεθος του σκεδάζοντος σωματιδίου είναι γενικά μεγαλύτερο από το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας laser και παίζει ρόλο στην χωρική σκέδαση της ακτινοβολίας laser στην ατμόσφαιρα, όπως άλλωστε και οι οπτικές ιδιότητες των σκεδαζόντων ή / και απορροφούντων σωματιδίων που σχετίζονται με τον δείκτη διάθλασής τους:

$$m=n+ik \quad (8)$$

όπου, m , ο δείκτης διάθλασης (δ.δ.) του σκεδαστή που είναι συνάρτηση του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, n , είναι το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης και είναι συνάρτηση της ταχύτητας του φωτός στο μέσο διάδοσης της ακτινοβολίας και k , είναι το φανταστικό μέρος του δ.δ. και αντιπροσωπεύει την απορροφητικότητα του σωματιδίου στο συγκεκριμένο μήκος κύματος προσπίπτουσας ακτινοβολίας).

Παρακάτω ορίζεται και η παράμετρος μεγέθους α (size parameter) του σκεδάζοντος αερολύματος που σχετίζεται με την ακτίνα του r (και τη διάμετρο D_p) καθώς και το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

$$\alpha \equiv 2\pi r / \lambda = \pi D_p / \lambda \quad (9)$$

Η θεωρία έδειξε ασυμμετρία μεταξύ εμπρόσθιας σκέδασης (forward scattering) και οπισθοσκέδασης (backscattering) κατά την Mie σκέδαση (Σχήμα 2.2), όπου, για σωματίδια με διάμετρο $D_p > \lambda$, $\alpha > 1$, υπερτερεί η εμπρόσθια σκέδαση. Η σκέδαση Mie ($\alpha \sim 1$) ισχύει για σφαιρικούς και μη-σφαιρικούς σκεδαστές (Σχήμα 2.2) [van de Hulst (1981), Bohren and Huffman (1981), Mischenko et al. (1999)].



Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση της σκέδασης Rayleigh και της σκέδασης Mie [Παπαγιαννης (2005, 2013-14)].

Το σύνολο των σκεδάσεων στην ατμόσφαιρα αλλά και το είδος του συστήματος lidar που χρησιμοποιείται αναλόγως επιθυμητών παραμέτρων μέτρησης προς μελέτη, παρουσιάζεται στον παραπάνω Πίνακα 2.1.

2.4 Εξίσωση LIDAR

Κατά την ελαστική σκέδαση Mie η εξίσωση του συστήματος lidar, δίνεται από τον παρακάτω τύπο και είναι:

$$P(\lambda, R) = P_{OL} \cdot \frac{A_0}{R^2} \cdot \beta(\lambda, R) \cdot \eta(\lambda) \cdot \xi(R) \cdot \Delta R \cdot \exp^{-2 \int_0^R [\alpha_{aer}(\lambda, r) + a_{Ray}(\lambda, r)] dr} \quad (10)$$

όπου, $P(R, \lambda)$ είναι η ισχύς λήψης, P_{OL} η ισχύς του εκπεμπόμενου παλμού, A_0 η διάμετρος του τηλεπισκοπίου λήψης, ΔR είναι η χωρική διακριτική ικανότητα της μέτρησης συστήματος lidar, $\eta(\lambda)$ είναι ο συντελεστής οπτο-ηλεκτρονικής απόδοσης του συστήματος lidar και $\xi(R)$ ο γεωμετρικός συντελεστής επικάλυψης της δέσμης laser και του οπτικού άξονα του τηλεσκοπίου σε απόσταση R . Ο τελευταίος εκφράζει την πιθανότητα το πεδίο της εκπεμπόμενης δέσμης laser να βρίσκεται εντός του οπτικού πεδίου FOV – Field Of View) του συλλέγοντος τηλεσκοπίου των σημάτων lidar που προέρχονται από απόσταση R και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1.

Ο Klett [Klett (1981, 1985)] έλυσε την Εξ. 10 με σκοπό να υπολογισθεί ο συντελεστής εξασθένησης $\alpha_{aer}(R)$ και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης $\beta_{aer}(R)$, οι οποίοι προέρχονται από την σκέδαση της δέσμης laser από τα αιωρούμενα σωματίδια:

$$\alpha_{aer}(\lambda, R) = \frac{\exp[S(R) - S(R_F)]}{\frac{1}{\alpha(\lambda, R_F)} + 2 \int_R^{R_F} \exp[S(R') - S(R_F)] dR'} - a_{Ray}(\lambda, R) \quad (11)$$

και:

$$\beta_{aer}(\lambda, R) = \frac{\exp[S'(R) - S'(R_F)]}{\frac{1}{\beta(\lambda, R_F)} + 2 \int_R^{R_F} \frac{1}{C(R')} \exp[S'(R') - S'(R_F)] dR'} - \beta_{Ray}(\lambda, R) \quad (12)$$

όπου:

$$S'(R) - S'(R_F) = S(R) - S(R_F) - \frac{16\pi}{3} \int_R^{R_F} \beta_{Ray} \left(1 - \frac{3}{8\pi \cdot C(R')}\right) dR' \quad (13)$$

Και
$$S(R) \equiv \ln[P'(\lambda, R) \cdot R^2] = \ln(RCLS) \quad (14)$$

Όπου, RCLS (Range-squared Corrected Lidar Signal), είναι το διορθωμένο σήμα lidar από την απόσταση και τα διάφορα είδη θορύβου (ηλεκτρονικός θόρυβος και ατμοσφαιρικό υπόβαθρο), R_F , είναι το ενδεικτικό ύψος αναφοράς μοριακής ατμόσφαιρας και $P'(\lambda, R)$, είναι η ισχύς σήματος λαμβανόμενη μετά από την αφαίρεση ατμοσφαιρικού και ηλεκτρονικού θορύβου (BG) :

$$P'(\lambda, R) = P(\lambda, R) - BG \quad (15)$$

Η εξίσωση lidar μπορεί να γραφεί και ως ακολούθως:

$$N(\lambda, z) = N_e(\lambda) \cdot \left(\frac{c\tau}{2}\right) \cdot \beta(\lambda, z) \cdot A \cdot \eta(\lambda) \cdot \xi(\lambda) \cdot \xi(z) \cdot z^{-2} \cdot \exp[-2\tau(\lambda, 0, z)] \quad (16)$$

όπου, $N(\lambda, z)$, είναι ο αριθμός των ανιχνευόμενων φωτονίων στο μήκος κύματος λ και από απόσταση z , $N_e(\lambda)$, είναι ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων στο μήκος κύματος λ , A , η επιφάνεια λήψης του οπτικού τηλεσκοπίου, $\eta(\lambda)$, είναι ο συντελεστής οπτο-ηλεκτρονικής απόδοσης του συστήματος lidar, c , η ταχύτητα του φωτός στο κενό, τ , η διάρκεια παλμού του συστήματος laser, $\xi(\lambda)$, ο συντελεστής ανακλαστικότητας του οπτικού τηλεσκοπίου, $\xi(z)$, ο γεωμετρικός συντελεστής επικάλυψης της δέσμης laser και του οπτικού άξονα του τηλεσκοπίου στην απόσταση z , $\beta(\lambda, z)$, ο συντελεστής οπισθοσκέδασης της ατμόσφαιρας και $\tau(\lambda, 0, z)$, το οπτικό πάχος της ατμόσφαιρας από τα αιωρούμενα σωματίδια (aer) (Aerosol Optical Depth – AOD), τα μόρια (mol) ή άλλα συστατικά (c) της ατμόσφαιρας.

Παράλληλα, ισχύει ότι:

$$\beta(\lambda, z) = \beta_{aer}(\lambda, z) + \beta_{mol}(\lambda, z) \quad (17)$$

και:

$$\tau(\lambda, 0, z) = \int_0^z [a_{mol}(\lambda, z') + a_{aer}(\lambda, z') + a_c(\lambda, z')] dz' \quad (18)$$

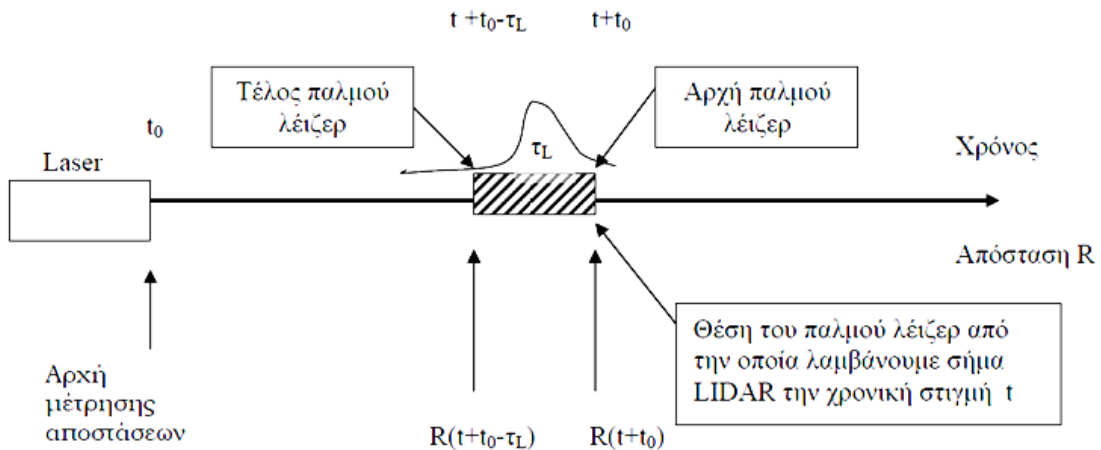
το οποίο, είναι το οπτικό πάχος για το στρώμα μεταξύ π.χ. των υψομέτρων z και z' . Η γνώση του οπτικού πάχους είναι απαραίτητη ώστε να γνωρίζουμε το πόσο εξασθένησε η δέσμη laser διαπερνώντας ένα συγκεκριμένο πάχος της μελετούμενης ατμόσφαιρας. Επίσης ισχύει ότι:

$$\Delta z = (c \cdot \tau / 2) \quad (19)$$

που αναφέρεται στην χωρική ακρίβεια μέτρησης του συστήματος lidar. Η τελευταία βέβαια εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως από την διάρκεια του παλμού εκπομπής laser, την συχνότητα δειγματοληψίας σήματος lidar κατά την λήψη και από τον χρόνο ζωής της διηγευμένης κατάστασης του ατμοσφαιρικού σωματιδίου - σκεδαστή κατά την σκέδαση.

Έτσι η Εξ. (19) λαμβάνει την παρακάτω μορφή (Εξ. 20), όπου, τ_L , είναι η χρονική διάρκεια του παλμού, t_0 , η χρονική στιγμή εκπομπής του παλμού και t , η χρονική στιγμή λήψης του τελευταίου (Σχήμα 2.3):

$$\Delta R = R(t+t_0-\tau_L) - R(t+t_0) = c(\tau_L)/2 \quad (20)$$



Σχήμα 2.3: Διάδοση παλμού laser στην ατμόσφαιρα [Παπαγιαννης (2019)].

2.5 Σκέδαση Rayleigh

Η ελαστική σκέδαση του φωτός από τα μόρια της ατμόσφαιρας ονομάζεται σκέδαση Rayleigh. Η τελευταία, χρησιμοποιείται κυρίως από τις σκεδάσεις στην ατμόσφαιρα του αζώτου και του οξυγόνου, καθώς αποτελούν το 99% αυτής. Στην περίπτωση αυτή, τα σκεδάζοντα σωματίδια (μόρια) της ατμόσφαιρας έχουν διάμετρο μικρότερη από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ($\alpha \ll 1$) πχ. για το ορατό φως έχουμε σωματίδια διαμέτρου $\leq 0.1 \mu\text{m}$). Οι βασικές αρχές της περιγράφηκαν

από τον λόρδο Rayleigh το 1871. Αυτός ο τύπος σκέδασης μπορεί να προκληθεί από κάθε άτομο ή μόριο. Η γωνιακή κατανομή της σκέδασης από μεγαλύτερα σωματίδια (μόρια) σχετίζεται με το μέγεθός τους και η έντασή της με την συγκέντρωση των σωματιδίων σε ένα μέσο (πχ. αέριο ή υγρό).

Η διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης $d\sigma_R / d\Omega$ (differential scattering cross section) Rayleigh για μονοχρωματικό πολωμένο φως και για οπτικά ισοτροπικά μόρια [Measures, (1984)] δίνεται από τη σχέση (Εξ. 21).

$$\frac{d\sigma_R}{d\Omega} = \left[\frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \right] [\cos^2 \varphi \cos^2 \theta + \sin^2 \varphi] \quad (21)$$

όπου, n , είναι το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας, N , η αριθμητική πυκνότητα (σε $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$) των μορίων της ατμόσφαιρας και θ, φ οι γωνίες (σε σφαιρικές συντεταγμένες) που σχηματίζουν η προσπίπτουσα και η σκεδαζόμενη πολωμένη ακτινοβολία μήκους κύματος λ (σε cm) (Σχήμα 2.4). Η ολική διατομή σκέδασης Rayleigh $\sigma_R(\lambda)$ (σε cm^2) υπολογίζεται ολοκληρώνοντας τη σχέση σε μια στερεά γωνία 4π (Εξ. 22):

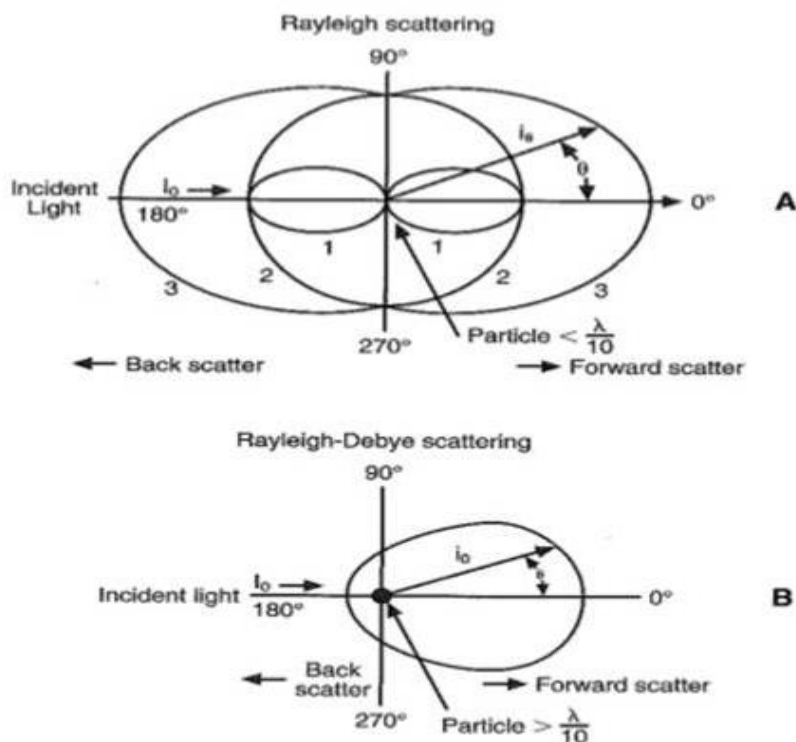
$$\sigma_R = \left(\frac{8\pi}{3} \right) \left[\frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \right] \quad (22)$$

Στην περίπτωση όπου $\theta = \pi$ (οπισθοσκέδαση) η παραπάνω εξίσωση 22 παίρνει την μορφή της Εξίσωσης 23 που δίνει την ολική διατομή της οπισθοσκέδασης Rayleigh:

$$\sigma_{\pi}^R = \frac{d\sigma_R(\theta = \pi)}{d\Omega} = \left[\frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \right] \quad (23)$$

ο συντελεστής οπισθοσκέδασης από τα μόρια της ατμόσφαιρας $\beta_{\pi}^R(\lambda)$, ο οποίος παίζει καθοριστικό ρόλο στην μελέτη της ατμόσφαιρας δίνεται από τη σχέση (Εξ. 24):

$$\beta_{\pi}^R(\lambda) = N \sigma_{\pi}^R(\lambda) = \left[\frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{N \lambda^4} \right] \quad (24)$$



Σχήμα 2.4: Σκέδαση Rayleigh και γωνιακή εξάρτηση για πολωμένη και μη πολωμένη δέσμη φωτός επί μορίων (επάνω - A) και για μη-πολωμένη δέσμη φωτός για μεγαλύτερα αιωρούμενα σωματίδια (κάτω - B) [<https://www.slideshare.net/brunobasil/nephlerometry-and-turbidimetry>].

Τα μόρια μπορεί να θεωρηθούν ότι αποτελούνται από μια συμμετρική κατανομή του ηλεκτρονικού νέφους γύρω από τον πυρήνα. Με βάση την παραπάνω Εξ. (21) φαίνεται όπως είπαμε ότι η σκέδαση από τη μοριακή ατμόσφαιρα (σκέδαση Rayleigh) είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης του λ , έτσι, η ηλιακή ακτινοβολία με μικρότερο μήκος κύματος (πχ. μπλε περιοχή του φάσματος $\lambda = 450 \text{ nm}$) σκεδάζεται εντονότερα απ' ό,τι η ακτινοβολία στην ερυθρά περιοχή του φάσματος ($\lambda = 650 \text{ nm}$), κάτι που εξηγεί και το μπλε χρώμα του καθαρού ουρανού (απαλλαγμένου από αιωρούμενα σωματίδια) [Rayleigh (1909)].

Αφού ολοκληρώσουμε την εξίσωση αυτή σε μια στερεά γωνία 4π (Εξ. 22), ενδεικτικά για το επίπεδο της θάλασσας ($p=1 \text{ atm}$) και για μέση θερμοκρασία $T=23^\circ\text{C}$ (296 K), η ολική ενεργός διατομή σκέδασης Rayleigh σ_R (σε cm^2) γράφεται ως εξής [Weitkamp (2005)]:

$$\sigma_R (cm^2) = (1.18 \times 10^{-8} / N) [550 \text{ nm} / \lambda (nm)]^4 \quad (25)$$

ή αντίστοιχα, ο ολικός συντελεστής σκέδασης Rayleigh (σε cm^{-1}) δίνεται από τη σχέση [Weitkamp, 2005]:

$$N \sigma_R (\text{ολικό}) = 1.18 \times 10^{-8} [550 \text{ nm} / \lambda (nm)]^4 \quad (26)$$

Βέβαια οι παραπάνω σχέσεις έχουν προσεγγιστική ισχύ, δεδομένου ότι ο δείκτης διάθλασης της ατμόσφαιρας παραμένει σταθερός και με το μήκος κύματος στο ορατό τμήμα του φάσματος (με επαγόμενο σφάλμα < 3%) [Παπαγιάννης (2019)]. Στην περίπτωση πολωμένης ακτινοβολίας (πχ. ακτινοβολία laser) η ενεργός διατομή οπισθοσκέδασης (για $\theta = \pi$) Rayleigh (σε $cm^2 \text{ sr}^{-1}$) από τα μόρια της ατμόσφαιρας, προκύπτει από την Εξ. (20) για $\theta = \pi$ και δίνεται προσεγγιστικά στο επίπεδο της θάλασσας από τη σχέση:

$$\sigma(\pi)_R (\text{σε } cm^2 \text{ sr}^{-1}) = d\sigma_R (\theta=\pi) / d\Omega = 5.45 \times 10^{-28} [550 \text{ nm} / \lambda (nm)]^4 \quad (27)$$

και επομένως, ο συντελεστής οπισθοσκέδασης όγκου β_R (volume backscattering coefficient) στο επίπεδο της θάλασσας (σε $T = 296^\circ \text{ K}$) δίνεται (σε $cm^{-1} \text{ sr}^{-1}$) προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$\beta_R = N \sigma(\pi)_R (cm^{-1} \text{ sr}^{-1}) = 1.39 \times 10^{-8} [550 \text{ nm} / \lambda (nm)]^4 \quad (28)$$

όπου, $N=2.55 \times 10^{19} \text{ mol/cm}^3$ [Measures (1984)].

2.6 Σκέδαση Raman

Το 1928 ανακαλύφθηκε από τον Ινδό Φυσικό Raman ένας άλλος τύπος σκέδασης που σχετίζεται με παραγωγή νέων μηκών κύματος, μικρότερα ή μεγαλύτερα από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο μηχανισμός αυτής της μη-ελαστικής σκέδασης Raman, έχει ως αποτέλεσμα την ιδιαίτερα αποτελεσματική εφαρμογή του φαινομένου στην απόκτηση πληροφοριών για την δομή της ύλης από τις μεταπτώσεις δόνησης που αυτή υφίσταται. Η τεχνική είναι γνωστή ως φασματοσκοπία Raman [Ansmann et al. (1992), Weitkamp (2005)].

Στην περίπτωση αυτή η ακτινοβολία laser διεγείρει τα μόρια του “στόχου”, τα οποία στην συνέχεια επιστρέφοντας στην μη-διεγερμένη κατάσταση εκπέμπουν ακτινοβολία σε διαφορετικό μήκος κύματος που αποτελεί χαρακτηριστικό (ταυτότητα) των μορίων του «στόχου». Με αυτό τον τρόπο, η ταυτότητα της δομής της ύλης του «στόχου» έχει μπορεί να ανακτηθεί μέσω της ανάλυσης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser.

Κατά την διάδοση ισχυρής παλμικής ακτινοβολίας laser στην ατμόσφαιρα,

παρατηρείται έντονη αλληλεπίδραση των μορίων αυτής με τα προσπίπτοντα φωτόνια της δέσμης laser και σαν επακόλουθο δημιουργείται, το φαινόμενο της σκέδασης Raman. Δημιουργούνται λοιπόν φασματικές ζώνες σκέδασης και ερμηνεύονται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της εισερχόμενης μονοχρωματικής ακτινοβολίας με τις διεγέρσεις των μορίων (ή του ενδιάμεσου υλικού). Συγκεκριμένα, για το μονοχρωματικό φως της δέσμης laser με συχνότητα ν_0 τα μόρια διεγείρονται και μετατρέπονται σε ταλαντευόμενα δίπολα. Αυτά τα δίπολα εκπέμπουν φως σε διαφορετικές συχνότητες.

Στην μία περίπτωση, ένα μόριο απορροφά ένα φωτόνιο με συχνότητα ν_0 . Το διεγερμένο μόριο επιστρέφει στην βασική του κατάσταση επανεκπέμποντας το φως στην ίδια συχνότητα ν_0 (περίπτωση σκέδασης Rayleigh ενότητα 2.5). Στην άλλη περίπτωση (σκέδασης Raman), το φωτόνιο με συχνότητα ν_0 απορροφάται από το μόριο, το οποίο αρχικά βρισκόταν στη βασική (initial) ενεργειακή κατάσταση, μεταβαίνει σε μια «εικονική» (virtual) διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση και καταλήγει στην τελική μετάπτωση μιας final ενεργειακής κατάστασης ταλάντωσης του μορίου (Σχήμα 2.5). Οι διεγέρσεις αυτές μπορεί να είναι είτε μονοσωματιδιακές κινήσεις (π.χ., κίνηση ελευθέρων ηλεκτρονίων, κινήσεις απομονωμένων ατόμων ή προσμίξεων), είτε συλλογικές (π.χ., πλεγματικές ταλαντώσεις – φωνόνια, ταλαντώσεις πλάσματος – πλάσμονια, ταλαντώσεις μαγνητικών ροπών – μαγνόνια).

Κατά την τελευταία αυτή μετάπτωση, παράγεται εκπομπή φωτονίων Raman, κατά την οποία πραγματοποιείται αλλαγή της ν_0 (αρχικής συχνότητας laser) σε συχνότητες ν^* , οι οποίες ονομάζονται Stokes (ν_S) και anti-Stokes (ν_{AS}) συχνότητες. Κατά συνέπεια, προκύπτει διαφορά ενέργειας μεταξύ της αρχικής (βασικής) κατάστασης του μορίου πριν την σκέδαση και της ενέργειάς του μετά και είναι ίση με $E=h(\nu_0-\nu^*)$. Συγκεκριμένα, κατά την περίπτωση που αρχικά το μόριο βρισκόταν στην αρχική του (βασική) κατάσταση και μετά την σκέδαση καταλήγει σε μια ανώτερη (τελική) διεγερμένη κατάσταση η σκέδαση αυτή ονομάζεται Raman-Stokes και πραγματοποιείται εκπομπή φωτονίου μήκους κύματος $\nu_S > \nu_0$.

Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου, μετά την Raman σκέδαση, το μόριο μεταβαίνει σε μια κατώτερη τελική κατάσταση ($E_T < E_0$) τότε η σκέδαση αυτή ονομάζεται Raman anti-Stokes και πραγματοποιείται η εκπομπή φωτονίου μήκους κύματος $\lambda_{AS} > \lambda_0$ (Σχήμα 2.5). Οι δύο περιπτώσεις κατάληξης λοιπόν μιας Raman σκέδασης, είναι το μόριο να μεταβεί σε μια ανώτερη ($E_T > E_0$) ενεργειακή κατάσταση όπου φαίνεται να «κερδίζει» ενέργεια, ή, σε μια «κατώτερη» τελική ενεργειακή κατάσταση, όπου παρατηρείται το ακριβώς αντίθετο, το μόριο φαίνεται να «χάνει» μέρος της «αρχικής» ενεργειακής του κατάστασης.

Με τον όρο «εικονική» (virtual) διεγερμένη ενεργειακή στάθμη εννοείται εκείνη η στάθμη η οποία αναφέρεται σε ένα ενεργειακό επίπεδο που ενεργειακά είναι χαμηλότερο από ένα επίπεδο που αντιστοιχεί σε μια ηλεκτρονική μετάπτωση. Επίσης η σκέδαση Raman Stokes είναι εντονότερη από την σκέδαση Raman anti-Stokes, γιατί υπάρχουν περισσότερα μόρια στην βασική κατάσταση απ' ό,τι στην διεγερμένη

κατάσταση.

Δηλαδή, η ακτινοβολία laser (συχνότητας ν_0) που προσπίπτει στα ατμοσφαιρικά μόρια προκαλεί έντονη διέγερση των μοριακών αυτών ρυπαντών, κυρίως μέσω διέγερσης των ταλαντωτικών τους επιπέδων. Τα επίπεδα διακρίνονται σε ταλαντωτικά (vibrational) ενεργειακά επίπεδα (vibrational Raman scattering) και σε περιστροφικά (rotational) ενεργειακά επίπεδα (rotational Raman scattering) (Σχήμα 1.5). Επομένως, υπάρχει ένα «φάσμα» μεταβάσεων (ταλαντωτικών και περιστροφικών) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5 όπου βλέπουμε τα ταλαντωτικά (ν) [$\nu=0,1,2,\dots$], αλλά και τα περιστροφικά (J) [$J=0,1,2,\dots$] ενεργειακά επίπεδα στην σκέδαση Raman στην ατμόσφαιρα.

Η σκέδαση Rayleigh είναι περίπου τρεις τάξεις μεγέθους ισχυρότερη από την σκέδαση Raman και η τελευταία είναι τόσο πιο ισχυρή, όσο η συγκέντρωση των σκεδαζόντων μοριακών ρυπαντών (πχ. άζωτο, οξυγόνο, όζον, κλπ.) στην ατμόσφαιρα είναι μεγαλύτερη [Weitkamp (2005)]. Στην σκέδαση Raman υπάρχει μετρήσιμη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ σκεδαζόμενου (προσπίπτοντος) φωτονίου και του μοριακού σκεδαστή και ο χρόνος αυτής της αλληλεπίδρασης μπορεί να λάβει 10^{-14} s.

Η μέθοδος Raman προσφέρει τη δυνατότητα ενός ανεξάρτητου υπολογισμού του συντελεστή εξασθένησης από τον συντελεστή οπισθοσκέδασης, χωρίς την αναγκαιότητα οποιασδήποτε παραδοχής, εξασφαλίζοντας έτσι σημαντικά μικρότερα σφάλματα μέτρησης [Ansmann et al. (1992)]. Το μειονέκτημα της μεθόδου Raman lidar είναι ότι απαιτείται πιο περίπλοκος και ακριβότερος εργαστηριακός εξοπλισμός. Συγκεκριμένα απαιτούνται δύο κανάλια ανίχνευσης σήματος (ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενο και Raman) εν αντιθέσει με το μοναδικό κανάλι που χρειάζεται στην τεχνική ενός Lidar οπισθοσκέδασης.

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τους [Ansmann et. al. (1992)] και το πλεονέκτημά της συγκριτικά με την μέθοδο [Klett (1981, 1985)] είναι ότι πέρα από τον συντελεστή οπισθοσκέδασης επιτρέπει τον υπολογισμό εξασθένησης. Συγκεκριμένα, εκπέμπεται ακτινοβολία laser ενός μήκους κύματος και ανιχνεύεται η ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία στο ίδιο μήκος κύματος, καθώς και η ακτινοβολία Raman που προέρχεται από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας του laser και του μοριακού αζώτου (N_2) της ατμόσφαιρας.

Τα ανελαστικά σήματα Raman, αποτελούν προϊόν της σκέδασης από το μοριακό άζωτο της ατμόσφαιρας και επομένως η ενεργός διατομή οπισθοσκέδασής του είναι αυτή που καθορίζει την ένταση των σημάτων. Στην περίπτωση που θέλουμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή οπισθοσκέδασης για τα αιωρούμενα σωματίδια, χρησιμοποιούμε τα ελαστικά και ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενα σήματα (για αντίστοιχα μήκη κύματος λ_L και λ_{Ra}). Έτσι, αν για παράδειγμα υποθέσουμε τον λόγο

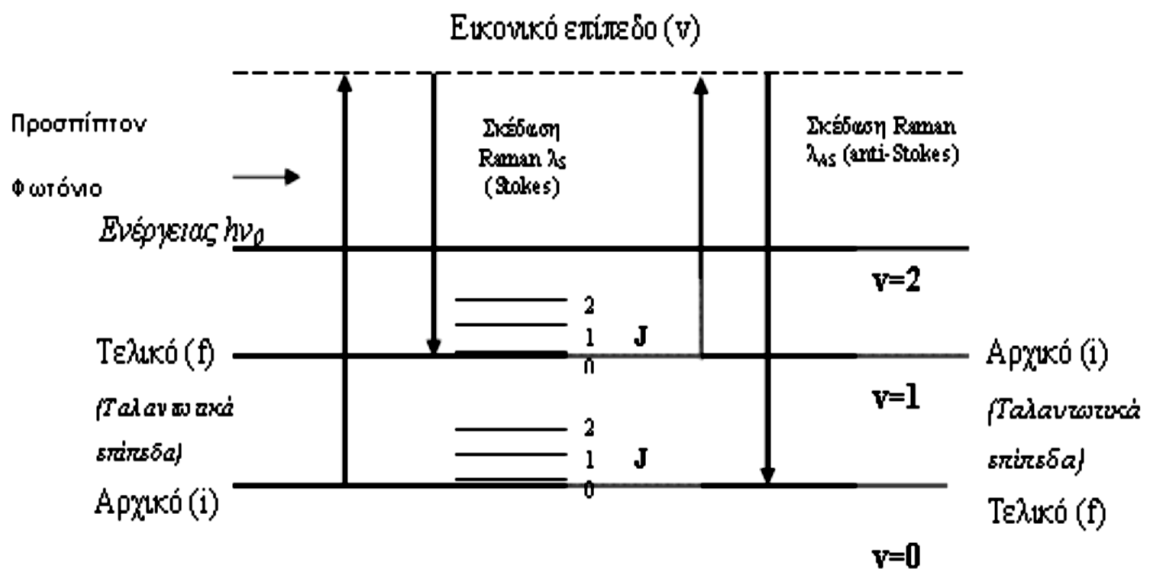
του ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενου σήματος από τα σωματίδια στα 355 nm προς το ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενο σήμα από το άζωτο, στα 387 nm, στηριζόμενοι στις διαφορικές εξισώσεις για lidar οπισθοσκέδασης και Raman για ένα ύψος – κεκλιμένη απόσταση R το ύψος (h) και ένα δεδομένο ύψος αναφοράς R_F , κάποιος είναι σε θέση να υπολογίσει τον συντελεστή οπισθοσκέδασης στο μήκος κύματος εκπομπής (λ_L) [Ansmann et al.(1992)].

Όμως, όπως και στην μέθοδο Klett [Klett (1981, 1985)], είναι αναγκαίο να εκτιμηθεί μία τιμή αναφοράς σχετικά με την οπισθοσκέδαση των σωματιδίων στο ύψος αναφοράς R_F . Για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της αβεβαιότητας στην εκτίμηση της λύσης, συνίσταται η επιλογή του ύψος αναφοράς στην περιοχή της ανώτερης τροπόσφαιρας, όπου η σκέδαση των σωματιδίων μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα συγκριτικά με την σκέδαση Rayleigh.

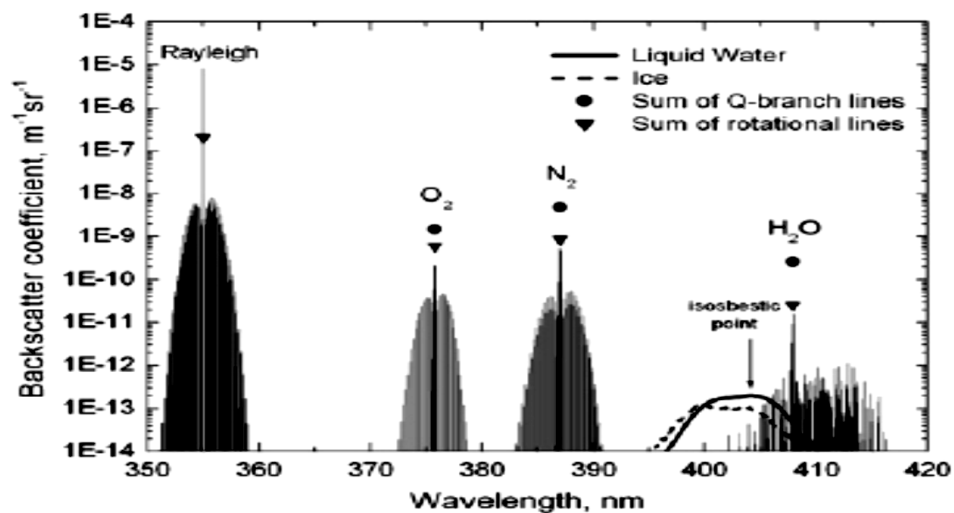
Στην περίπτωση όμως κεκλιμένων – οριζόντιων μετρήσεων με elastic – inelastic Raman lidar, όπου το σήμα lidar αδυνατεί εκ φύσεως να επιτύχει μεγαλύτερα ύψη, η επιλογή του R_F θα οδηγήσει σε λαθεμένες έως και πολύ λαθεμένες εκτιμήσεις. Για τον λόγο αυτό και αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5, η τεχνική 3D Stepping ή LADDER καθώς και / ή ο αλγόριθμος Weather Phenomena ή METCON [Pantazis et al. (2017)], προκειμένου να αποφευχθεί το όποιο λάθος μέτρησης επί κεκλιμένων – οριζόντιων μετρήσεων σε περιπτώσεις επιλογής μέτρησης κατά Klett ή Raman μεθόδου.

Η τεχνική Raman lidar γενικότερα δύναται να δώσει πολύ αξιόπιστη ανάκτηση των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων και της υγρασίας της ατμόσφαιρας [Whiteman et al. (1992), Ansmann et al. (2003), Whiteman et al. (2003), Whiteman et al. (2006)] χρησιμοποιώντας εκπομπή ακτινοβολίας laser στα 355 nm και ανίχνευση στα 355 nm (σκέδαση Rayleigh) και στα 387 nm (σκέδασης Raman από το ατμοσφαιρικό άζωτο και στα 407 nm από τους υδρατμούς [Weikamp (2005)].

Γίνεται κατανοητό ότι η αξιοπιστία και η ακρίβεια στην μέτρηση υδρατμών και ρυπαντών (σωματιδίων και μορίων) της ατμόσφαιρας [Ansmann et al. (1992), Whiteman et al. (2006)], με την μέθοδο Raman σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος lidar μπορεί να αποτελέσουν έναν από τους καλύτερους τρόπους εισαγωγής ακριβέστερων δεδομένων και την επιτυχία της συγκεκριμένης Διδακτορικής Διατριβής. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι η τελευταία, όπως θα αποδειχθεί και παρακάτω, δεν λειτουργεί και με την χρήση δεδομένων από ένα σύστημα ελαστικό lidar, καθώς κατά την μέθοδο Raman lidar η επιστροφή συγκρίνεται και με το ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενο σήμα και άρα στην μέθοδο Raman lidar το τελευταίο (ελαστικό) σήμα κρίνεται απαραίτητο για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.5: Ενεργειακά ταλαντωτικά (v) και περιστροφικά (J) επίπεδα στην σκέδαση Raman στην ατμόσφαιρα [Παπαγιάννης (2019)].



Σχήμα 2.6: Η φασματική κατανομή των ταλαντωτικών-περιστροφικών μεταπτώσεων Raman για τα μόρια του οξυγόνου (O_2), αζώτου (N_2) και υδρατμών (H_2O) σε υγρή και κρυσταλλική μορφή, όταν το μήκος κύματος διέγερσης είναι στα 355 nm [Weitkamp (2005)].

Η συγκέντρωση της κατακόρυφης κατανομής της αναλογίας συγκέντρωσης μάζας και υγρασίας - υδρατμών $m(r)$, σε απόσταση r , από το άζωτο της ατμόσφαιρας S_{N_2} , ατμοσφαιρικό και τους υδρατμούς (S_{H_2O}) δίνεται από την εξίσωση:

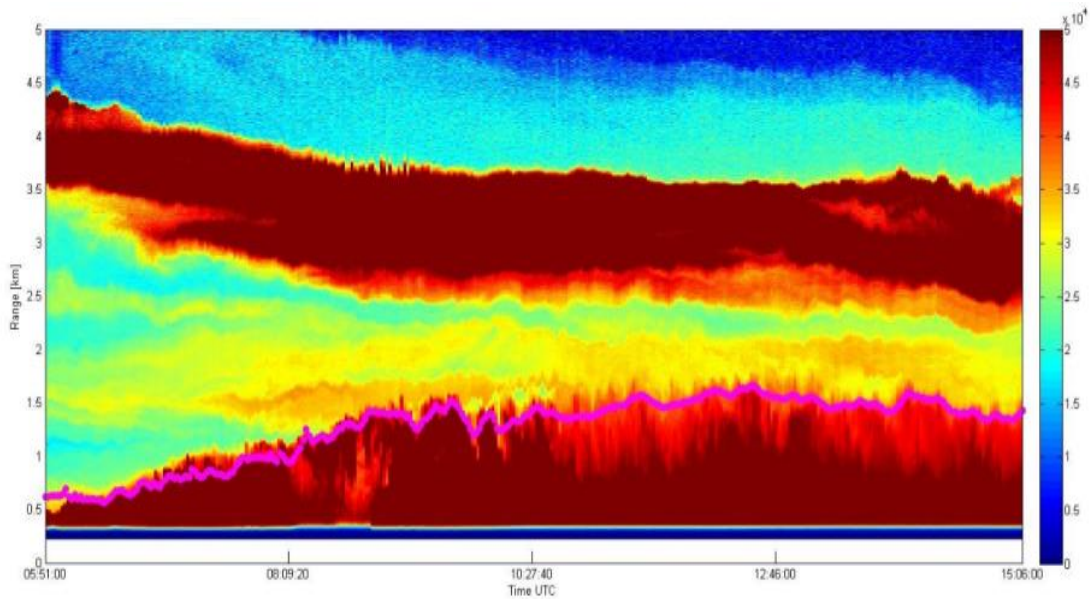
$$m(r) = K_m \frac{S_{H_2O}(r) \exp[-\int_0^r \alpha_{\lambda N_2}(r') dr']}{S_{N_2}(r) \exp[-\int_0^r \alpha_{\lambda H_2O}(r') dr']} \quad (22)$$

όπου δίνονται οι συντελεστές ατμοσφαιρικής εξασθένησης στα μήκη κύματος 387 nm ($\alpha_{\lambda N_2}$) και 407 nm ($\alpha_{\lambda H_2O}$), και η σταθερά βαθμονόμησης του συστήματος Raman lidar (K_m) [Ferrare et al.(1995)] που υπολογίζεται από την ενεργό διατομή της σκέδασης Raman καθώς και από τα οπτοηλεκτρονικά χαρακτηριστικά της συσκευής. Η σταθερά K_m υπολογίζεται κυρίως από την σύγκριση της κατακόρυφης κατανομής της υγρασίας – υδρατμών από το σύστημα Raman lidar και εκείνης που υπολογίζεται από ραδιοβόλση σε περιοχή πλησίον της μέτρησης της lidar συσκευής [Labzonskii et al. (2018), Dai et al. (2018)].

2.7 Ανίχνευση αιωρούμενων σωματιδίων

Η εκπομπή δέσμης laser κατακόρυφα ή σε 3D δίνει την δυνατότητα λήψης οπισθοσκεδάσεων της εκπνεύμενης δέσμης laser ύστερα από μια σειρά σκεδάσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω και πολλαπλών σκεδάσεων στην ατμόσφαιρα. Αναλόγως της επιλογής του μήκους κύματος εκπομπής λαμβανουμε μια σειρά «υπογραφών» των σκεδαστών στην λήψη. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η ανίχνευση διαφόρων «επεισοδίων» - cases που διαδραματίζονται εκείνη την ώρα στην ατμόσφαιρα, όπως η μεταφορά ερημικής σκόνης από περιοχές της Σαχάρας (Σχήμα 2.7), τα βιομηχανικά αέρια απόβλητα, οι δασικές πυρκαγιές, η ηφαιστειακή τέφρα και γενικότερα η ατμοσφαιρική ρύπανση.

Η ακρίβεια στο είδος, τον χρόνο καθώς και την θέση και την ταχύτητα κίνησης του σκεδαστή στη ατμόσφαιρα, όπως θα δούμε και παρακάτω, είναι πολύ αξιόπιστη κάτι που αναδεικνύει τα συστήματα lidar ως το κύριο όργανο παρακολούθησης / μελέτης παραμέτρων της ατμόσφαιρας από απόσταση. Η ανάγκη χρήσης αλγορίθμων επεξεργασίας των ληφθέντων σημάτων κρίνεται απαραίτητη και προτάθηκε από τον Klett, [Klett (1981), (1985)] με σκοπό την ανάκτηση της κατακόρυφης κατανομής του συντελεστή οπισθοσκέδασης (β_{aer}) των αιωρούμενων σωματιδίων.



Σχήμα 2.7: Περίπτωση μεταφοράς ερημικής σκόνης την 26/05/2014 πάνω από την Αθήνα με χρήση δεδομένων του EOLE lidar ΕΜΠ [<http://hygracd.impworks.gr/>].

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου Klett [Klett (1981, 1985)] υπάρχει μια αβεβαιότητα στην ανάκτηση του συντελεστή β_{aer} , η οποία με την χρήση της μέθοδου Raman μπορεί να μειωθεί στο 10-20%. Παράλληλα, η ίδια τεχνική επιτρέπει την ανάκτηση του συντελεστή εξασθένησης των αερολυμάτων (α_{aer}) με ακρίβεια 10-15% [Ansmann (1990)]. Βέβαια, το σήμα λήψης λόγω σκεδάσης Raman είναι αρκετά ασθενές και απαιτείται η εκπομπή ισχυρών παλμών laser, στενών φασματικών φίλτρων συμβολής κατά τη λήψη, οπότε και η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται, κυρίως, για νυχτερινές lidar μετρήσεις [Weitkamp (2005), Müller et al. (2007)].

Η τεχνική High Spectral Resolution lidar (HSRL) που θα παρουσιαστεί παρακάτω (ενότητα 2.10) [Eloranta et al. (2005), Hayman et al. (2016)] μπορεί να μειώσει την παραπάνω αβεβαιότητα σε πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια της τάξεως εντός 3%, οποίος είναι ένας από τους λόγους μελλοντικής επιλογής αυτής της τεχνικής παρόλες τις δύσκολες τεχνικά απαιτήσεις αυτής.

2.8 Τεχνική Doppler lidar

Τα σημερινά συστήματα lidar δύνανται να μετρήσουν την ταχύτητα του ανέμου μέσω του φαινομένου Doppler [Weitkamp (2005), Wulfmeyer et al. (2005), Xia et al. (2007), Nicolae et al. (2009), Pichugina et al. (2012), Shannuan et al. (2017)]. Στην περίπτωση αυτή το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου παλμού του συστήματος lidar

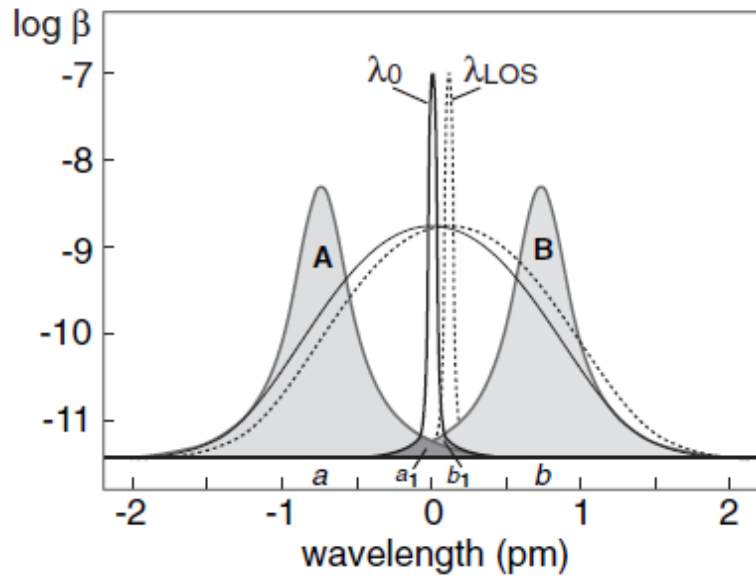
διαφέρουν ελαφρώς από εκείνο του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος lidar όταν ο σκεδαστής (σωματίδια, μόρια) κινείται ως προς τη συσκευή λήψης lidar.

Βάσει της σκέδασης Mie για την ανίχνευση αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα αλλά και των περιορισμών αυτής ($\alpha \sim 1$), επιλέγεται συνήθως συχνότητα ή μήκος κύματος της περιοχής του υπέρυθρου (κοντινού $\sim 1.5 \mu\text{m}$ ή μέσου $\sim 10.5 \mu\text{m}$) αποφεύγοντας έτσι «έντονη» λήψη από τη μοριακή σκέδαση Rayleigh, που κυριαρχεί στην περιοχή του υπεριώδους - ορατού φάσματος. Επίσης, χρησιμοποιούνται παλμοί δέσμης laser με μικρό εύρος φάσματος (της τάξεως των pm) ώστε να γίνει ευκολότερα αντιληπτή η διαφορά συχνότητας από την εκπεμπόμενη κατά την οπισθοσκέδαση της δέσμης στην λήψη λόγω φαινομένου Doppler [Weitkamp (2005), Wulfmeyer et al. (2005), Xia et al. (2007), Nicolae et al. (2009), Pichugina et al. (2012), Shannuan et al. (2017)]. Βέβαια, η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου γίνεται πάντα προς την κατεύθυνση της δέσμης (1D) οπότε κάθε μέτρηση σε 2D ή 3D απαιτεί να εφαρμοστεί σε περισσότερες γωνίες (για 3D απαιτείται γωνία 120°) [Weitkamp (2005), Nicolae et al. (2009)].

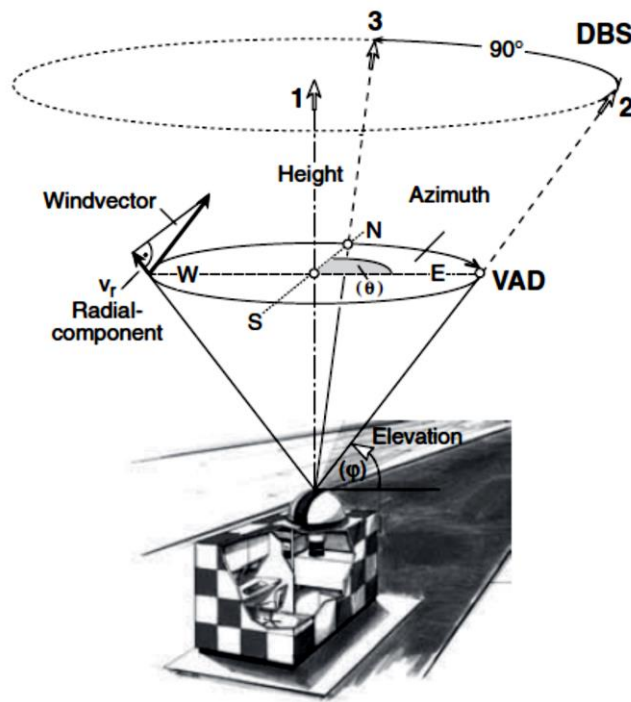
Συγκεκριμένα, το εκπεμπόμενο μήκος κύματος λ_0 ανιχνεύεται μετατοπισμένο στο μήκος κύματος λ_d ως προς το αρχικά εκπεμπόμενο λόγω της κίνησης των αιωρούμενων μορίων της ατμόσφαιρας. Η μετατόπιση αυτή είναι συνήθως της τάξεως των μερικών MHz. Η τεχνική Doppler lidar χωρίζεται στην τεχνική της “άμεσης” ανίχνευσης (direct detection-incoherent detection) και σε εκείνη της “έμμεσης” ανίχνευσης (indirect detection-coherent detection).

Κατά την “άμεση” ανίχνευση καταγράφεται η μετατόπιση του μήκους κύματος εκπομπής με χρήση ειδικών φίλτρων όπως το συμβολόμετρο Fabry-Perot ή Fizeau αλλά και άλλων φίλτρων όπως του ιωδίου, με τα οποία γίνεται δυνατός ο διαχωρισμός των σημάτων λήψης που προέρχονται από το αιωρούμενα σωματίδια και από τα μόρια της ατμόσφαιρας [McGill et al. (1997), Weitkamp (2005), Shannuan et al. (2017)].

Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η χρήση πολύ στενών φασματικών φίλτρων γύρω από το κεντρικό μήκος λ_0 στο οποίο ανιχνεύονται τα αιωρούμενα σωματίδια, ενώ αντίστοιχα στα φίλτρα A και B γίνεται η ανίχνευση των μορίων της ατμόσφαιρας [Weitkamp (2005), Eloranta et al. (2005)].



Σχήμα 2.8: Ανίχνευση φαινομένου Doppler lidar με την τεχνική της άμεσης ανίχνευσης με λ_0 και $\lambda_{LOS} = \lambda_D$ για ανίχνευση των οπτικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ μέσω των φίλτρων A και B γίνεται η ανίχνευση της ταχύτητας των μορίων [Weitkamp (2005)].



Σχήμα 2.9: Απεικόνιση 3D του ανέμου σε διάδρομο από-προσγείωσης αεροδρομίου (Τεχνική VAD) [Weitkamp (2005)].

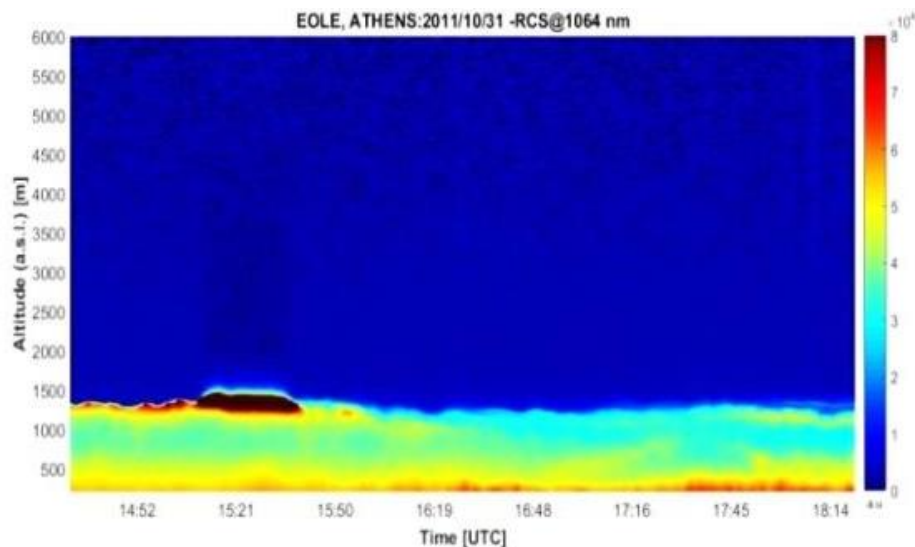
Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η τεχνική Doppler LIDAR κατά την εφαρμογή σε διάδρομο αεροδρομίου, για την 3D απεικόνιση του ανέμου (μέσω κωνικής σάρωσης του ατμοσφαιρικού όγκου), με σκοπό την έγκαιρη ανίχνευση διατμητικού ανεμου (windshear). Παρόμοιες εφαρμογές της τεχνικής αυτής έχουν υλοποιηθεί σε διεθνή αεροδρόμια του εξωτερικού, όπως για παράδειγμα στο Παρίσι, στη Φρανκφούρτη και σε αεροδρόμια των ΗΠΑ.

Αντίστοιχα, η “έμμεση” ανίχνευση γίνεται με την συμμετοχή ενός τοπικού ταλαντωτή (Local Oscillator - LO). Συγκεκριμένα, το ασθενές οπισθοσκεδαζόμενο σήμα ακτινοβολίας, συχνότητας $f_0 + \Delta f$, «προστίθεται» με το σήμα συχνότητας f_{LO} του τοπικού ταλαντωτή με αποτέλεσμα την δημιουργία του τελικό σήματος οπισθοσκεδάσης lidar με συχνότητα $f_{\text{ολ}} = f_{LO} + f_0 + \Delta f$, ώστε να είναι ικανά ισχυρό για να ανιχνευτεί [Weitkamp (2005)].

2.9 Εφαρμογή της τεχνικής lidar στην ανίχνευση νεφών

Είναι γνωστό ότι στην περιοχή του υπέρυθρου η σκέδαση από τα αιωρούμενα σωματίδια / νέφη (σκέδαση Mie [Horvath (2009)]) υπερτερεί της σκέδασης από τα ατμοσφαιρικά μόρια (σκέδαση Rayleigh, [Rayleigh (1909)]) με αποτέλεσμα τα συστήματα lidar που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των νεφών να λειτουργούν αποτελεσματικότερα στην περιοχή του κοντινού - μέσου υπέρυθρου [Shettle and Fenn (1979), Fenn et al. (1985), Papayannis et al. (2017)], παρά στην περιοχή του υπεριώδους ή του ορατού [Measures (1992), Weitkamp (2005)]. Επιπλέον, τα συστήματα lidar που είναι εφοδιασμένα με κανάλια καταγραφής της αποπόλωσης από τα αιωρούμενα σωματίδια και τα νέφη [Freudenthaler et al. (2009)] επιτρέπουν την μέτρηση του λόγου γραμμικής αποπόλωσης των αιωρούμενων σωματιδίων (δ_p) μέσω του υπολογισμού του λόγου της έντασης της συνιστώσας του κάθετα πολωμένου σήματος lidar προς την συνιστώσα του παράλληλα πολωμένου σήματος lidar στην περίπτωση εκπομπής πολωμένης δέσμης laser στην ατμόσφαιρα με τις αναφερόμενες παραπάνω τιμές, ενώ κυμαίνεται χαμηλότερα στην περίπτωση λοιπών αιωρούμενων σωματιδίων.

Οι τιμές του δ_p συνήθως κυμαίνονται από 5-30% για τα αιωρούμενα σωματίδια [Gross et al. (2013), Haarig et al. (2018)]. Στην περίπτωση των νεφών αντιστοίχως, ο λόγος αυτός παίρνει αυξημένες τιμές ($\delta_p = 0.4$ έως 0.8) [Sassen (1991)] και κατά συνέπεια, γίνεται δυνατή η ταυτόχρονη μέτρηση του λόγου δ_p και του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος lidar, με σκοπό την ανίχνευση των νεφών στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 2.10: Σήμα lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) στα 1064 nm όπως καταγράφηκε από το σύστημα EOLE lidar του ΕΜΠ στις 31/10/2011 με εμφανή την παρουσία στρωμάτωσης νέφους μεταξύ 1300 και 1500 m [<http://hygracd.impworks.gr/>, Pantazis et al. (2017)].

Γίνεται κατανοητό λοιπόν ότι ο συνδυασμός καταγραφής του σήματος οπισθοσκέδασης lidar (Σχήμα 2.10) και του λόγου αποπόλωσης μπορεί να μας δώσει μια καλή εκτίμηση της χωρικής ανίχνευσης ενός νέφους. Ειδικότερα, αν το AOD ενός νέφους είναι μικρό (τυπικά < 0.2) [Sassen(1991)] και το σήμα εκπομπής συστήματος lidar είναι ισχυρό σε σχέση με το πάχος του νέφους που συναντά ώστε να το διαπεράσει, γίνεται δυνατή η καταγραφή του γεωμετρικού πάχους του νέφους καθώς και η καταγραφή του ύψους και της βάσης των νεφών γενικότερα.

Το πρόβλημα αυτό, το πότε δηλαδή μία εικόνα από οπισθοσκέδαση lidar αφορά νέφος ή απλά έντονη ομίχλη, αναλύεται και στο Κεφάλαιο 5, κατά την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος οπισθοσκέδασης lidar στο Κεφ. 5 και τον αλγόριθμο Weather Phenomena ή METCON [Pantazis et al. (2017)].

2.10 Μέτρηση θερμοκρασίας με την χρήση της τεχνικής LIDAR

Με χρήση της τεχνικής lidar είναι δυνατή η ανάκτηση της κατακόρυφης κατανομής της θερμοκρασίας στην τροπόσφαιρα με δύο ειδικές τεχνικές:

- i) την High Spectral Resolution lidar (HSRL) και

- ii) την σκέδαση Raman λόγω περιστροφικών μεταπτώσεων (Rotational Raman Lidar - RRL).

Η τεχνική HSRL στηρίζεται στην φασματική κατανομή του σήματος στη λήψη με σκοπό τον διαχωρισμό μοριακής και σωματιδιακής ανίχνευσης. Αυτό γίνεται εφικτό καθώς η θερμική κίνηση των μορίων της ατμόσφαιρας (~ 50-300 m/s) προκαλεί μια διευρυμένη φασματικά κατανομή του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος λόγω του φαινομένου Doppler, σε αντίθεση με την αντίστοιχη φασματική κατανομή που προέρχεται από τα σχεδόν ακίνητα σωματίδια (1-10 m/s). Με τον τρόπο αυτό τα τελευταία παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστα στην φασματική κατανομή λόγω του φαινομένου Doppler των μορίων, κάνοντας δυνατή την ανάκτηση των ιδιοτήτων των σωματιδίων με ελάχιστες υποθέσεις, θέτοντας έτσι την τεχνική αυτή ως μία από τις πλέον αξιόπιστες τεχνικές για την μέτρηση όχι μόνο των συντελεστών β_{aer} και α_{aer} , αλλά και της θερμοκρασίας. Η τεχνική αυτή είναι αρκετά αποδοτική, με αποτέλεσμα τα συστήματα αυτά να λειτουργούν από επίγεια και εναέρια μέσα, σε όλη την διάρκεια της ημέρας [Razenko and Eloranta (2018)].

Μία τέτοια τεχνική έχει φυσικά κάποιες απαιτήσεις σε σχέση με την ικανότητα ανίχνευσης μικρών φασματικών μετατοπίσεων κατά την λήψη και τον διαχωρισμό μορίων και σωματιδίων, αλλά και κατά την εκπομπή, καθώς απαιτείται μια φασματικά στενή εκπομπή δέσμης laser της τάξεως των 150 MHz, αλλά ταυτόχρονα και σταθερή εντός των 20 MHz. Αποτελεί αξιόπιστη τεχνική και υπολογίζεται να είναι η τεχνική επιλογή του μέλλοντος σε σχέση με την τεχνική RRL.

Η τεχνική RRL μπορεί να δώσει αξιόπιστες καταγραφές της θερμοκρασίας από το έδαφος έως τη μέση τροπόσφαιρα [Weitkamp (2005)]. Στηρίζεται στην σκέδαση Raman από περιστροφικές μεταπτώσεις του αζώτου ή του οξυγόνου και καταγράφει τις φασματικές γραμμές κατά την λήψη, σε ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ τους, της τάξεως κάποιων Ångström. Η τεχνική αυτή είναι ικανή να ανιχνεύσει την ύπαρξη λεπτών νεφών ή αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα [Cooney (1972), Behrendt and Reichardt (2000), Behrendt et al. (2002), Alpers et al. (2004), Weitkamp (2005), Zuev et al. (2017)].

Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην ανίχνευση των φασματικών γραμμών laser που εμφανίζονται σε μικρή φασματική απόσταση (~ μερικά Å) λόγω της σκέδασης Raman και των περιστροφικών μεταπτώσεων στο N_2 ή το O_2 κατά την οπισθοσκέδαση. Η ένταση των φασματικών γραμμών που ανιχνεύονται, εξαρτάται από την θερμοκρασία και συγκεκριμένα η ένταση των γραμμών οι οποίες είναι πλησίον στο μήκος κύματος εκπομπής της δέσμης laser μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ αντίστοιχα η ένταση των φασματικών γραμμών οι οποίες

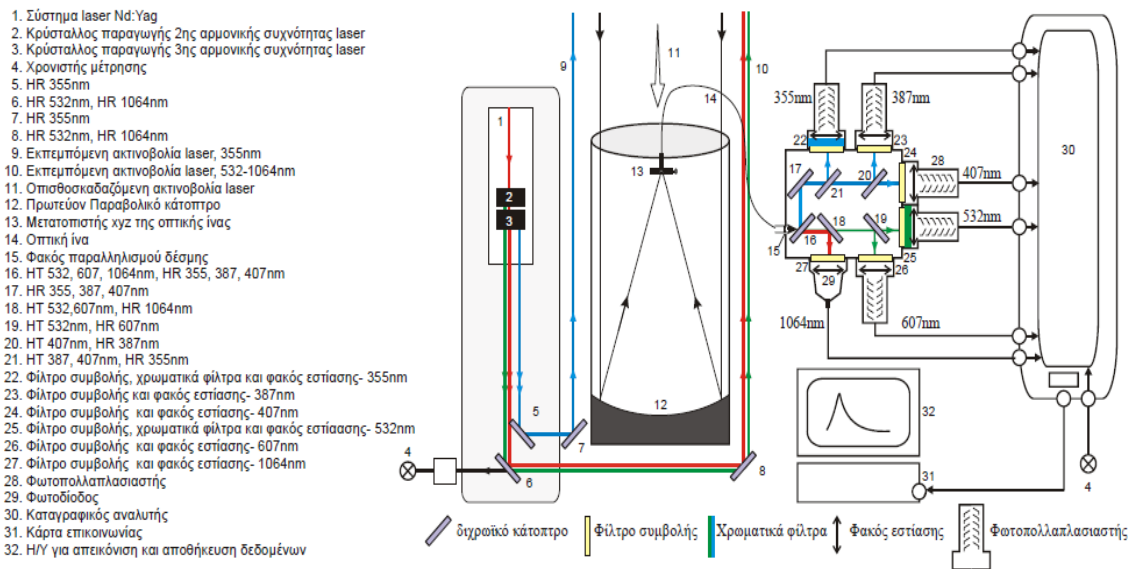
ευρίσκονται μακρύτερα από το μήκος κύματος εκπομπής της δέσμης laser αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, που οφείλεται στην αλλαγή των κατανομών των πληθυσμών των περιστροφικών (ενεργειακών) επιπέδων, με την θερμοκρασία λόγω της κατανομής Maxwell-Boltzmann [Weitkamp (2005)].

2.11 Πειραματική διάταξη συστήματος lidar του ΕΜΠ

Το σύστημα lidar του ΕΜΠ (Σχήμα 2.11), σχεδιάστηκε για να εκτελεί συνεχείς μετρήσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο ΑΟΣ και στην ελεύθερη τροπόσφαιρα. Είναι βασισμένο σε τρία μήκη κύματος εκπομπής ενός παλμικού Nd:YAG laser (θεμελιώδης, δεύτερη και τρίτη αρμονική συχνότητα) laser (Spectra Physics), που εκπέμπει στα 1064, 532 και 355 nm, με ενέργεια εξόδου/παλμό 350, 200 και 250 mJ, αντίστοιχα, χρονικής διάρκειας παλμού 6-8 ns και επαναληπτικότητα 10 Hz. Αποτελείται από τα κάτωθι βασικά μέρη (Σχήμα 2.11):

- Πηγή ακτινοβολίας laser και οπτικό σύστημα εκπομπής ακτινοβολίας laser.
- Οπτικό σύστημα συλλογής, διαχωρισμού και ανίχνευσης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας laser.
- Ηλεκτρονικό σύστημα ψηφιοποίησης, καταγραφής και αποθήκευσης των δεδομένων lidar.
- Κατάλληλο λογισμικό για την επεξεργασία και απεικόνιση των δεδομένων lidar.





Σχήμα 2.11: Σύστημα Raman-LIDAR του ΕΜΠ [Mamouri, PhD Thesis (2009)].

Ο οπτικός δέκτης είναι ένα κοίλο παραβολικό κάτοπτρο, με διάμετρο $D = 300$ mm και εστιακή απόσταση $f = 600$ mm. Ο δέκτης συνδέεται με το σύστημα ανίχνευσης σημάτων lidar μέσω μιας οπτικής ίνας από SiO_2 με διάμετρο πυρήνα 2 mm. Το κύριο πλεονέκτημα μιας τέτοιας γεωμετρίας είναι η δυνατότητα να σχεδιαστούν συμπαγή συστήματα lidar και η δυνατότητα φυσικού διαχωρισμού του συστήματος ανίχνευσης σημάτων από το τηλεσκόπιο λήψης.

Η φασματική διάταξη ανίχνευσης περιλαμβάνει μία φωτοδίοδο χιονοστιβάδας στην περιοχή του κοντινού υπερύθρου (1064 nm) και πέντε φωτοπολλαπλασιαστές (Hamamatsu R7400-PU) οι οποίοι ανιχνεύουν την ελαστικά οπισθοσκαδαζόμενη ακτινοβολία στα 532 και 355 nm, καθώς και την ακτινοβολία Raman στα 387 και 407 nm που προέρχονται από την αλληλεπίδραση της υπεριώδους δέσμης του laser με το ατμοσφαιρικό άζωτο και τους υδρατμούς αντίστοιχα, καθώς και την ακτινοβολία στα 607 nm λόγω σκέδασης Raman της ορατής ακτινοβολίας laser (532 nm) από το N_2 . Η ακτινοβολία αυτή ανιχνεύεται από φωτοπολλαπλασιαστές) ειδικά επιλεγμένους για την ευαισθησία και την γρήγορη απόκριση τους στα αντίστοιχα μήκη κύματος.

Η ακτινοβολία laser που οπισθοσκαδάζεται συλλέγεται από ένα οπτικό τηλεσκόπιο (Σχήμα 2.11 - κάτω), κατευθύνεται μέσω της οπτικής ίνας στο ανιχνευτικό σύστημα, και μέσω ενός συστήματος διχρωϊκών οπτικών φίλτρων διαχωρίζεται φασματικά και ακολούθως μέσω φακών (εστιακής απόστασης $f = 50$ mm) εστιάζεται στην φωτοκάθοδο των φωτοπολλαπλασιαστών. Το φασματικό εύρος και το κεντρικό

μήκος κύματος των φίλτρων είναι ειδικά επιλεγμένα ώστε να αποκόπτονται όλα τα μήκη κύματος εκτός του επιθυμητού στη συχνότητα laser και έτσι να αυξάνεται σημαντικά ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR). Το φασματικό εύρος των φίλτρων στα 1064, 532, 355, 387, 407 και 607 nm είναι 1,0, 0.5, 1.0 και 3.0 nm, αντίστοιχα.

Η βάση της οπτικής ίνας τοποθετείται ακριβώς στο εστιακό επίπεδο του τηλεσκοπίου αποτελώντας ένα κεντρικό εμπόδιο ακτίνας $r_s = 10$ mm. Η απόσταση μεταξύ του κέντρου της εκπεμπόμενης δέσμης laser και του άξονα του τηλεσκοπίου είναι $d_o = 300$ mm. Η ακτίνα της δέσμης laser είναι $w_o = 5$ mm και η απόκλιση της είναι 0.5 mrad.

Το καταγραφικό σύστημα που χρησιμοποιείται (LICEL Transient Recorder TR20-80) έχει τη δυνατότητα να εκτελεί ταυτόχρονη αναλογική καταγραφή και την καταμέτρηση φωτονίων (τεχνική photon counting). Το σημαντικό αυτό πλεονέκτημα προσφέρει τη δυνατότητα να αποφεύγεται ο κορεσμός του σήματος στις κοντινές αποστάσεις (έως περίπου 2 km) και να διατηρείται η ευαισθησία του συστήματος στην καταγραφή σημάτων από μεγάλες αποστάσεις (τυπικά 10-12 km). Επίσης, χρησιμοποιούνται και δύο οπτικά φίλτρα διαπερατότητας 50% στα 355 και 532 nm, αντίστοιχα, προκειμένου να μειωθεί η ένταση των λαμβανόμενων σημάτων από το κοντινό πεδίο (π.χ. τα πρώτα 300-500 m) του συστήματος lidar. Η αντίστοιχη μέγιστη χωρική ακρίβεια του συστήματος lidar είναι 7.5 m (= 1 bin). Μετά την καταγραφή τους τα πρωτογενή δεδομένα (μετρήσεις lidar) αποθηκεύονται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω χρήση και επεξεργασία).

Συνοψίζοντας, το σύστημα lidar του ΕΜΠ είναι ένα σύστημα lidar-Raman με εκπομπή σε 3 μήκη κύματος (1064, 532 και 355 nm) και ανίχνευση στα μήκη κύματος των 1064, 532 και 355 nm από ελαστική σκέδαση, καθώς και από Raman σκέδαση στα μήκη κύματος των 387 και 407 nm για την ανίχνευση του N_2 και των υδρατμών αντίστοιχα, αλλά και των 607 nm λόγω Raman σκέδασης από τα 532 nm εκπομπής, από το N_2 . Το σύστημα lidar του ΕΜΠ μπορεί να καταγράψει και το σήμα lidar από την αποπύλωση στα 355 nm. Το σύστημα αυτό βελτιστοποιήθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος EARLINET, τόσο σε επίπεδο υλικού (hardware), όσο και σε επίπεδο λογισμικού (software).

2.12 Σκοπός της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής

Στόχος αυτής της Διδακτορικής Διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός καινοτόμου επιχειρησιακού συστήματος τηλεπισκόπησης LASER (Light Detection And Ranging -

LIDAR) τρισδιάστατης (3D) καταγραφής μετεωρολογικών και ατμοσφαιρικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο. Έμφαση δίνεται στη μέτρηση της ατμοσφαιρικής ορατότητας και συγκεκριμένα της κάθετης - οριζόντιας και επικλινούς ορατότητας (3D Visibility or Slant Visual Range - SVR), μέτρηση ορατότητας διαδρόμου Απο-Προσγείωσης αεροδρομίων (Runway Visual Range - RVR) και οδικού δικτύου, καθώς και στην ανίχνευση διάταξης νεφών και οπτική γεωμετρία τους, εντοπισμού ατμοσφαιρικών στρωματώσεων και ακριβής κατηγοριοποίησή τους καθώς και ύψος και πάχος αυτών, 3D καταγραφή του πάχους του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (ΑΟΣ) ή αλλιώς Planetary Boundary Layer Height - PBLH, αλλά και στην μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου σε 2D ή / και 3D χωρίς την αναγκαία χρήση επιπλέον ακριβούς εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα συστήματα Doppler lidar ή radar.

Βασικό στοιχείο διαφοροποίησης μιας τέτοιας συσκευής lidar από προηγούμενες συσκευές μέτρησης, μετά την υλοποίησή της και την εισαγωγή των αλγορίθμων και τεχνικών που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5 (δηλ. στο κομμάτι της επεξεργασίας δεδομένων) [Pantazis et al. (2017 – 2019)], είναι η ικανότητα που επιδεικνύει η συσκευή να πραγματοποιεί μετρήσεις σε 3D, με αξιόπιστη μέτρηση ατμοσφαιρικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και εντός ανομοιογενούς ατμόσφαιρας. Αυτό συμπληρώνει την υπάρχουσα συμβατική οργανολογία που σήμερα στηρίζεται στις επιτόπιες μετρήσεις (in situ) και στην λήψη θεωρητικών υποθέσεων ομοιογένειας εντός πραγματικής ατμόσφαιρας.

Με τον τρόπο αυτό, μία τέτοια συσκευή θα μπορεί να αναβαθμίσει τις υπηρεσίες της εντός της κοινότητας της Αεροπλοΐας και της Ασφάλειας πτήσεων σε αεροδρόμια [Pantazis et al. (2017 – 2019)] και να αποτελέσει έναν αξιόπιστο «συνεργάτη» των Ελεγκτών Εναερίου Κυκλοφορίας (EEK) και του Aviation Management των αεροδρομίων καθώς και των μετεωρολόγων σε αυτά. Η συσκευή αυτή θα συμβάλλει ενεργά με τον τρόπο αυτό στην σημαντική μείωση του συνολικού χρόνου πτήσης και της κατανάλωσης καυσίμων από τα αεροσκάφη, τη μείωση των εκπομπών CO₂ και άλλων αέριων ή σωματιδιακών ρύπων στο περιβάλλον (Aviation ECO) καθώς και στην μείωση του κόστους πτήσης. Σημαντική επίσης θα είναι η συμβολή μιας τέτοιας συσκευής στην βιώσιμη ανάπτυξη και την ενίσχυση της οικονομίας μέσω της αύξησης της ικανότητας των αεροδρομίων να ελέγχουν περισσότερα αεροσκάφη, ασφαλέστερα και στον ίδιο χρόνο.

Μία τέτοια αλλαγή στην οργανολογία των αεροδρομίων, προβλέπεται να συμβάλλει στο μέλλον με θετικό τρόπο, την προτυποποίηση και τις απαιτήσεις των συσκευών ατμοσφαιρικών μετρήσεων από τον International Civil Aviation Organization (ICAO) (ή / και International Maritime Organization (IMO), Weather Meteorological Organization (WMO). Ως παράδειγμα, μπορεί να αναφερθεί η περίπτωση της μέτρησης της ορατότητας από scatterometer, που ισχύει σήμερα ως αποδεκτό, ότι η ανάκτηση ορατότητας με επιτόπιες μετρήσεις (in situ) δύναται να παρέχουν την τελευταία σε αποστάσεις έως και 10 km, καθώς και η περίπτωση των ραδιοβλήσεων, έναν αρκετά κοστοβόρο και τοπικού χαρακτήρα τρόπο ανάκτησης του ΑΟΣ, τον οποίο θα δοκιμάσει με βάση την αξιοπιστία που μπορεί μια lidar

συσκευή να προσφέρει, καθώς και την ευχρηστία αυτής, μιλώντας με οικονομικούς όρους.

Οι προτεινόμενες τεχνικές lidar και αλγόριθμοι, τείνουν να κάνουν μια τέτοια lidar συσκευή ιδιαίτερα ελκυστική στις προαναφερθείσες κοινότητες, καθώς και στην ναυσιπλοΐα, τη Διαστημική και την παρατήρηση της ατμόσφαιρας, αλλά και τη Μετεωρολογία (μέτρηση ορατότητας και ταχύτητας ανέμου χωρίς την ανάγκη περαιτέρω εξοπλισμού Doppler, καταγραφή ομίχλης κλπ.).

Με την συσκευή αυτή φαίνεται να επιλύονται σημαντικά μειονεκτήματα υπάρχουσας συμβατικής τεχνολογίας βάσει της επικρατούσας βιβλιογραφίας, όπως θα παρουσιασθεί παρακάτω και δύναται να προσφέρει τα μέγιστα στην οικολογία μιας περιοχής (π.χ. αεροδρομίου) καθώς και την παρακολούθησή των ατμοσφαιρικών παραμέτρων αυτής 24/7, με σκοπό την αξιολόγηση της ατμοσφαιρας ποιοτικά, δίνοντας χρήσιμα στοιχεία (δεδομένα) για το Health and Safety περιοχής.

Η ανάπτυξη μεθόδων και αλγορίθμων στο πλαίσιο αυτής της Διδακτορικής Διατριβής μπορούν να βοηθήσουν και προς την κατεύθυνση της δορυφορικής ενημέρωσης πλοίων οπουδήποτε στην γη, για τον καιρό που λαμβάνει χώρα σε κάθε πλοίο ανά τη υφήλιο, μέσω ακριβών ατμοσφαιρικών μετρήσεων lidar από τα ίδια ή/ και από lidar δορυφορικό σύστημα. Στο πνεύμα αυτό, η μετεωρολογική αυτή ενημέρωση θα μπορούσε δυνητικά να τροφοδοτεί με δεδομένα και έναν αυτόματο εγκέφαλο Τεχνητής Νοημοσύνης (ArtificialIntelligence – AI) στον δρόμο για την Αυτόνομη Ναυσιπλοΐα (Autonomous ECO Shipping) που βρίσκεται σε ανάπτυξη από διάφορες χώρες, επιλέγοντας την βέλτιστη διαδρομή, σε πραγματικό χρόνο αναλόγως πληροφοριών lidar μετρήσεων [Pantazis, MSAW (2019)]. Η χρήση νέων Μεθόδων και Αλγορίθμων στο πλαίσιο αυτής της διατριβής μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και στη βαθμονόμηση lidar δορυφορικών συστημάτων όπως για παράδειγμα το σύστημα Aeolus της European Space Agency (ESA), που χρησιμοποιεί την τεχνική Doppler lidar για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου σε 2 διαστάσεις (https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Aeolus/Aladin_wind_probe_ready_for_Aeolus).

3.

Τεχνικές μέτρησης μετεωρολογικής ορατότητας, ύψους ΑΟΣ και ταχύτητας ανέμου

3.1 Τεχνικές μέτρησης Ορατότητας στην ατμόσφαιρα

Παρακάτω, θα αναφερθούν οι βασικότερες τεχνικές μέτρησης της ορατότητας στην ατμόσφαιρα, τόσο με τη χρήση συστημάτων τηλεπισκόπησης laser, όσο και με άλλες, συμβατικές μεθόδους.

3.1.1 Υφιστάμενες τεχνολογίες και μεθοδολογίες μετρήσεων με χρήση συστημάτων lidar για την καταγραφή της ατμοσφαιρικής Ορατότητας

Τα **οροφόμετρα** (ceilometers), τα οποία μετρούν το συντελεστή οπισθοσκέδασης αιωρούμενων σωματιδίων [Munkel (2004, 2007), Wiegner and Geiss (2012), Wiegner (2014), David et al. (2015), Madonna (2015)] με χρήση συστημάτων laser και Mie οπισθοσκέδαση, για την κάθετη μέτρηση της βάσης αλλά και του υπομετρικού εύρους - πάχους νεφών ή / και την καθ' ύψος μέτρηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων, με παράλληλη εκτίμηση της ατμοσφαιρικής ορατότητας, κατά τη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας laser (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Οροφόμετρο εγκατεστημένο σε διεθνές αεροδρόμιο [LufftOpticalSensors – www.Lufft.com].

Τα ceilometers λειτουργούν από 1 (1D) έως 3 διαστάσεις (3D) σάρωσης με την υπόθεση πάντα της ομογενοῦς ή καθ' ύψος ομοιογένειας της ατμόσφαιρας και υπολογίζουν την ατμοσφαιρική ορατότητα λαμβάνοντας υπόψη τις παρακάτω τεχνικές lidar:

i) η *κεκλιμένη μέθοδος* (Slope method) [Kovalev and Eichinger(2004), Kohl (1978)] η οποία θεωρεί ως *ομοιογενή* την ατμόσφαιρα διάδοσης της ακτινοβολίας laser. Σε αυτήν τη μέθοδο, για μία δέσμη εκπομπής laser, υπολογίζεται ο λογάριθμος του διορθωμένου σήματος lidar με την απόσταση (Εξ. 23, 24):

$$P(R) = \frac{(\beta * K)}{R^2} \exp(-2 * \alpha * R) \quad (23)$$

$$\ln[P(R)R^2] = \ln(\beta * K) - 2 * \alpha * R \quad (24)$$

όπου, R, είναι η απόσταση σε km, P(R), η ισχύς λήψης από R σε Watt, K είναι η σταθερά του συστήματος σε $W \text{ km}^3 \text{ sr}$, α, είναι ο συντελεστής εξασθένησης (σε km^{-1}) και β είναι ο συντελεστής οπισθοσκέδασης (σε $\text{km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$).

Για $R=0$ η τιμή του διορθωμένου σήματος είναι $\ln(\beta * K)$, η κλίση είναι διπλάσια του α και υπολογίζεται η τυπική απόκλιση. Η μέθοδος καταλήγει ότι οι ποσότητες $\beta * K$ και η τυπική απόκλιση, αντίστοιχα, δίνονται από τις (Εξ. 25, 26):

$$\beta * K = \exp(y) \quad (25)$$

και
$$\frac{\delta(\beta * K)}{\beta * K} = \delta y \quad (26)$$

Η τυπική απόκλιση είναι η $(y \pm \delta y)$.

Αντίστοιχα, το οπτικό πάχος (τ) το οποίο αποτελεί μέτρο της ορατότητας και δίνεται από τη σχέση :

$$\tau = \int_0^r a(r') dr \quad (27)$$

Ενώ, για τον υπολογισμό του a παίρνουμε:

$$P(R) * R^2 = Z(R) \quad (28)$$

$$S(R) = \frac{P(R) * R^2}{K} = \frac{Z(R)}{K} \quad (29)$$

και
$$\alpha = - \frac{1}{2S(R)} * \frac{dS(R)}{dR} \quad (30)$$

Σημειώνεται ότι η μέθοδος κλίσης μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε μήκος κύματος [Weitkamp (2005)] αναζητώντας μία μέση τιμή του συντελεστή εξασθένησης α (λ, R) (Εξ. 30), σε αντίθεση με την μέθοδο λόγου (ratio method) που «αναζητά» τον συντελεστή αυτό, για το σύνολο των διαφορετικών ατμοσφαιρικών στρωματώσεων.

Στην κεκλιμένη μέθοδο χρησιμοποιείται η παραδοχή της ομοιογενούς ατμόσφαιρας σε μεγαλύτερες αποστάσεις, προκειμένου να παραχθούν οι ατμοσφαιρικές παράμετροι. Ωστόσο, με τον τρόπο αυτό, το σφάλμα στις παράγωγες αυτές παραμέτρους, αυξάνεται λόγω της αστάθειας των επικρατούντων ατμοσφαιρικών συνθηκών, ως συνάρτηση της απόστασης (R).

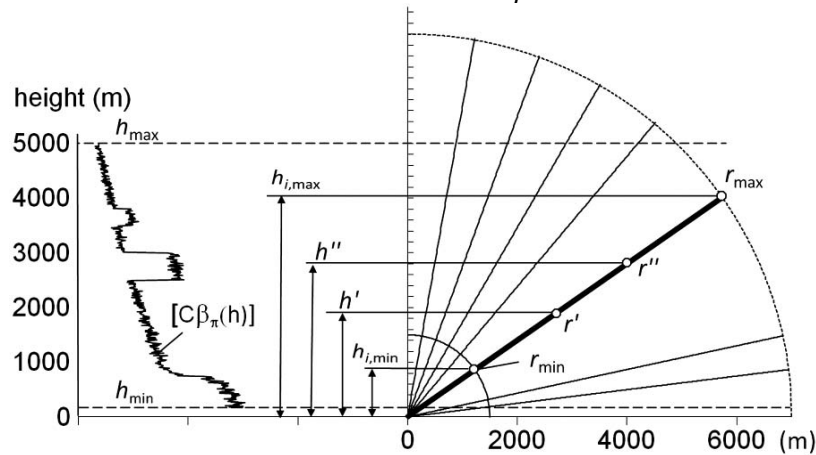
ii) η *πολυγωνική μέθοδος (Multiangle method)* [Kovalev and Eichinger (2004)] υποθέτει ότι υπάρχει μια οριζόντια ή σταθερή τιμή του $\beta(\lambda, R)$ σε κάθε ξεχωριστό ύψος h , μετά από κατακόρυφη μέτρηση και την λαμβάνει ίση με εκείνη την τιμή του $\beta(\lambda, R)$ σε κεκλιμένη απόσταση από το σημείο κατακόρυφης μέτρησης του $\beta(\lambda, R)$, κάτι που δεν ισχύει σε μια "πραγματική - επιχειρησιακή" ατμόσφαιρα και ειδικά σε μεγαλύτερες κεκλιμένες αποστάσεις.

Θεωρεί δηλαδή ότι:

$$\tau(h, \varphi_1) * \sin\varphi_1 = \tau(h, \varphi_2) * \sin\varphi_2 = \tau(h, \varphi_N) * \sin\varphi_N = \text{const} \quad (31)$$

Όπου, $\tau(h, \varphi_i)$, είναι το οπτικό βάθος του ατμοσφαιρικού στρώματος από το έδαφος ($h = 0$) στο ύψος h , μετρούμενο στην κατεύθυνση κλίσης με τη γωνία ανύψωσης φ_i (Σχήμα 3.2):

$$\tau(h, \varphi_i) = \int_0^r \tau_{total}(r') dr' = \frac{1}{\sin\varphi_i} * \int_0^h \tau_{total}(h') dh' \quad (32)$$



Σχήμα 3.2: Αρχή λειτουργίας της Πολυγωνικής μεθόδου [Kovalev and Eichinger (2004)].

iii) η μέθοδος Οπτικού πάχους (Optical Depth method) [Kovalev and Eichinger (2004)] υποθέτει ότι ο λόγος lidar ($C(\lambda, R)$) που είναι ο λόγος του συντελεστή εξασθένησης με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης, είναι σταθερός, κάτι που πάλι δεν ισχύει σε μια "πραγματική - επιχειρησιακή" ατμόσφαιρα καθότι οι σκεδαστές και τα μεγέθη τους είναι πολλά και διαφορετικά με διαφορετική απόκριση μεταξύ των $\alpha(\lambda, R)$ και $\beta(\lambda, R)$. Το οπτικό βάθος σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να εκτιμηθεί με άλλες ανεξάρτητες μετρήσεις στην κατακόρυφη κατεύθυνση, όπως στην περίπτωση του ηλιακού φωτόμετρου [Kohl (1978)] ή μέσω της τεχνικής Raman lidar [Ansmann et al.(1990), Ansmann et al.(1992)].

$$C(\lambda, R) = a_{aer}(\lambda, R) / \beta_{aer}(\lambda, R) \quad (33)$$

Σε αυτήν τη μέθοδο θεωρείται γνωστή η τιμή του οπτικού πάχους και χρησιμοποιείται ως οριακή τιμή:

$$T_{max}^2 = e^{-2 \int_{r_0}^{r_{max}} \tau_{total}(r') dr'} \quad (34)$$

όπου, T_{max}^2 , η αμφίδρομη διαπερατότητα της ατμόσφαιρας της διαδιδόμενης ακτινοβολίας laser στην ατμόσφαιρα, από την αρχική απόσταση r_0 έως τη μέγιστη απόσταση r_{max} :

$$I_{r,max} = \int_{r_0}^{r_{max}} \tau_{total}(r') e^{-2 \int_{r_0}^{r_{max}} \tau_{total}(r') dr'} \quad (35)$$

και το οπτικό πάχος που λαμβάνουμε είναι:

$$\tau = \frac{0.5 * Z_r(r)}{\frac{I_{r,max}}{1 - T_{max}^2}} - I_r(r_0, r) \quad (36)$$

Ακόμη και εάν αυτή η μέθοδος φαίνεται να λειτουργεί καλά κάτω από διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, το πρόβλημα γίνεται αντιληπτό όταν πραγματοποιούνται μετρήσεις οριζόντιας απόστασης, όπου η τιμή αυτή δεν μπορεί να διατηρηθεί σταθερή και επομένως, η ορατότητα δεν μπορεί να υπολογισθεί με σχετική ακρίβεια υπό πραγματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, ιδιαίτερα σε οριζόντιες μετρήσεις και σε μεγαλύτερες κλίμακες, όπου το σήμα lidar μπορεί να γίνει πολύ θορυβώδες.

iv) η μέθοδος *Οριακών συνθηκών - σημείου* (Boundary Point Solution method - BPS) [Gong et al. (2011)] το οποίο υποθέτει και εδώ ότι ο λόγος lidar (C(λ,R) Εξ. 1) είναι σταθερός (με τα ανωτέρω «προβλήματα» που αναφέρθηκαν για μια τέτοια υπόθεση) και ανεξάρτητος από την απόσταση και θέτει το συντελεστή εξασθένησης με γνωστή τιμή σε συγκεκριμένη απόσταση – σημείο (οριακές συνθήκες), λαμβάνοντας υπόψη πάντα τους περιορισμούς μια τέτοιας υπόθεσης για μία μέτρηση μιας «πραγματικής – επιχειρησιακής» ατμόσφαιρας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εκτός βέβαια της περίπτωσης Klett, όπου μπορεί να θεωρεί μηδενική την τιμή των αιωρούμενων σωματιδίων σε εκείνο το ύψος, όπου θεωρητικά, αλλά και πρακτικά, υπάρχει έλλειψη των ανωτέρω.

Εδώ, το οπτικό πάχος δίνεται αντίστοιχα από την σχέση:

$$\tau_{aer} = \frac{Z_r(r)}{\frac{Z_r(r_b)}{\tau_{aer}(r_b)} - 2 \int_{r_b}^r Z_r(r') dr'} \quad (37)$$

Η ίδια τεχνική λοιπόν χρησιμοποιήθηκε και από τον Klett [Klett, (1981, 1985)] θέτοντας ένα ύψος αναφοράς, όπου οι τιμές των συντελεστών εξασθένησης αιωρούμενων σωματιδίων $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και οπισθοσκέδασης $\beta_{aer}(\lambda, R)$, μπορεί να είναι μηδενικές. Με τον τρόπο αυτό είναι ευκολότερο να ανακτηθούν τα $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και $\beta_{aer}(\lambda, R)$ για χαμηλότερα ύψη, μέσω του σήματος lidar, βέβαια με σχετικά μεγάλη

αβεβαιότητα, της τάξης του 20-30% [Klett (1981, 1985), Ansmann (1990)] ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου στον αλγόριθμο του Klett.

3.1.2 Συμβατικές τεχνικές μέτρησης της ατμοσφαιρικής ορατότητας

Τα κυριότερα όργανα μέτρησης της ατμοσφαιρικής ορατότητας και λοιπών μετεωρολογικών συνθηκών σε πραγματικό χρόνο στα αεροδρόμια βασίζονται στη μέτρηση του συντελεστή εξασθένησης α , αλλά και λοιπών παραμέτρων όπως θα δούμε παρακάτω:

i) οι *εμπρόσθιοι σκεδαστομετρητές* (forward scatterometers) χρησιμοποιούν την τοπικά εμπρόσθια ατμοσφαιρική σκέδαση με χρήση μονάδων εκπομπής και λήψης φωτεινών δεσμών για την εκτίμηση των ορίων της ορατότητας [CIMO (2008), WMO (2010)]. Οι συσκευές αυτές λειτουργούν με την αρχή τη εμπρόσθιας σκέδασης (φωτεινή δέσμη λυχνίας xenon) μέσω του συντελεστή σκέδασης β , συνήθως με κλίση 42° (προς τα κάτω του επιπέδου πομπού και δέκτη) οι οποίοι αναπτύσσονται στο επίπεδο του διαδρόμου, με εμβέλειες θεωρητικά άνω των > 10 km για «καθαρή» ατμόσφαιρα και παρέχουν τιμές του RVR (Runway Visual Range) (Σχήμα 3.3). Η αδυναμία τους είναι ότι λαμβάνουν ως υπόθεση μια ομοιογενή την ατμόσφαιρα σε όλο το μήκος του διαδρόμου, απαιτώντας, έτσι, μια συνεχή βαθμονόμηση.



Σχήμα 3.3: Εμπρόσθιος σκεδαστομετρητής διαδρόμου αεροδρομίου AGVIS FSI (<https://wikivisually.com/wiki/Scatterometer>).



Σχήμα 3.4: Διαπερατόμετρο

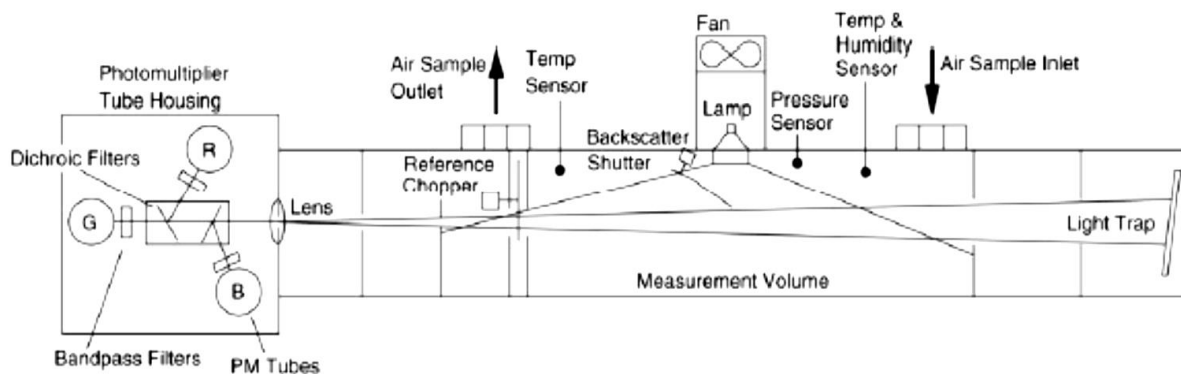
[\[https://en.wikipedia.org/wiki/Transmissometer#/media/File:Transmissometer.jpg\]](https://en.wikipedia.org/wiki/Transmissometer#/media/File:Transmissometer.jpg).

ii) τα *διαπερατόμετρα* (Transmissometers), χρησιμοποιούν, επίσης, την εμπρόσθια σκέδαση αλλά ο πομπός και ο δέκτης τοποθετούνται σε μεγαλύτερες αποστάσεις (συνήθως 10-75 m), προκειμένου να υπολογισθεί ο συντελεστής ατμοσφαιρικής εξασθένησης α [David et al.(2015)]. Σύμφωνα με την σκέδαση Mie της εμπρόσθιας σκέδασης χρησιμοποιείται η μέτρηση του συντελεστή α , μεταξύ του πομπού και του δέκτη στο επίπεδο του διαδρόμου (Σχήμα 3.4). Τα όργανα αυτά παρέχουν τιμές της ορατότητας με εμβέλεια > 10 km, παρέχοντας ταυτόχρονα τιμές του RVR. Η αδυναμία τους είναι ότι και αυτές οι συσκευές θεωρούν την ατμόσφαιρα ομοιογενή σε όλο το μήκος του διαδρόμου και έχουν μεγάλο κόστος συντήρησης.

iii) τα *κυψελοειδή δίκτυα* (cellular networks) μπορούν να ανιχνεύσουν τις ατμοσφαιρικές συνθήκες μέσω της εξασθένησης της ισχύος της κυψελοειδούς διαπερατότητας [David et al.(2015)]. Λειτουργούν με την λογική των υπαρχόντων μικροκυματικών δικτύων, καθώς και αυτών που πρόκειται να εφαρμοσθούν σε υψηλότερες συχνότητες. Ο υπολογισμός της ορατότητας πραγματοποιείται μέσω της μέτρησης του συντελεστή εξασθένησης α . Αυτό γίνεται λαμβάνοντας υπόψη μια ομοιογενή ατμόσφαιρα μεταξύ δύο πομποδεκτών μικροκυματικών δικτύων και στην οποία μετράται η μείωση της ισχύος των εκπεμπόμενων σημάτων (σε dB) και άρα της εξασθένησης που υφίσταται η μικροκυματική ακτινοβολία οδεύοντας από τον πομπό στον δέκτη του δικτύου. Αυτό μετά μεταφράζεται σε οπτικό πάχος και με τον τρόπο

αυτό σε εκτίμηση ορατότητας.

iv) τα *νεφελόμετρα* (nephelometers) μετρούν τη σκέδαση που υφίσταται μια φωτεινή δέσμη από τα αερολύματα σε μια ευρεία γωνία 0 - 180° [WMO (2010)]. Στα όργανα αυτά ο πομπός και ο δέκτης στήνονται εσωτερικά και αντικριστά στο εσωτερικό της συσκευής, όπου εκπέμπεται μια δέσμη φωτός (π.χ. λυχνία LED ή λυχνία αλογόνου) (Σχήμα 3.5). Ο προσροφούμενος όγκος αέρα υπό μελέτη διαπερνάται από την φωτεινή δέσμη και μετράται η ένταση της διερχόμενης φωτεινής ακτινοβολίας. Η σύγκριση της ισχύος μεταξύ της αρχικά εκπεμπόμενης δέσμης και της ανιχνευόμενης, σε μια ευρεία γωνία 0-180°, δίνει τη δυνατότητα μέτρησης του συντελεστή εξασθένησης α του προς μελέτη αέριου όγκου.



Σχήμα 3.5: Αρχή λειτουργίας νεφελόμετρου [TSI (2005)].

v) τέλος, η ορατότητα μπορεί να εκτιμηθεί από έναν επίγειο εξειδικευμένο παρατηρητή με βάση τον ορισμό της ορατότητας και στηριζόμενος σε γνωστές αποστάσεις κατά μήκος προκαθορισμένων θέσεων γύρω από τα αεροδρόμια [WMO (2010)]. Έτσι, εάν η θέση ή οι θέσεις διαφόρων αντικειμένων γύρω από τον παρατηρητή που βρίσκεται στον πύργο ελέγχου ενός αεροδρομίου, είναι γνωστές, τότε η ορατότητα υπολογίζεται κατ' εκτίμηση, ως η απόσταση που το αντικείμενο αυτό διακρίνεται καθαρά (με βάση τον ορισμό της μετεωρολογικής ορατότητας) από τον παρατηρητή. Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε στην ορατότητα κυρίως σε οριζόντιο επίπεδο και όχι σε κεκλιμένο και μόνο προς την κατεύθυνση που το αντικείμενο αυτό γίνεται ορατό από τον παρατηρητή και όχι αναγκαστικά προς την κατεύθυνση του διαδρόμου του αεροδρομίου και τις δυνατές θέσεις που μπορεί να βρεθούν τα αεροσκάφη κατά τις από-προσγειώσεις τους.

Όλες οι προαναφερθείσες τεχνικές και μέθοδοι εκτίμησης ορατότητας έχουν συγκεκριμένα μειονεκτήματα, καθώς είτε βασίζονται κυρίως σε δεδομένα τοπικής μέτρησης είτε υποθέτοντας (σχεδόν πάντα) ότι η ατμόσφαιρα είναι ομοιογενής στην ολότητά της ή ομογενής καθ' ύψος με αποτέλεσμα να είναι γνωστός ο συντελεστής εξασθένησης α . Όταν όμως οι κεκλιμένες μετρήσεις πραγματοποιούνται σε "πραγματικές – επιχειρησιακές" ατμόσφαιρες που σημαίνει κάτω από ασταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι προαναφερθείσες τεχνικές καθίστανται λιγότερο λειτουργικές και λιγότερο ακριβείς λόγω αυτών των υποθέσεων στις οποίες στηρίζονται.

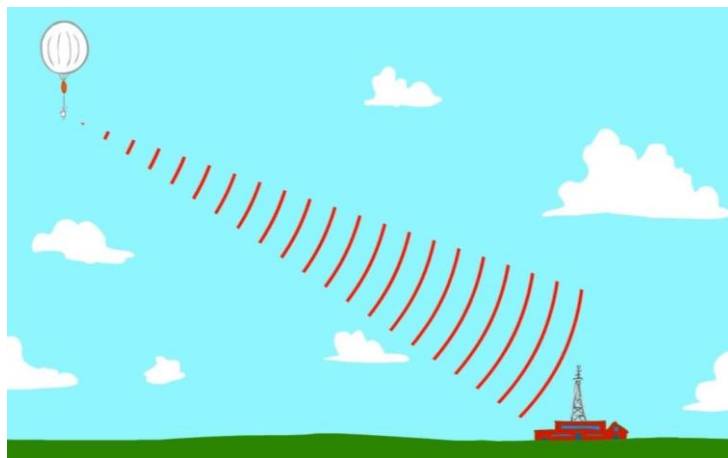
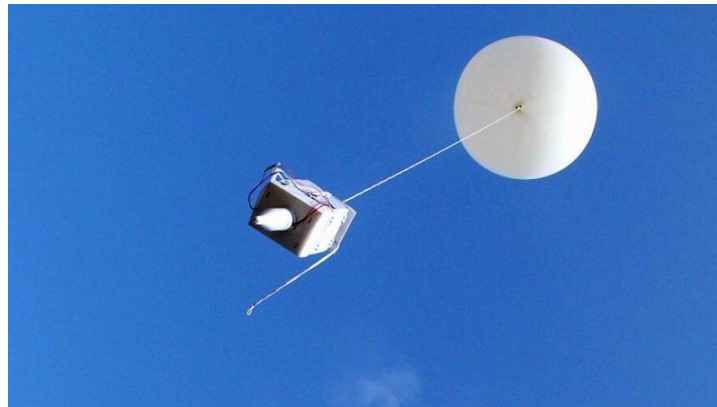
vi) αξίζει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι αυτοματοποιημένοι αλγόριθμοι για την ανίχνευση ατμοσφαιρικών στρωμάτων και την αφαίρεση θορύβου, έχουν προταθεί εδώ και αρκετά χρόνια [Gong et al.(2011)]. Η ανίχνευση γίνεται τυπικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο κλίσης η οποία προϋποθέτει όπως προαναφέρθηκε, μια ομοιογενή ατμόσφαιρα.

3.2 Τεχνικές εύρεσης ύψους του ΑΟΣ

Τα όργανα που έχουν χρησιμοποιηθεί γενικότερα για την ανάκτηση – ανεύρεση του ΑΟΣ είναι το radar [Eymard et al. (1982)], lidars [Hooper et al. (1985), Melfi et al. (1985)], οροφόμετρα, Doppler lidars υψηλής ανάλυσης (High Resolution Doppler LIDARs - HDRL) [Melfi et al. (1985)], SODARs (Sonic Detection And Ranging) [<http://www.scintec.com/english/web/Scintec/Products/FAS%20SODARs.aspx>, Eymard et al. (1982)], ραδιοφωνικά συστήματα ανίχνευσης (Radio Acoustic Sounding Systems - RASS) [International Measurement Confederation (1988)], ραδιο – προφίλ ανέμου [Eymard et al. (1982)] καθώς και η ραδιοβόλιση. Ακολούθως, αναφέρονται οι δύο κυριότερες τεχνικές.

3.2.1 Ραδιοβολίσεις

Η ραδιοβολίδα είναι μία συσκευή τηλεμετρίας που μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα συνήθως από ένα αερόστατο και που μετρά διάφορες ατμοσφαιρικές παραμέτρους τις οποίες και μεταδίδει σε έναν δέκτη στη Γη (Σχ. 3.6). Με αυτόν το τρόπο μετρώνται και άλλες μεταβλητές καθ' ύψος, όπως η ατμοσφαιρική πίεση, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, ο άνεμος (ταχύτητα και κατεύθυνση).



Σχήμα 3.6: (Επάνω) Ραδιοβολίδα με μπαλόνι. (Κάτω) Εκπομπή μετεωρολογικών δεδομένων πίσω στον σταθμό εδάφους [https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA_enGR867GR867&q=radiosonde+photos&tbm=isch&source=univ&sa=X&ved=2ahUKEwii4pXQjvzIAhVS06YKHY7KDWzQsAR6BAgKEAE&biw=1536&bih=722].

Οι συσκευές αυτές μπορούν να λειτουργούν με ραδιοσυχνότητα 403 MHz ή 1680 MHz. Μια ραδιοβολίδα, η θέση της οποίας παρακολουθείται καθώς ανέρχεται για να δώσει πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου, ονομάζεται "rawinsonde" ("wind-sonde"). Οι περισσότερες ραδιοβολίδες φέρουν ανακλαστικές ραντάρ. Μια ραδιοβολίδα που πέφτει από ένα αεροπλάνο, ονομάζεται "dropsonde" (Σχήμα 3.7). Οι ραδιοβολίσεις αποτελούν σημαντική πηγή μετεωρολογικών δεδομένων και εκατοντάδες χρησιμοποιούνται καθημερινά σε όλο τον κόσμο για εύρεση ύψους ΑΟΣ και λοιπών μετεωρολογικών δεδομένων καθώς αποτελούν ίσως την πιο αξιόπιστη πηγή μέτρησης σε όλα τα ανωτέρω. Η χρήση δεδομένων ραδιοβόλισης, μέσω της συσχέτισης της αρνητικής κλίσης των μετρήσεων

σχετικής υγρασίας (RH) με τη θετική κλίση της θερμοκρασίας (θ) ή / του αριθμού Richardson αναφέρεται από τους [Tsaknakis et al. (2011)].



Σχήμα 3.7: (Αριστερά) Το αεροσκάφος Global Hawk της NASA απελευθερώνει Ραδιοβολίδα “dropsonde”. (Δεξιά) Η ραδιοβολίδα “dropsonde” εν πτήση [https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA_enGR867GR867&q=dropsonde+photos&tbm=isch&source=univ&sa=X&ved=2ahUKEwiQv_X7jvzIAhWwxMQBHQ37BJkQsAR6BAgKEAE&biw=1536&bih=722].

3.2.2 Τεχνική LIDAR

Η χρήση της τεχνικής lidar επιτρέπει την ανάκτηση του ύψους του ΑΟΣ μέσω των ακόλουθων μεθόδων:

i) η μέθοδος *διακύμανσης* (Variance), όπου το PBLH βρίσκεται όταν παρατηρείται μία καθαρή "επιλογή" μέγιστης απόκλισης σήματος οπισθοσκέδασης, ως συνάρτηση του ύψους [Menut et al. (1999)].

ii) μέθοδος *διαβάθμισης*, όπου το PBLH υπολογίζεται από ένα απόλυτο τοπικό ελάχιστο του πρώτου παραγώγου του διορθωμένου κατ' απόσταση σήματος (Range Corrected LIDAR Signal - RCLS), ως συνάρτηση του ύψους [Menut et al. (1999), Sicard (2006)].

iii) η *λογαριθμική κλίση*, όπου το PBLH υπολογίζεται από ένα απόλυτο τοπικό ελάχιστο του πρώτου παραγώγου του λογαρίθμου του σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (ln (RCLS)) ως συνάρτηση του ύψους [Kovalev and Eichinger (2004)].

iv) το *σημείο καμπής*, όπου το PBLH υπολογίζεται σε ένα απόλυτο τοπικό ελάχιστο της πρώτου παραγώγου του σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) ως συνάρτηση του ύψους [Menut et al. (1999), Kovalev and Eichinger (2004)].

v) μέθοδος του *κατωφλίου*, όπου η PBLH υπολογίζεται από την ισοδυναμία του σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) με μια κρίσιμη τιμή κατωφλίου [Sicard (2006), Kovalev and Eichinger (2004)].

vi) η μέθοδος *μετασχηματισμού* (Covariance Wavelet), όπου η PBLH υπολογίζεται με ένα σαφές μέγιστο μετασχηματισμού συνδιακύμανσης, το οποίο είναι ένα μέτρο της ομοιότητας του σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση RCLS και της Haar function [Baars et al. (2008)].

vii) η *εκτεταμένη* μέθοδος *φίλτρου Kalman* (EKF), όπου η εκτίμηση του PBLH [Lange et al. (2014), (2015)] βασίζεται στην εκτίμηση τεσσάρων χρονικά προσαρμόσιμων συντελεστών μιας απλοποιημένης καμπύλης της μορφής της συνάρτησης σφάλματος που μοντελοποιεί το σύνορο του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και της ελεύθερης τροπόσφαιρας στο σήμα lidar, διορθωμένο ως προς την απόσταση.

Σε αυτή την εργασία, χρησιμοποιούνται νέοι αλγόριθμοι επεξεργασίας δεδομένων οπισθοσκέδασης lidar σήματος από το σύστημα Elastic – Raman lidar της μονάδας τηλεπισκόπησης laser (LASER Remote Sensing Unit - LRSU) του Ε.Μ.Π. [Κόκκαλης (2017)] για τον υπολογισμό του PBLH. Οι αλγόριθμοι αυτοί δημιουργούν ένα νέο είδος «μαθηματικών εργαλείων» (θεωρητικών συνθηκών) για επεξεργασία, με βάση το σήμα οπισθοσκέδασης lidar, το οποίο συμφωνεί με την προσέγγιση της ανάκτησης PBLH, σύμφωνα με το θεώρημα Bayes που χρησιμοποιείται επαρκώς και σε τεχνικές Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) [Stone (2013)].

Επίσης, όπως θα δειχθεί και παρακάτω, ενσωματώντας αυτούς τους αλγορίθμους σε ένα σύστημα lidar 3-διαστάτης σάρωσης, μπορεί να καταγραφεί με μικρό σχετικά κόστος το ύψος του ΑΟΣ, 24 ώρες την ημέρα και 7 ημέρες την εβδομάδα, σε σχέση με την πολυέξοδη και χρονικά και τοπικά περιορισμένη μέθοδο της ραδιοβόλισης.

Τα αποτελέσματα αυτής της επεξεργασίας του σήματος συγκρίνονται κατόπιν με την κατά γενική ομολογία, πιο αξιόπιστη αυτή μέθοδο μέτρησης ΑΟΣ, την ραδιοβόλιση, ως μέτρο αξιολόγησης των νέο-αναπτυχθέντων αλγορίθμων.

Στην Ελλάδα, δεδομένα των ραδιοβολίσεων προέρχονται από τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) και ευκαιριακά από το Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών(ΕΚΠΑ). Η τοποθεσία της ΕΜΥ (37.88° Β, 23.73° Α, 10 m ASL) βρίσκεται κοντά στον πρώην Ανατολικό αεροδρόμιο της Αθήνας, στην περιοχή του Ελληνικού, το οποίο απέχει απόσταση 11.5 km από το ΕΜΠ, όπου και βρίσκεται η διάταξη του συστήματος Raman-lidar. Από την άλλη το ΕΚΠΑ βρίσκεται (37.88° Β, 23.73° Α, 212m ASL) πολύ κοντά στο ΕΜΠ.

3.3 Μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου

Ένα άλλο μετεωρολογικό δεδομένο ενδιαφέροντος είναι η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου. Από τις μετρήσεις αυτές, η πιο γνωστή lidar μέθοδος βασίζεται στην τεχνική Doppler lidar, για το οποίο έγινε αναφορά στο Κεφ. 2. Επίσης, η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μεταβλητή και στην εύρεση του PBLH [Hooper et al. (1985)], μέσω μέτρησης του ανέμου καθ' ύψος και της σπείρας Eckman, βάσει των χαρακτηριστικών του ανέμου εντός του ΑΟΣ και την ροή του ανέμου πάνω από αυτό, όπως αυτό παρουσιάστηκε παραπάνω.

Μια άλλη, διαφορετική τεχνική μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου, που ομοιάζει με αυτήν που προτείνεται σε αυτήν την διατριβή και η οποία βασίζεται σε μετρήσεις lidar μοναδικής διεύθυνσης, είναι εκείνη που αναφέρεται στο [Tomás (2015)]. Εκεί, χρησιμοποιείται η μέθοδος συσχέτισης ανάκτησης σήματος lidar οπισθοσκέδασης για συστήματα σάρωσης οπισθοσκέδασης lidar αποτελούμενα από κατακόρυφες κατανομές κατά μήκος της Γραμμής Οράσεως (Line Of Sight - LOS), δημιουργώντας τομές της ατμόσφαιρας σε διαφορετικές γωνίες κυρίως μέσω παρακολούθησης μεγαλύτερων ατμοσφαιρικών όγκων (όπως σύννεφα κτλ), η οποία διαμορφώνεται τελικά αλγεβρικά σε μορφή πινάκων, υπό διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό ανακτώνται κατακόρυφες κατανομές του ανέμου της ατμόσφαιρας μέσω υπόθεσης ομογενών κατακόρυφων μετρήσεων χρησιμοποιώντας το μοντέλο "παγωμένης" ατμόσφαιρας. Επίσης, ισχύει και για την περίπτωση κεκλιμένων μετρήσεων που βασίζονται στην τεχνική πολλαπλών γωνιών αζιμουθιακά για οριζόντια ανάκτηση ανέμου.

Οι κύριες διαφορές των ανωτέρω μεθόδων μέτρησης ανέμου με συστήματα lidar με τους προτεινόμενους αλγορίθμους ανάκτησης παρακάτω, είναι ότι, ακόμα και αν χρησιμοποιούνται μετρήσεις μίας δέσμης lidar οπισθοσκέδασης, υπολογίζεται η ταχύτητα του ανέμου σε 2 διαστάσεις (2D), παραμένοντας σε μία μόνο κλίση (γωνίες

φ και θ σταθερές κατά αζιμούθιο και καθ' ύψος) και υπολογίζοντας ακόμη και τα 3-διαστατα κατανομές σήματος της ταχύτητας του ανέμου, χρησιμοποιώντας τότε μια μέθοδο παρόμοια με τη σάρωση αζιμούθιου 2-γωνιών (Multiangle method). Σε αυτήν την διατριβή παρουσιάζονται νέοι αλγόριθμοι μαζί με παραδείγματα εφαρμογών που χρησιμοποιούν πραγματικά δεδομένα ατμοσφαιρικής αναστροφής που συλλέγονται κυρίως από το σύστημα lidar NTUA-LRSU.

4.

Προσομοιώσεις

4. 1 Προσομοιώσεις ατμοσφαιρικής ορατότητας

Παραπάνω έγινε παρουσίαση συμβατικών τεχνικών αλλά κυρίως τεχνικών lidar που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ορατότητας και λοιπών μετεωρολογικών παραμέτρων όπως ταχύτητας του ανέμου, θερμοκρασίας, υγρασίας, PBLH κτλ. Οι παραπάνω τεχνικές χρησιμοποιούνται τόσο στον ερευνητικό τομέα όσο και από την μετεωρολογία και τα αεροδρόμια προς όφελος της Ασφάλειας Πτήσεων και Εδάφους (ΑΠΕ).

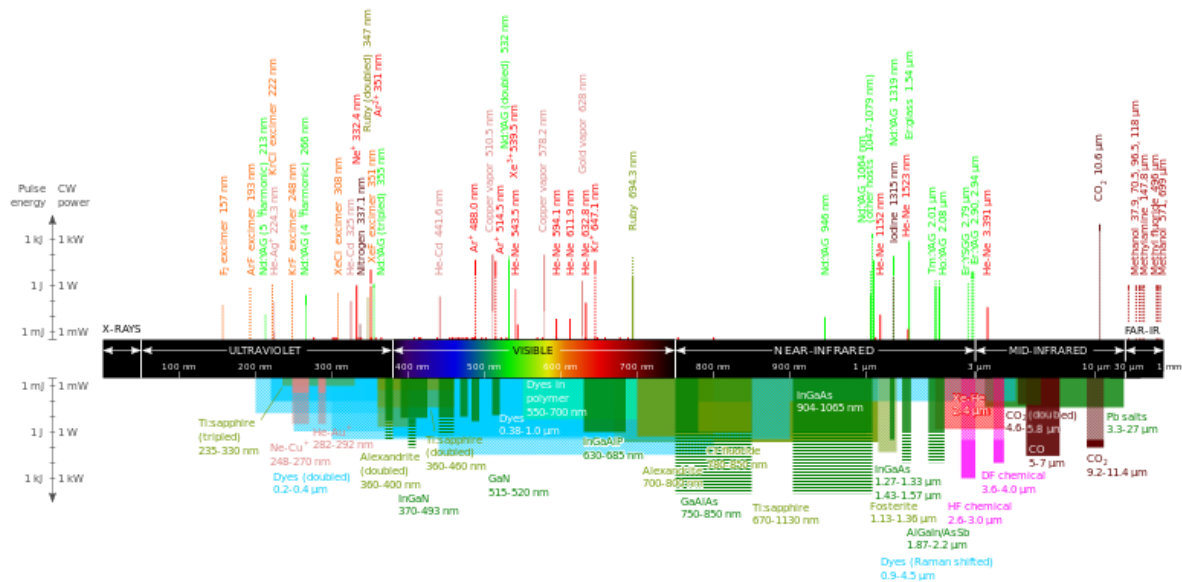
Με την τεχνική lidar, η ικανότητα μέτρησης που αφορά στις οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς και η δυνατότητα απεικόνισης της γεωμετρίας των νεφών και των στρωματώσεων της ατμόσφαιρας ακόμη και σε 3 διαστάσεις, τα κάνει να φαίνονται “ιδανική” λύση κατά την ασφαλή μέτρηση - εκτίμηση της ορατότητας. Μία τέτοιας ικανότητας 3-διαστάσεων μέτρησης, lidar συσκευή και κατά προτίμηση σε μήκος κύματος του κοντινού υπερύθρου [Shettle and Fenn (1979), Fenn et al. (1985)], ικανής να ανταποκρίνεται σε ελαστική και μη ελαστική σκέδαση, ακόμη και πολλαπλού μήκους κύματος για μέτρηση υγρασίας και αζώτου, μπορεί να επιλεγεί ως μία αρκετά καλή λύση συσκευής που θα ανταποκρίνεται με ακρίβεια στην μέτρηση στην ορατότητας και λοιπών μετεωρολογικών παραμέτρων μετά από επεξεργασία μέσω αλγορίθμων, για εκμετάλλευσή τους από την Αεροπλοΐα και την Ασφάλεια Πτήσεων και Ναυσιπλοΐας, την Διαστημική και τους δορυφόρους παρατήρησης της γης, καθώς και την ασφάλεια πόλεων στην συγκοινωνία και την υγεία των πολιτών κτλ.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί μία συσκευή lidar με ικανότητα να παράγει το δυνατό τα ανωτέρω «προϊόντα» προς τον χρήστη με το μικρότερο δυνατό κόστος, οδηγηγούμαστε αρχικά στις συσκευές του εμπορίου με, σχετικά της διατριβής, «προϊόντα», αναφορά των οποίων γίνεται στο Κεφ. 5 παρακάτω. Στο Σχήμα 4.1, παρουσιάζονται τα διαθέσιμα στο εμπόριο συστήματα laser που αποτελούν ή δύναται

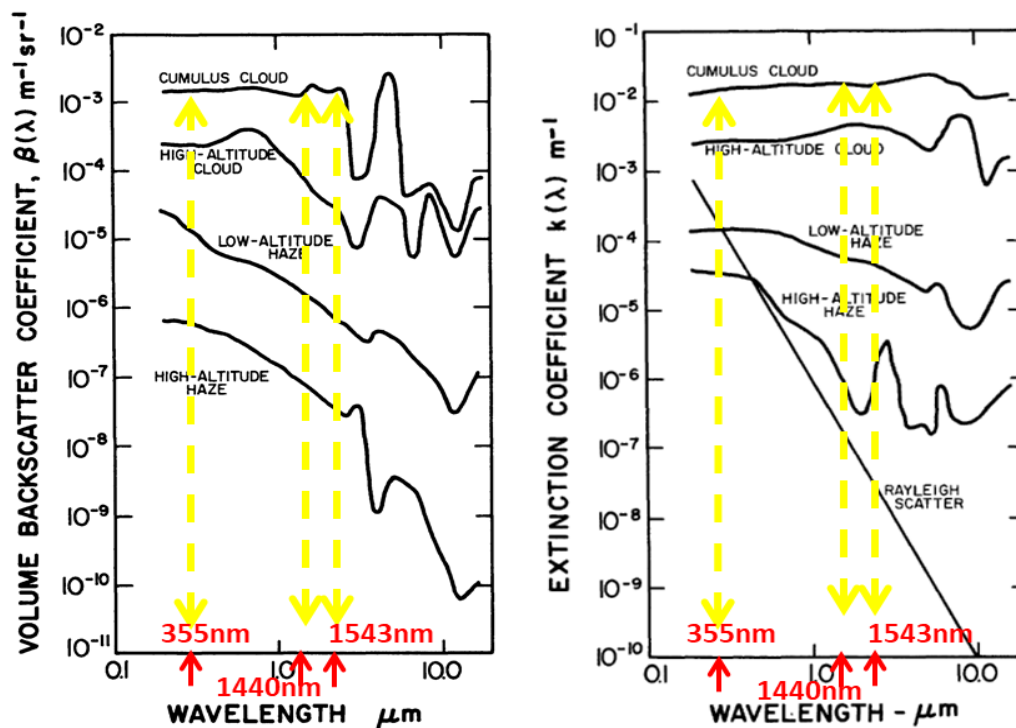
να αποτελέσουν πιθανούς πομπούς συσκευών lidar. Για τον λόγο αυτό και ένα 3-διάστατο lidar ελαστικής σκέδασης και επεξεργασίας αρχικά με την μέθοδο Klett (Κεφ. 2) ή / και με δυνατότητα λήψης και επεξεργασίας Raman σκέδασης, για την ανίχνευση υγρασίας κτλ όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 2, αλλά και γιατί ως μέθοδος έχει μικρότερη πιθανότητα λάθους ανάκτησης του οπτικού πάχους (τ) και του συντελεστή εξασθένησης (α) από την Klett, αποτελεί μία καλώς επιλέξιμη συσκευή.

Μία τέτοια συσκευή lidar θα πρέπει επίσης να είναι «επιχειρησιακή», κάτι που σημαίνει ότι θα πρέπει να μπορεί να «επιχειρεί» και να αναπτύσσεται στο όποιο περιβάλλον, όπως για παράδειγμα σε ένα αεροδρομίο, οπότε, μεταξύ διαφόρων συστημάτων laser, επιλέγεται για εδώ το Nd:YAG laser, καθώς είναι ένα σύστημα συμπαγές, σχετικά μικρό σε όγκο και κύριως αξιόπιστο στη λειτουργία του (π.χ. εκπομπή σταθερής ενέργειας ανά παλμό και σταθερού μήκους κύματος εκπομπής).

Το Nd:YAG laser τυπικά εκπέμπει στα 1064nm, αλλά μπορεί να εκπέμψει (μέσω μετατροπής του μήκους κύματος εκπομπής) και στα 213 nm, 266 nm 355 nm, 532 nm, 946 nm, 1120 nm, 1320 nm, 1440 nm ακόμη και στα 1543 nm και σε “eye-safe” συνθήκες, όπως οι τελευταίες ορίζονται κάθε φορά από τους διεθνείς οργανισμούς όπως ο International Civil Aviation Authority (ICAO). Τα 532 nm αποφεύγονται για χρήση ειδικότερα από την ασφάλεια πτήσεων, καθότι βρίσκονται εντός του ανθρωπίνου οπτικού φάσματος (400-700 nm περίπου) και μπορούν να αποτελέσουν περισπασμό στους χειριστές αεροσκαφών και να προκαλέσουν πιθανό ατύχημα.



Σχήμα 4.1: Διαθέσιμες πηγές laser σε μια ευρεία φασματική περιοχή
[\[https://en.wikipedia.org/wiki/LASER#/media/File:Commercial_LASER_lines.svg\]](https://en.wikipedia.org/wiki/LASER#/media/File:Commercial_LASER_lines.svg).

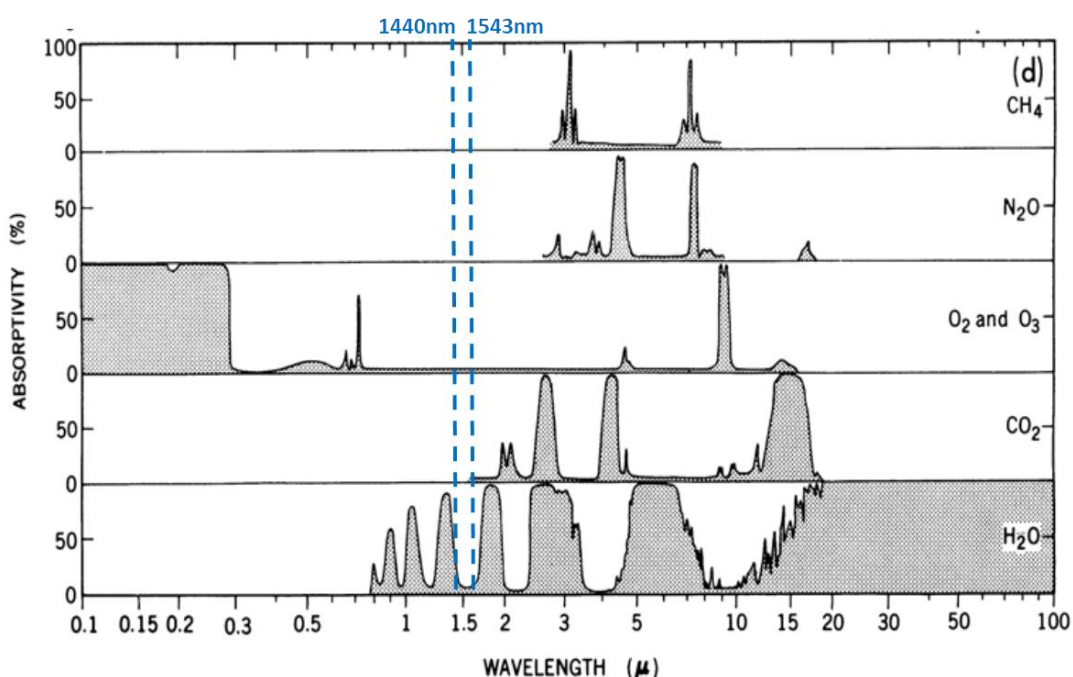


Σχήμα 4.2: (Αριστερά): Συντελεστής οπισθοσκέδασης όγκου (β) (σε $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$) στην ατμόσφαιρα σε σχέση με το μήκος κύματος (λ) σε (μm) για διαφορετικούς τύπους αιωρούμενων σωματιδίων, νεφών και ομίχλης. (Δεξιά): Συντελεστής εξασθένησης (σε m^{-1}) σε σχέση με το μήκος κύματος (λ) σε (μm) [CIMO (2008), Measures (1992), Deirmendjian (1964, 1969)].

Η εκπομπή ακτινοβολίας laser στα 355 nm αποτελούν ένα πιθανό μήκος κύματος χρήσης αλλά όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2 και όπως θα δούμε και αργότερα στο κεφάλαιο αυτό μέσα από κάποιες δοκιμές μέσω μοντελοποίησης (trials), στο μήκος κύματος αυτό επικρατεί η μοριακή σκέδαση έναντι της σωματιδιακής. Η επιλογή του κοντινού υπέρυθρου επιτρέπει την ακριβέστερη καταγραφή των αιωρούμενων σωματιδίων καθώς η σκέδαση από αυτά είναι εντονότερη από εκείνη των μορίων (Κεφ. 2). Αυτό δεν σημαίνει όμως ότι λαμβάνοντας υπόψη το κατάλληλο εκείνο γράφημα που προέρχεται από αξιόπιστο μοντέλο, όπως αυτό διορθώθηκε μετά από δοκιμές (Σχήμα 4.2), δεν μπορεί κάποιος, να λάβει υπόψη του το μοριακό σήμα οπισθοσκέδασης και να το περιλάβει στην επεξεργασία του.

Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζεται η ατμοσφαιρική απορροφητικότητα (%) από τα κυριότερα ατμοσφαιρικά αέρια σε διάφορα μήκη κύματος για διάφορα αέρια. Καθώς η ορατότητα εξαρτάται κατά πολύ από την παρουσία υγρασίας στην

ατμόσφαιρα, μπορεί κάποιος να διακρίνει τα πιο επιθυμητά μήκη κύματος εκπομπής και αντίστοιχης λήψης, που ευρίσκονται στο κοντινό υπέρυθρο, όπως για παράδειγμα στα 1440 nm (\approx 1500 nm) ή στα 1543 nm (\approx 1500 nm). Εκτιμάται ότι μία lidar συσκευή, με δυνατότητα επεξεργασίας ελαστικής ή / και μη ελαστικής σκέδασης και εκπομπή στο κοντινό υπέρυθρο όπως αυτό των 1440 nm ή Raman-shifted Nd:YAG laser στα 1543 nm (\approx 1500 nm), θα ήταν μία καλή επιλογή λύση για τον σκοπό που έχει τεθεί. Παρακάτω ακολουθούν κάποιες δοκιμές (trials) μεταξύ των μηκών κύματος 355 nm, 1440 nm και 1543 nm μέσω ενός αξιόπιστου μοντέλου θεωρητικής προσέγγισης Mieplot, το οποίο και προσομοιάζει την Mie σκέδαση, κάτω από διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες [<http://philiplaven.com/MiePlot.htm>].

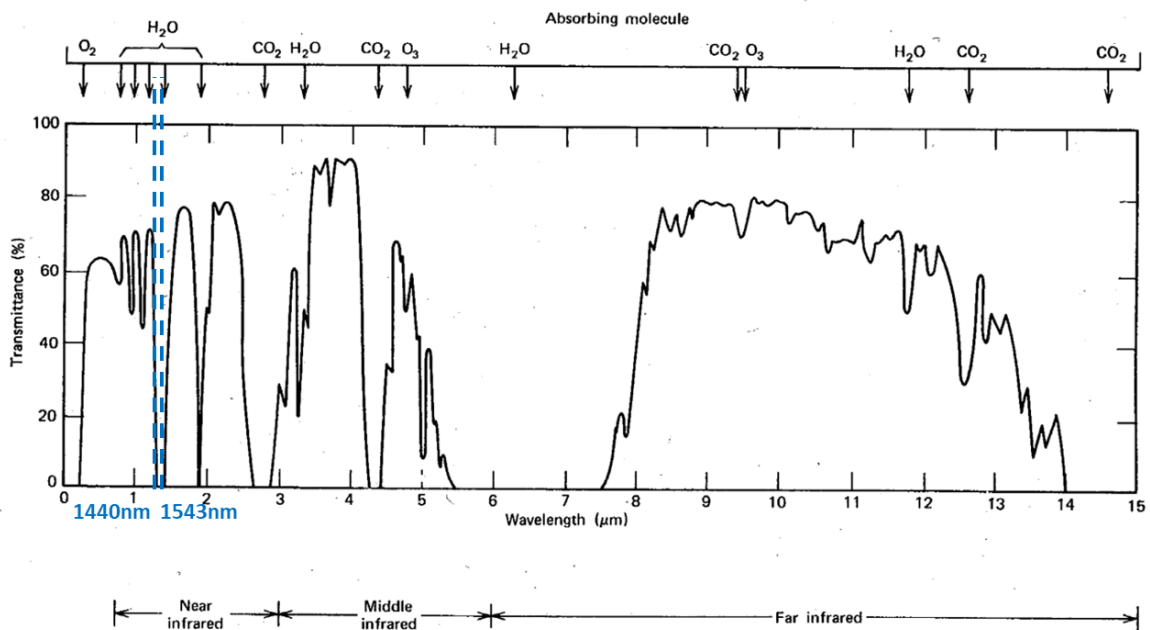


Σχήμα 4.3: Απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας (%) για τα κυριότερα ατμοσφαιρικά αέρια σε όλη την ατμόσφαιρα, σε συνάρτηση με το μήκος κύματος [Peixoto and Ort (1993)].

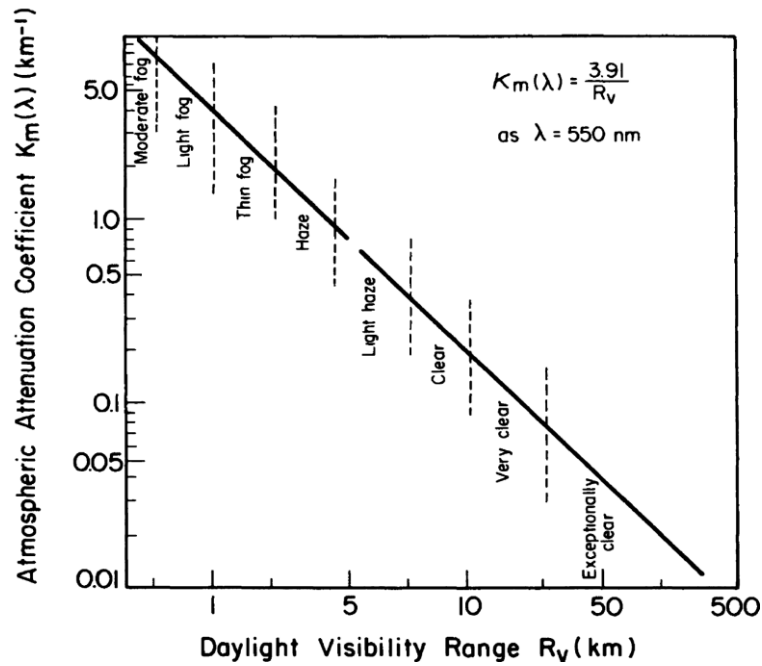
Ακολουθως, παρουσιάζουμε διαφορετικές περιπτώσεις (μέσω προσομοιώσεων) σκέδασης ακτινοβολίας στη γηινή ατμόσφαιρα, στα μήκη κύματος 355 – 1064 – 1500 nm [<http://philiplaven.com/MiePlot.htm>]. Ως σκεδαστές σε όλες τις δοκιμές θεωρήθηκαν σφαιρικά σωματίδια που προσομοιάζουν στα υδροσταγονίδια, με μέσο διάδοσης τον ατμοσφαιρικό αέρα στους 20° C με χρήση του αντίστοιχου δείκτη διάθλασης που χρησιμοποιεί το διεθνές μοντέλο IAPWS20C Complex για οπισθοσκέδαση σε planewave. Οι προσομοιώσεις έδειξαν πως τα 355 nm κυριαρχούν στο σήμα οπισθοσκέδασης από πολύ μικρή διάμετρο υδροσταγονιδίου 0.1μm

(LightHaze) έως και τα 120 μm (ModerateFog) [Measures (1992), Deirmendjian (1964, 1969)].

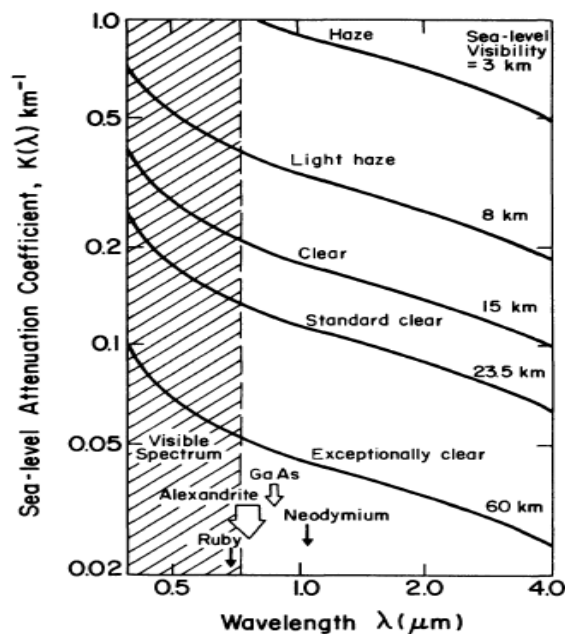
Η εκτίμηση Light Haze, Haze, Fog κτλ γίνεται σύμφωνα με την ορατότητα που αυτά επιτρέπουν στο ορατό φάσμα και συγκεκριμένα όπως αυτή δίνεται στο Σχήμα 4.5 σύμφωνα με τους [Measures (1992), Deirmendjian (1964, 1969)] όπου δίνεται ο δείκτης ατμοσφαιρικής εξασθένησης (α) σε km^{-1} σε σχέση με την ορατότητα (απόσταση) R_v σε km , στο ορατό φάσμα με μήκος κύματος ίσο με 550 nm και το οποίο λαμβάνει υπόψη του το Σχήμα 4.2 επίσης από Measures [Measures (1992), Deirmendjian (1964, 1969)]. Αντίστοιχα, για τον ορισμό συνθηκών για Haze κτλ στο θαλάσσιο περιβάλλον και πάνω από θάλασσα, που είναι χρήσιμη για την ναυσιπλοΐα, το Σχήμα 4.6 δίνει τον δείκτη της ατμοσφαιρικής εξασθένησης (α) σε km^{-1} σε σχέση με διαφορετικά μήκη κύματος [CIMO (2008), Kovalev and Eichinger (2004), David et al. (2015), Gong et al. (2011), Morille (2007)] και διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες, στο επίπεδο της θάλασσας.



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση της φασματικής διαπερατότητας (%) της ατμόσφαιρας για τα κυριότερα ατμοσφαιρικά αέρια, από το έδαφος έως την κορυφή της [Hudson and Hundson (1975)].

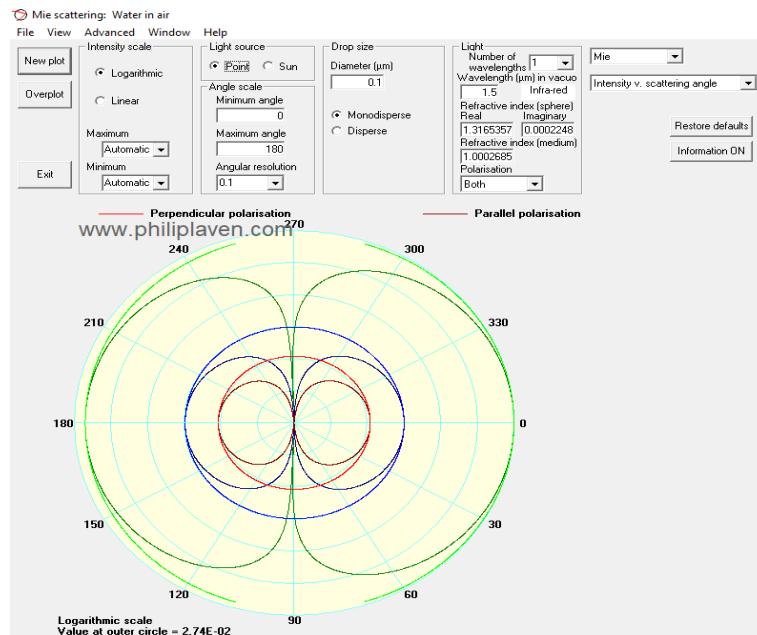


Σχήμα 4.5: Ο δείκτης ατμοσφαιρικής εξασθένησης (α) σε km^{-1} σε σχέση με την Ορατότητα (απόσταση) R_v σε km , στο μήκος κύματος των 550 nm και $\epsilon=0.02$ [Measures (1992), Deirmendjian (1964, 1969)].

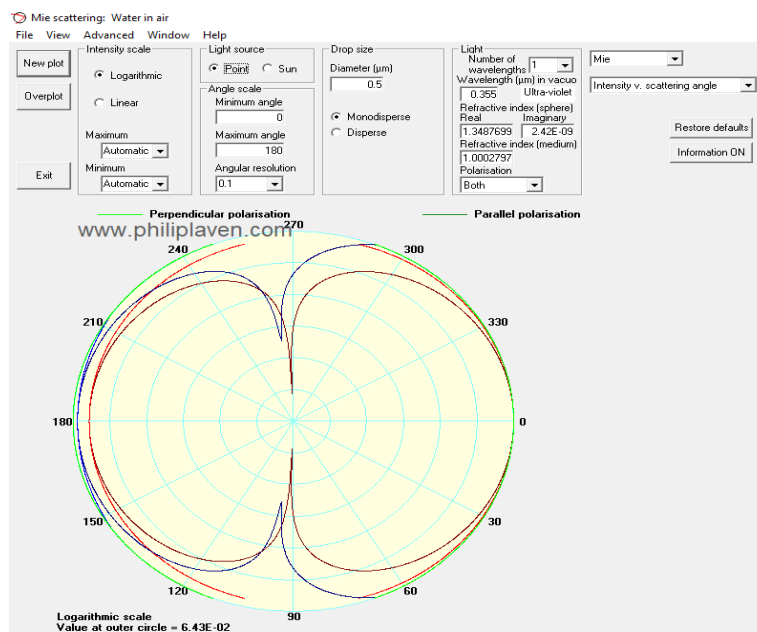


Σχήμα 4.6: Ο δείκτης ατμοσφαιρικής εξασθένησης (α) σε km^{-1} σε σχέση με διαφορετικά μήκη κύματος και διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες, στο επίπεδο της θάλασσας [Measures (1992), Deirmendjian (1964, 1969), Pantazis et al. (2017)].

α).

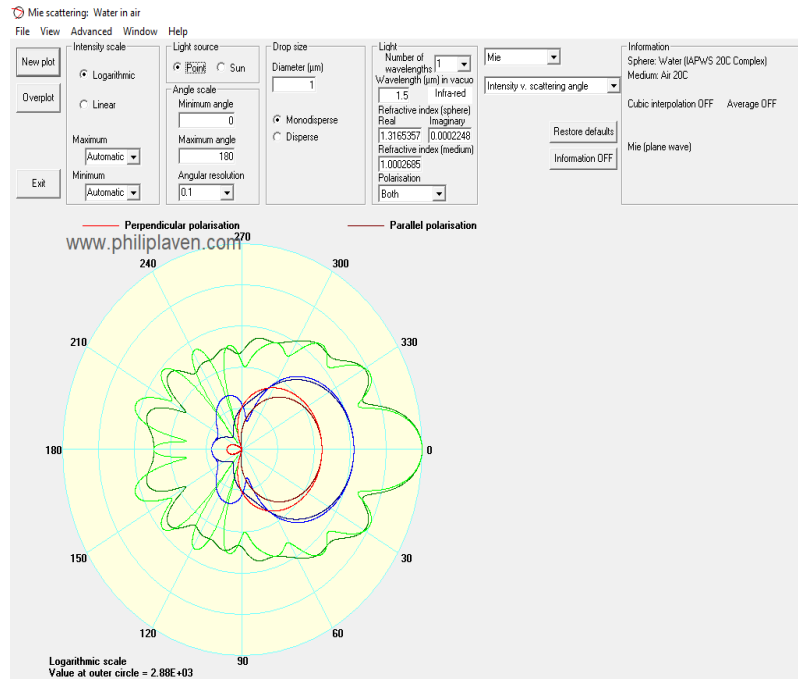


β).

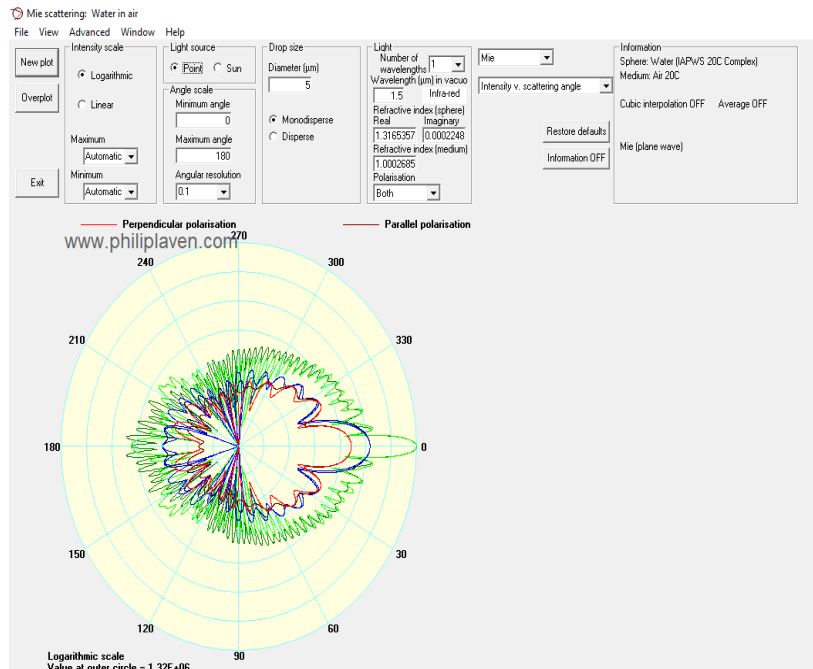


Σχήμα 4.7: α). Προσομοίωση διαμέτρου 0.1 μm (Haze), β). Προσομοίωση διαμέτρου 0.5 μm (Haze). Όπου με πράσινο χρώμα φαίνονται τα 355 nm, με μπλε τα 1064 nm και με κόκκινο τα 1500 nm [<http://philiplaven.com/MiePlot.htm>].

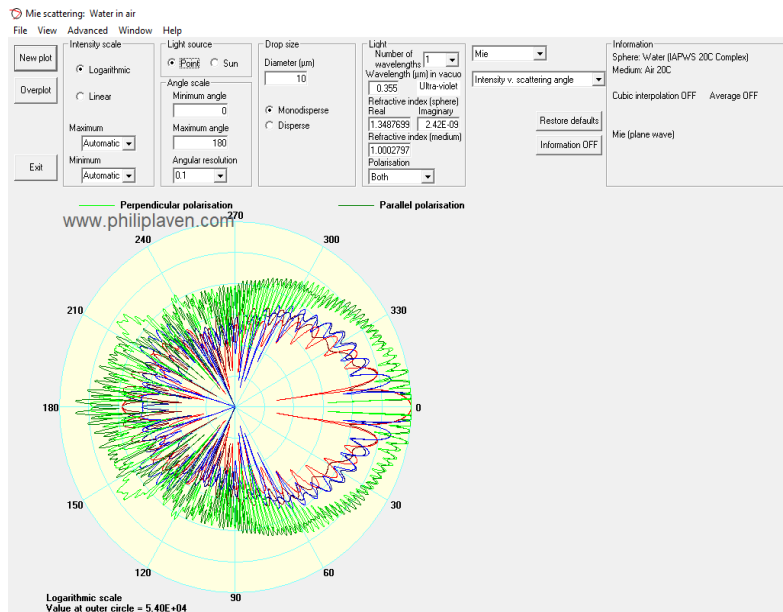
α).



β).

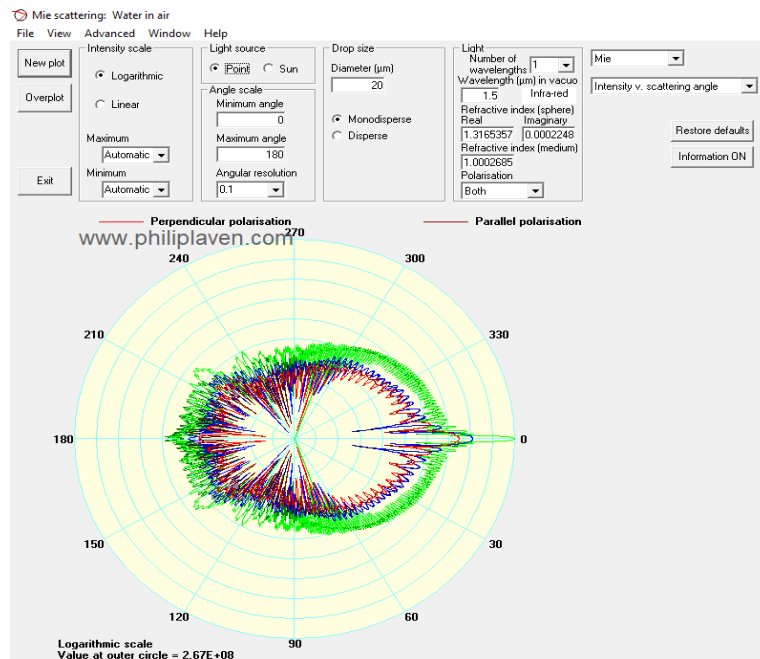


γ).

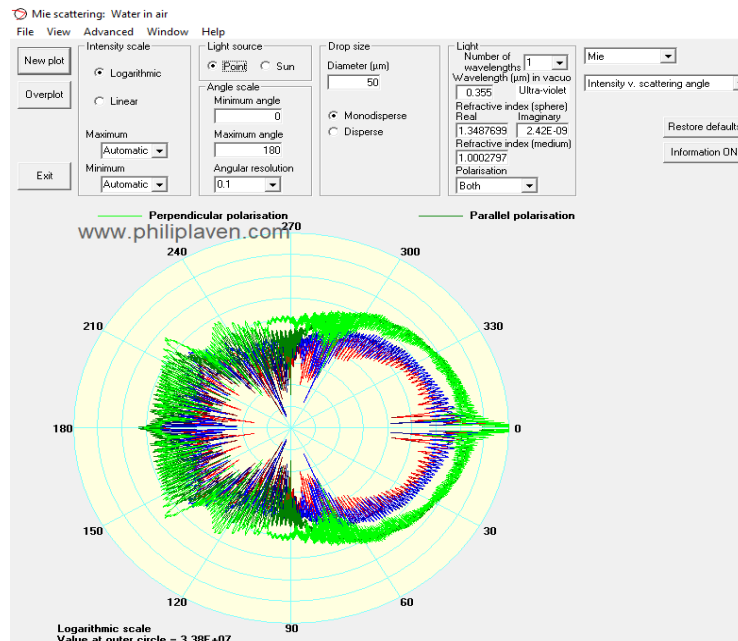


Σχήμα 4.8: α). Προσομοίωση διαμέτρου 1 μm (ThinFog) β). Προσομοίωση διαμέτρου 5 μm (ThinFog), γ). Προσομοίωση διαμέτρου 10 μm (ThinFog). Όπου με πράσινο χρώμα φαίνονται τα 355 nm, με μπλε τα 1064 nm και με κόκκινο τα 1500 nm [<http://philiplaven.com/MiePlot.htm>].

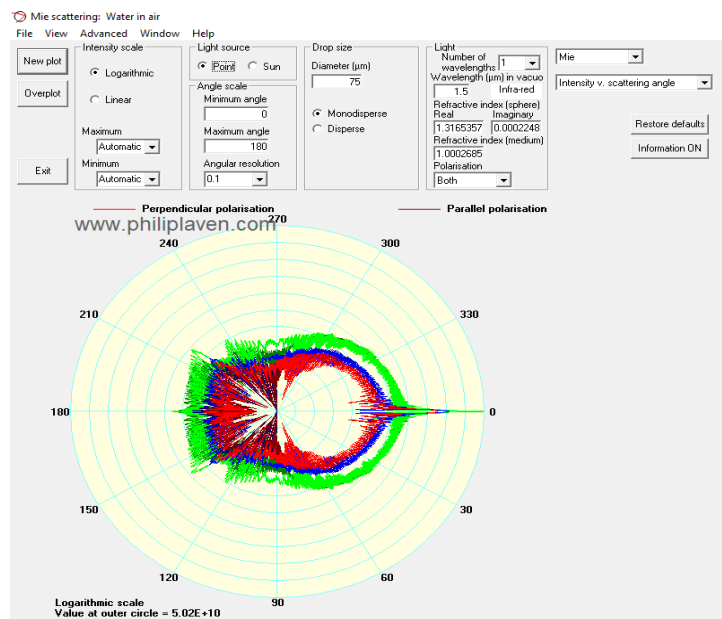
α).



β).

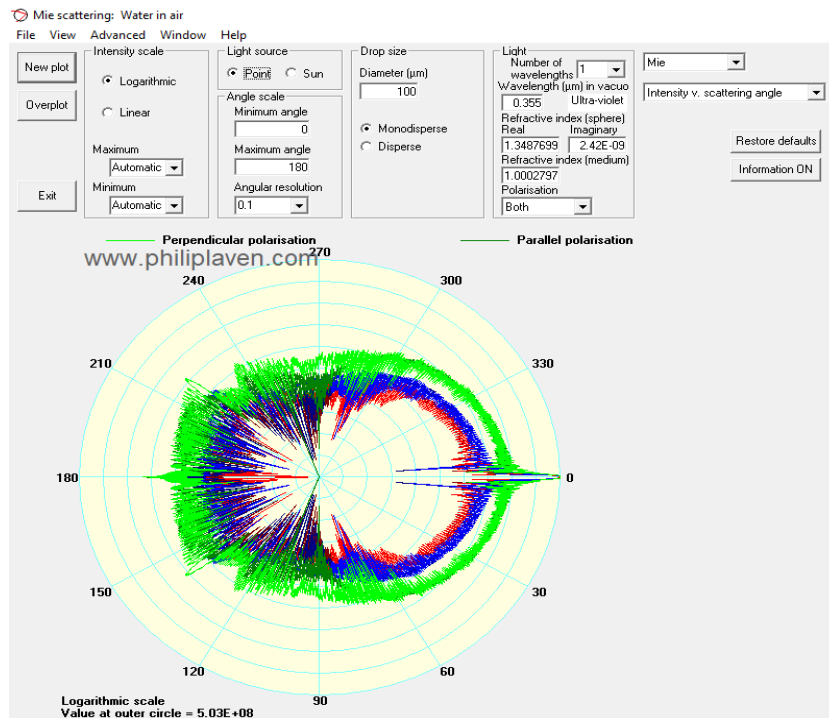


γ).

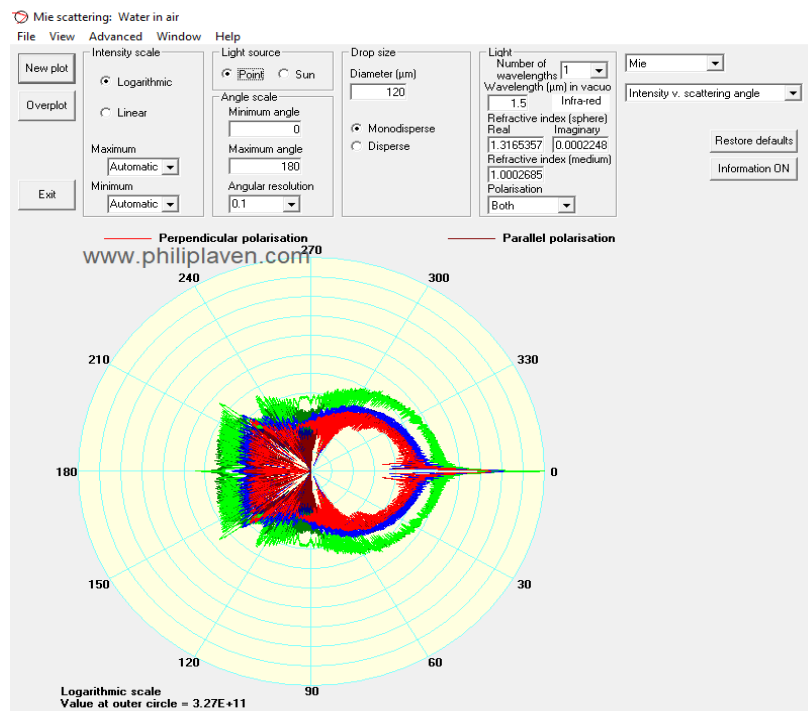


Σχήμα 4.9: α). Προσομοίωση διαμέτρου 20 μm (LightFog), β). Προσομοίωση διαμέτρου 50 μm (LightFog), γ). Προσομοίωση διαμέτρου 75μm (LightFog). Όπου με πράσινο χρώμα φαίνονται τα 355 nm, με μπλε τα 1064 nm και με κόκκινο τα 1500 nm [<http://philiplaven.com/MiePlot.htm>].

α).



β).



Σχήμα 4.10: α). Προσομοίωση διαμέτρου 100 μm (ModerateFog - Mist), β). Προσομοίωση διαμέτρου 50 μm (Moderate Fog - Mist). Όπου με πράσινο χρώμα φαίνονται τα 355 nm, με μπλε τα 1064 nm και με κόκκινο τα 1500 nm [<http://philiplaven.com/MiePlot.htm>].

Εδώ, παρουσιάστηκαν αποτελέσματα προσομοιώσεων εκπομπής ενός lidar στα μήκη κύματος 355 – 1064 – 1500 nm υπό διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες (Clear Sky, Haze, Fog κτλ) και σκέδασης ακτινοβολίας αυτής εντός της γήινης ατμόσφαιρας [<http://philiplaven.com/MiePlot.htm>]. Στην προσομοίωση ως σκεδαστές θεωρήθηκαν σφαιρικά σωματίδια που προσομοιάζουν στα υδροσταγονίδια, με μέσο διάδοσης τον ατμοσφαιρικό αέρα στους 20° C και με χρήση του αντίστοιχου δείκτη διάθλασης που χρησιμοποιεί το διεθνές μοντέλο IAPWS20C Complex για οπισθοσκέδαση σε planewave.

Οι προσομοιώσεις έδειξαν πως τα 355 nm κυριαρχούν στο σήμα οπισθοσκέδασης από πολύ μικρή διάμετρο υδροσταγονιδίου 0.1 μm (Light Haze) έως και τα 120 μm (ModerateFog) [Measures (1992), Deirmendjian (1964, 1969)]. Ο λόγος είναι ξεκάθαρα ότι εκτός της σκέδασης των υπαρχόντων υδροσταγονιδίων, το μήκος κύματος αυτό είναι πιο ευαίσθητο, από τα υπόλοιπα μήκη κύματος (1064 και 1500 nm) που εξετάζονται, στις μοριακές σκεδάσεις (Κεφ. 2).

Για τις ατμοσφαιρικές συνθήκες Clear Sky – Haze – Thin Fog και έως τα 5 μm διαμέτρου του σκεδαστή, καλύτερη ανταπόκριση σε οπισθοσκέδαση φαίνεται να έχουν τα 1064 nm. Ειδικότερα στην περίπτωση των 5 μm, τα 1500 nm φαίνεται να έχουν την μικρότερη οπισθοσκέδαση με διαφορά από τα υπόλοιπα. Ωστόσο, στις περιπτώσεις μεγαλύτερων υδροσταγονιδίων (> 5 μm) και για ατμοσφαιρικές συνθήκες άνω του Thin Fog (Light Fog και Moderate Fog), τα 1500 nm εκπομπής φαίνεται να έχουν εξίσου καλή ανταπόκριση στην οπισθοσκέδαση όπως και τα 1064 nm.

Κατά συνέπεια, μία συσκευή lidar και ειδικότερα 3-διάστατης σάρωσης, φαίνεται να μπορεί να εκτελέσει το έργο που επωμίζεται ένας επιτόπιος μετεωρολογικός σταθμός με in situ – επιτόπιες μετρήσεις, αλλά με την δυνατότητα Remote Sensing – τηλεπισκόπισης σε αποστάσεις km, καθώς έχει την ευαισθησία να ανιχνεύει τα μικροσωματίδια της ατμόσφαιρας με ακρίβεια και ιδιαίτερα εκείνα που είναι ενδιαφέροντος όπως τα αιωρούμενα σωματίδια και την επίδραση στην ορατότητα αεροδρομίου ή οδικού / ναυσιπλοϊκού δικτύου, που μπορούν να επιφέρουν. Η αντιληψη αυτή μπορεί να οδηγήσει σε ένα εκτενέστερο δίκτυο lidar συσκευών και ειδικότερα 3-διάστατης σάρωσης τα οποία σε συνδυασμό με την συμβατική οργανολογία μετεωρολογικών μετρήσεων σε μια ευρύτερη περιοχή, μπορεί να αντικαταστήσει ή / και να

συμπληρώσει επάξια έναν ευρύτερο μετεωρολογικό σταθμό και ειδικότερα σε μετρήσεις τηλεπισκόπησης σύμφωνα και με την δυνατότητα πλάγιας μέτρησης (slant range measurements), σύμφωνα και με τις νέες μεθόδους και αλγόριθμους που αναπτύσσονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Εκεί, θα παρουσιαστούν νέες τέχνικές και αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος οπισθοσκέδασης από δεδομένων μιας 3-διάστατης lidar συσκευής ή δικτύου lidar συσκευών, με μεγαλύτερη ακρίβεια από τις συμβατικές και αυτών που περιγράφησαν ήδη. Στόχος, ο οποίος τέθηκε από τον συγγραφέα και επετεύχθει, ήταν οι αλγόριθμοι αυτοί να είναι ευέλικτοι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε 1 έως και 3-διαστάσεις χρησιμοποιώντας ακόμη και την 4-διάσταση, τον χρόνο, ενεργοί σε ελαστική αλλά και μη-ελαστική σκέδαση, ικανότητας να ανταποκρίνονται σε lidar συσκευή πολλαπλών ή μονού μήκους κύματος, να μπορούν να συνεργάζονται προς την εύρεση βέλτιστης λύσης και να μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα ή συλλογικά και αυτοματοποιημένα, ώστε η συσκευή ή συσκευές αυτές lidar να μπορούν να τεθούν στην όποια τοποθεσία προς «επιχειρησιακή» λειτουργία (Κεφ. 5 παρακάτω).

5.

Αλγόριθμοι Εύρεσης Μετεωρολογικών Παραμέτρων

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε νέες τεχνικές και αλγόριθμους επεξεργασίας δεδομένων lidar μιας 3-διάστατης lidar συσκευής ή δικτύου lidar συσκευών, με ευέλικτη επεξεργασία ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σε 1 έως και 3-διαστάσεις χρησιμοποιώντας ακόμη και την 4-διάσταση, το χρόνο, με βάση την ελαστική αλλά και μη-ελαστική σκέδασης lidar και με στόχο την «επιχειρησιακή» λειτουργία τους.

Στην αμέσως παρακάτω ενότητα θα παρουσιάσουμε μία νέα τεχνική ανάκτησης της ορατότητας σε περισσότερες των μία, διαστάσεων, εντός ομογενούς αλλά και μη-ομογενούς ατμόσφαιρας, στηριζόμενοι κυρίως στην εργασία των [Kovalnen and Eichinger (2004)]. Η αδυναμία αυτή, δηλαδή μιας lidar μέτρησης σε κεκλιμένο επίπεδο (slant-range), σε 1, 2 και 3-διαστάσεις, εντός ομογενούς, αλλά και ανομοιογενούς ατμόσφαιρας, αναγνωρίστηκε από τον συγγραφέα σύμφωνα με την παρούσα διεθνή βιβλιογραφία και πρακτική [Vieeze et al. (1972), Kohl et al. (1978), Pantazis et al. (2017-2019)].

5.2 Τεχνική 3D Stepping ή LADDER

Στην υπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία ([Kohl (1978), Vieeze et al. (1972)], οι συντελεστές οπισθοσκέδασης ($\beta_{\text{aer}}(\lambda, R)$) και εξασθένησης ($\alpha_{\text{aer}}(\lambda, R)$) μπορούν να εξαχθούν από κεκλιμένες μετρήσεις συστήματος lidar. Όμως οι προκύπτουσες τιμές των παραπάνω μεγεθών, συνδέονται με διάφορες παραδοχές όπως εκείνες της ατμοσφαιρικής ομοιογένειας καθ' ύψος σε μια ευρεία περιοχή της ατμόσφαιρας. Οι μετρήσεις αυτές υπό παραδοχές επί μίας πραγματικής, ανομοιογενούς, ατμόσφαιρας

δεν μπορούν να θεωρηθούν ασφαλείς και ειδικότερα στην ανάκτηση της ατμοσφαιρικής ορατότητας και για εφαρμογές κυρίως στην ασφάλεια των πτήσεων σε αεροδρόμια ή στη Μετεωρολογία και την προγνωση του καιρού, την ασφάλεια της Ναυσιπλοΐας, της μέτρησης μέσω δορυφορικών συστημάτων παρατήρησης της ατμόσφαιρας (Earth Observation) κτλ.

Είναι γνωστό στους χρήστες συσκευών lidar κατακόρυφης μετρήσης, ότι υπάρχει κάποιος ύψος πάνω από το οποίο, δεν υπάρχουν αιωρούμενα σωματίδια (τυπικά πάνω από το ύψος των 10-15 km). Ακολουθώντας αυτή τη λογική, ο Klett (1981) όρισε το ύψος αναφοράς R_F όπου οι τιμές των $\alpha(\lambda, R)$ και $\beta(\lambda, R)$ είναι ίσες με τις μοριακές τους τιμές.

Ακολούθως, θα δείξουμε ότι, με τη χρήση ενός τρισδιάστατου συστήματος lidar, χρησιμοποιώντας τη νέα τεχνική 3D Stepping ή LADDER που αναλύεται εδώ, μπορούμε να ανακτήσουμε πλήρως (εντός του σφάλματος της μεθόδου εύρεσης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος που αρχικά χρησιμοποιείται) το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα $P(\lambda, R)$ καθώς και τους συντελεστές $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ ή $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (Εξ. 1, 10-18), πραγματοποιώντας μετρήσεις από την κάθετη προς την οριζόντια κατεύθυνση. Το σχήμα που δημιουργείται (Σχήμα 5.1) θυμίζει «σκάλα» για αυτό και η τεχνική αυτή ονομάζεται 3D Stepping ή LADDER technique.

Συγκεκριμένα, θεωρούμε μια συσκευή 3D lidar αρχικά τοποθετημένη για κάθετη ή σχεδόν κάθετη εκπομπή, με κατεύθυνση προς την ατμόσφαιρα και σε τέτοια γωνία ώστε το σύστημα lidar να λαμβάνει οπισθοσκέδαση από το ύψος R_F (τυπικά κατακόρυφη γωνία $\varphi = 0^\circ - 20^\circ$). Κατόπιν, εντοπίζεται το στρώμα της ατμόσφαιρας όπου δεν υπάρχουν αιωρούμενα σωματίδια εκεί όπου οι τιμές των συντελεστών εξασθένησης και οπισθοσκέδασης αγγίζουν μοριακές τιμές (Σχήμα 4.2 - σκέδαση Rayleigh) (τυπικά ανω των 10-15 km, ώστε το λαμβανόμενο σήμα lidar από το ύψος αυτό να ταυτίζεται με το αντίστοιχο της μοριακής ή σχεδόν μοριακής σκέδασης (τυπικά $SNR = 2-3$) (Rayleigh fit). Στη συνέχεια, καθορίζεται το ύψος R_F και μετράται η τιμή $P'(\lambda, R)$, ώστε η τιμή των συντελεστών $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ ή $\beta_{aer}(\lambda, R)$ είναι μηδενική (ή σχεδόν μηδενική) λόγω απουσίας αιωρούμενων σωματιδίων (Εξ. 1, 10-18).

Τέλος, συνεχίζονται οι μετρήσεις lidar από κάθετη προς οριζόντια κατεύθυνση, λαμβάνοντας σήματα οπισθοσκέδασης με βήματα γωνίας $\varphi=1^\circ$ ή λιγότερο, αναλόγως καιρικών συνθηκών και σε αποστάσεις μικρότερες (ή κατ'επιλογήν μεγαλύτερες) κατά 1–2 bin απόστασης (όπου 1 bin αντιστοιχεί στη χωρική ακρίβεια μέτρησης της συσκευής lidar). Έτσι από την τιμή $P'(\lambda, R_{Ray})$ ή $P'(\lambda, R_F)$, ανακτώνται νέες τιμές $P_{RF-new}'(\lambda, R_{RF-new})$, κτλ (Σχήμα 5.1) οι οποίες περιέχουν και την οπισθοσκέδαση των αιωρούμενων σωματιδίων οπότε και υπολογίζονται αντίστοιχα οι τιμές $\alpha_{aer}(\lambda, R_{new})$,

$\beta_{aer}(\lambda, R_{new})$ κτλ.

Δηλαδή, στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα $P'(\lambda, R_{Ray})$ ή $P'(\lambda, R_F)$ αφαιρούμε 1-2 bin απόστασης (1bin = 7,5 m σε αυτή την εργασία) και το σήμα οπισθοσκεδάσης σε αυτήν την απόσταση αποτελεί την τιμή του σήματος στην απόσταση R_1 . Κατόπιν, η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται στη επόμενη γωνία διαφοράς μειωμένη κατά 1° (ή και λιγότερο) από την προηγούμενη και το σήμα $P_{RF-new}'(\lambda, R_{RF-new})$ αποτελεί την τιμή του σήματος της επόμενης δέσμης σήματος. Γίνεται εκμετάλλευση δηλαδή του γεγονότος ότι σε πολύ μικρές αποστάσεις η ατμόσφαιρα όντως μπορεί να παραμένει ομοιογενής, κάνοντας χρήση οριακών συνθηκών με όριο την προηγούμενη «κοντινή» μέτρηση (Σχήμα 5.2). Επιλέγονται δηλαδή τα σημεία R_F και R_{F-new} εκεί όπου ισχύει η παρακάτω συνθήκη (Εξ. 37-41):

$$R_{F-new} < R_F \quad (37)$$

$$R_{F-new} = R_F - k * \Delta R \quad (38)$$

$$P'_{(m)}(\lambda, R_n) / P'_{(m+1)}(\lambda, R_{n\pm k}) \sim 1 \quad (39)$$

και $\alpha_{aer(m)}(\lambda, R_n) / \alpha_{aer(m+1)}(\lambda, R_{n\pm k}) \sim 1 \quad (40)$

και $\beta_{aer(m)}(\lambda, R_n) / \beta_{aer(m+1)}(\lambda, R_{n\pm k}) \sim 1 \quad (41)$

όπου, $R_F = R_{reference} = R_n$ κάθε φορά και $R_{F-new} = R_{n\pm k}$ το νέο R_F αντίστοιχα, το n , αναφέρεται στον αριθμό των bins στην απόσταση R_F κάθε φορά, $m = 1,2,3... \text{ ο αριθμός κάθε μέτρησης, και το } k = 1,2,3...$

Προκειμένου λοιπόν να ανακτηθούν οι τιμές $\alpha_{aer}(\lambda, R_{F-new})$, απαιτείται μια τιμή του του λόγου lidar (Εξ. 1) από τον χρήστη, η οποία τυπικά έως σήμερα έπιαρνε τιμές 20 – 40 sr κατ' εκτίμηση του χρήστη και θεωρούνταν σταθερή για κάθε μέτρηση Θεωρώντας ομοιγένεια της ατμόσφαιρας στον κάθετο άξονα. Στην συγκεκριμένη εργασία και στην τεχνική 3D Stepping ή LADDER, η τιμή αυτή μπορεί να είναι μεταβλητή για κάθε μέτρηση και ακολουθεί τις τιμές «πρότυπα» του λόγου lidar που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγορίθμου Weather Phenomena ή METCON, όπως αυτός περιγράφεται σε παρακάτω ενότητα και λαμβάνει υπόψη το Σχήμα 4.2 ή / και την εργασία των [Haarig et al. (2018), Müller et al. (2007), Burton (2013)].

Με τον τρόπο αυτό, μετά από κάθε διαδοχική μέτρηση lidar μπορούμε να ανακτήσουμε τις αντίστοιχες τιμές $\beta_{aer}(\lambda, R)$ και $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, λαμβάνοντας υπόψη τις

προηγούμενες (τελευταίες γνωστές) τιμές αυτών των συντελεστών και αλλάζοντας κάθε φορά την R_F των Εξ. 1, 10-18, στην R_{F-new} . Ταυτόχρονα, πραγματοποιείται μια συνεχής "βαθμονόμηση" των τιμών του σήματος στην κάθε νέα κάθετη γωνία μικρότερου ύψους, στην τιμή του σήματος lidar που αρχικά είχε βαθμονομηθεί από την κάθετη ή σχεδόν κάθετη γωνία, γνωστού ύψους $R_F = R_n$ και επιπέδου του σήματος σε όλη αυτή την απόσταση, παίρνοντας από την προηγούμενη στην επόμενη θέση ελαφρώς αλλαγμένου ύψους, στην θέση R_{n-k} .

Με αυτό τον τρόπο, για κάθε "νέο" ύψος αναφοράς R_{F-new} που το σύστημα lidar κατευθύνει την δέσμη του «βαδίζοντας» προς την οριζόντια θέση, γίνεται εφικτό να υπολογιστούν αξιόπιστα οι τιμές $P(\lambda, R)$ και $\beta_{aer}(\lambda, R)$, $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ από την κάθετη προς την τελική υπό κλίση γωνία μέτρησης (Slant Range measurements) ή / και οριζόντια (Horizontal measurements), αποφεύγοντας έτσι τις αμφισημίες που σχετίζονται με παραδοχές, όπως η υπόθεση της ομοιογενούς ατμόσφαιρας, η οποία προκαλεί μεγάλα σφάλματα, ιδιαίτερα σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Ωστόσο, στην τεχνική 3D Stepping ή LADDER, δεχόμαστε επίσης ένα είδος ατμοσφαιρικής «ομοιογένειας» που βασίζεται στις τιμές $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ ή $\beta_{aer}(\lambda, R)$, του σήματος lidar διορθωμένου ως προς την απόσταση (RCLS) μεταξύ διαδοχικών ισοδυνάμων ατμοσφαιρικών στρωμάτων (Σχήμα 5.2). Το όριο της 1° μπορεί να αλλάξει και είναι ρυθμιζόμενο από τον χρήστη προς πιο ακριβείς μετρήσεις, ανάλογα με την αστάθεια των καιρικών συνθηκών. Όσο πιο ασταθείς είναι οι παρατηρούμενες καιρικές συνθήκες, τόσο μικρότερο είναι το όριο της μέτρησης από εκείνο της, κατά κανόνα, 1° λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες των Εξ. 37-41.

Μέθοδοι όπως η τεχνική της κλίσης ή η μέθοδος λόγου (slope technique ή ratio method αντίστοιχα) [Kovalev and Eichinger (2004), Vieveze et al. (1972)] χρησιμοποιούν κυρίως την παραδοχή της ομοιογενούς ατμόσφαιρας σε μεγαλύτερες αποστάσεις και υπολογίζονται «παραμορφωμένες», οι οποίες ατμοσφαιρικές παραμέτροι. Ωστόσο, με τον τρόπο αυτό, το σφάλμα στις υπολογιζόμενες παραμέτρους αυξάνεται λόγω της αστάθειας των επικρατούντων ατμοσφαιρικών συνθηκών, ως συνάρτηση της απόστασης (R). Άλλες μέθοδοι, όπως η πολυγωνική μέθοδος [Kovalev and Eichinger (2004)] υποθέτουν ότι η τιμή $\beta_{aer}(\lambda)$ είναι σταθερή στο οριζόντιο επίπεδο και είναι συγκεκριμένη η τιμή αυτή σε κάθε ύψος, κάτι που δεν ισχύει για την τεχνική 3D Stepping ή LADDER και μία "πραγματική - ανομοιογενής" (ειδικά σε αποστάσεις Km), ατμόσφαιρα.

Επιπλέον, η μέθοδος του οπτικού βάθους σύμφωνα με το [Kovalev and Eichinger (2004)] υποθέτει ότι ο συντελεστής εξασθένησης είναι σταθερός και το οπτικό βάθος πρέπει να υπολογισθεί και από άλλες ανεξάρτητες μετρήσεις στην

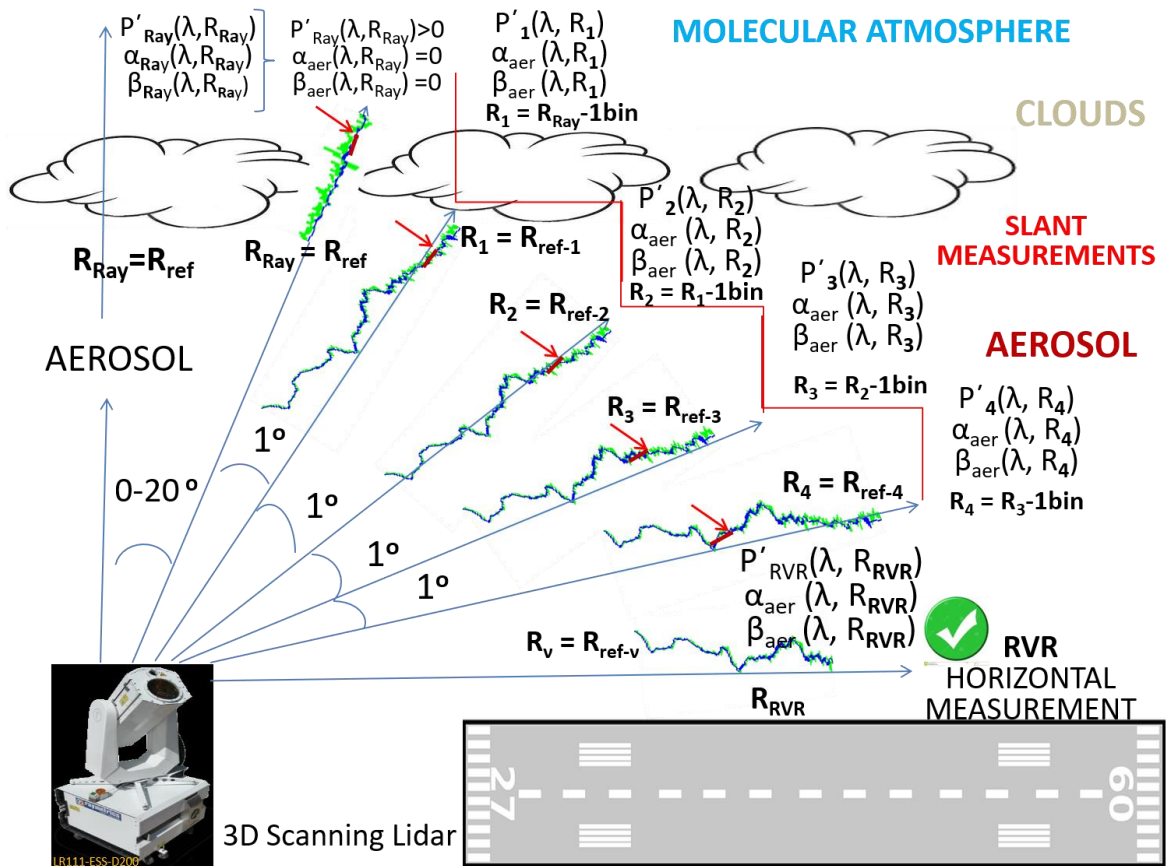
κατακόρυφη διεύθυνση (π.χ. μετρήσεις ηλιακού φωτομέτρου ή από ένα σύστημα Raman lidar [Ansmann (1992)]). Ακόμη και αν αυτή η μέθοδος φαίνεται ότι λειτουργεί καλά υπό διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, το πρόβλημα γίνεται αισθητό όταν προσπαθούμε να κάνουμε μετρήσεις στο οριζόντιο επίπεδο, όπου ο συντελεστής εξασθένησης δεν μπορεί να διατηρηθεί σταθερός, ειδικά σε επικλινείς - οριζόντιες μετρήσεις και σε μεγαλύτερες αποστάσεις, όπου το σήμα lidar μπορεί να γίνει ιδιαίτερα θορυβώδες.

Η τεχνική 3D Stepping ή LADDER θα μπορούσε ίσως να συγκριθεί με τη BPS μέθοδο [Measures (1992)], η οποία υποθέτει ότι ο συντελεστής εξασθένησης είναι σταθερός και ίσος με μία γνωστή τιμή σε συγκεκριμένη περιοχή (συνοριακές συνθήκες). Η ίδια τεχνική χρησιμοποιήθηκε από τον Klett (Klett, 1981). Έτσι, αυτή η ρύθμιση των αρχικών συνθηκών στον κατακόρυφο άξονα είναι η μόνη ομοιότητα με σε σχέση με την προτεινόμενη τεχνική 3D Stepping ή LADDER.

Στην τελευταία αυτή τεχνική, μετά τις πρώτες κατακόρυφες μετρήσεις και τη χρήση των αλγορίθμων απόσβεσης θορύβου πχ. NOSUB - S/R ή DENOISING - 1/2 (βλ. παρακάτω), υπολογίζεται αρχικά το ύψος αναφοράς (R_F), όπου οι τιμές των $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ ή / και $\beta_{aer}(\lambda, R)$ καθίστανται μηδενικές (ή σχεδόν μηδενικές). Στη συνέχεια, ανακτάται το $\beta_{aer}(\lambda, R)$ ή / και το $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ σε χαμηλότερα ύψη θεωρώντας μία πολύ μικρή περιοχή της ατμόσφαιρας ως ομογενή, προκειμένου να θεωρηθεί αυτή ως νέα οριακή συνθήκη πολύ μικρής $\Delta R = R_F - R_{F-new}$, ως αποδεκτή και ικανή συνθήκη για να βαθμονομηθεί το νέο σήμα στην νέα αυτή απόσταση R_{F-new} , σε σχέση με την τιμή του προηγούμενου σήματος στην απόσταση R_F , κρατώντας όμως το “νέο” αυτό σήμα τα δικά του «χαρακτηριστικά», σε όλο το εύρος της απόστασης, δηλαδή την δική του διαμόρφωση τιμών σε σχέση με την απόσταση.

Έτσι, με την τεχνική 3D Stepping ή LADDER και χρησιμοποιώντας τις παραπάνω Εξ. 1, 10-18, επεκτείνεται ο τρόπος σκέψης για μετρήσεις επικλινούς έως και οριζόντιας απόστασης με διαφορετικές τιμές βαθμονόμησης οπισθοσκεδαζόμενου σήματος κάθε φορά. Αυτές οι νέες τιμές θα λαμβάνονται υπόψη από τον αλγόριθμο Weather Phenomena ή METCON που θα αναλύσουμε παρακάτω ανάλογα με τον τύπο του μελετούμενου ατμοσφαιρικού στρώματος (π.χ. λεπτή ομίχλη, μέτρια ομίχλη, θολότητα κλπ.). Ακόμη, η νέα αυτή τεχνική της επικλινούς λήψης οπισθοσκεδαζόμενου σήματος lidar σε όλες τις δυνατές κάθετες και οριζόντιες γωνίες (φ και θ αντίστοιχα), μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας την όποια μέθοδο (Klett, Raman κτλ) λαμβάνοντας υπόψη και τις εργασίες των [Haarig, et al. (2018), Müller et al. (2007), Burton (2013)], όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις δικές του τιμές των $\beta_{aer}(\lambda, R)$ ή / και $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ ή αυτές του σχήματος Σχήματος 4.2 όπως και των

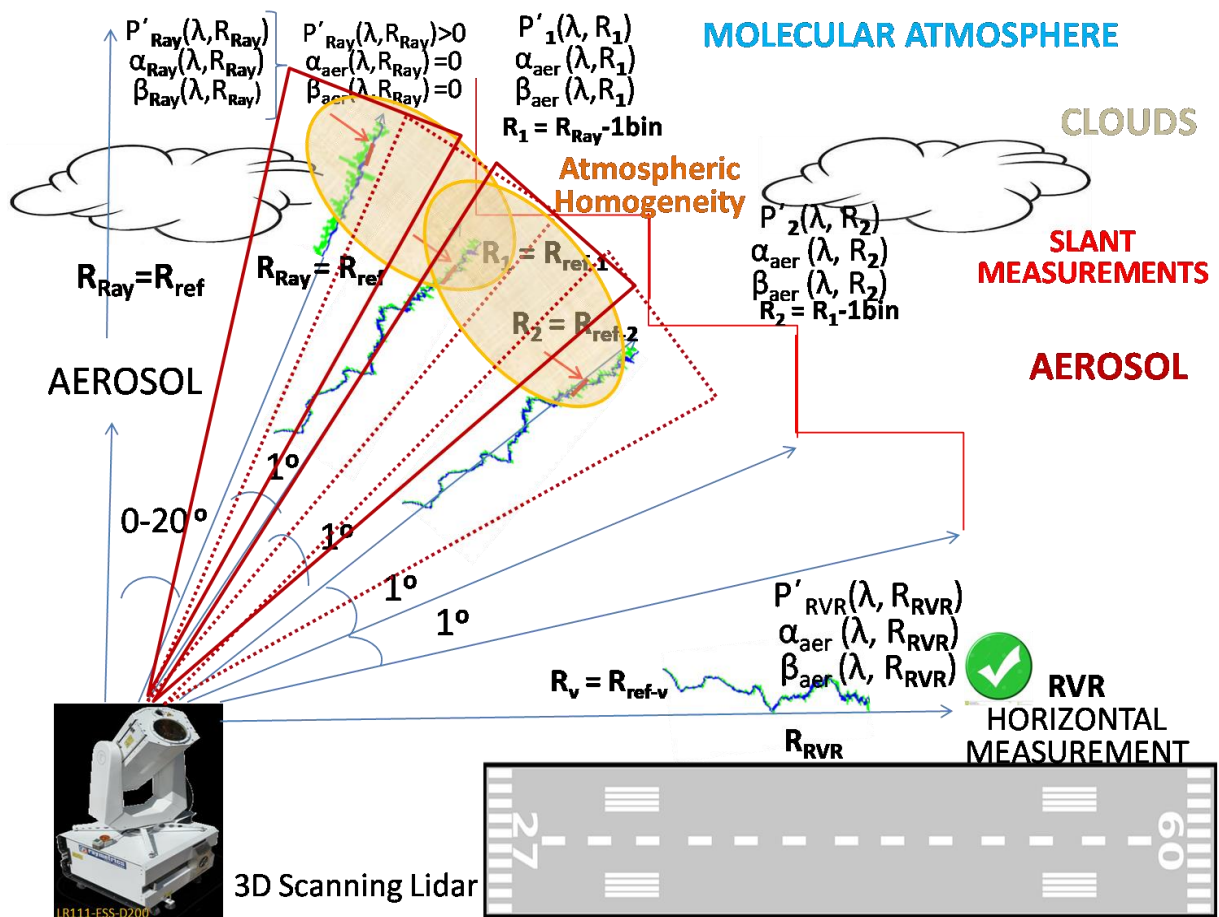
[Deirmendjian (1964), Wright (1966), Measures (1992), Kovalev and Eichinger (2004), David et al. (2015), Gong et al. (2011), Morille (2007)].



Σχήμα 5.1: Τεχνική 3D Stepping – LADDER. Σύστημα lidar κινούμενο από Κάθετη (VOR) σε Οριζόντια (HOR - RVR) διεύθυνση με το σχετικό σήμα οπισθοσκέδασης. Όπου τα κόκκινα βέλη δείχνουν την μειούμενη (ή την αυξανόμενη) απόσταση επί της οποίας θεωρείται η τιμή του σήματος $P(\lambda, R)$ ή / και $\alpha(\lambda, R)$ και $\beta(\lambda, R)$, αξιόπιστη [Pantazis et al. (2017)].

Όσον αφορά τις μετρήσεις της ορατότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας, σύμφωνα με τους κανόνες των WMO και ICAO και χρησιμοποιώντας τον εμπειρικό νόμο Koschmieder (στα 550 nm), η ορατότητα (Vis) (σε km) σε σχέση με την ατμοσφαιρική εξασθένηση α (σε km^{-1}) δίνεται από τις (Εξ. 2-7) [Kovalev and Eichinger (2004)], λαμβάνοντας υπόψη ότι το εκτιμώμενο σφάλμα των ανακτημένων τιμών ορατότητας (Vis) σε κάθετο – οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο και εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια της μεθόδου ανάκτησης των συντελεστών των τιμών των $\alpha_{\text{aer}}(\lambda, R)$ ή / και $\beta_{\text{aer}}(\lambda, R)$. Όταν εφαρμόζεται η κλασική μέθοδος αντιστροφής του Klett [Klett

(1881, 1985)], όπου χρησιμοποιείται ως δεδομένη μια σταθερή τιμή $C(\lambda, R)$ που καθορίζεται από μέσο οπτικό βάθος αιωρούμενων σωματιδίων στον κάθετο άξονα (Aerosol Optical Depth - AOD) και λαμβάνεται από ένα κοντινό φωτομέτρο ηλιοφάνειας [Pappalardo et al. (2004)], οι τιμές $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ ανακτώνται με αβεβαιότητα της τάξης του 20-30% [Landulfo et al. 2005]]. Χρησιμοποιώντας, όμως την τεχνική Raman (κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας αλλά και την ημέρα) [Ansmann et al. (1992)] για την ανάκτηση της κατακόρυφης κατανομής του $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, η αβεβαιότητα στην ανάκτηση του $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ μειώνεται στα ~ 5-15% [Ansmann et al. (1992), Mattis et al. (2002)].



Σχήμα 5.2: Τεχνική 3DStepping – LADDER, ένδειξη Ατμοσφαιρικής Ομοιογένειας (Atmospheric Homogeneity) μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων.

Η εκτίμηση σφάλματος για την τεχνική 3D Stepping ή LADDER στην αρχική (κατακόρυφη) μέτρηση που αφορά την ανάκτηση του συντελεστή $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ ή / και $\beta_{aer}(\lambda, R)$, εξαρτάται μόνο από την εκτίμηση σφάλματος της χρησιμοποιούμενης μεθόδου (πρακτικά Klett ή Raman). Στην περίπτωση μιας μη-ομοιογενούς ατμόσφαιρας και χρησιμοποιώντας για παράδειγμα τη μέθοδο Klett, λαμβάνονται οι τιμές του $C(\lambda, R)$ σύμφωνα με τιμές αλγορίθμου Weather Phenomena ή METCON παρακάτω (με τη λήψη του λόγου των τιμών $\alpha_{aer}(\lambda, R) / \beta_{aer}(\lambda, R)$) και τα εύρη των $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, $\beta_{aer}(\lambda, R)$ για τους διάφορους τύπους αερολυμάτων (λεπτή ομίχλη, θολότητα, ελαφριά θολότητα κλπ.).

Έτσι, λύνεται το πρόβλημα αβεβαιότητας στον υπολογισμό των $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και $\beta_{aer}(\lambda, R)$ που προκύπτει από την ύπαρξη των διαφορετικών ατμοσφαιρικών στρωματώσεων και την αποδοχή ευρύτερων παραδοχών ομοιογένειας εντός ανομοιογενούς ατμόσφαιρας (Πίνακας 5.1), τα οποία λαμβάνονται υπόψη από Weather Phenomena ή METCON στην όποια κατεύθυνση και έτσι, με διαδοχικές «κοντινες» μετρήσεις της μεθόδου 3D Stepping ή LADDER, επιτυγχάνεται η ανάκτηση τιμών της κατακόρυφης – κεκλιμένης κατανομής των $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και / ή $\beta_{aer}(\lambda, R)$ χωρίς επιπλέον σχετικό σφάλμα. Στη συνέχεια και εφόσον ενδιαφέρει ο υπολογισμός της ορατότητας (Vis), μπορεί να αντληθεί η αβεβαιότητα υπολογισμού της ορατότητας (ΔVis) (Εξ. 42), λαμβάνοντας υπόψη τις Εξ. 1, 10-18 και η οποία βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στην αβεβαιότητα της μεθόδου ανάκτησης των τιμών των σχετικών συντελεστών (πχ Klett ή Raman):

$$\Delta Vis = Vis * [\Delta \alpha_{aer}(\lambda, R) / \alpha_{aer}(\lambda, R)] \quad (42)$$

όπου, $\Delta \alpha_{aer}$, υποδηλώνει την εκτιμώμενη τιμή σφάλματος του συντελεστή απόσβεσης (Πίνακας 5.1).

Στον Πίνακα 5.1, παρουσιάζονται διάφορες μεθόδους και τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση - εκτίμηση των συντελεστών της ατμοσφαιρικής εξασθένησης, της ορατότητας και της σχετικής αβεβαιότητάς τους, σε σύγκριση με την τεχνική 3D Stepping ή LADDER, σε ομοιογενείς / μη-ομοιογενείς ατμόσφαιρες. Το σφάλμα της εκτίμησης $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και / ή $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (όπως και στο Vis) είναι πρακτικά μηδενικό όσον αφορά την ίδια την τεχνική [Pantazis et al. (2017)], σύμφωνα με την επεξήγηση που δόθηκε ήδη παραπάνω.

| Μέθοδος | α_{aer} error ($\Delta\alpha_{aer}$) % | Vis error (ΔVis) % | Σχόλια |
|---------------|--|--|--|
| Klett | 20-30 | 20-30 | Ομοιογενής ατμόσφαιρα |
| Raman | 5-15 | 5-15 | Ομοιογενής ατμόσφαιρα |
| LADDER | 0 (γνωστό $C(\lambda, R)$ πχ από METCON) | 0 (γνωστό $C(\lambda, R)$ πχ από METCON) | Ομοιογενής/ Μη-ομοιογενής ατμόσφαιρα |
| Scatterometer | N/A | ± 10 m or ± 10 %, (όποιο είναι υψηλότερο) | Ομοιογενής ατμόσφαιρα |

Πίνακας 5.1: Πίνακας διαφόρων μεθόδων και τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή - εκτίμηση της ατμοσφαιρικής εξασθένησης α_{aer} (λ , R), της ορατότητας και της σχετικής αβεβαιότητας τους, σε σύγκριση με την τεχνική 3D Stepping ή LADDER σε ομοιογενείς / μη-ομοιογενείς ατμόσφαιρες [Pantazis et al. (2017)].

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η τεχνική 3D Stepping ή LADDER [Pantazis et al. (2017)] φαίνεται να είναι η μοναδική που μπορεί να εφαρμοστεί, τόσο σε ομοιογενείς όσο και σε μη-ομοιογενείς ατμόσφαιρες, σε αντίθεση με τις άλλες τεχνικές - μεθόδους που υιοθετούν ομοιογενείς ατμοσφαιρικές συνθήκες σε μικρές αλλά και μεγάλες αποστάσεις. Το πλεονέκτημα αυτό, καθιστά την τεχνική 3D Stepping ή LADDER πιο ελκυστική σε λειτουργικά εμπορικά, αλλά και ερευνητικά συστήματα lidar αλλά και γενικότερα σε συσκευές ατμοσφαιρικής ορατότητας και αξιόπιστης ανάκτησης συντελεστών και παραμέτρων της ατμόσφαιρας.

5.3 Αλγόριθμοι Denoising - 1/2 ή NOSUB - S/R

Μετά την εφαρμογή της μεθόδου lidar μέτρησης σε επικλινές – οριζόντιο (3D)

επίπεδο και άρα την βαθμονόμηση του σήματος οπισθοσκέδασης σε κάθε βήμα, έπρεπε να βρεθεί και κάποιος νέος τρόπος αφαίρεσης θορύβου από το σήμα αυτό, εκτός των γνωστών Signal to Noise Ratio (SNR) [Morille et al. (2007), Pappalardo et al. (2004), Tsaknakis et al. (2011)] κτλ. Σε αυτό το σημείο λοιπόν και αφού υπολογιστούν τα $P'(\lambda, R)$, σήμα lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS), καθώς και $\beta_{aer}(\lambda, R)$ ή / και $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, παρουσιάζεται εδώ ένα νέο φίλτρο αποσβέσεως για να μειωθεί αποτελεσματικά ο θόρυβος του σήματος οπισθοσκέδασης lidar και να υπολογισθεί αυτόματα το ωφέλιμο από το συνολικό σήμα οπισθοσκέδασης.

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται δύο νέα φίλτρα επεξεργασίας σήματος, τα οποία είναι: το φίλτρο Denoising – 1 ή NOSUB – S (αλγόριθμος Noise SUBtraction by Steps) και το φίλτρο Denoising – 2 ή NOSUB – R (αλγόριθμος Noise SUBtraction by Ratio) [Pantazis et al. (2017)]. Χρησιμοποιώντας το πρώτο φίλτρο, (Denoising – 1 ή NOSUB – S) και για αποστάσεις τυπικά μικρότερες από $R = 5$ km, εφαρμόστηκε αρχικά, ένα μέσο χωρικό “median” φίλτρο για την εύρεση μέσης τιμής εύρους ± 2 bin απόστασης (πρώτο βήμα). Στη συνέχεια (δεύτερο βήμα), ελέγχεται εάν οι τιμές $\alpha_{aer}(\lambda, R_n)$ και / ή $\beta_{aer}(\lambda, R_n)$ στην απόσταση του n (νιοστού) bin αναφοράς (αριθμός bin (n), που μετράει από την αρχή του σήματος lidar) είναι ίσες ή διαφορετικές από τις τιμές των $\alpha_{aer}(\lambda, R_{n\pm 1})$ και / ή $\beta_{aer}(\lambda, R_{n\pm 1})$ κατά έναν παράγοντα $k = 1.1$ έως 1.15 για τις τιμές $\beta_{aer}(\lambda, R)$ και $k = 1.15$ έως 1.2 για τις τιμές του $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, από bin σε bin (Εξ.43-46):

$$\beta_{aer}(\lambda, R_n) / \beta_{aer}(\lambda, R_{n+1}) \geq k \quad (43)$$

$$\beta_{aer}(\lambda, R_{n+1}) / \beta_{aer}(\lambda, R_n) \geq k \quad (44)$$

$$\alpha_{aer}(\lambda, R_n) / \beta_{aer}(\lambda, R_{n+1}) \geq k \quad (45)$$

$$\alpha_{aer}(\lambda, R_{n+1}) / \alpha_{aer}(\lambda, R_n) \geq k \quad (46)$$

Εάν μία από τις προϋποθέσεις στις Εξ. 43-46 ισχύει, τότε οι συντελεστές διατηρούν τις αρχικές τους τιμές. Σε επόμενο βήμα εξετάζονται οι τιμές των συντελεστών στο επόμενο bin ($n + 1$) (π.χ. $\alpha_{aer}(\lambda, R_{n+1})$ και / ή $\beta_{aer}(\lambda, R_{n+1})$) λαμβάνοντας υπόψη αυτή τη φορά τις Εξ. 43-46 με όριο το $k = 1,5-1,55$ για τις τιμές $\beta_{aer}(\lambda, R)$ και $k = 1,55-1,6$ για τις τιμές $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, από bin σε bin. Εάν η τελευταία είναι η περίπτωση που ισχύει, τότε οι τιμές του $\alpha_{aer}(\lambda, R_{n+1})$ και / ή $\beta_{aer}(\lambda, R_{n+1})$ ορίζονται στο μηδέν.

Διαφορετικά, εάν δηλαδή $1.15 < k < 1.5$ για τις τιμές $\beta_{aer}(\lambda, R)$ ή / και $1.2 < k < 1.55$ για τις τιμές $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, λαμβάνουν την τιμή (Εξ. 47, 48):

$$\beta_{aer}(\lambda, R_{n+1}) = [\beta_{aer}(\lambda, R_n) + \beta_{aer}(\lambda, R_{n+1})]/2 \quad (47)$$

Και αντίστοιχα:
$$\alpha_{aer}(\lambda, R_{n+1}) = [\alpha_{aer}(\lambda, R_n) + \alpha_{aer}(\lambda, R_{n+1})]/2 \quad (48)$$

Σε κάθε άλλη περίπτωση, οι τιμές των $\alpha_{aer}(\lambda, R_{n+1})$ και / ή $\beta_{aer}(\lambda, R_{n+1})$ παραμένουν ίδιες με τις αρχικά υπολογιζόμενες. Για παράδειγμα, για μεγαλύτερες αποστάσεις (δηλαδή $R > 3-5$ km) αναλόγως των επικρατούντων καιρικών συνθηκών, προτείνεται να ακολουθείται η ίδια διαδικασία, αλλά με ± 3 bin. Ακολούθως, στο βήμα 4, πραγματοποιείται αφαίρεση των αρνητικών τιμών του $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και / ή του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ σε όλο το εύρος του σήματος κατ' απόσταση, επειδή αυτές οι τιμές πλέον είναι σαφώς τεχνητές και δεν χρήζουν περαιτέρω επεξεργασίας.

Έτσι, αν:
$$a_{aer}(\lambda, R_n) < 0 \quad \text{ή / και} \quad \beta_{aer}(\lambda, R_n) < 0 \quad (49)$$

τότε:
$$a_{aer}(\lambda, R_n) = 0 \quad \text{ή / και} \quad \beta_{aer}(\lambda, R_n) = 0 \quad (50)$$

Σαν πέμπτο βήμα, ορίζεται ένα άνω κατώφλι στις τιμές του $\alpha_{aer}(\lambda, R_n) > 60 \text{ km}^{-1}$ και / ή $\beta_{aer}(\lambda, R_n) > 6 \text{ sr}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ή $\beta_{aer}(\lambda, R_n) > 0.6 \text{ sr}^{-1} \text{ km}^{-1}$ (τυπικά, οι τιμές $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ είναι μία έως δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερες από τις τιμές του $\beta_{aer}(\lambda, R_n)$) [Kovalev and Eichinger (2004)]. Σε αυτή την περίπτωση το σήμα τυπικά θεωρείται πολύ θορυβώδες και τεχνητό και έτσι οι τιμές αυτές θέτονται ίσες με το μηδέν.

Στη συνέχεια, στο βήμα έξι, μπορεί να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος Denoising – 2 ή NOSUB - R. Εκεί, χωρίζεται αρχικά η περιοχή μέτρησης R σε ίσα "πακέτα απόστασης", που κυμαίνονται συνήθως από 300-500 m έως 1000 m (ή και πολύ μικρότερα – ρυθμιζόμενα από τον χρήστη). Στη συνέχεια, στο βήμα επτά, ορίζεται η "χορδή" (LST) που είναι το πραγματικό «μήκος» της "χορδής" στο σήμα. Το μήκος της N-ης "χορδής" (LST_N) σήματος (όπου η N-η χορδή εκκινεί τη μέτρησή της κατά προτίμηση από την μέγιστη περιοχή (R_{max}) σήματος, που επιλέγεται από τον χρήστη και προς την κατεύθυνση της θέσης του συστήματος lidar) εντός ενός «πακέτου απόστασης», υπολογίζεται από την Εξ.50:

$$LST_N = \sum_{n=b_{min}}^{n=b_{max}} LST_n = \sum_{n=b_{min}}^{n=b_{max}} [((\delta(\Lambda_n))^2 + (\delta(b_n))^2)^{1/2}] \quad (50)$$

Όπου, Σ , είναι το άθροισμα, το n, αντιπροσωπεύει το αντίστοιχο bin απόστασης (από

το εύρος b_{\min} έως το b_{\max}), το LST_n , είναι το μήκος της N-ης "χορδής" του σήματος αποτελούμενο από αριθμό bins, δ , είναι η μικρότερη διαφορά και το Λ_n αντιπροσωπεύει τις αντίστοιχες τιμές $P'(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS), $\alpha_{aer}(\lambda, R_n)$ και / ή $\beta_{aer}(\lambda, R_n)$, όπου:

$$LST = \sum_{N=1}^{N=\max} LST_N \quad (51)$$

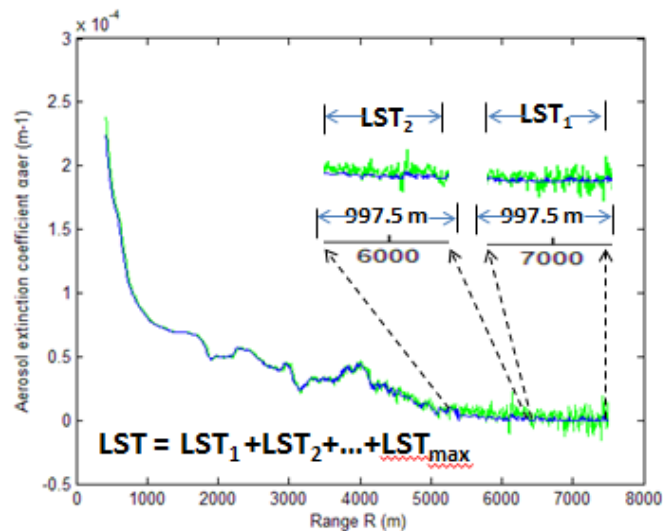
είναι το πλήρες μήκος του σήματος (βλέπε Σχήμα 5.3) σε όλο το σήμα του συστήματος lidar (τυπικά μέχρι $R_{\max} = 7,5-15$ χλμ. από τη θέση συστήματος lidar).

Σαν όγδοο βήμα, γίνεται υπολογισμός της αναλογίας σύμφωνα με την Εξ. 58:

$$(LST_N)/(LST_{N+1}) \leq 1 \pm 10^{-11} \quad (52)$$

όπου, λαμβάνεται ο λόγος διαδοχικών LST και συγκρίνονται με τη σταθερή τιμή ~ 1 (1 ± 10^{-11}). Εάν η Εξ. 52 ισχύει, τότε στο βήμα εννέα, οι τιμές των συντελεστών ($P'(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS), $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και / ή $\beta_{aer}(\lambda, R)$) που αντιστοιχούν στο LST_{N+1} μηδενίζονται για το τελικό επεξεργάσιμο σήμα. Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται και μεταξύ LST_{N+1} και LST_{N+2} κτλ.

Η ιδέα πίσω από αυτή την υπόθεση είναι ότι, όταν λαμβάνονται υπόψη μεγάλες αποστάσεις (π.χ. $> 8-10$ km), (δηλαδή ο αντίστοιχος λόγος σήματος προς θόρυβο – SNR, γίνεται μικρότερος από 1-2) το ληφθέν σήμα lidar γίνεται εξαιρετικά θορυβώδες [Measures (1992), Heese et al. (2010)]. Έτσι, οι τιμές LST μεταξύ των γειτονικών χορδών (LSTs) που βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους σε μήκος, με τον θόρυβο να "κυβερνά" το σήμα lidar σε αυτές τις αποστάσεις, σημαίνει ότι αφού έχει εφαρμοστεί ήδη ο Denoising – 1 ή NOSUB-S και έχει βελτιστοποιηθεί η ανάκτηση τιμών των συντελεστών ήδη μία φορά, η περαιτέρω ανάκτηση των τιμών των συντελεστών στο LST_{N+1} σε αυτές τις αποστάσεις, δεν παρουσιάζουν πλέον ενδιαφέρον και αφαιρούνται από το τελικό επεξεργασμένο σήμα lidar.



Σχήμα 5.3: Παράδειγμα εφαρμογής του Denoising – 1/2 ή NOSUB - S/R στις τιμές α_{aer} (λ , R) που ανακτήθηκαν στα 355 nm από το LRSU-NTUA (03-10-2016 στις 08:02:10 UTC). Η πράσινη γραμμή υποδηλώνει την ανακτώμενη α_{aer} (λ , R) και η μπλε γραμμή είναι η διορθωμένη τιμή του α_{aer} (λ , R) μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου [Pantazis et al. (2017)].

Εάν η Εξ. 52 πλέον δεν ισχύει, τότε η διαδικασία διακόπτεται και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών της Λ_n και αυτές του LST_{N+1} διατηρούνται. Η ίδια διαδικασία που φαίνεται στα βήματα επτά, οκτώ και εννέα μπορούν να εφαρμοστούν ξανά με ρύθμιση της έναρξης μέτρησης του N-ου LST σήματος, στη θέση του συστήματος lidar, και στη συνέχεια, το N υπολογίζεται από το σημείο αυτό και προς το R_{max} . Ωστόσο, προτείνεται όπως το N να ξεκινάει από R_{max} και προς το R_{min} (στη θέση συστήματος lidar), λόγω της ανάκτησης πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων για την μέθοδο αυτή, ειδικά υπό πολύ θορυβώδεις συνθήκες σήματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Είναι δυνατή και η προσθήκη φωτομέτρου στην περιοχή του συστήματος lidar κατά την διάρκεια της ημέρας, όπου μπορεί να μετράται η ηλιακή ακτινοβολία περιβάλλοντος τις περιόδους που το σύστημα lidar δεν εκπέμπει, οπότε να αφαιρείται και μέσω αυτής της διαδικασίας το εξωγενές επίπεδο θορύβου του περιβάλλοντος στο μήκος κύματος λήψης, επιπλέον της εφαρμογής του αλγορίθμου (επιλογή χρήστη).

Τέλος, εάν ο χρήστης ορίζει το πραγματικό επίπεδο θορύβου σε διαφορετική θέση, τότε ο αλγόριθμος Denoising – 1/2 ή NOSUB - S/R, βελτιώνει τις σταθερές των ανωτέρω Εξ. 43 – 52 σημειώνοντας την ώρα της ημέρας και την εποχή – μήνα, συν την τοποθεσία GPS ορισμού από τον χρήστη, καθώς και τις μετρήσεις ύπαρξης

πιθανού φωτομέτρου, ώστε να αποφαινεται καλύτερα σε επόμενες μετρήσεις με την διαδικασία μηχανικής μάθησης. Συγκεκριμένα, εφαρμόζει συνεχείς αλλαγές στα εύρη των LSTs αναλόγως απόστασης από τη θέση συστήματος lidar και των σταθερών, όπως του 10^{-11} , προκειμένου, σε συνδυασμό με την μέτρηση καιρικών συνθηκών από τον αλγόριθμο DECIS ή VERDE που θα αναλυθεί παρακάτω, να αποφαινεται για τις βέλτιστες ρυθμίσεις αναλόγως εποχής, μήνα, τοποθεσίας και ειδικότερα των επικρατούντων καιρικών συνθηκών. Αυτό επιτυγχάνεται όταν μετά από αυτές τις συνεχείς αλλαγές, βρεθούν εκείνοι οι ικανοί συνδυασμοί οι οποίοι μπορούν να πετύχουν το δηλωθέν από τον χρήστη σωστό αποτέλεσμα λαμβάνοντας υπόψη κάποια ελάχιστα όρια, όπως αλλαγές του μήκους των LSTs σε μήκη όχι μικρότερα των 3 ή 5 bins όπου μπορεί να μην παρατηρείται σοβαρή αλλαγή στην τιμή του σήματος (πχ. > 10%).

Η εφαρμογή των αλγορίθμων Denoising – 1/2 ή NOSUB – S/R δείχνει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις πραγματικών συνθηκών λειτουργίας, μετά από ανάλυση σήματος πραγματικών δεδομένων lidar οπισθοσκέδασης σε πάνω από 50 περιπτώσεις των δοκιμών, ο αλγόριθμος αυτός διατηρεί (σε περισσότερο από 88% των περιπτώσεων) [Pantazis et al. (2017)] τις χρήσιμες τιμές των συντελεστών, ενώ «αφαιρούνται», εντέχνως, οι τιμές ή συμμετοχή του θορυβώδους σήματος, στην πληροφορία. Οι αλγόριθμοι Denoising – 1/2 ή NOSUB - S/R διαπιστώθηκε ότι λειτουργούν καλύτερα σε περισσότερο θορυβώδη σήματα (χαμηλότερες τιμές SNR) αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την εμβέλεια R_{max} ενός συστήματος lidar αποκομίζοντας το ωφέλιμο σήμα και αφαιρώντας τον θόρυβο. Οι αλγόριθμοι αυτοί συνεχώς βελτιώνουν την αποτελεσματικότητά τους μέσω μηχανικής μάθησης και μπορούν επίσης να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό ή ξεχωριστά και να είναι διαρκώς βελτιούμενοι στην αποτελεσματικότητά τους. Ένα παράδειγμα της εφαρμογής Denoising – 1/2 ή NOSUB - S/R παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3 όπου παρατηρείται ότι διατηρούνται οι χρήσιμες πληροφορίες (ωφέλιμο σήμα) $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ για περαιτέρω αξιόπιστη επεξεργασία που πριν ήταν εντός, επιπέδου θορύβου.

Οι αλγόριθμοι Denoising – 1/2 ή NOSUB - S/R μπορούν να εφαρμοσθούν ήδη από τις πρώτες κατακόρυφες μετρήσεις της μεθόδου 3D Stepping ή LADDER, χρησιμοποιώντας την αυτόματη επιλογή του R_F , ακολουθώντας την λογική όπου το $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και / ή $\beta_{aer}(\lambda, R)$ είναι πρακτικά ίσο με το μηδέν, όπως παρουσιάστηκε ότι συμβαίνει για τιμές συντελεστών Rayleigh (ή όπου το σήμα έχει πολύ μικρές τιμές των συντελεστών σε σχέση με τις τιμές του υπόλοιπου σήματος, όπως αυτό παρατηρείται από τη μεγαλύτερη απόσταση της θέσης του συστήματος lidar). Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια αυτόματη επιλογή R_{max} για κάθε σήμα σύστημα lidar, το οποίο υπολογίζεται εκ νέου κάθε φορά σύμφωνα με την τεχνική 3D Stepping ή LADDER,

αφαιρώντας ή προσθέτοντας 1-2 bin απόστασης για κάθε επόμενη μέτρηση. Στη περίπτωση αυτή και εφαρμόζοντας την 3D Stepping ή LADDER, η τιμή του $P'(\lambda, R)$ ή σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) και ειδικότερα των $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και $\beta_{aer}(\lambda, R)$ κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης από την κάθετη προς την οριζόντια θέση, προτείνεται όπως το k (Εξ. 43-46) στις τιμές $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και $\beta_{aer}(\lambda, R)$ να λαμβάνεται από 1,3 ως 1,5 λόγω του ότι η κλήση προς την επικλινή και την οριζόντια θέση θα προσθέσει διαρκώς οπισθοσκεδαζόμενο ωφέλιμο σήμα αλλά και θόρυβο.

5.4 Αλγόριθμος Weather Phenomena ή METCON

Σε αυτή την ενότητα και μετά την εφαρμογή (κατ' επιλογή του χρήστη) της τεχνικής 3D Stepping ή LADDER και Denoising – 1/2 ή NOSUB - S/R, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος Weather Phenomena ή METCON (METeorological CONditions identification) που σκοπό έχει να αναγνωρίσει τα διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης της δέσμης laser ενός συστήματος lidar σε τρεις διαστάσεις. Χρησιμοποιεί τα Σχήματα 4.2 και 4.5 παραπάνω, σε συνδυασμό, καθώς και το Σχήμα 4.6 αντί του Σχήματος 4.5 για περιπτώσεις Ναυσιπλοΐας. Λαμβάνει δηλαδή υπόψη τα [CIMO (2008), Deirmendjian (1964), Wright, (1966), Measures (1992), Kovalev and Eichinger (2004), David et al. (2015), Gong et al. (2011), Morille (2007)] προκειμένου να ορίσει κάποια όρια του λόγου lidar ($C(\lambda, R)$) αλλά και των συντελεστών εξασθένησης και οπισθοσκέδασης αιωρούμενων σωματιδίων ($\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και $\beta_{aer}(\lambda, R)$) προκειμένου να υπολογιστεί η αποστάση και το εύρος, έκαστου παρόντος ατμοσφαιρικού στρώματος.

Ο λόγος lidar είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από το μήκος κύματος και γενικά δεν είναι σταθερός με το ύψος. Η τιμή του λόγου lidar των αερολυμάτων, εξαρτάται από τον δείκτη διάθλασης και άρα από την χημική τους σύσταση και την κατανομή μεγεθών των αιωρούμενων σωματιδίων. Από αρκετές επιστημονικές εργασίες έχει βρεθεί ότι ο λόγος lidar μπορεί να λάβει ένα μεγάλο εύρος τιμών που κυμαίνεται από 10 έως 100 sr [Ackermann (1998), Mattis et al.(2004), Muller et al.(2005), Ansmann et al. (2012)]. Στη χρήση της τεχνικής της ελαστικής οπισθοσκέδασης lidar, η εκ των προτέρων υπόθεση γνωστής τιμή του λόγου lidar, καθώς και η υπόθεση ότι ο λόγος αυτός παραμένει σταθερός με το ύψος, αποτελούν την μεγαλύτερη πηγή αβεβαιότητας στην επίλυση της διαφορικής εξίσωσης του συστήματος lidar ελαστικής οπισθοσκέδασης [Bosenberg (1997)].

Όπως προαναφέρθηκε, ο λόγος lidar καθώς και τα εύρη τιμών των $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ ή /

και $\beta_{aer}(\lambda, R)$, λαμβάνονται υπόψη σε αυτή τη διατριβή κυρίως βάσει του Σχήματος 4.2. Φυσικά, ο κάθε χρήστης μπορεί να θέσει στις τεχνικές και τους αλγορίθμους που παρουσιάζονται στη διατριβή αυτή, τα δικά του όρια στο όποιο μήκος κύματος που επιχειρεί και έχει μελετήσει στην δική του τοποθεσία, χωρίς οι νέες αυτές τιμές να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα των τεχνικών και αλγορίθμων που περιγράφονται εδώ, λαμβάνοντας υπόψη ότι η όποια απόκλιση από τα παρουσιαζόμενα οφείλεται στα όρια που ο ίδιος έθεσε.

Ο λόγος lidar ($C(\lambda, R)$) Εξ. 1) που επιλέγεται στην διατριβή αυτή για τις διάφορες μετεωρολογικές συνθήκες βασίζεται στην εργασία των Deirmendjian (1964) και Wright (1966) όπως αναφέρεται από τον Measures (1992). Αυτό, μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε το Σχήμα 5.4, προκειμένου να εξαχθούν οι λόγοι lidar υπό διάφορες μετεωρολογικές συνθήκες, [Deirmendjian (1964), Wright (1966), Measures (1992), WMO (1990, 2010), ICAO (2008), CIMO (2008)], μέσω της ορατότητας που αυτά επιτρέπουν, όταν ακτινοβολία μήκους κύματος από περίπου 200 nm έως περίπου 15 μm διέρχεται μέσα από διαφορετικές ατμοσφαιρικές στρωματώσεις – ατμοσφαιρικούς “όγκους”. Κάποιες διαφορές στις τιμές των $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και $\beta_{aer}(\lambda, R)$ μπορεί να εμφανιστούν σε περιπτώσεις Haze [Wright et al. (1966)], αλλά αυτό ισχύει για ακτινοβολία πάνω από τα 2 με 3 μm κι όχι στα 355 nm ή κοντινό IR που στην διατριβή αυτή έχουμε κυρίως επικεντρώσει.

Στην βιβλιογραφία υπήρξαν πολλές μελέτες που αναδεικνύουν τους περιορισμούς της μεθόδου αντιστροφής σήματος lidar κατά Klett [Fernald et al.(1972, 1984), Klett (1981, 1985), Sassano et al. (1985), Bissonete (1986) Gonzales (1988), Ansmann et al. (1992), Kovalev (1995), Kunz (1996), Ackermann (1998), Kovalev and Eichinger (2004)]. Η πηγή όλων των περιορισμών έγκειται στο γεγονός ότι ο συντελεστής εξασθένησης και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων, πρέπει να υπολογισθούν από μία και μόνο μετρούμενη ποσότητα, το ελαστικά οπισθοσκαζόμενο σήμα lidar. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε και η μελέτη εξαγωγής (αξιολόγησης) του Weather Phenomena ή METCON με τις τιμές $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και $\beta_{aer}(\lambda, R)$ που αυτός δίνει από μελέτη του Σχήματος 5.4, με βάση τα ελαστικά σήματα lidar από το σύστημα lidar του ΕΜΠ. Επίσης, για τους περισσότερους από τους τύπους σωματιδίων, ο λόγος lidar δεν παρουσιάζει φασματική εξάρτηση, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση σωματιδίων ερημικής σκόνης [Teschke et al.(2009, 2011), Muller et al. (2009), Gross et al.(2011)].

Υπάρχει βέβαια και η περίπτωση επιλογής της χρήσης δεδομένων Raman lidar που όπως προαναφέραμε παρέχει πολύ αξιόπιστες μετρήσεις του λόγου lidar. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου επίλυσης της εξίσωσης lidar, είναι η παραδοχή

ύπαρξης μίας σταθερής με το ύψος σχέσης μεταξύ του συντελεστή εξασθένησης και του συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων, το οποίο λαμβάνουμε υπόψη και επιλύουμε εδώ με τον αλγόριθμο Weather Phenomena ή METCON. Επίσης, οι αυθαίρετες παραδοχές για την κατακόρυφη κατανομή του λόγου lidar και το ύψος αναφοράς R_F , συντελούν στην αύξηση της αβεβαιότητας και τους σφάλματος της τελικής λύσης.

Στην περίπτωση λοιπόν που θέλουμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή οπισθοσκέδασης για τα αιωρούμενα σωματίδια, χρησιμοποιούμε τα ελαστικά και τα ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενα σήματα (για τα αντίστοιχα μήκη κύματος). Έτσι, αν για παράδειγμα υποθέσουμε τον λόγο του ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενου σήματος από τα σωματίδια στα 355 nm προς το ανελαστικά οπισθοσκεδαζόμενο σήμα από το άζωτο στα 387 nm, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον συντελεστή οπισθοσκέδασης στο μήκος κύματος εκπομπής [Ansmann et al.(1992)].

Αυτό, για επικλινείς μετρήσεις lidar μπορεί να γίνει ασφαλώς με την τεχνική 3D Stepping ή LADDER, ιδιαίτερα όσον αφορά την λήψη του ελαστικού σήματος lidar εντός ανομοιογενούς ατμόσφαιρας και κατόπιν να χρησιμοποιηθούν και οι λοιποί αλγόριθμοι που περιγράφονται στην παρούσα Διατριβή, καθώς είναι ανεξάρτητοι από την μεθοδολογία (Klett, Raman κτλ) που θα ακολουθηθεί και επικεντρώνουν στις τιμές που οι ατμοσφαιρικοί παράμετροι και η ισχύς του σήματος οπισθοσκέδασης τελικά κατέχουν κατά απόσταση.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι, ο «τρόπος» επιλογής $C(\lambda, R)$ στον αλγόριθμο Weather Phenomena ή METCON, διαφέρει ριζικά από την εργασία των [Haarig et al. (2018), Müller et al. (2007), Burton (2013)], καθώς επικεντρώνεται στην ορατότητα που η ατμόσφαιρα επιτρέπει κάθε φορά σύμφωνα με κανόνες διεθνών οργανισμών όπως ICAO και WMO όπως ειπώθηκε και όχι αναλόγως με την επιλεγμένη – συγκεκριμένη ατμοσφαιρική μελέτη. Επίσης, το Σχήμα 5.4 παρακάτω εξασφαλίζει την περίπτωση επιλογής διαφορετικού λόγου lidar με το ύψος, καθώς λαμβάνει υπόψη και περιπτώσεις “Cumullus Cloud”, “High” και “Low Altitude Haze” με διαφορετικές τιμές $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και $\beta_{aer}(\lambda, R)$ σε σχέση με την επιλογή διαφορετικής τιμής του λόγου lidar με το ύψος. Ο κάθε χρήστης όμως μπορεί να χρησιμοποιήσει την μεθοδολογία που χρησιμοποιείται από τον Weather Phenomena ή METCON, θέτωντας δικά του όρια $C(\lambda, R)$ και αντίστοιχων τιμών των $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ ή / και $\beta_{aer}(\lambda, R)$, επιτρέποντας την λειτουργία μεταβλητού $C(\lambda, R)$, χρησιμοποιώντας και την εργασία των [Haarig et al. (2018), Müller et al. (2007), Burton (2013)] ή άλλων επιθυμητών τιμών των ανωτέρω παραμέτρων.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε αλγορίθμους και τεχνικές που εφαρμόζονται

εντός ανομοιογενούς ατμόσφαιρας επιλέγοντας διαφορετικούς λόγους lidar προκειμένου να εντοπίσει διαφορετικές ατμοσφαιρικές στρωματώσεις, αναδεικνύοντας έτσι την δυνατότητα εφαρμογής της προτεινόμενης τεχνικής υπό διάφορες μετεωρολογικές συνθήκες και κάνοντας την προτεινόμενη τεχνική περισσότερο επιχειρησιάζκη, ικανή αυτόνομης λειτουργίας ακόμα και σε ανομοιογενείς ατμόσφαιρες.

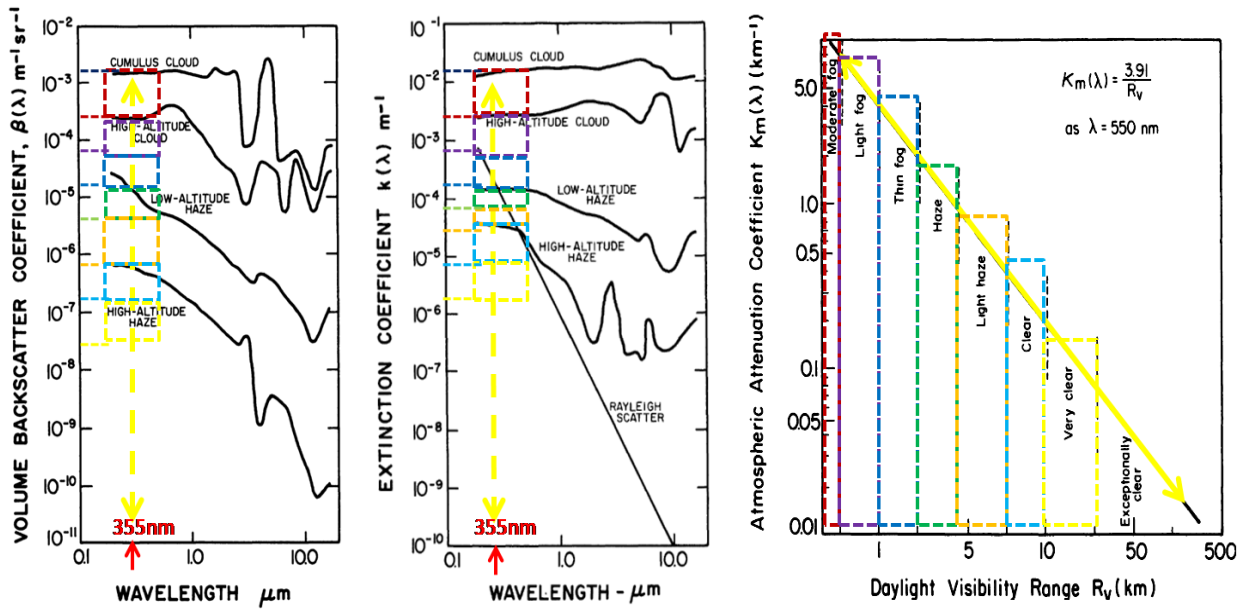
Με τον αλγόριθμο Weather Phenomena ή METCON και με βάση το Σχήμα 5.4, κάποιος μπορεί να επιλέξει το όποιο μήκος κύματος επιθυμεί με αναγωγή πάντα στο οπτικό φάσμα (515 – 530 – 555 nm κτλ) και την ορατότητα που δίνουν τα ίδια ατμοσφαιρικά φαινόμενα στο οπτικό και να λάβει τις αντίστοιχες τιμές των $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ και $\beta_{aer}(\lambda, R)$, τα οποία τελικώς θα δώσουν διαφορετική τιμή λόγου lidar για ανίχνευση του ιδίου ατμοσφαιρικού στρώματος κάθε φορά.

Ο αλγόριθμος Weather Phenomena ή METCON μπορεί να χρησιμοποιεί τα όποια όρια λόγων lidar και εύρη τιμών συντελεστών εξασθένησης και οπισθοσκέδασης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση του ανωτέρω Σχήματος 5.4 παρουσιάζεται η λειτουργία του Weather Phenomena ή METCON (με χρήση των τιμών των Σχημάτων 4.2, 4.5 και Σχήμα 4.6 για περιπτώσεις εφαρμογής στη ναυσιπλοΐα) συνολικά, για την αναγνώριση μετεωρολογικών συνθηκών όπως νέφη, ομίχλη, ελαφριά ομίχλη κλπ, με την απόσταση (R), για κάθε κατακόρυφη ή κεκλιμένη μέτρηση και επιλογή αντίστοιχων λόγων lidar για ανίχνευση έκαστου ατμοσφαιρικού στρώματος. Συγκεκριμένα ο Weather Phenomena ή METCON στα 355 nm, λειτουργεί ως εξής:

(i) Για κάθε 1 έως 2 bin απόστασης, ελέγχει τις ανακτημένες τιμές του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ και $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ (Σχήματος 4.2 ή 4.6 για την ναυσιπλοΐα) στο μήκος κύματος επιλογής, μέσω των οποίων προκύπτει και το αντίστοιχο C (λ, R) για ανίχνευση έκαστου μετεωρολογικού φαινομένου (πχ ομίχλη, ελαφριά ομίχλη κτλ) σε συνδυασμό με τα φαινόμενα που αναφέρονται στο Σχήμα 4.5 με την ορατότητα, έτσι:

(ii) Αν $\beta_{aer}(\lambda, R) \geq 2 * 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, τότε το αποτέλεσμα είναι CI = 'Cloud, NO-visibility', με $C(\lambda, R) = 10 \text{ sr}^{-1}$ και $\alpha_{aer}(\lambda, R) \geq 2 * 10^{-2} \text{ m}^{-1}$, γιατί και η εξασθένηση μιας δέσμης ακτινοβολίας είναι μεγάλη, καθώς αυτή διέρχεται μέσα από κάποιο σύννεφο, αλλά και η οπισθοσκέδαση Mie είναι μεγάλη, καθώς τα υδροσταγονίδια στα νέφη αποτελούν σφαιρικούς σκεδαστές και όχι πολυεπίπεδους όπως την περίπτωση σκόνης και άμμου, όπως αυτή καταφθάνει από τη Σαχάρα. Σε αυτό να σημειώθει ότι ακόμη και οι πολυεπίπεδοι σκεδαστές εντός περιβάλλοντος αυξημένης Σχετικής Υγρασίας (ΣΥ), μπορούν να περιβάλλονται από την υγρασία αυτή και να μετατρέπονται σε μεγάλο ποσοστό ή στην ολότητά τους από υδροσταγονίδια δίνοντας έντονες σκεδάσεις Mie. Η ορατότητα στην περίπτωση της αποκάλυψης σύννεφου,

είναι μηδενική.



CLOUD MOD FOG Light FOG Thin FOG HAZE Light HAZE Sky CLEAR Very CLEAR

Σχήμα 5.4: Συνδυασμός μετεωρολογικών φαινομένων βάσει Ορατότητας που επιτρέπουν (στο οπτικό φάσμα - ICAO, WMO κτλ) και τιμές των συντελεστών εξασθένησης και οπισθοσκέδασης [Deirmendjian (1964), Wright (1966), Measures (1992), CIMO (2008), Pantazis et al. (2017)].

(iii) Εάν το $2 \cdot 10^{-4} \leq \beta_{\text{aer}}(\lambda, R) < 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, τότε το αποτέλεσμα είναι MF (= 'Moderate Fog, μέγιστη ορατότητα 200 m' με $C(\lambda, R) = 10 \text{ sr}^{-1}$ και $2 \cdot 10^{-3} < \alpha_{\text{aer}}(\lambda, R) < 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$, καθώς στο σημείο αυτό της πυκνής ομίχλης η παρουσία υδροσταγονιδίων είναι προφανώς έντονη.

(iv) Εάν το $8 \cdot 10^{-5} \leq \beta_{\text{aer}}(\lambda, R) < 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, τότε το αποτέλεσμα είναι LF = 'Light Fog, ορατότητα 200 m έως 1 km, με μέσο όρο $C(\lambda, R) = 8,255 \text{ sr}^{-1}$ ($6,25 < C(\lambda, R) < 10 \text{ sr}^{-1}$) και $5 \cdot 10^{-4} < \alpha_{\text{aer}}(\lambda, R) < 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, καθώς τα υδροσταγονία είναι πλέον μικρότερα σε μέγεθος και πλησιάζει περισσότερο η διάσταση a ($= 2\pi r / \lambda$, Εξ. 9) αυτών, το μήκος κύματος εκπομπής της συγκεκριμένης περίπτωσης μελέτης των 355 nm και το φαινόμενο σκέδασης Mie εντείνεται.

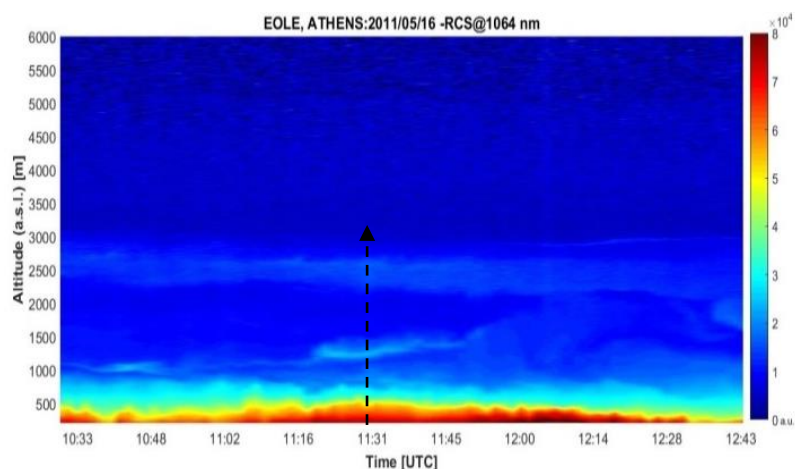
(v) Εάν το $4 * 10^{-5} \leq \beta_{\text{aer}}(\lambda, R) < 8 * 10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, τότε το αποτέλεσμα είναι TF = 'Thin Fog, ορατότητα 1 έως 2 km', με μέσο όρο $C(\lambda, R) = 6,875 \text{ sr}^{-1}$ ($6,25 < C(\lambda, R) < 7,5 \text{ sr}^{-1}$) και $3 * 10^{-4} < \alpha_{\text{aer}}(\lambda, R) < 5 * 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, καθώς τα υδροσταγονίδια πλέον μπορεί να βρίσκονται αραιότερα στον χώρο, αλλά τώρα πλησιάζουν ακόμη περισσότερο στο μήκος κύματος της συγκεκριμένης εκπομπής.

(vi) Εάν το $2 * 10^{-5} \leq \beta_{\text{aer}}(\lambda, R) < 4 * 10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, τότε το αποτέλεσμα είναι HZ = 'Haze, ορατότητα 2 έως 4 km', με μέσο όρο $C(\lambda, R) = 6,25 \text{ sr}^{-1}$ ($5 < C(\lambda, R) < 7,5 \text{ sr}^{-1}$) και $1 * 10^{-4} < \alpha_{\text{aer}}(\lambda, R) < 3 * 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, για παρόμοιο λόγο.

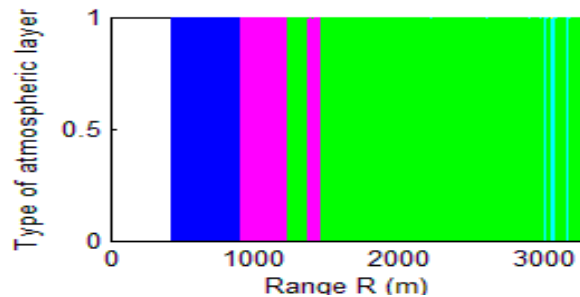
(vii) Αν το $8 * 10^{-7} \leq \beta_{\text{aer}}(\lambda, R) < 2 * 10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, τότε το αποτέλεσμα είναι LH = 'Light Haze, ορατότητα 4 έως 6 km', με μέσο όρο $C(\lambda, R) = 27,5 \text{ sr}^{-1}$ ($5 < C(\lambda, R) < 50 \text{ sr}^{-1}$) και $4 * 10^{-5} < \alpha_{\text{aer}}(\lambda, R) < 1 * 10^{-4} \text{ m}^{-1}$,

Για περιπτώσεις μετεωρολογικών φαινομένων που επιτρέπουν ορατότητα μεγαλύτερη των 6 km, είναι εκείνη του Clear (Sky) η οποία και δίνει ορατότητα 6 έως 10 km (Σχήματα 4.5, 5.4), που είναι και το μέγιστο ορατότητας που δίνεται από τον Ελεγκτή Εναερίου Κυκλοφορίας (EEK) προς τον πιλότο και αφορά την ορατότητα γύρω από το αεροδρόμιο και τον διάδρομο Από-προσγείωσης κατά την εκφορά του METAR (Meteorological Terminal Aviation Routine) αεροδρομίου. Το METAR αφορά την ενημέρωση των πιλότων κατά την φάση απογείωσης και προσγείωσης – προσέγγισης του αεροδρομίου και μιλά για τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες και αφορά θερμοκρασία αεροδρομίου, σημείο δρόσου (θερμοκρασία – Κεφ. 1), ταχύτητα ανέμου και διεύθυνση, διάδρομος εν χρήσει, διάφορα επικρατούντα μετεωρολογικά φαινόμενα όπως βροχή ή ομίχλη, ύψος νεφών, βαρομετρική πίεση και ορατότητα αεροδρομίου.

α).



β).



Σχήμα 5.5: α). Σήμα lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) που ανακτήθηκε στα 1064 nm από τον LRSU-NTUA (16-05-2011), β). Αλγόριθμοι Weather Phenomena ή METCON και Visibility ή NAVIS που εφαρμόζονται σε δεδομένα οπισθοσκέδασης lidar στα 355 nm στις 11:30:10 UTC [Pantazis et al. (2017)].

Όπως παρουσιάστηκε, ο αλγόριθμος Weather Phenomena ή METCON παρακολουθεί και αποκαλύπτει τα διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα σε πραγματικό χρόνο προς όλες τις κατευθύνσεις που το σύστημα 3D lidar εκπέμπει (Σχήμα 5.5). Όπου το μπλε είναι "Light Fog", το μοβ είναι "Thin Fog", το ανοιχτό μπλε είναι "Light Haze" και το πράσινο είναι "Haze". Η ορατότητα του πύργου από εφαρμογή του αλγορίθμου Visibility ή NAVIS (βλ. παρακάτω ενότητα) είναι 523 m και η ορατότητα του πιλότου είναι 1928 m από την απόσταση των 3000 m και προς την θέση της lidar συσκευής. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι ικανός να παρακολουθεί τα επερχόμενα μετεωρολογικά φαινόμενα και την εξέλιξή τους σε πραγματικό χρόνο, με «αντίληψη» πραγματικής ορατότητας μέσα από αυτά, σύμφωνα με κανονισμούς ICAO και WMO. Έτσι λοιπόν, κατά την χρήση του Weather Phenomena ή METCON, ο χρήστης του συστήματος lidar μπορεί να εναλλάσει τους λόγους lidar όπως αναλύθηκε παραπάνω, επί του ίδιου σήματος οπισθοσκέδασης και να αναγνωρίζει τις αποστάσεις αλλά και τα εύρη διαφόρων ατμοσφαιρικών στρωματώσεων, εντός του ωφέλιμου σήματος οπισθοσκέδασης.

5.5 Αλγόριθμος Visibility ή NAVIS

Στο Κεφ. 1, έγινε ανάλυση των γνωστών – συμβατικών μεθόδων μέτρησης της ορατότητας σήμερα. Σε αυτήν την ενότητα και μετά την εφαρμογή (κατ' επιλογή του χρήστη) της τεχνικής 3D Stepping ή LADDER, Denoising - 1/2 ή NOSUB – S/R και Weather Phenomena ή METCON, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος Visibility ή NAVIS –

T/P (Novel Algorithm for VISibility measurement from the Tower and from the Pilot's point of view) ο οποίος ασχολείται με την ανάκτηση του συντελεστή εξασθένησης a_{aer} (λ, R) και υπολογισμό του Οπτικού Πάχους (AOD - τ) σε τρεις διαστάσεις (3D Viewing). Ο αλγοριθμός αυτός ακολουθεί τους κανόνες ICAO και WMO, υπολογίζοντας την ορατότητα κυρίως βάσει των Εξ. 1-7 και 10-18 και από την οπτική που έχει για παράδειγμα ο Ελεγκτής Εναέριας Κυκλοφορίας (ΕΕΚ) του Πύργου Ελέγχου ενός αεροδρομίου, αλλά και από την οπτική του Πιλότου ή αντίστοιχα του καπετάνιου ενός πλοίου, συμβάλλοντας τα μέγιστα στην Ασφάλεια Πτήσεων και Εδάφους στην Αεροπλοΐα αλλά και την Ασφάλεια της Ναυσιπλοΐας.

Ο αλγόριθμος Visibility ή NAVIS χρησιμοποιεί τον Weather Phenomena ή METCON προκειμένου να εξασφαλισθεί η παρουσία ή όχι, μετεωρολογικών φαινομένων που αναλύθηκαν παραπάνω και επηρεάζουν την ατμοσφαιρική ορατότητα. Κατόπιν, γίνεται υπολογισμός του AOD (τ) σύμφωνα με Εξ. 18 και 53, 54 από τη θέση του συστήματος lidar και προς την κατεύθυνσή – γωνίας (φ, θ) ενδιαφέροντος, όπως για παράδειγμα, στην γωνία εκείνη από το επίπεδο του διαδρόμου Από-προσγείωσης που ο πιλότος προσεγγίζει το αεροσκάφος για προσγείωση:

$$\tau_{c_n}(0, R) = \int_0^R a_{c_n}(\lambda, R') dR' \quad (53)$$

$$\tau_{total}(0, R) = \tau_{c_1} + \tau_{c_2} + \dots + \tau_{c_n} \quad (54)$$

όπου, R , είναι η απόσταση στην οποία μετρήθηκε η συγκεκριμένη τιμή $a_{aer}(\lambda, R)$ κάθε φορά, σε κάθε απόσταση, με μια διακριτική ικανότητα συνήθως 1-2 bin απόστασης, τ_{total} , είναι το άθροισμα των τ_{c_n} και όπου τ_{c_n} είναι το οπτικό βάθος έκαστου στρώματος συγκεκριμένου “βάθους” – απόστασης, το οποίο έχει ήδη αναγνωρισθεί σε διάφορες αποστάσεις από παραπάνω βήματα αλγορίθμου και έχει ήδη ληφθεί υπόψη για αυτό το συγκεκριμένο βήμα – υπολογισμό συνολικού οπτικού πάχους (τ_{total}).

Είναι γνωστό ότι το ανθρώπινη οπτική φασματική περιοχή εκτείνεται από 400 nm έως 700 nm, με κορύφωση τα 555 nm κατά την διάρκεια της ημέρας και 507 nm για νυχτερινές συνθήκες, σύμφωνα με την Επιτροπή για Όργανα και Μεθόδους Παρατήρησης [CIMO (2008)] για σχετική απόδοση φωτεινότητας μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Έτσι, με τη χρήση της ορατότητας σε σχέση με τον συντελεστή ατμοσφαιρικής εξασθένησης στα 550 nm (βλ. Σχήματα 4.2, 4.5, 5.4) [Wright (1966)] μπορεί κάποιος να έχει μια πολύ καλή προσέγγιση των παραπάνω απαιτούμενων

τιμών στα 355 nm ή σε άλλο επιθυμητό μήκος κύματος.

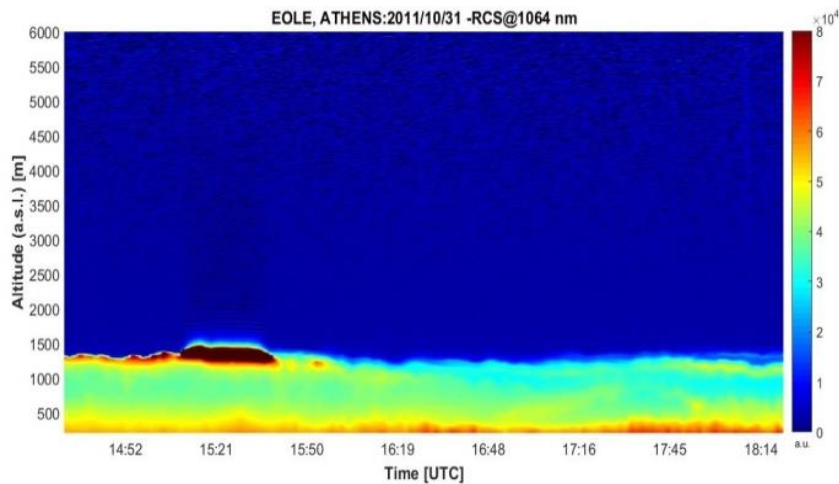
Συγκεκριμένα, μετά τη βαθμονόμηση της συσκευής μας, καθώς και την εφαρμογή της τεχνικής 3D Stepping ή LADDER, την εισαγωγή των σημάτων lidar προς επεξεργασία και την εφαρμογή του αλγορίθμου Weather Phenomena ή METCON και των τιμών $C_n(\lambda, R)$, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Visibility ή NAVIS - T/P. Προκειμένου να ανακτηθεί η ορατότητα σε ένα αεροδρόμιο, ο αλγόριθμος NAVIS-T υπολογίζει την ορατότητα από τη θέση του συστήματος lidar σε κατακόρυφη γωνία, τυπικά $\varphi=15^\circ$ από το έδαφος και αντιθέτως του διαδρόμου χρήσης για προσεγγίζοντα και αποχωρούντα αεροσκάφη. Για την περίπτωση μέτρησης ορατότητας RVR, η κατακόρυφη αυτή γωνία (φ) μηδενίζεται, προκειμένου να οδηγηθούμε σε οριζόντια μέτρηση.

Οπότε, σε κάθε περίπτωση, οι τιμές AOD (T_{total}) συγκρίνονται με τις τιμές των πεδίων του Weather Phenomena ή METCON σε σχέση με τον συντελεστή εξασθένησης και εξάγεται έτσι η συνολική ορατότητα με ανώτατο όριο AOD (T_{total}) εκείνο του εντοπισμού νέφωσης ($\alpha_{aer}(\lambda, R) > 2 * 10^{-2} m^{-1}$, με $C(\lambda, R) = 10 sr^{-1}$ και $\beta_{aer}(\lambda, R) > 2 * 10^{-3} m^{-1} sr^{-1}$ στα 355 nm), καθώς, όπως αναφέρθηκε και στον αλγόριθμο Weather Phenomena ή METCON, δεν ορίζεται ορατότητα εντός ενός νέφους. Αυτή η διαδικασία, εκτίμησης της ορατότητας με σύστημα lidar από τον Visibility ή NAVIS μετά από την χρήση του Weather Phenomena ή METCON, γίνεται επί του ωφέλιμου σήματος οπισθοσκέδασης lidar (Σχήμα 5.6): όπου το μωβ χρώμα είναι "Thin Fog", το κόκκινο είναι "Moderate Fog", το ανοιχτό μπλε είναι "Light Haze", το πράσινο είναι "Haze" και το μαύρο είναι "Cumulus Cloud". Η ορατότητα του εδώ πύργου είναι 1512 m και η ορατότητα του πιλότου είναι 1370 m από την απόσταση των 3000 m και προς την θέση της συσκευής lidar .

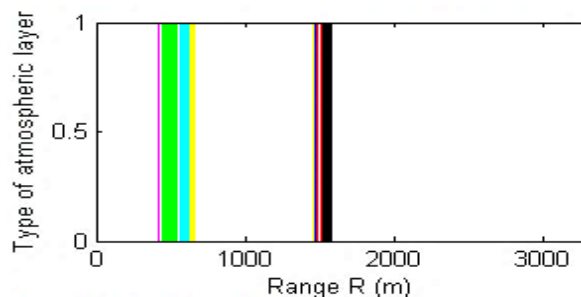
Το AOD (T_{total}) μετράται είτε από την θέση του συστήματος lidar προς την κατεύθυνση εκπομπής, οπότε και εκτιμάται η ορατότητα από την θέση αυτή (οπτική του Ελεγκτή Εναερίου Κυκλοφορίας αεροδρομίου - απόσταση R_1), είτε, από το μέγιστο της απόστασης ωφέλιμου σήματος ή της παρούσης θέσης του πιλότου από τη θέση lidar (όποιο είναι μικρότερο - απόσταση R_2) και προς τον διάδρομο Από-προσγείωσης (οπτική του χειριστή πιλότου - απόσταση R_3) (Σχήματα 5.5, 5.6), οπότε και δίνεται ως εξαγόμενο αποτέλεσμα η απόσταση R_1 ή R_2 και ο αλγόριθμος Visibility ή NAVIS σταματά να ενεργεί σε αυτή τη περίπτωση. Διαφορετικά, εάν δηλαδή το AOD είναι μικρότερο αυτού της εύρεσης σύννεφου και ο πιλότος απέχει της θέσης του συστήματος lidar πέραν της μέγιστης απόστασης ωφέλιμου σήματος, ως μέγιστη ορατότητα τότε δίνεται η μέγιστη απόσταση ωφέλιμου σήματος (R_{max}): "Η ορατότητα

του ελεγκτή του πύργου είναι R_1 (ή R_{max})” και “Η ορατότητα του πιλότου από το R_{max} (ή R_2), είναι R_3 (ή R_{max})”.

α).



β).



Σχήμα 5.6: α). Το σήμα lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) που ανακτήθηκε στα 1064 nm από το LRSU-NTUA (31-10-2011), β). Αλγόριθμοι Visibility ή NAVIS και Weather Phenomena ή METCON που εφαρμόζονται σε 3D δεδομένα lidar στα 355 nm, στις 15:29:50 UTC [Pantazis et al. (2017)].

Τέλος, εάν ο χρήστης ορίζει την πραγματική ορατότητα, προερχόμενη από άλλα πραγματικά tests ορατότητας την ώρα της μέτρησης lidar όπως για παράδειγμα την ορατότητα που αναφέρει ο πιλότος κάποια χρονική στιγμή, τότε ο αλγόριθμος Visibility ή NAVIS έχει την δυνατότητα να εκτιμά την ορατότητα αυτή και να εισάγεται στον Weather Phenomena ή METCON, εκκινώντας διαδικασία βελτίωσης των τιμών του λόγου lidar, έτσι ώστε, αναλόγως διαφοράς της ορατότητας, να επηρεάζεται αρχικά

εκείνο το στρώμα της ατμόσφαιρας που κατά κανόνα επηρεάζει περισσότερο την ορατότητα. Για παράδειγμα, εάν η διαφορά στην ορατότητα είναι της τάξεως των 300 m και ο Weather Phenomena ή METCON έχει αναγνωρίσει τμήμα “ModerateFog” (ορατότητα 200 m) αρχικά κάνει μικρές αλλαγές στον λόγο lidar του “ModerateFog” προσπαθώντας να πετύχει την ακριβή αλλαγή που χρειάζεται και δεν ασχολείται αρχικά με τον λόγο lidar του “Light Fog” με ορατότητα 1 km, τηρώντας κάποια όρια μέγιστων αλλαγών του λόγου lidar.

Επίσης, σημειώνει την ώρα της ημέρας και εποχή – μήνα, συν την τοποθεσία GPS ορισμού από τον χρήστη, καθώς και τις μετρήσεις ύπαρξης άλλης συσκευής ορατότητας όπως scatterometer, ώστε να αποφαινεται καλύτερα σε επόμενες μετρήσεις με την διαδικασία μηχανικής μάθησης, όπως προαναφέρθηκε. Και πάλι, οι αλγόριθμοι Visibility ή NAVIS και Weather Phenomena ή METCON, σε συνδυασμό με την μέτρηση καιρικών συνθηκών από τον αλγόριθμο DECIS ή VERDE που θα αναλυθεί παρακάτω, μπορούν να αποφαινονται για τις βέλτιστες ρυθμίσεις αναλόγως εποχής, μήνα, τοποθεσίας και ειδικότερα παρόντων καιρικών συνθηκών. Αυτό το πετυχαίνουν όταν μετά από αυτές τις συνεχής αλλαγές, βρεθούν εκείνοι οι ικανοί συνδυασμοί οι οποίοι μπορούν να πετύχουν το δηλωθέν από τον χρήστη σωστό αποτέλεσμα, λαμβάνοντας υπόψη κάποια ελάχιστα όρια, όπως αλλαγές του λόγου lidar αναλόγως της τιμής του λόγου lidar κοντινών καιρικών φαινομένων όπως για παράδειγμα ο λόγος lidar για το “Moderate Fog”, θα κινείται μεταξύ “Cumullus Cloud” και “Light Fog” κτλ.

Ένας άλλος τρόπος που μπορεί να επιτευχθεί η μέτρηση της ορατότητας, είναι εκείνος που χρησιμοποιεί τις Εξ. 55-57 [Pantazis et al. (2017)]. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τις διαθέσιμες μετρήσεις lidar που έγιναν σε συγκεκριμένες θέσεις και σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, ταξινομημένες κατά εποχή και έχοντας μελετημένη – γνωστή ατμοσφαιρική σύνθεση, χρησιμοποιώντας τον συντελεστή Absorption Angstrom (AAE) (ο οποίος ορίζει την εξάρτηση της απορρόφησης των αερολυμάτων από συγκεκριμένο μήκος κύματος) και τον Exponent Extermination Angstrom (EAE), (που είναι η ένδειξη του αντίστοιχου μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα [Russell (2010)]), αλλά και μαζί με σημαντικές μετεωρολογικές συνθήκες, όπως η σχετική υγρασία (RH), η θερμοκρασία, η παρουσία βροχής κλπ., καθώς και η γεωγραφική θέση, γίνεται εφικτό να ανακτηθούν μετρήσεις ορατότητας.

Η ιδέα είναι ότι με τη διεξαγωγή μετρήσεων lidar σε διαφορετικά μήκη κύματος σε διαφορετικές τοποθεσίες εν μέσω διαφορετικών γνωστών μετεωρολογικών συνθηκών, στη διάρκεια του χρόνου, θα μπορούσε κάποιος να ανακτήσει την ορατότητα και τις μετεωρολογικές συνθήκες με καλή προσέγγιση, σε ένα μόνο μήκος

κύματος (πχ στα 355 nm) (Εξ. 55 έως 57):

$$a(\lambda_1)/\alpha(\lambda_2) = \beta(\lambda_1)/\beta(\lambda_2) = L \quad (55)$$

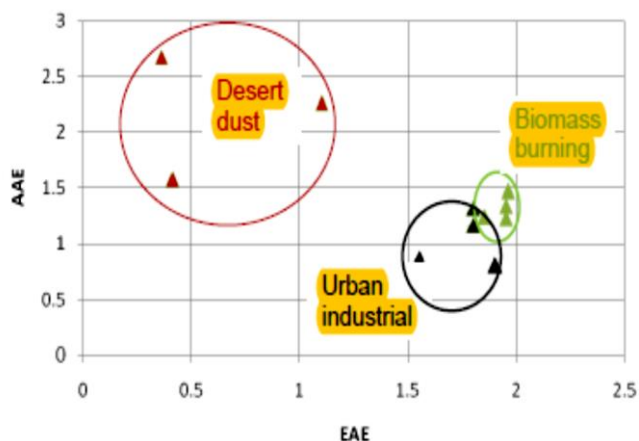
Με σκοπό να υπολογιστούν τα:

$$\beta(\lambda_1) = L * \beta(\lambda_2) \quad (56)$$

$$\alpha(\lambda_1) = L * \alpha(\lambda_2) \quad (57)$$

όπου, λ_1 , λ_2 είναι διαφορετικά μήκη κύματος, για παράδειγμα $\lambda_1 = 355$ nm, όπου έχουν ληφθεί οι μετρήσεις lidar και $\lambda_2 = 550$ nm, όπως η ορατότητα και η κατηγοριοποίηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών έχει οριστεί – περιγραφεί από [Measures (1992), Wright (1966)]. Το L, είναι μια σταθερά που ορίζεται από διαφορετικές τιμές, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν σε διαφορετικές εποχές, χημικές συνθέσεις της ατμόσφαιρας, σε οποιαδήποτε γεωγραφική θέση χρησιμοποιώντας τις Εξ. 55 έως 57. Πραγματοποιήθηκε εξέταση επί σειρά ετών και διαφορετικών εποχών σε δεδομένα lidar και σύγκριση των τιμών $\lambda_1 = 355$ nm και $\lambda_2 = 532$ nm όπου και ευρέθη ότι η σχέση ο μέσος όρος (M.O.) του L είναι ίσος με 0.74 (+0.06, -0.04), με το μέγιστο των περιπτώσεων να συντάσσονται με την τιμή αυτή (± 0.02).

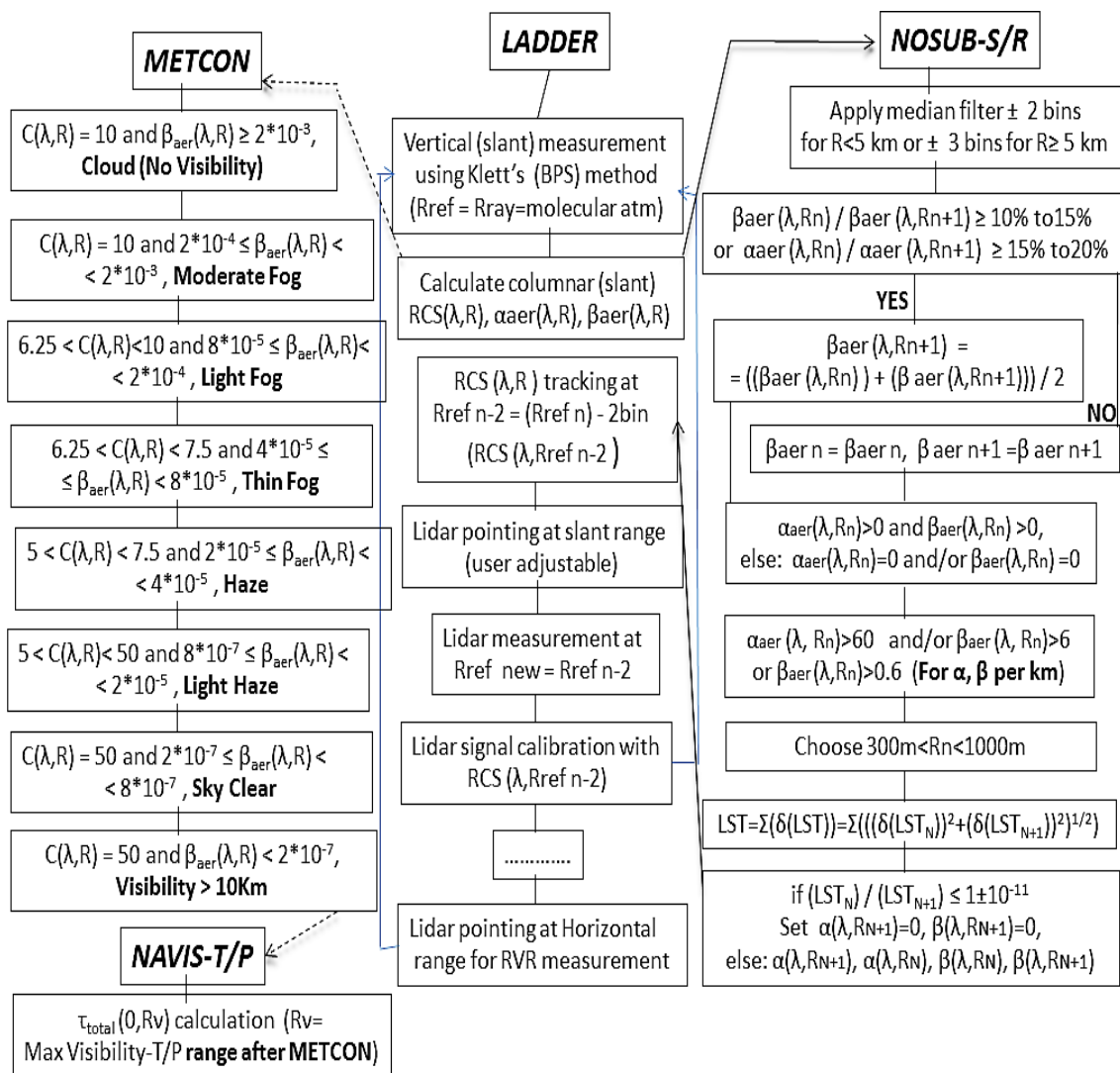
Οι αμφιβολίες σχετικά με τη σύνθεση αερολύματος ή τα μείγματα που προκύπτουν σε ορισμένες τιμές AAE είναι ικανές να μειωθούν με ομαδοποίηση, όπως προτείνεται από τους [Russell (2010)]. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 5.7 [Russell (2010)] παρουσιάζονται οι τιμές AAE έναντι EAE (για τα 440 nm και 880 nm) για 11 Μη-ωκεάνιες τοποθεσίες AERONET. Έτσι, θα μπορούσε κάποιος να κατηγοριοποιήσει γενικότερα τα διάφορα είδη αερολυμάτων. Σε αυτό το συγκεκριμένο παράδειγμα (Σχήμα 5.7) υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ του τύπου αερολύματος της περιοχής Solar Village / Σαουδικής Αραβίας και του δάσους Boreal, όπου οι αντίστοιχες τιμές EAE δεν έχουν καμία ομοιότητα (0,4 και 1,9 αντίστοιχα), όπου δείχνει μεγαλύτερα μεγέθη σωματιδίων στην τελευταία τοποθεσία.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα σκέδασης παραχθείσας από δεδομένα AERONET, AAE έναντι EAE για τις 11 μη-ωκεάνιες θέσεις, που δείχνουν την ομαδοποίηση με τύπο αερολύματος χρησιμοποιώντας το ζεύγος μήκους κύματος 440 nm και 880 nm [Russell (2010)].

Παραπάνω παρουσιάστηκαν μερικά τυπικά παραδείγματα εφαρμογών των τεχνικών των ανωτέρω αλγορίθμων, με "πραγματικά" δεδομένα lidar που αποκτήθηκαν από το σύστημα LRSU του ΕΜΠ. Έχουν αξιολογηθεί πάνω από 100 συνολικά περιπτώσεις διαφορετικών καιρικών συνθηκών που είναι σε θέση να παράσχουν αξιόπιστα αποτελέσματα με τους προαναφερθέντες αλγόριθμους, οι οποίοι βρέθηκαν σε πολύ καλή συμφωνία (> 94%) εκείνης των 355 nm, έναντι δεδομένων lidar στα 1064 nm, χρησιμοποιώντας το νόμο του Koschmieder και τα διαγράμματα του Wright σε συνδυασμό με την τεχνική 3D Stepping ή LADDER για επικλινείς μετρήσεις, τους λοιπούς αλγορίθμους μας και τις τιμές AAE - EAE.

Τελικά, όσον αφορά την ορατότητα σε 3D και την αναγνώριση των ατμοσφαιρικών στρωμάτων που την επηρεάζουν μέσω αξιόπιστης ανάκτησης των $P'(\lambda, R)$ ή σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS), $\beta_{aer}(\lambda, R)$ και $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, χρησιμοποιείται ο νόμος του Koschmieder καθώς και τα διαγράμματα του Wright που παράγονται από το MAPP (SRI) [Wright (1966), AMOFSG (2013)], σε συνδυασμό πάντα με την τεχνική 3D Stepping ή LADDER, τους λοιπούς αλγορίθμους που παρουσιάζονται εδώ και / ή τις τιμές AAE - EAE. Έτσι, επιτυγχάνεται η παραμετροποίηση της κατακόρυφης / κεκλιμένης και οριζόντιας ορατότητας, σύμφωνα με τους κανόνες ICAO και WMO.



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα ροής των αλγορίθμων LADDER, Denoising - 1/2 ή NOSUB – S/R, Weather Phenomena ή METCON και Visibility ή NAVIS-T / P. Το σύμβολο υποδηλώνει την επανάληψη των παραπάνω βημάτων από την κάθετη στην οριζόντια κατεύθυνση της συσκευής, για τη μέτρηση ορατότητας διαδρόμου [Pantazis et al. (2017)].

Επιπλέον, είναι εφικτό να πληρούνται και οι συνθήκες για την ασφάλεια των ανθρωπίνων οφθαλμών, σύμφωνα με τα μέτρα που αναφέρονται στο [Wright (1966)] και το Αμερικανικό Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων, ANSI (American National Standards Institute), στα 355 nm ή σε άλλο επιθυμητό μήκος κύματος, παράλληλα με την μέτρηση της ορατότητας. Επομένως, η Μέγιστη Επιτρεπόμενη Έκθεση, MPE (Maximum Protected Exposure), που πρέπει να είναι $10^{-3} \text{ J} / \text{cm}^{-2}$ μπορεί να τηρηθεί

από ένα σύστημα lidar και παράλληλα να ανιχνεύονται ατμοσφαιρικά στρώματα σε τρεις διαστάσεις. Έτσι, μία συσκευή τρισδιάστατης σάρωσης lidar που πληρεί τις προαναφερόμενες απαιτήσεις καθώς και αυτές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ασφάλεια από laser ακτινοβολία, EN 60825-1: 2007, μαζί με τους προτεινόμενους αλγόριθμους, τείνει να είναι μια βέλτιστη επιλογή.

Παρόλο που οι ανωτέρω αλγόριθμοι και τεχνική, μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα ο καθένας, παραπάνω στο Σχήμα 5.8, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της ικανότητας διαλειτουργικότητας αυτών, σε συνδυασμό. Επομένως, η εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής 3D Stepping ή LADDER σε συστήματα τρισδιάστατων παλμικών πολυκαναλικών lidar που λειτουργούν στα αεροδρόμια, σε συνδυασμό με την χρήση των αλγορίθμων Denoising - 1/2 ή NOSUB – S/R, Weather Phenomena ή METCON και Visibility ή NAVIS, έχουν πολλά να προσφέρουν στην εκτίμηση της οριζόντιας - κεκλιμένης και κάθετης ορατότητας από την οπτική των Ελεγκτών Εναερίου Κυκλοφορίας του αεροδρομίου, τους μετεωρολόγους, αλλά και από την οπτική του χειριστή πιλότου, συμβάλλοντας τα μέγιστα της Ασφάλειας Πτήσεων (και αντίστοιχα στην Ασφάλεια της Ναυσιπλοΐας).

5.6 Αλγόριθμος MUSTI – L/D ή VASPAT – L/D και Ατμοσφαιρική διαστρωμάτωση

Τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας, τα οποία παρουσιάζονται κυρίως στην χαμηλότερη τροπόσφαιρα, είναι οι καλύτεροι ιχνηθέτες της ατμοσφαιρικής κίνησης και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μελετήσουν τη δομή του PBL [Stull (1988)]. Για την ανίχνευση αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας η καλύτερη περιοχή μήκους κύματος βρίσκεται μεταξύ 1-3 μm [Sasano (1989)]. Οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται εδώ λειτούργησαν επί δεδομένων οπισθοσκέδασης στα 355 nm και τα αποτελέσματα που ελήφθησαν συγκρίθηκαν για την αποτελεσματικότητά τους, με εκείνα τα αποτελέσματα που ελήφθησαν ταυτόχρονα στα 1064 nm, σχετικά με την ανάκτηση PBLH και υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Το συγκεκριμένο μήκος κύματος στα 355 nm έχει επιλεγεί, κυρίως λόγω των συνθηκών ασφάλειας που μπορεί να παρέχει κατά την εκπομπή του στους ανθρώπινους οφθαλμούς, σε αυτή τη φασματική περιοχή [Pantazis et al. (2017)]. Ειδικότερα, η ασφάλεια των ανθρωπίνων οφθαλμών μπορεί να επιτευχθεί σε απόσταση περίπου 1 m για μια τυπική δέσμη laser με ενέργεια ανά παλμό 10-30 mJ στα 355 nm με διάρκεια παλμού 6-8 nsec και επαναληπτικότητα 10-20 Hz), ακολουθώντας τα πρότυπα της ΕΕ για την ασφάλεια εκπομπής του laser EN 60825-1:

2007.

Ο αλγόριθμος MUSTI (Multiple Space Time filters) ή VASPAT (VARIABLE SPACe - Time filters) όπως παρουσιάζεται παρακάτω, μπορεί να αποκαλύψει την παρούσα ατμοσφαιρική διαστρωμάτωση (Layering - L) και την χωρική κατανομή (Distribution - D) με βάση τον ανακτώμενο συντελεστή $\beta_{aer}(\lambda, R)$ και / ή $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS), με βάση τα δεδομένα τρισδιάστατης σάρωσης. Όταν τα L και D ανακτώνται τότε μπορεί κανείς να μετρήσει την ταχύτητα του ανέμου σε 3D με συνεχή μέτρηση των κατακόρυφων κατανομών των συντελεστών $\beta_{aer}(\lambda, R)$ και / ή $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS), χρησιμοποιώντας μια διαφορετική τεχνική από αυτή που προτείνεται στο [Tomás (2015)]. Οι συγκεκριμένος αλγόριθμος SIBESMEA θα αναλυθεί και σε παρακάτω ενότητα μέτρησης του ανέμου με lidar χωρίς την ανάγκη χρήσης επιπλέον συσκευής Doppler. Ο αλγόριθμος MUSTI - L/D ή VASPAT - L/D είναι απαραίτητος για τον επόμενο αλγόριθμο MUSTI - PBLH ή αλλιώς VASPAT - PBLH, ο οποίος ειδικεύεται στην ανάκτηση του PBLH και θα συζητηθεί και αυτός στην επόμενη ενότητα.

Στον MUSTI - L/D ή VASPAT - L/D, υπολογίζεται ο συντελεστής $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (ή / και $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένου ως προς την απόσταση (RCLS)) στην κατακόρυφη διεύθυνση ή σε κλίση του 3D lidar, με την απόσταση (R), μετά από την βαθμονόμηση του σήματος και υπολογισμού αντίστοιχα του σήματος lidar διορθωμένου ως προς την απόσταση (RCLS), μετά και την απομάκρυνση του θορύβου από το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα. Η διαδικασία μπορεί να γίνει σε όλα τα ληφθέντα σήματα δεδομένων lidar που λαμβάνονται μέσα σε ένα χρονικό διάστημα μιας ώρας ή και λιγότερο [Stull (1988), (2013)].

Σε αυτήν την Διδακτορική διατριβή, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν ρυθμίσεις κατάλληλες για τιμές $\beta_{aer}(\lambda, R)$ προκειμένου να αποδειχθεί η ορθότητα της αρχής λειτουργίας του αλγορίθμου, όπως αυτή δίνεται παρακάτω, συγκρινόμενη πάντα με προφίλ από οπισθοσκεδαζόμενο σήμα στα 1064 nm. Ωστόσο, αυτή η αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου, παραμένει η ίδια, με διαφορετικές ίσως ρυθμίσεις, για διαφορετικά είδη τύπων μέτρησης όπως με δεδομένα σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) κτλ, τα οποία λαμβάνονται υπόψη από τον χρήστη.

Συνεχίζοντας, οι υπολογιζόμενες τιμές του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ "διαμερίζονται" σε μικρότερα "χωρικά φίλτρα" προκειμένου να δημιουργηθεί ένα διαφορετικό είδος «μαθηματικών εργαλείων - συνθηκών» για επεξεργασία. Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήσαμε 12 διαφορετικά φίλτρα χώρου (G1 έως G269) από 7,5 m (1 bin) έως 2017,5 m (269 bins). Τα όρια αυτά και ειδικότερα αυτό των 269 bins επιλέχθηκαν

κυρίως για λόγους αποκάλυψης ατμοσφαιρικής διαστρωμάτωσης και χωρικής κατανομής τους στην περίπτωση οριζόντιας μέτρησης lidar και RVR:

$$G3 = 3 * bin = 3 * 7.5(m) \quad (58)$$

όπου, το G3 αντιπροσωπεύει το «χωρικό φίλτρο» της ομάδας – πακέτου των 3 bins.

Έπειτα, ελέγχεται αν οι υπολογιζόμενες τιμές $\beta_{aer}(\lambda, R)$ σε οποιοδήποτε από αυτά τα χωρικά φίλτρα είναι μεγαλύτερες από την τιμή των $8 * 10^{-7} m^{-1} sr^{-1}$ με $C(\lambda, R) = 50 sr$ ($\alpha_{aer}(\lambda, R) 10^{-5} m^{-1}$), γιατί μία τιμή μεγαλύτερη από αυτή, σημαίνει ότι υπάρχουν ατμοσφαιρικά φαινόμενα όπως Fog, Haze κλπ, όπως αναλύθηκε σε παραπάνω ενότητες (Σχήμα 5.4), στα 355 nm. Έπειτα, ελέγχεται αν οι τιμές $\beta_{aer}(\lambda, R)$ σε οποιοδήποτε από αυτά τα χωρικά φίλτρα σε σχέση με επόμενο πακέτο ίσου αριθμού bins (“χωρικό φίλτρο”), είναι μεγαλύτερες κατά ένα ποσοστό του 10% (ποσοστό που παράγεται στατιστικά μετά εξέταση ενός μεγάλου αριθμού μετρήσεων), για να διαπιστώσουμε αν η διαφορά μεταξύ των τιμών $\beta_{aer}(\lambda, R)$ βρίσκεται εντός της κανονικής ταλάντωσης του συντελεστή του ίδιου ατμοσφαιρικού στρώματος ή έχει να κάνει με κάποια σημαντική αλλαγή που δηλώνει παρουσία διαφορετικού ατμοσφαιρικού στρώματος:

$$\beta_{aer}(\lambda, R)_{G3} / \beta_{aer}(\lambda, R)_{G3+1} > 0.1 \quad (59)$$

ή

$$\beta_{aer}(\lambda, R)_{G3+1} / \beta_{aer}(\lambda, R)_{G3} > 0.1 \quad (60)$$

όπου, το $\beta_{aer}(\lambda, R)_{G3}$, είναι η τιμή του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ του χωρικού φίλτρου του πακέτου των 3 bins και $\beta_{aer}(\lambda, R)_{G3+1}$, του επόμενου “χωρικού φίλτρου” του πακέτου των 3 bins επίσης.

Σε επόμενο βήμα, ο αλγόριθμος υπολογίζει την 1^{η} ($d\beta_{aer}(\lambda, R)_{G3} / dR$) και την 2^{η} παράγωγο ($d^2\beta_{aer}(\lambda, R)_{G3} / dR^2$) και αν μεταξύ συνεχόμενων χωρικών φίλτρων ανιχνεύονται κλίσεις στο γράφημα του $\beta_{aer}(\lambda, R)_{Gn}$ της τάξεως άνω των 12° (1^{η} παράγωγος) (Εξ. 63, 64) και ανίχνευση πιθανών κοιλίων κτλ (2^{η} παράγωγος) (Εξ. 65, 66) που είναι ύποπτα για πιθανή ύπαρξη διαφορετικού ατμοσφαιρικού στρώματος ή συνύπαρξης διαφορετικών ατμοσφαιρικών στρωμάτων ή ακόμη και το ίδιο ατμοσφαιρικό στρώμα με αισθητά διαφορετική ένταση (συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων, ταχύτητας κτλ):

$$M3DR = \{d(\beta_{aer}(\lambda, R)_{G3}) / dR\} \quad (61)$$

$$M3DDR = \{d^2(\beta_{aer}(\lambda, R)_{G3})/dR^2\} \quad (62)$$

$$M3DRP = M3DR > 0.212 \quad (63)$$

$$M3DRN = M3DR < -0.212 \quad (64)$$

$$M3DDRP = M3DDR > 0 \quad (65)$$

$$M3DDRN = M3DDR < 0 \quad (66)$$

όπου, το M3DR είναι ένας πίνακας με στοιχεία τις τιμές της παραγώγου πρώτης τάξης του πακέτου των τριών bins, στο εύρος R, το M3DDR είναι ένας πίνακας επίσης με στοιχεία, τις τιμές της παραγώγου δεύτερης τάξης, το M3DRP είναι η μήτρα των θετικών τιμών του M3DR, το M3DRN είναι ο πίνακας των αρνητικών τιμών του M3DR, το M3DDRP είναι ο πίνακας των θετικών τιμών του M3DDR και το M3DDRN είναι ο πίνακας των αρνητικών τιμών του M3DDR.

Εδώ χρειάζεται να οριστεί ο όρος «συμφωνία», για να δηλωθούν οι υπάρχουσες τιμές στα στοιχεία των αντίστοιχων πινάκων, ως συνάρτηση της απόστασης, με τιμές διαφορετικές από το μηδέν αναλόγως της συνθήκης της «συμφωνίας». Έτσι, αν συμφωνούν τότε, το νέο στοιχείο του νέου (παραγωγικού) πίνακα, παίρνει την τιμή 1, αφού πληρούνται οι όροι «αληθών» συνθηκών ή, 0, όταν δεν συμφωνούν, οπότε πληρούνται "ψευδείς" συνθήκες. Αυτοί οι πίνακες χρησιμοποιούνται σε όλα τα είδη των χωρικών φίλτρων, όπως για παράδειγμα ο M169DR είναι ο πίνακας με στοιχεία των παραγώγων πρώτης τάξης του πακέτου των 169 bins, στην απόσταση (R) και το M55DDR είναι το παράγωγο δεύτερης τάξης του πακέτου των 55 bins στην απόσταση R, κλπ.

Στη συνέχεια, ελέγχεται εάν τα παράγωγα πρώτης τάξης έχουν το ίδιο πρόσημο (θετικό ή αρνητικό) για ένα αριθμό συνεχών «χωρικών φίλτρων» όπως για παράδειγμα για τα G2, G3 και G5. Έτσι, εάν τα παράγωγα πρώτης τάξης με το ίδιο πρόσημο, αντιστοιχούν σε τιμές μεγαλύτερες από 12° γωνιακής αλλαγής (που παράγεται στατιστικά για την εκτίμηση της σοβαρής αλλαγής της ατμοσφαιρικής διαστρωμάτωσης, αποθηκεύονται στην απόσταση (Rx) από την τοποθεσία του συστήματος lidar που συμβαίνουν. Μια «αρχή» ενός στρώματος, σε σχέση με την θέση που εδρεύει το σύστημα lidar, που παράγεται από τις θετικές τιμές των παραγώγων πρώτης τάξης (> 12° γωνιακή μεταβολή των τιμών του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ - συνιστάται) και τις θετικές τιμές των παραγώγων της 2ης τάξης, συν 10% αλλαγή του μέσου όρου των τιμών του $\beta_{aer}(\lambda, R)$, από το επόμενο πακέτο ίσου αριθμού bins. Κατά

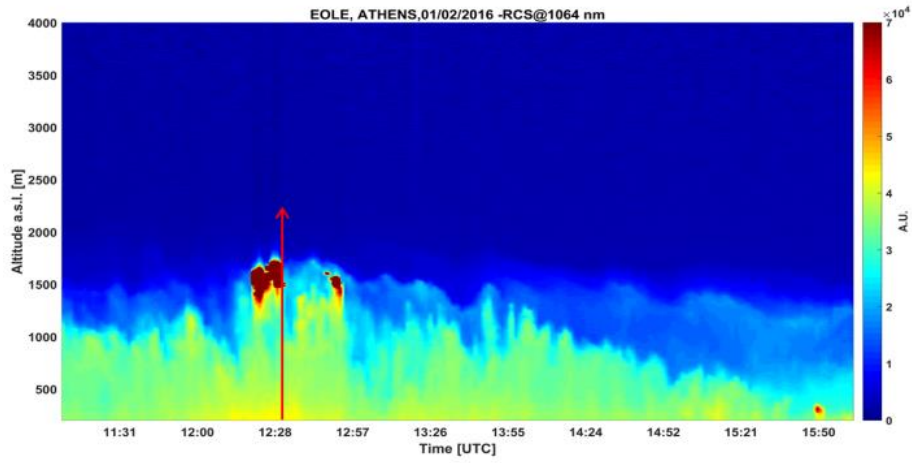
συνέπεια, το «τέλος» ενός στρώματος που παράγεται από αρνητικές τιμές των παραγώγων πρώτης τάξης ($> 12^\circ$ γωνιακή αλλαγή των τιμών του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ - συνιστάται) και οι αρνητικές τιμές των παραγώγων δεύτερης τάξης, συν 10% (λ, R) από ο επόμενο πακέτο ίσου αριθμού bins.

Στο Σχήμα 5.9 (γ), με το μπλε χρώμα είναι οι «αρχές - εκκινήσεις» και με το πράσινο χρώμα είναι οι «λήξεις» μιας περίπτωσης ατμοσφαιρικής διαστρωμάτωσης που παρουσιάζεται για το σκοπό αυτό (όπου δύο ή περισσότερες συνεχόμενες μπλε ή πράσινες γραμμές χρώματος, χωρίς διαφορετικό χρώμα (μεταξύ των γραμμών ιδίου χρώματος), δείχνει ότι η $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (και / ή $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) συνεχίζει να αυξάνεται (μπλε γραμμή) ή αντίστοιχα μειώνεται (πράσινη γραμμή). Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να έχουμε μια καλύτερη αντίληψη των L και D όπως αυτά αναλύθηκαν.

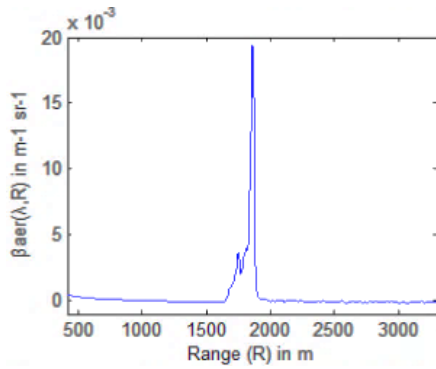
Κατόπιν, γίνεται ανίχνευση και παρακολούθηση αυτών των κοινών υψών – αποστάσεων «αρχής» και «τέλους» διαφορετικών στρωμάτων ατμοσφαιρικής διαστρωμάτωσης και παρακολουθείται η εξέλιξη αυτών μεταξύ ίσων και διαφορετικών, αλλά συνεχών, “χωρικών φίλτρων” και παράγεται έτσι ένας μέσος όρος για τα κοινά αυτά ύψη – αποστάσεις «αρχής» και «τέλους» διαφορετικών ατμοσφαιρικών στρωμάτων, μεταξύ 1 έως 5 bins διακύμανσης (7,5 έως 55 m χωρική ακρίβεια) η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των bins έκαστου πακέτου που διαλέγει ο χρήστης, καθώς και από την απόσταση – χωρική διακριτική ικανότητα, του συστήματος lidar.

Με αυτό τον τρόπο ο αλγόριθμος είναι σε θέση να παριστά συνολικά την ατμοσφαιρική διαστρωμάτωση (MUSTI - L/D ή VASPAT - L/D) και να έχουμε μια σαφή κατανόηση της χωρικής κατανομής αυτής (MUSTI - L/D ή VASPAT - L/D) και του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (και / ή $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένου ως προς την απόσταση (RCLS)) εντός ένας τρισδιάστατου τόπου που περιβάλλει ένα σύστημα lidar ή μια περιοχή, για παράδειγμα ενός αεροδρομίου (Σχήμα 5.9). Όπου με το μπλε χρώμα είναι οι «αρχές» ενός ατμοσφαιρικού στρώματος και με το πράσινο χρώμα είναι τα «τελειώματα», σύμφωνα με το β. δ) Χρωματιστή οπτικοποίηση των μετεωρολογικών συνθηκών σύμφωνα με εξαγόμενα αποτελέσματα εφαρμογής αλγορίθμου Weather Phenomena ή METCON (Σχήμα 5.6). Η στήλη μπλε χρώματος συμβολίζει την παρουσία “Light Fog”, η κόκκινου χρώματος, συμβολίζει την παρουσία “Moderate Fog”, μοβ, για “Thin Fog”, πράσινη, για “Haze”, γαλάζια για “Light Haze”, και η κίτρινη στήλη δηλώνει καθαρό Ουρανό (ορατότητα 6 - 10 km). Όπου δεν υπάρχει χρώμα (λευκό), υπάρχει “Πολύ καθαρός” ή “Εξαιρετικά καθαρός ουρανός”.

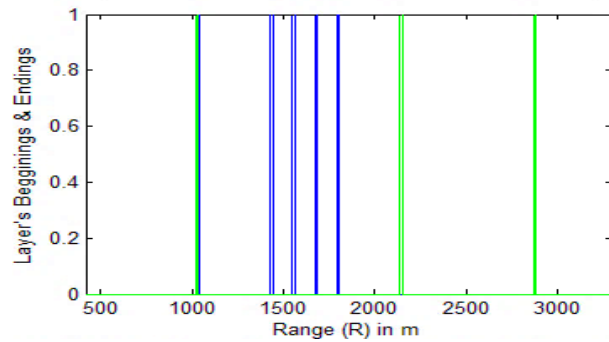
α).



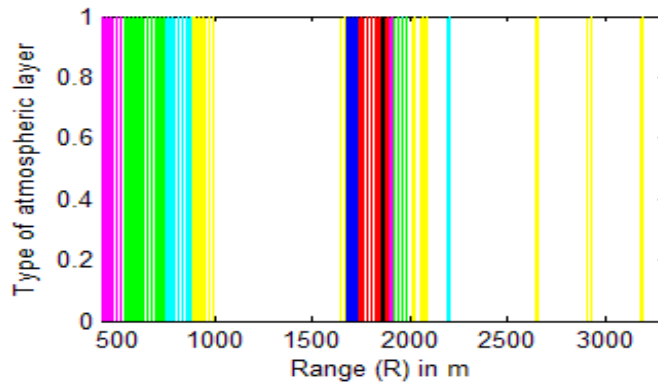
β).



γ).



δ).



Σχήμα 5.9: α). Το σήμα lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) που ανακτήθηκε στα 1064 nm από τα δεδομένα LRSU NTUA στις 12:29:40 UTC της 01/02/2016 .

β). Υπολογιζόμενο $\beta_{aer}(\lambda, R)$ από την μέτρηση. γ). Αλγόριθμος MUSTI - L/D ή VASPAT - L/D σε χρήση στα 355 nm. [Pantazis et al. (2018)].

Οι αλγόριθμοι MUSTI - L/D ή VASPAT - L/D δημιουργούν μία ένωση – έλεγχο τιμών των πινάκων που αναφέρθηκαν, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή των αποτελεσμάτων τους. Όλοι οι πίνακες παρουσιάζουν τις αντίστοιχες πληροφορίες αρχικά με τα $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (και / ή $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) με την απόσταση (R) - ύψος, αντίστοιχα για τις κεκλιμένες ή κατακόρυφες μετρήσεις, συγκεκριμένα:

(i) Αρχικά λαμβάνεται ένα αρχείο καταγραφών οπισθοσκέδασης και υπολογίζονται αντίστοιχα οι τιμές $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (ή / και $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) - αντίστοιχα, αλλά υπενθυμίζεται ότι οι τιμές – ρυθμίσεις παρακάτω, απαντούν στις ρυθμίσεις που θέτουμε για το $\beta_{aer}(\lambda, R)$ στα 355 nm).

(ii) Στη συνέχεια, δημιουργούμε δύο διαφορετικούς πίνακες, B και C, όπου τα στοιχεία του B αποτελούνται από τις τιμές του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ στο σύνολο των bins-απόστασης ωφέλιμου σήματος οπισθοσκέδασης. Τα στοιχεία του C περιέχουν το πραγματικό εύρος (R) σε αριθμό bins (ή υπολογίζονται αντίστοιχα σε m):

$$B = \{\beta_{aer}(\lambda, R)\} \quad (77)$$

$$C = \{R\} \quad (78)$$

(iii) Στη συνέχεια, δημιουργούνται τα χωρικά φίλτρα με διαδικασία εξομάλυνσης-μέσου όρου των τιμών τους κάθε 2, 3, 5, 9, 15, 27, 41, ... 269 δεσμεύοντας τις τιμές των στοιχείων του πίνακα B και οι νέες αυτές τιμές από τον υπολογισμό τους εισάγονται ως νέα στοιχεία των νέων δημιουργηθέντων πινάκων M2, M3, M5 ... M269. Σε αυτή την εργασία δημιουργήθηκαν 12 χωρικά φίλτρα – μαθηματικά εργαλεία για επεξεργασία (ο αριθμός τους εξαρτάται από τον χρήστη) και σημειώνεται ότι τα “χωρικά φίλτρα” έχουν να κάνουν με τη δημιουργία – καθορισμό νέων «μονάδων μέτρησης» - συνθήκες μέτρησης, για χρήση τους από τους αλγορίθμους:

$$M3 = \{G3, R\} \quad (79)$$

(iv) Κατόπιν, ελέγχεται κάθε στοιχείο αυτών των πινάκων (M2, M3 ...) εάν οποιαδήποτε αλλαγή των τιμών $\beta_{aer}(\lambda, R)$ από στοιχείο σε επόμενο στοιχείο κάθε

πίνακα M με την απόσταση και ελέγχεται αν είναι μεγαλύτερη αυτή η αλλαγή από 10% και αποθηκεύονται τιμές αυτές στην αντίστοιχη απόσταση R_x . Σημειώνεται ότι αυτό το βήμα έχει να κάνει με την παρακολούθηση των τιμών του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ που δηλώνει εάν η μεταβολή είναι σύμφωνη με μια κανονική αλλαγή των τιμών του κατ' απόσταση, εντός ενός συγκεκριμένου ατμοσφαιρικού στρώματος, ή, έχει να κάνει με αλλαγή μετεωρολογικών συνθηκών, όπως η «αρχή» ή το «τέλος» ενός νέφους, ομίχλης ή άλλου ατμοσφαιρικού στρώματος (Εξ. 70, 71). Παρακολουθούνται λοιπόν οι τιμές αυτές με την απόσταση R_x όπου εντοπίζονται από την lidar συσκευή, για περαιτέρω επεξεργασία και τοποθετούνται στους πίνακες H2, H3, H5 ... H269 αντίστοιχα:

$$H3 = \{M3, [\beta_{aer}(\lambda, R)_{G3} / \beta_{aer}(\lambda, R)_{G3+1} > 0.1]\} \quad (70)$$

ή

$$H3 = \{M3, [\beta_{aer}(\lambda, R)_{G3+1} / \beta_{aer}(\lambda, R)_{G3} > 0.1]\} \quad (71)$$

(v) Ελέγχεται ποιες τιμές του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ των πινάκων H3, H5 ... H269 είναι μεγαλύτερες από $8 * 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ ($C(\lambda, R) = 50 \text{ sr}$, $\alpha_{aer}(\lambda, R) > 4 * 10^{-5} \text{ m}^{-1}$), όπου, σύμφωνα με Weather Phenomena ή METCON είναι η αρχή κάποιων μετεωρολογικών συνθηκών στα 355 nm. Εάν αυτές οι τιμές των στοιχείων των πινάκων είναι μικρότερες από την ανωτέρω, εξαιρούνται από τις μήτρες H3, H5, ... H269. Σε αυτό το βήμα (v) του αλγορίθμου μπορούμε να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα τοποθετώντας διαφορετικές τιμές $\beta_{aer}(\lambda, R)$ για διαφορετικά μήκη κύματος του συστήματος lidar σύμφωνα με Weather Phenomena ή METCON, όπως ειπώθηκε παραπάνω.

(vi) Σε αυτό το βήμα, δημιουργούνται πίνακες παραγώγων πρώτης τάξης για κάθε χώρο φίλτρου από μήτρες (M) όπως M2DR, M3DR, M5DR ... M269DR οι οποίες τιμές αντιστοιχούν σε διαφορές στην αλλαγή γωνίας μεγαλύτερες από 12° (στατιστικά παραγόμενη τιμή αποφεύγοντας τις κανονικές ταλαντώσεις ενός συγκεκριμένου στρώματος και σύμφωνα με το συγκεκριμένο χωρικό φίλτρο. Η διαφορά αυτή στην κλίση μπορεί να μεταβάλλεται με το τρόπο όπου όσο μεγαλύτερο είναι το χωρικό φίλτρο, τόσο μικρότερη μπορεί να είναι η απαιτούμενη γωνιακή αλλαγή ($> 10^\circ$) - ρυθμιζόμενο από τον χρήστη όπως και την επιλογή των "χωρικών φίλτρων" προς επεξεργασία).

(vii) Στη συνέχεια, διαχωρίζονται αυτά τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων πινάκων σε θετικά και αρνητικά παράγωγα πρώτης τάξης. Σε αυτή τη διαδικασία, θέσαμε τα θετικά παράγωγα πρώτης τάξης στους πίνακες M2DRP, M3DRP, M5DRP ... M269DRP και τα αρνητικά στους M2DRN, M3DRN, M5DRN ... M269DRN.

(viii) Δημιουργούνται διαφορετικά είδη πινάκων όπου τα θετικά και αρνητικά παράγωγα πρώτης τάξης χωρίζονται, στα DP2, DP3 ... DP269 για τα θετικά παράγωγα πρώτης τάξης που «συμφωνούν» με τους πίνακες H (τιμές διαφορετικές από το μηδέν), στο αντίστοιχο “χωρικό φίλτρο” και DN2, DN3 ... DN269, που αντιπροσωπεύει τα αρνητικά παράγωγα πρώτης τάξης, ακολουθώντας παρόμοιο τρόπο σκέψης (Εξ. 72, 73):

$$DP3 = \{M3DRP, H3\} \quad (72)$$

$$DN3 = \{M3DRN, H3\} \quad (73)$$

όπου, η DP3 (που χρησιμοποιείται συνήθως για τις "αρχές - εκκινήσεις" ενός ατμοσφαιρικού στρώματος) είναι ο πίνακας που περιλαμβάνει τους M3DRP και M3DDRP και DN3 (που χρησιμοποιείται συνήθως για τα "τερματισμό – πέρασ - λήξη" ενός ατμοσφαιρικού στρώματος) είναι ο πίνακας που περιλαμβάνει τους M3DRN και M3DDRN, οι οποίοι «συμφωνούν» με τους H πίνακες, με τιμές διαφορετικές από τη μηδενική στην αντίστοιχη απόσταση R_x και αντίστοιχο “χωρικό φίλτρο”.

(ix) Κατόπιν δημιουργούνται νέοι πίνακες παραγώγων δεύτερης τάξης για κάθε χωρικό φίλτρο σε ολόκληρη την απόσταση (R_x) των πινάκων (M) που ονομάζονται M2DDR, M3DDR ... M269DDR.

(x) Διαχωρίζονται οι δημιουργούμενοι πίνακες M2DDR, M3DDR ... M269DDR σε εκείνες με θετικές τιμές στοιχείων στην αντίστοιχη απόσταση, με το όνομα M2DDRP, M3DDRP ... M269DDRP και σε εκείνες με αρνητικές τιμές αντίστοιχα, με το όνομα M2DDRN, M3DDRN ... M269DDRN, οι οποίες συμφωνούν με τις H μήτρες.

(xi) Υλοποιείτε και πρακτικά η ιδέα των "εκκινήσεων" και των "λήξεων" διαφορετικών ατμοσφαιρικών στρωμάτων, με τη δημιουργία των πινάκων M2S, M3S ... M269S για τις "εκκινήσεις" όπου συμπεριλαμβάνονται στοιχεία «συμφωνίας» των στοιχείων των πινάκων DP3 ... DP269 με τα στοιχεία των πινάκων M2DDRP, M3DDRP ... M269DDRP και "λήξεις" που εκπροσωπούνται από τους πίνακες M2F, M3F ... M269F και περιλαμβάνουν στοιχεία «συμφωνίας» των στοιχείων των πινάκων, DN2, DN3 ... DN269 καθώς και των M2DDRN, M3DDRN ... M269DDRN (Εξ. 74, 75):

$$MS3 = \{DP3, M3DDRP\} \quad (74)$$

$$MF3 = \{DN3, M3DDRN\} \quad (75)$$

(xii) Σε αυτό το σημείο, έχουν δημιουργηθεί όλες οι πιθανές «εκκινήσεις» (M2S, M3S ... M269S μήτρες) και «λήξεις» (M2F, M3F ... M269F). Στη διαδικασία καλύτερης αποσαφήνισης ενός προϊόντος «εκκίνησης» ή «λήξης» με την απόσταση, θα πρέπει τα «κοντινά» χωρικά φίλτρα να συμφωνούν από την άποψη της εμβέλειας ή του ύψους ανίχνευσης αυτών. Για παράδειγμα, για να υπάρχουν τιμές στον M3S σε μια R_x απόσταση, πρέπει να υπάρχουν σε αυτή την περιοχή και τιμές από το M2S και πιθανότατα και από το M5S διαφορετικές από μηδέν, γιατί διαφορετικά μπορεί να υφίσταται απλά μια «νόρμαλ» ταλάντωση του υπάρχοντος ατμοσφαιρικού στρώματος, χωρίς να δηλώνεται κάποιο νέο στρώμα. Η επιλογή του ακριβούς εύρους (R_x) που ο αλγόριθμος υποδηλώνει μια 'αρχή' ή ένα 'τέλος' ενός στρώματος, γίνεται από τα προϊόντα που παράγονται από την επιλογή, αρχικά, του χωρικού φίλτρου, που δίνει και την ακρίβεια της ίδιας περιοχής ενδιαφέροντος (συνίσταται περιοχή λίγων μέτρων).

Για καλύτερη ρύθμιση της συμφωνίας μεταξύ παραγόμενων προϊόντων από τα χωρικά φίλτρα συνίσταται όπως ο χρήστης να είναι εξοικειωμένος με τη θέση που μετράει και για ψυχρή και στρωματοποιημένη ατμόσφαιρα, τα προϊόντα των φίλτρων χώρου θα πρέπει να συμφωνούν όσον αφορά την εγγύτητα γύρω από τα κοντινά φίλτρα χώρου για κατακόρυφες ή σχεδόν κατακόρυφες μετρήσεις, ενώ, για πιο διαταραγμένο καιρό, όπως είναι εκείνος που υπάρχει σε πιο ζεστά κλίματα με μίξη μεγαλύτερων ατμοσφαιρικών στρωμάτων, θα πρέπει κατά την συμφωνία των παραγόμενων προϊόντων των πινάκων να υπάρχει συμφωνία σε μια ευρύτερη περιοχή χωρικών φίλτρων (αυτό το σημείο ορισμού - κατηγοριοποίησης της ατμόσφαιρας για επιλογή κατάλληλων χωρικών φίλτρων, μπορεί να αποφασιστεί αυτόματα από τον αλγόριθμο VERDE ή DECIS όπως αναλύεται σε παρακάτω ενότητα).

(xiii) Σε αυτό το βήμα δημιουργούνται νέοι πίνακες με ταονόματα LAY (LAY2, LAY3, LAY5 ... LAY269) και NLAY (NLAY2, NLAY3, NLAY5 ... NLAY269) που δηλώνουν LAYering. (Οι πίνακες LAY υποδηλώνουν ένα στρώμα με σχηματισμό "καμπυλότητας" και το NLAY δηλώνει το διάστημα μεταξύ των στρωμάτων με παρουσία σχηματισμού "κοιλότητας"). Έτσι, οι μήτρες LAY2, LAY3, LAY5 ... LAY269 περιλαμβάνουν τη συμφωνία, όσον αφορά την περιοχή, των DP2, DP3, ... DP269 και M2DDRN, M3DDRN ... M269DDRN πινάκων και αντίστοιχα, οι πίνακες NLAY3, NLAY5 ... NLAY269, περιλαμβάνουν τη συμφωνία των DN2, DN3, ... DN269 και M2DDRP, M3DDRP ... M269DDRP. Είναι χαρακτηριστικό για τα MS και MF στοιχεία των πινάκων να περιβάλλουν τα νέα παραγόμενα στοιχεία, όσον αφορά την απόσταση, των πινάκων LAY και NLAY (Εξ. 76, 77). Με αυτόν τον τρόπο γίνεται μια απομόνωση των υπαρχόντων στρωματώσεων:

$$LAY3 = \{DP3, M3DDRN\} \quad (76)$$

$$NLAY3 = \{DN3, M3DDRP\} \quad (77)$$

(xiv) Σε περίπτωση συνεχόμενων στοιχείων της μήτρας MS από άποψη απόστασης – εμβέλειας από τη θέση που βρίσκεται το σύστημα lidar, χωρίς την ύπαρξη ενός στοιχείου μήτρας MF, μεταξύ των στοιχείων MS, να χρησιμοποιείται το στοιχείο MS που βρίσκεται στην μικρότερη απόσταση από τη θέση του συστήματος lidar, ως η αρχή – εκκίνηση του παρόντος ατμοσφαιρικού στρώματος (εντός μιας απόστασης 10 με 15 bins για κατακόρυφες μετρήσεις) και αντίστοιχα, το μακρύτερο στοιχείο συνεχόμενων MFστοιχείων από την άποψη της απόστασης, ως τη λήξη του. Συνεπώς, για την ύπαρξη των στοιχείων μήτρας MF και χωρίς την ύπαρξη ενός στοιχείου μήτρας MS, το στοιχείο μήτρας MF με τη μεγαλύτερη απόσταση συνιστάται να χρησιμοποιείται ως το «τέλος» του παρόντος στρώματος (εντός μιας απόστασης 10 με 15 bins για κατακόρυφες μετρήσεις).

(xv) Σε αυτό το βήμα, όλες οι «εκκινήσεις» και «λήξεις» που έχουν απομείνει ως στοιχεία, ελέγχονται ξανά ως προς το εάν υπάρχουν περισσότερες από μία «εκκινήσεις» ή «τερματισμοί» αντίστοιχα, που υπάρχουν σε κοντινή απόσταση και με χωρική ανοχή από 10 έως 15 bins (ανάλογα με την ακρίβεια που χρειάζεται ο χρήστης). Για τιμές των στοιχείων των πινάκων LAY και NLAY, διαφορετικών από το μηδέν, υπολογίζεται ένας μέσος όρος (εντός μιας απόστασης 10 με 15 bins για κατακόρυφες μετρήσεις) για να παραχθεί μια σαφέστερη «αρχή» ή «τελος» για τον χρήστη και η παρακολούθηση αυτής της τελικής διαστρωμάτωσης εισάγεται σε μια τελική, νέα μήτρα που ονομάζεται LAYER :

$$\begin{aligned} LAYER = \{ & LAY2, LAY3, \dots, LAY269, \\ & NLAY2, NLAY3, \dots, NLAY269\} \end{aligned} \quad (78)$$

(xvi) Τέλος, τα αποτελέσματα της μήτρας LAYER παρουσιάζονται σε διαφορετικά χρώματα για τις «εκκινήσεις» και «λήξεις» ώστε να έχουμε μια καλή εικόνα του L της ατμόσφαιρας καθώς και του D του β_{aer} (λ , R), προς την κατεύθυνση του προσανατολισμού του συστήματος lidar (Σχήμα 5.9 (γ)).

(xvii) Τα στρώματα μπορούν επίσης να χρωματιστούν και να υπολογιστεί και το οπτικό βάθος (τ) κάθε στρώματος και μπορεί να γίνει κατηγοριοποίηση, σύμφωνα με Weather Phenomena ή METCON σε οποιοδήποτε μήκος κύματος, ένα σύστημα εκπέμπει. Με αυτό τον τρόπο οι εκκινήσεις και λήξεις ατμοσφαιρικών στρωμάτων μπορεί επίσης να γίνει με τον αλγόριθμο Weather Phenomena ή METCON (Σχήμα 5.9

(δ)). Είναι επίσης πρακτικό για τα συστήματα lidar αποπόλωσης να χρωματίζουν τα διάφορα είδη αιωρούμενων σωματιδίων σε οποιαδήποτε απόσταση και ένα προφίλ του βάθους στρωματοποίησης αιωρούμενων σωματιδίων κάθε είδους μπορεί να γίνει για λόγους φιλικής προς το χρήστη, χρήσης, αλλά και απεικόνισης των στρωματώσεων της ατμόσφαιρας και των αιωρούμενων σωματιδίων.

Τέλος, εάν ο χρήστης ορίζει την πραγματική ατμοσφαιρική διαστρωμάτωση, με διαφορετικό τρόπο, προερχόμενη από δορυφορική μέτρηση (πχ IR camera) ή πχ scatterometer επί ραδιοβολίδας ή άλλου ιπτάμενου μέσου την περίοδο της lidar μέτρησης, τότε ο αλγόριθμος MUSTI - L/D ή VASPAT – L/D έχει την δυνατότητα όπως διορθώσει την διαστρωμάτωση αυτή συγκρινόμενη αρχικά με τον Weather Phenomena ή METCON και διορθώνοντας τον Weather Phenomena ή METCON σε σχέση με τα δεδομένα εισαγωγής του χρήστη. Ουσιαστικά εκκινείται μια διαδικασία βελτίωσης των τιμών του λόγου lidar, όπως ειπώθηκε ήδη και με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται το σήμα λήψης ώστε να βελτιωθούν και τα στοιχεία επί των πινάκων κατά την επεξεργασία του αλγορίθμου MUSTI - L/D ή VASPAT – L/D. Επίσης, σημειώνει και αυτός την ώρα της ημέρας και εποχής – μήνα, συν την τοποθεσία GPS ορισμού από τον χρήστη, ώστε να αποφαίνεται καλύτερα σε επόμενες μετρήσεις με την ίδια διαδικασία μηχανικής μάθησης όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

5.7 Αλγόριθμος MUSTI - PBLH ή VASPAT – PBLH

Παρακολουθώντας τα αποτελέσματα του αλγορίθμου MUSTI - L/D ή VASPAT – L/D και του πίνακα LAYER, είναι πλέον η ώρα να γίνει χρήση και των «χρονικών φίλτρων» που αναπτύσσονται (“Time filters”) σε αυτή την ενότητα, στον δρόμο για μία τετραδιάστατη (4D) ανάκτηση του PBLH.

Γίνεται μέτρηση για τουλάχιστον 15 έως 20 min (συνίσταται), για περίπτωση κατακόρυφων μετρήσεων και να αποκτήσουμε έτσι τουλάχιστον 15 (τουλάχιστον) ή περισσότερα αρχεία δεδομένων οπισθοσκέδασης lidar. Τα «χρονικά φίλτρα» έχουν να κάνουν με τα 15 ή περισσότερα αρχεία δεδομένων οπισθοσκέδασης τα οποία παρακολουθούνται χρονικά. Με άλλα λόγια, παρακολουθείται η διαστρωμάτωση και η χωρική κατανομή του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ στον πίνακα LAYER, αλλά αυτή τη φορά, ελέγχονται μόνο οι παραγόμενες “λήξεις” καθώς αυτές ενδιαφέρουν, αντιμετωπίζοντας το «στρώμα» του PBLH ως «λήξη» ενός ατμοσφαιρικού στρώματος γενικότερα. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, ανακτάται το PBLH ως ένα στρώμα που έχει «τελος», χωρίς συγκεκριμένη «αρχή - εκκίνηση» σε κάθε συγκεκριμένο μικρό χρονικό πλαίσιο των 15 ή περισσότερων λεπτών, για κατακόρυφες ή σχεδόν κατακόρυφες μετρήσεις. Το

ιδανικό θα ήταν ~ 30' καταγραφής του $\beta_{aer}(\lambda, R)$, αλλά σε κάθε περίπτωση λιγότερο από 60' [Stull (1988, 2013)], όπου το PBLH θα μπορούσε να έχει μια μικρή ή μεσαία αλλαγή ειδικά σε νορμάλ – μη έντονα διαταραγμένες καιρικές συνθήκες. Η ιδέα είναι να επωφεληθεί ο χρήστης από αυτό το μοναδικό χαρακτηριστικό του PBLH που μοιάζει με ένα κοινό «τέλος» στο χρόνο της ερευνητικής δραστηριότητας, χρησιμοποιώντας παραγόμενα αποτελέσματα του αλγορίθμου MUSTI - L/D ή VASPAT – L/D, με τον χρόνο.

Έπειτα, ελέγχονται τα ύψη αυτών των «λήξεων» και αν αυτά υπερβούν μια κοινή περιοχή PBLH για εκείνη την εποχή του έτους και για την τοποθεσία του συστήματος lidar (ψυχρότερα ή θερμότερα κλίματα, με χαμηλότερα ή υψηλότερα PBLH αντίστοιχα - παρέχονται από τον χρήστη). Προσθείεται (και αφαιρείται αναλόγως), κάποιος ύψος από εκείνη την περιοχή των κοινών πιθανών PBLH για να παραχθεί μια ευρύτερη περιοχή αναζήτησης κοινού ύψους PBLH και με αυτόν τον τρόπο εξαιρούνται οι "λήξεις" μεγαλύτερου ύψους για να αποκλειστεί η δυνατότητα λήψης υψηλότερων "λήξεων", όπως πχ από σύννεφα, αντί για του PBLH και εξαιρούνται επίσης οι "λήξεις" του κατώτερου στρώματος έντονης οπισθοσκέδασης, οι οποίες και αυτές θα μπορούσαν δυνητικά να οδηγήσουν σε λανθασμένη ανάκτηση του PBLH. Σημειώνεται ότι η κοινή περιοχή ανάκτησης του PBLH που παρέχεται από τον χρήστη, δεν είναι υποχρεωτική για την εύρυθμη λειτουργία του αλγορίθμου MUSTI - PBLH ή VASPAT – PBLH και χρησιμοποιεί και από μόνος του ιστορικά στοιχεία ανάκτησης PBLH.

Στη συνέχεια, ελέγχεται ποιο είναι το πιο κοινό ύψος με τις περισσότερες "λήξεις" σε όλες τις καταγραφές των 15 έως 20' (συνιστάται) των 15 ή περισσότερων αρχείων δεδομένων μας, όπου το PBLH δεν θα ποικίλει πολύ (περισσότερο από 300 έως 500 m εντός μιας ώρας μέτρησης [Stull (1988, 2013)]) σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα και ακόμη και στην περίπτωση διαταραγμένων καιρικών συνθηκών, όπου παρατηρείται απότομη αλλαγή του, θα μπορεί εύκολα εκείνο να παρατηρηθεί και να ληφθεί από τα αρχεία καταγραφών της μέτρησης, τα οποία για εδώ υπολογίζονται ότι έχουν μια χρονική κλίμακα μέγιστου περίπου 1-2' το καθένα. Στη συνέχεια, ένα μέσο ύψος των μετρήσεων των πιο κοινών «λήξεων» εντός 10 έως 15 bins ύψους (συνιστάται) θα δοθεί ως PBLH, ακόμη και αν αυτό αλλάζει δυναμικά και βίαια. Αν η συχνότητα εμφάνισης ενός κοινού «τέλους - λήξης» που παράγεται σε αυτό το σημείο, γίνεται το ίδιο σε περισσότερα από μία κοινή «λήξη», με τη διαφορά μικρότερη από τα 100-150 m, τότε, 2 ή περισσότερα αρχεία καταγραφών πρέπει να προστεθούν σε αυτή τη διαδικασία, για να έχουν ένα κοινό «τέλος - λήξη» με τουλάχιστον δύο φορές εμφάνισης περισσότερες από το δεύτερο πιο κοινό PBLH ύψος (συνιστάται).

Υπάρχει περίπτωση τα περισσότερα από τα ατμοσφαιρικά στρώματα να είναι σύννεφα και ως γνωστό, το σύννεφο τελειώνει φυσικά ή αλλάζει δραματικά στο «τελείωμά» του ως καταγραφή οπισθοσκέδασης εντός αυτής της σε σύντομης χρονικής περιόδου ή ακόμα καλύτερα όταν ο χρόνος εγγραφής είναι σχεδόν 30' ή ακόμα και 45' (ρυθμιζόμενος από το χρήστη). Έτσι, με αυτόν τον τρόπο, τα σύννεφα δεν πρέπει να παράγουν κοινά ύψη στις τελικώς καταγραφόμενες κοινές «λήξεις» σε αυτή τη διαδικασία αναζήτησης και ως εκ τούτου, εξαιρούνται ως στοιχεία, από τον πίνακα των PPBLH (Possible PBLH) που δίδεται παρακάτω.

Φυσικά και είναι δυνατό, για οποιοδήποτε στρώμα ή σύννεφο σε μια δυναμική ή ομαλή ατμόσφαιρα, να έχει ένα "τέλος - λήξη", σε κάποια ή όλα τα χρονικά πλαίσια που ψάχνουμε. Είναι εξαιρετικά δύσκολο όμως να διατηρήσει σταθερό αυτό το «τέλος», στο ίδιο εύρος, όταν η παρακολούθηση των φίλτρων χώρου ξεκινά με χωρική ανάλυση 1 bin (= 7,5 m). Με κάθε τρόπο και για να αποφευχθεί αυτή η μικρή αλλαγή με την ανίχνευση ενός κοινού στρώματος ή «λήξεως» νέφους, ως PBLH, εκτός από την προσαρμογή του χρόνου εγγραφής, παρακολουθείται ταυτόχρονα και ο πίνακας LAYER και τις αντίστοιχες «αρχές» αυτών των «λήξεων». Τα μη κοινά «τέλη - λήξεις», αν υπάρχουν, λαμβάνονται υπόψη τους πίνακες LAY και NLAY κάθε αρχείου εγγραφής για τις καμπυλότητες και τις κυρτώσεις στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα. Οι παράγωγοι που υπολογίζονται στην διάρκεια της παραπάνω διαδικασίας και εφόσον τα ήδη παραγόμενα PBLH έχουν την συναίνεση του χρήστη (από διόρθωση δική του ή επειδή συμφωνεί με το αποτέλεσμα) λαμβάνονται υπόψη ως μέτρο, μαζί με τις τιμές των υπαρχόντων $\beta_{aer}(\lambda, R)$, $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS), για περαιτέρω αναγνώρισή τους ως υποψήφια για ανάκτηση PBLH, με ανοχή 2-3% (συνιστάται) σε συνδυασμό με την ανοχή ύψους [Stull (2013)] όπως αναφέρθηκε ήδη.

Αυτό γίνεται για να αποφασιστεί αν θα αφαιρεθούν αυτά τα «τέλη - λήξεις» από τον πίνακα PPBL των πιθανών υψών PBL. Μετά από κάθε «αρχή – εκκίνηση» πρέπει κανονικά να αναμένεται και ένα «τέλος - λήξη». Για να επιτευχθεί αυτό αυτόματα και αυτόνομα, γίνεται καταγραφή και προηγούμενων αναφορών PBLH στα οποία ο χρήστης δεν έχει εκφράσει την αντίθεσή του ή αν εξέφρασε λαμβάνει αυτά ως σωστά υπό τις δικές τους συνθήκες και με αυτόν το τρόπο παρακολουθείτε από τον αλγόριθμο ένας μεγάλος αριθμός πακέτων που έχουν ήδη παράγει PBLH από πριν. Με αυτό τον τρόπο γίνεται να παραταθεί ο χρόνος παρατήρησης και να διορθωθούν οι ψευδείς ανακτήσεις PBLH, λαμβάνοντας υπόψη τη γενική αρχή, ότι ένα PBLH θα μπορούσε να έχει μικρή αλλαγή ύψους, αλλά συνήθως όχι μεγαλύτερη από 300 έως 500 μέτρα εντός μιας ώρας [Stull (1988, 2013)].

Έτσι, για διαταραγμένες καιρικές συνθήκες, μπορεί να είναι χρήσιμες 2 ή 3 προηγούμενες ανακτήσεις PBLH (συνιστάται), αλλά σε πιο ήπιες καιρικές συνθήκες, 3 ή και 4 ανακτήσεις PBLH ή και περισσότερο, θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμες. Ο λόγος είναι ότι σε διαταραγμένες καιρικές συνθήκες, το PBLH μπορεί να αλλάζει δραματικά κάθε φορά, ενώ, σε περιπτώσεις στρωματοποιημένων καιρικών συνθηκών, ίσως χρειαστεί περισσότερος χρόνος εγγραφής για να εντοπιστεί σαφώς το ακριβές PBLH για περιπτώσεις κατακόρυφης καταγραφής δεδομένων οπισθοσκέδασης lidar.

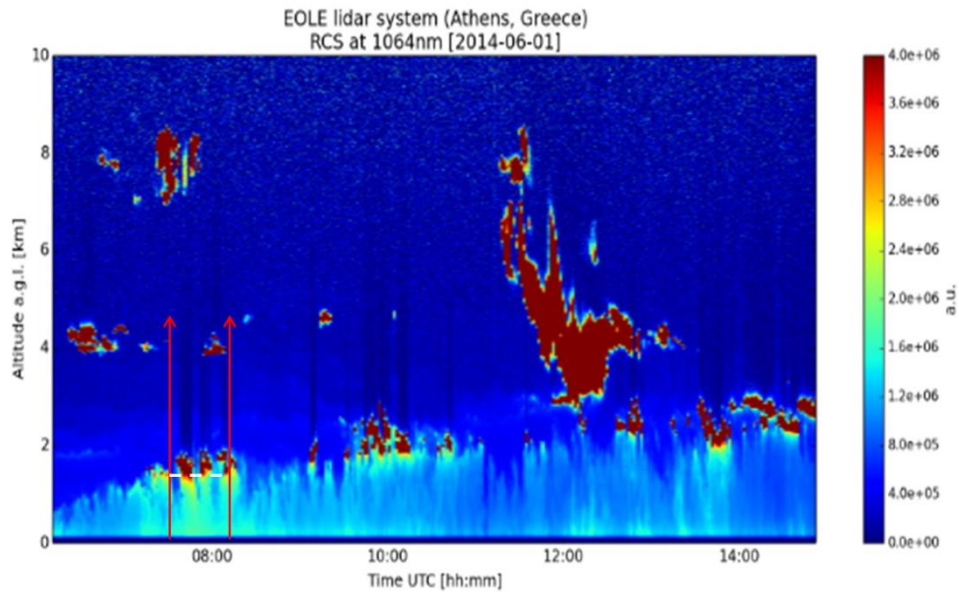
Ο μέγιστος χρόνος εγγραφής που θα μπορούσε να γίνεται η εγγραφή συνιστάται να είναι μια ώρα για τον λόγο που αναφέρθηκε. Για περιπτώσεις καταγραφών οπισθοσκέδασης σε 3D, για ανάκτηση PBLH, γίνεται αναφορά σε παρακάτω ενότητα με άλλο αλγόριθμο (3D PBLH Retrieval) και μία νέα τεχνική (Fastplan ή Uniform). Επίσης, ο αλγόριθμος DECIS ή VERDE (επόμενη ενότητα) συμμετέχει και αυτός στην αυτόματη αυτή απόφαση του απαιτούμενου χρόνου καταγραφής, απαντώντας σε “ερωτήσεις” σχετικά με τις «παρούσες καιρικές συνθήκες» που είναι κυρίως υπεύθυνες για την ανάπτυξη – διαφοροποίηση του PBLH, με το χρόνο.

Ο αλγόριθμος MUSTI-PBLH ή VASPAT –PBLH μπορεί επίσης να περιοριστεί από ένα ελάχιστο και μέγιστο υψόμετρο της κοινής περιοχής PBLH (πχ από 1000 έως και 5000m), ανάλογα με τη γεωγραφική θέση (γεωγραφικό πλάτος) της μέτρησης και τις πιο συνηθισμένες τιμές PBLH κατά τα προηγούμενα έτη, το αντίστοιχο χρονικό διάστημα που οι μετρήσεις λαμβάνουν χώρα. Η ακριβής τιμή PBLH θα δοθεί, μετά από έναν μέσο όρο των πιθανότερων κοινών «λήξεων», με ελαφρώς διαφορετικά ύψη, τα οποία έχουν τελικά μείνει μετά από επεξεργασία και έχουν επιλεγεί από τον πίνακα PPBLH (Σχήμα 5.10).

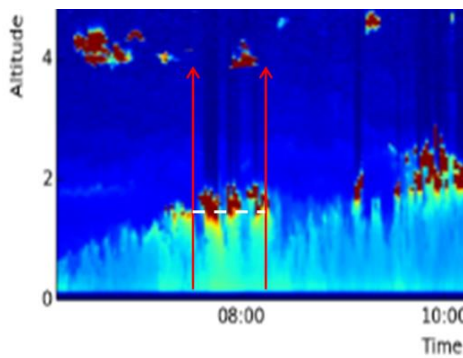
Τέλος, εάν ο χρήστης ορίζει το πραγματικό PBLH, με διαφορετικό τρόπο, προερχόμενο πχ από ραδιοβολίδα ή άλλο αξιόπιστο τρόπο, την περίοδο της lidar μέτρησης, τότε ο αλγόριθμος MUSTI - PBLH ή VASPAT – PBLH έχει την δυνατότητα όπως διορθώσει το ψευδές PBLH συγκρινόμενο αρχικά με τον Weather Phenomena–PBLH ή METCON – PBLH (παρακάτω) και γενικότερα τον Weather Phenomena ή METCON και διορθώνοντας τον τελευταίο σε σχέση με τα δεδομένα εισαγωγής του χρήστη. Ουσιαστικά εκκινείται μια διαδικασία βελτίωσης των τιμών του λόγου lidar, όπως ειπώθηκε και στον MUSTI – L/D ή VASPAT – L/D και με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται το σήμα λήψης, ώστε να βελτιωθούν και τα στοιχεία επί των πινάκων κατά την επεξεργασία του αλγορίθμου MUSTI – PBLH ή VASPAT – PBLH. Με τον τρόπο αυτό μαθαίνει να διαβάζει το είδος των ατμοσφαιρικών συνθηκών – είδους ατμοσφαιρικών στρωμάτων πρέπει να αναζητήσει, σε σχέση με το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα που αυτά δίνουν, για ανάκτηση του PBLH, αναλόγως

εποχής και μήνα στην συγκεκριμένη τοποθεσία, ώστε να αποφαίνεται καλύτερα σε μελλοντικές μετρήσεις. Συγκεκριμένα λειτουργεί ως εξής:

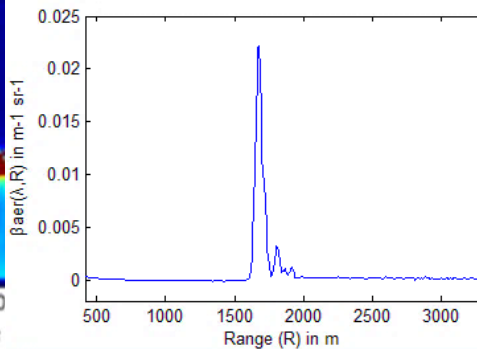
α).



β).



γ).



Σχήμα 5.10: α). Το σήμα lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) που ανακτήθηκε στα 1064 nm από τα δεδομένα LRSU NTUA (1/6/2014). β). Μεγέθυνση του προηγούμενου γραφήματος από 07:44:30 έως 08:07:50 UTC, με MUSTI – PBLH ή VASPAT – PBLH παρείχε εκτίμηση PBLH. γ). $\beta_{\text{aer}}(\lambda, R)$ την 07:46:10 UTC. [Pantazis et al. (2018)].

Σε αυτό το σημείο υπάρχει μια σαφή εικόνα των αποτελεσμάτων ατμοσφαιρικής διαστρωμάτωσης και χωρικής κατανομής του αλγορίθμου MUSTI – L/D ή VASPAT –

L/D, προκειμένου να συνεχιστεί η περαιτέρω παρουσίαση της επεξεργασίας των διαδοχικών σημάτων lidar. Κατόπιν συνεχίζει από το τέλος των βημάτων των MUSTI –L/D ή VASPAT – L/D, οπότε:

(xviii) Εκτελούνται τα βήματα (i) έως (xvii) για περισσότερα από δεκαπέντε (ρυθμιζόμενα από το χρήστη σύμφωνα και με σύσταση από DECIS ή VERDE παρακάτω) αρχεία δεδομένων $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (ή / και $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)), που αντιστοιχούν σε χρόνο καταγραφής 15' ή περισσότερο και τα τοποθετούνται όλα μαζί στον πίνακα MLAYER, που είναι ένας συνδυασμός των πινάκων LAYER, όλων των αρχείων των δεδομένων. Σε αυτό το βήμα χρησιμοποιούνται τα «χρονικά φίλτρα», για πρώτη φορά στους αλγόριθμους MUSTI – L/D ή VASPAT – L/D. Παρακολουθείται ο πίνακας MLAYER που περιλαμβάνει ως στήλες τους LAYER1 έως LAYER15 (ή περισσότερους):

$$MLAYER = \{LAYER1, LAYER2, \dots, LAYER15\} \quad (79)$$

(xix) Σε συνεργασία με τον αλγόριθμο DECIS ή VERDE παρακάτω, εκτελείται ένας άλλος τύπος χρήσης των «χωρικών – χρονικών φίλτρων» του αλγορίθμου MUSTI – PBLH ή VASPAT – PBLH. Σύμφωνα με τον DECIS ή VERDE και την θολότητα της ατμόσφαιρας επιλέγονται διαφορετικοί τρόποι – συνδυασμοί συμφωνιών των πινάκων του MUSTI – L/D ή VASPAT – L/D, μέσω διαφορετικών επιλογών των «χωρικών φίλτρων» και της «συμφωνίας» των προϊόντων τους. Δηλαδή, αναλόγως της συνολικής και τοπικής θολότητας της ατμόσφαιρας που δίνει ο DECIS ή VERDE καθώς και τα ύψη εύρεσης των περισσότερο θολών σημείων της ατμόσφαιρας σε σχέση με την υπόλοιπη, δημιουργούνται νέοι πίνακες ALAYER1, ALAYER2 ... ALAYER15 (για δεδομένα 15 αρχείων καταγραφής ή περισσότερα). Για παράδειγμα, για μια «καθαρή ατμόσφαιρα» (που παράγεται από τους αλγόριθμους DECIS ή VERDE και Weather Phenomena ή METCON ως απεικόνιση), διαφορετικά «χωρικά φίλτρα» και τα προϊόντα τους (χωρικά παράγωγα κ.λπ.) πρέπει να συμφωνούν, για να δημιουργηθεί μια νέα «αρχή» ή ένα «τέλος - λήξη» ατμοσφαιρικού στρώματος, όπως τα «χωρικά φίλτρα» M2, M3, M5 και τα προϊόντα τους.

Αντίθετα, για μια «θολή ατμόσφαιρα», η παραπάνω «συμφωνία» δεν είναι αρκετή και, ως εκ τούτου, τα «χωρικά φίλτρα» M7, M9, M15 και M27 και τα προϊόντα τους, θα πρέπει πλέον να «συμφωνούν», η οποία επιλογή χωρικών φίλτρων και αντίστοιχη συμφωνία των προϊόντων τους, εξαρτάται από την «θολότητα» που δίνεται από το DECIS ή VERDE και από τον Weather Phenomena ή METCON. Πρέπει δηλαδή, διαφορετικά χωρικά φίλτρα και τα προϊόντα τους να συμφωνούν ώστε να υπολογιστεί αυτή τη φορά μια «αρχή» ή ένα «τέλος - λήξη» ενός ατμοσφαιρικού

στρώματος. Η "θολότητα", που δίνεται κυρίως από τον DECIS ή VERDE, έχει να κάνει με την ευρύτητα και την συνεκτικότητα, από την άποψη του ύψους, των υφιστάμενων ατμοσφαιρικών στρωμάτων και η κατάλληλη συμφωνία των αντίστοιχων «χωρικών φίλτρων» και των προϊόντων τους υπολογίζεται μαζί.

Έτσι, όσο μεγαλύτερα και ευρύτερα είναι τα ατμοσφαιρικά στρώματα που ανιχνεύονται, τόσο μεγαλύτερα πρέπει να είναι τα «χωρικά φίλτρα» που πρέπει ληφθούν υπόψη για να τα περιβάλουν χωρικά. Όσο πιο λεπτά είναι τα ατμοσφαιρικά στρώματα, τόσο μικρότερη είναι η ολική θολότητα και χρειάζονται μικρότερα «χωρικά φίλτρα» για να ληφθούν υπόψη αυτή τη φορά. Η "θολότητα" της ατμόσφαιρας μπορεί να μετρηθεί όπως ειπώθηκε ήδη με τον αλγόριθμο DECIS ή VERDE και τον αλγόριθμο Weather Phenomena ή METCON, αλλά σε κάθε περίπτωση, ο DECIS ή VERDE δεν αποφασίζει εάν υπάρχει μια «αρχή» ή ένα «τέλος» ενός ατμοσφαιρικού στρώματος καθώς και την ακριβή απόσταση R_x που αυτά συμβαίνουν. Αυτό γίνεται με τους αλγόριθμους MUSTI – L/D ή VASPAT – L/D, με τη βοήθεια του DECIS ή VERDE.

(xv) Ακολούθως, δημιουργείται ένας νέος πίνακας που ονομάζεται N LAYER, και ο οποίος είναι ένας πίνακας όπου παρακολουθεί μόνο τα «τελειώματα» ατμοσφαιρικών στρωμάτων.

(xvi) Σε αυτό το σημείο, ο χρήστης έχει εισάγει συνήθως περιοχή PBLH για την περιοχή μελέτης, ανάλογα με την ώρα της ημέρας και της εποχής - μήνα. Έτσι, δημιουργείται ένας ευρύτερος χώρος από άποψη ύψους (ρυθμιζόμενος από το χρήστη). Οποιαδήποτε εγγραφή στον πίνακα N LAYER εκτός αυτών των ορίων ύψους, μπορεί να αποκλειστεί ή να χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύον, πιθανό PBLH εάν εντός του ανατεθέντος εύρους υψών από τον χρήστη δεν μπορεί να διακριθεί ξεκάθαρο PBLH (βλ. παρακάτω).

(xvii) (Προαιρετικά: Ειδικά για διαταραγμένες καιρικές συνθήκες - απόφαση αλγόριθμου DECIS ή VERDE) Σε αυτό το βήμα ελέγχονται τα υπόλοιπα «τελειώματα – λήξεις» του πίνακα M LAYER και ελέγχονται επίσης και οι πίνακες A LAYER για να βρεθούν οι αντίστοιχες «αρχές» τους με την μέθοδο της γειννίασης, μιας «αρχής» και επερχόμενου «τέλους» ατμοσφαιρικών στρωμάτων, τα οποία συλλέγονται σε νέο πίνακα τον B LAYER. Μια καλή τακτική είναι να εξαιρούνται περαιτέρω επεξεργασίας αρχικά τα "τέλη", όταν οι αντίστοιχες "αρχές" τους είναι κοντά σε μια περιοχή 2 έως 3 bins ($3 * 7.5 \text{ m} = 22.5 \text{ m}$) για περιπτώσεις σύννεφων και από εκεί να αυξάνεται σταδιακά η περιοχή έρευνας μεταξύ μιας «αρχής» και ενός «τέλους» ατμοσφαιρικών στρωμάτων (το 'τέλος' έχει αντίστοιχη 'αρχή' σε χαμηλότερο ύψος για μέτρηση συστήματος lidar από το έδαφος). Εν πάση περιπτώσει, εάν υπάρχει ατμοσφαιρική

στρώση λεπτότερη από 20 m σε κατακόρυφες μετρήσεις, τότε αυτό θα μπορούσε να είναι ένα λεπτό σύννεφο ή μια αρκετά λεπτή μάζα αέρα που ταξιδεύει και θα μπορούσε να αφαιρεθεί. Δημιουργείται έτσι ένας νέος πίνακας που ονομάζεται XLAYER με τα υπολειπόμενα υπολογιζόμενα «τέλη».

$$BLAYER = \{ALAYER1, \dots, ALAYER15, MLAYER\} \quad (80)$$

(xxiii) Σε περίπτωση που ισχύουν σταθερές καιρικές συνθήκες (εκτίμηση DECIS ή VERDE και Weather Phenomena ή METCON) με ισχυρή και σταθερή διαστρωμάτωση στο χρόνο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα προηγούμενως παραγόμενα PBLH (2, 3 ή ακόμα και 4) για να εκτιμηθούν. Δημιουργείται τότε ένας ευρύτερος πίνακας XLAYER, καθώς ενισχύεται με παλαιότερα παραγόμενα PPBLH και PBLH.

(xxiv) Σε αυτό το βήμα, ελέγχεται ο πίνακας XLAYER για κοινές "λήξεις - τελειώματα" από 10 έως 15 bins ύψους μεταξύ όλων των στηλών στον χρόνο καταγραφής. Κοινά 'τέλη' σημειώνονται σε αυτό το βήμα και υπολογίζεται ένας μέσος όρος σε αυτά τα κοινά εναπομένοντα «τελειώματα». Αυτές οι μέσες τιμές ύψους, γειτνιάζοντων «λήξεων» σε ολό τον χρόνο καταγραφής, οδηγούνται σε έναν νέο πίνακα τον PPBLH, των πιθανών υψών PBLH.

(xxv) Στον πίνακα αυτό ελέγχεται για το ποιο είναι το πιο κοινό ύψος 'τέλους' το οποίο θα επιλεγεί ως τελικώς πιθανό PBLH. Εάν σε αυτό το σημείο παράγονται περισσότερες από μία τιμές PBLH με την ίδια συχνότητα εμφάνισης και η διαφορά τους ξεπερνά τα 300 m, τότε απαιτούνται περισσότερα αρχεία καταγραφής δεδομένων μέχρις ότου το πιο συνηθισμένο ύψος εμφάνισης PBLH εμφανιστεί τουλάχιστον δύο φορές περισσότερο (συνίσταται) από το επόμενο πιο συνηθισμένο ύψος «τέλους» (ρυθμιζόμενο από τον χρήστη). Αυτός ο τύπος επεξεργασίας τηρείται, εάν ο χρόνος εγγραφής είναι μικρότερος από 30 ή 40'. Εάν ο χρόνος εγγραφής υπερβαίνει ήδη αυτά τα χρονικά πλαίσια, τότε προτείνεται να επιλεγεί λιγότερος χρόνος εγγραφής (10 – 15') έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί το PBLH.

Αυτό συμβαίνει επειδή, για παράδειγμα, σε μια συννεφιά, μπορεί να εμφανιστούν τελικά σύννεφα στην κορυφή του PBL και το PBLH μπορεί να αλλάζει με το χρόνο, σύμφωνα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Ως εκ τούτου, πέραν του ορίου των 30 έως 40', εάν παράγονται περισσότερες από μία τιμές PBLH με την ίδια συχνότητα, ο χρόνος αυτός περιορίζεται (προτείνεται) σε εγγραφή σε 15-20', αλλά πάντα λιγότερο από 40'. Αυτό γίνεται προκειμένου να αρχειοθετηθούν τα αρχεία δεδομένων από μία πιο ξεκάθαρη ατμόσφαιρα η οποία κινείται πάνω από τη θέση του συστήματος lidar,

για να παράχθει η πραγματική τιμή PBLH με ξεκάθαρα μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης. Για περιπτώσεις διαφοράς PBLH μικρότερης των 300 m (κανονική ταλάντωση PBLH μιας σχεδόν διαταραγμένης ατμόσφαιρας) και χρόνων καταγραφής μικρότερων των 30', λαμβάνεται μια μέση τιμή PBLH (ενημερώνοντας τον χρήστη).

(xxvi) Αν το πιο συνηθισμένο στοιχείο του PPBLH εμφανίζεται λιγότερο από το μισό του αριθμού των αρχείων καταγραφής, τότε λαμβάνονται υπόψη παρόμοιες καταγραφές του πίνακα PPBLH (εντός σε 10 έως 15 bins) και μια μέση τιμή αυτών των "λήξεων", περιορίζεται ο χρόνος καταγραφής, καταλήγωντας σε ένα, πιο "κοινό" ύψος PPBLH. Ο αλγόριθμος μπορεί επίσης και επιστρέφει στο βήμα (xxiii) με τα αποτελέσματα του πίνακα PPBLH και να συνεχίσει την επεξεργασία του με αυτά τα νέα υπολειπόμενα δεδομένα. Αυτή η τελευταία διαδικασία μπορεί να γίνει 2 έως 3 φορές περισσότερο, εάν δεν παράγεται PBLH, σύμφωνα με τις συνθήκες των πιο συχνών PBLH (βήμα (xxv)). Διαφορετικά, ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο βήμα.

(xxvii) Πλέον, η τελική, πιο κοινή εγγραφή του πίνακα PPBLH, δίνεται ως PBLH. Εάν το ύψος λοιπών στοιχείων PPBLH, παρουσιάζει την ίδια πιθανότητα σε αυτό το ύψος, τότε ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα (xxvi) και επαναλαμβάνεται μέχρι το τελευταίο βήμα, λαμβάνοντας υπόψη περισσότερα ή λιγότερα αρχεία δεδομένων, σύμφωνα με το βήμα (xxvi). Και αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για 2 έως 3 φορές ή μέχρι να παραχθεί μια τιμή PBLH, δίνοντας ενημέρωση αυτής της κατάστασης στον χρήστη.

(xxviii) Αν σε αυτό το βήμα, ακόμα δεν μπορεί να υπολογιστεί το PBLH, δίδεται ως PBLH το πλησιέστερο του πίνακα PPBLH στην πιο συνηθισμένη περιοχή PBLH, όπως υποδεικνύεται στην αρχή από τον χρήστη, εντός ενός εύρους 100 έως 300 m (ρυθμιζόμενο από το χρήστη), δίνοντας και εδώ, ενημέρωση αυτής της κατάστασης στον χρήστη.

(xxix) Εάν δεν πληρούνται καμία από τις παραπάνω προϋποθέσεις (βήματα (xxiv) έως (xxviii)), τότε δεν μπορεί να υπολογιστεί PBLH και θα δοθεί ειδοποίηση στο χρήστη "Notable to calculate PBLH". Αυτό μπορεί να συμβεί, για παράδειγμα, όταν υπάρχουν έντονα διαταραγμένες καιρικές συνθήκες σε διάφορα ύψη και έτσι δεν μπορεί να υπολογιστεί κανένα PBLH εντός του εύρους ενίχνευσης του συστήματος lidar ακόμη και από έμπειρο μετεωρολόγο, καθώς δεν εντοπίζεται PBLH με κάποιο τρόπο.

(xxx) Σε αυτό το σημείο, στα παραγώμενα PBLH που δεν έχουν αμφισβητηθεί ή αν αμφισβητήθηκαν λαμβάνεται υπόψη η νέα αυτή εισαγόμενη πληροφορία από τον χρήστη, καταγράφονται οι συνθήκες (τιμές των $\beta_{aer}(\lambda, R)$, $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar

διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) και οι παράγωγοί τους με μια ανοχή 2 – 3% στις τιμές αυτές (συνίσταται) από αρχείο καταγραφής σε επόμενο (εφόσον αυτό ξεπερνά το λεπτό μέχρι την επόμενη καταγραφή), για την αναζήτηση παρόμοιων συνθηκών μελλοντικού PBLH και παρακολούθησής του από αρχείο καταγραφής στο επόμενο, λαμβάνοντας υπόψη και τον περιορισμό ύψους [Stull (2013)] στο συνολικό χρόνο καταγραφής.

Η μέθοδος με την οποία τα «προϊόντα» υπολογίστηκαν από τους MUSTI – PBLH ή VASPAT – PBLH και οι διαφορές των «τιμών μέτρησης» των χωρικών φίλτρων φαίνεται να περιορίζουν τυχόν εσφαλμένες εκτιμήσεις αυτής της ανάκτησης. Δοκιμές ανάκτησης PBLH με τον παραπάνω αλγόριθμο σε δεδομένα lidar οπισθοσκέδασης στα 355 nm στο ΕΜΠ, σε σχέση με μετρήσεις ίδιας ημέρας και παρόμοιας ώρας με ραδιοβολίσεις της ΕΜΥ (κοντινής σχετικά απόστασης και χρόνου καταγραφής), έδειξαν επιτυχία υπολογισμού PBLH σε περίπου 87% των περιπτώσεων που μελετήθηκαν σε ένα ύψος εύρους από 50-75 m (λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα των PBLHs κατά τη διάρκεια του χρόνου εγγραφής, ειδικά για τις διαταραγμένες ατμόσφαιρες και λαμβάνοντας υπόψη την «κάποια» απόσταση μεταξύ ΕΜΠ και ΕΜΥ – Σχήμα 6.2 παρακάτω κεφάλαιο). Είναι γνωστό ότι ισχύει:

$$\beta_{total}(\lambda, R) = \beta_{mol}(\lambda, R) + \beta_{aer}(\lambda, R) \quad (81)$$

και ότι στα 355 nm, το $\beta_{total}(\lambda_{355}, R)$ είναι διαφορετικό από $\beta_{total}(\lambda_{1064}, R)$ στα 1064 nm και ότι σύμφωνα με τη σκέδαση Mie, τα αιωρούμενα σωματίδια είναι ευκολότερα ανιχνεύσιμα στα 1064 από τα 355 nm.

Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο δουλεύουν οι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH με παράγωγα και το ποσοστό αλλαγής του $\beta_{aer}(\lambda, R)$, φαίνεται να δίνουν σωστά αποτελέσματα και στα 355 nm. Με τον όποιο τρόπο πάντως, οι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και ο τρόπος επεξεργασίας τους (δηλαδή μια αλλαγή 10% στις τιμές του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ κτλ) ρυθμίζονται και από το χρήστη ανάλογα με το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται και τη συμπεριφορά του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (ή / και αντίστοιχα του $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)). Επιπρόσθετα, εάν το σύστημα lidar έχει ικανότητα αποπόλωσης αιωρούμενων σωματιδίων, Raman, τότε οι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH, μπορούν να ενισχυθούν και με αυτά τα πρόσθετα σημαντικά στοιχεία, παρέχοντας την ικανότητα χαρακτηρισμού των αιωρούμενων σωματιδίων σε σχέση με το σχήμα τους, σε οποιοδήποτε ύψος ή απόσταση, αλλά και της επικρατούσας θερμοκρασίας στο ύψος αυτό, καθώς και υγρασίας (για περίπτωση ύπαρξης καναλιού ελέγχου υγρασίας), καθώς οι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή

VERDE, μπορούν να είναι προσαρμοσμένοι να λειτουργούν σε οποιοδήποτε μήκος κύματος και μπορούν να δεχθούν επιπλέον στοιχεία εισαγωγής δεδομένων για επεξεργασία, δουλεύοντας αυτόνομα ή σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές ανάκτησης PBLH (Σχήμα 5.12).

5.8 Αλγόριθμος DECIS ή VERDE

Για λόγους ύπαρξης έντονης οπισθοσκέδασης ειδικά στα πρώτα μέτρα από το έδαφος, οι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH μπορεί να χρειαστούν την «βοήθεια» ενός νέου αλγορίθμου του DECIS ή VERDE στην αναζήτηση περίπτωσης χαμηλού PBLH. Αυτό συμβαίνει γιατί στο ύψος των πρώτων εκατοντάδων μέτρων έως και των 1000–1200 m πάνω από το έδαφος, αναλόγως εποχής, υπάρχει έντονη οπισθοσκέδαση από τα αιωρούμενα σωματίδια από τα χαμηλά υψόμετρα και «έντονη» μείωση των τιμών του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (και / ή $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Επίσης, προκειμένου να υπάρχει αυτόνομη χρήση των αλγορίθμων και ειδικότερα των MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην ενότητα 5.7, αλλά και για να περιοριστεί η περιοχή αναζήτησης καθώς και τα πιθανά σφάλματα της ανάκτησης PBLH, εισάγεται εδώ ο αλγόριθμος DECIS ή VERDE, ώστε να ξεπεράσουν τα όποια πιθανά "εμπόδια".

Ο αλγόριθμος DECIS ή VERDE γενικότερα “αποφαίνεται” για την «ποιότητα» - κατάσταση της ατμόσφαιρας άνωθεν της θέσης του συστήματος lidar ή σε κάποια απόσταση από αυτό (περίπτωση συστήματος 3D lidar), και «οδηγεί» την χρήση – επεξεργασία των «χωρικών φίλτρων» και των παραγόντων τους. Γενικά, «διαμερίζει» την εξεταζόμενη ατμόσφαιρα στην περίπτωση ενός κατακόρυφα προσανατολισμένου συστήματος lidar ή κεκλιμένου, σε βήματα των 200 m (συνιστάται και εξηγείται παρακάτω) και μετρά το AOD σε κάθε ένα από αυτά τα πακέτα ατμόσφαιρας των 200 m, από τα χαμηλότερα προς τα μεγαλύτερα ύψη. Το οπτικό πάχος των 200 m επιλέχθηκε εδώ λόγω της ορατότητας που δίνει ένα κάπως έντονο φαινόμενο, το “Moderate Fog” (βλ. Weather Phenomena ή METCON) με σκοπό να δει ο χρήστης πόσα και ποια «μέρη – πακέτα» της ατμόσφαιρας που διαμέρισε τεχνητά, χαρακτηρίζονται ως “Moderate Fog” και σε ποια ύψη, ώστε να γίνει αντιληπτό το είδος της ατμόσφαιρας που περιβάλλει την θέση του συστήματος lidar.

Από την άλλη, το «πακέτο» ατμόσφαιρας των 200 m κρίνεται ικανό, αν χρησιμοποιηθεί ως χωρική διακριτική ικανότητα για εξέταση της ατμοσφαιρας. Ο χρήστης βεβαια μπορεί να ακολουθήσει την ορατότητα που προκύπτει από άλλα

καιρικά φαινόμενα (βλ. Weather Phenomena ή METCON) και να διαλέξει άλλα «πακέτα» ατμόσφαιρας, διαφορετικού μήκους των 200 m και σε συνάφεια με την ορατότητα που αυτά δίνουν, ή, να εξετάσει το κάθε επιλεγέν πακέτο του όποιου μήκους, ως προς το φαινόμενο που το ίδιο ανιχνεύει σε αυτή την απόσταση. Για τους λόγους αυτούς, όπως θα δούμε και παρακάτω, μπορεί να αλλάζει αυτή τη ρύθμιση αναλόγως του είδους της έρευνας.

Ο αλγόριθμος DECIS ή VERDE μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε ύψος ή απόσταση (κάθετα, με κλίση), προκειμένου να παρασχεθεί η θολότητα της ατμόσφαιρας προς την κατεύθυνση εκπομπής και να οδηγηθούν οι αλγόριθμοι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH ώστε να αποφευχθούν τυχόν εσφαλμένοι υπολογισμοί. Κατόπιν, το (τ) υπολογίζεται σε κάθε ατμοσφαιρική «φέτα - πακέτο» ατμόσφαιρας και εάν το (τ) υπερβαίνει ένα φράγμα $2 * 10^{-3}$ στα 355 nm (για εδώ), που είναι το όριο της εκκίνησης του “Moderate Fog” στα 355 nm για το $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ σε m^{-1} και $C(\lambda, R) = 10$ sr, σύμφωνα με Weather Phenomena ή METCON, υπολογίζεται αυτό το ατμοσφαιρικό κομμάτι ως θολό.

Βέβαια το ίδιο όριο ισχύει για κατακόρυφες και μη, μετρήσεις. Όμως, για περιπτώσεις μη κατακόρυφης μέτρησης, ο χρήστης μπορεί επίσης να επιλέξει, αν επιθυμεί να εκτιμά την ατμόσφαιρα σε κάποια κεκλιμένη απόσταση από αυτόν, ως να ήταν ο ίδιος κάτω από κάθε σημείο και να τις συγκρίνει με κατακόρυφες μετρήσεις της περιοχής του στο ίδιο ύψος (ανίχνευση περιπτώσεων στρωματοποιημένης ατμόσφαιρας σε απόσταση), οπότε σε αυτή την περίπτωση, το όριο (τ) ανίχνευσης της θολότητας για κάθε «πακέτο» ατμόσφαιρας που τίθεται, υπολογίζεται αναλόγως της κατακόρυφης γωνίας εκπομπής:

$$\tau_{vertical} = \eta \mu(\phi) * \tau_{slant} \quad (82)$$

όπου, ϕ , η κατακόρυφη γωνία μετρούμενη από το έδαφος και το $\eta \mu(\phi)$ παίζει τον ρόλο συντελεστή λόγω κεκλιμένου επιπέδου που η δέσμη εκπέμπεται αντί της κατακόρυφης οπισθοσκέδασης και δεν έχει κάποια φυσική σημασία.

Κατόπιν, εξετάζονται αυτά τα 200 m και υπολογίζεται το AOD που δίνουν έκαστο από αυτά. Συμπληρωματικά, μετράται το AOD των 200 m κάθε 1-3 bins, εξετάζοντας έτσι όλο το μήκος ωφέλιμου σήματος οπισθοσκέδασης για περιπτώσεις μη ανίχνευσης υπάρχουσας θολότητας από λεπτό ατμοσφαιρικό στρώμα με πάχος μικρότερο των 200 m. Ο DECIS ή VERDE προσπαθεί να βρει πόσες «φέτες – πακέτα» ατμόσφαιρας χαρακτηρίζονται ως θολές και σε ποιο υψόμετρο, ώστε να οδηγηθεί μετά η κατάλληλη χρήση των «χωρικών φίλτρων» των MUSTI – L/D ή

VASPAT – L/D.

Στη συνέχεια, απευθύνεται στον MUSTI – PBLH ή VASPAT – PBLH στη χρήση των MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH LOWER ALT-1, LOWER ALT-2, LOWER ALT-3, LOWER ALT-4 ή MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH HIGHER ALT, τα οποία αποτελούν πρωτοποθετημένες ρυθμίσεις, πριν την χρήση μηχανικής μάθησης από τους MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH όπως αναλύθηκε σε παραπάνω ενότητα. Γίνεται κατανοητό ότι οι παραπάνω αλγόριθμοι, είναι οι ίδιοι αλγόριθμοι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH, αλλά με διαφορετικές ρυθμίσεις, οι οποίες εισάγονται αντίστοιχα για επεξεργασία.

Αυτές οι διαφορετικές ρυθμίσεις, πρέπει να γίνουν πρώτα με την περιοχή ύψους αναζήτησης και με τη συμφωνία 3, 4, 5, 6, 7 ή ακόμα και 8 συνεχόμενων «χωρικών φίλτρων» και των παραγόμενων προϊόντων τους από αλγόριθμους MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH. Για παράδειγμα, τα στοιχεία των M2DR < (- 0.212) και M3DR < (- 0.212) και M5DR < (- 0.212) πρέπει να συμφωνούν σε κάποια απόσταση, ώστε να μπορέσουν να συνεχίσουν στην επεξεργασία του MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και τέλος να παράγουν πιθανά PBLHs στον πίνακα των πιθανών PBLH.

Για παράδειγμα, σε μια συνεχώς θολή ατμόσφαιρα μέχρι το ύψους 3000 m, όπως υποδηλώνει ο DECIS ή VERDE, ο MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT-L/D/PBLH θα προσπαθήσει να βρει το PBLH εκεί που κατά πάσα πιθανότητα βρίσκεται, γύρω στο ύψος των 3000 m, οπότε και ορίζει τα χωρικά του φίλτρα ώστε αυτά να καλύπτουν αυτά τα ύψη επαρκώς, αναζητώντας το ακριβές PBLH, με τρόπο που οι κανόνες επεξεργασίας των MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH, όπως αυτοί αναλύθηκαν σε παραπάνω ενότητα, να πληρούνται.

Η "σωστή" επιλογή των ρυθμίσεων, εξαρτάται από το επίπεδο θολότητας και το υψόμετρο – απόσταση που αυτή εμφανίζεται, τα πιθανά αρχεία δεδομένων που μπορούν να εισαχθούν, όπως η βροχή ή το χιόνι, οπότε και στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται αντίστοιχες ρυθμίσεις MUSTI – L/D/PBLH RAIN / SNOW ή VASPAT – L/D/PBLH RAIN / SNOW για επεξεργασία των δεδομένων lidar. Η διαφορά των δύο τελευταίων με τις προηγούμενες ρυθμίσεις, είναι ότι αποφεύγει πιθανά έντονα spikes στο σήμα οπισθοσκέδασης, μικρής απόστασης 1-3 bins δίνοντας σε αυτά τιμές $\beta_{aer}(\lambda, R)$ γειτονικών επιστροφών. Αυτή η κατάσταση έντονων spikes, εφόσον ανιχνεύεται σε όλο ή μεγάλο μέρος του σήματος, ενεργοποιούν αυτόματα τη ρύθμιση MUSTI – L/D/PBLH RAIN / SNOW ή VASPAT – L/D/PBLH RAIN / SNOW ενημερώνοντας τον χρήστη αν θέλει να την αναιρέσει. Διαφορετικά μπορεί να το δηλώσει και ο ίδιος ο χρήστης, ώστε η ρύθμιση να λαμβάνεται από την αρχή όταν

επιηρρεάζει το σήμα οπισθοσκέδασης με έντονα, μικρής εμβέλειας, spikes. Σε κάθε περίπτωση μαζί με αυτή τη ρύθμιση συνεχίζουν να τρέχουν οι λοιπές ρυθμίσεις των MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH, καθώς ο MUSTI – L/D/PBLH RAIN / SNOW ή VASPAT – L/D/PBLH RAIN / SNOW είναι συμπληρωματικός αυτών. Οπότε στη συνέχεια χρησιμοποιούνται κανονικά αρχικά οι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH LOWER ALT-1, LOWER ALT-2, Κάτω ALT-3, LOWER ALT-4 ή MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLHHIGHER ALT για την ακριβή παραγωγή του PBLH.

Ο DECIS ή VERDE, όπως ειπώθηκε, ενεργοποιεί τον τρόπο με τον οποίο το PBLH θα υπολογιστεί από το πίνακα PPBLH και τα χωρικά φίλτρα που θα επιλεγούν κυρίως σε χρήση. Έτσι, πρώτα "ορίζει" την θολότητα της ατμόσφαιρας και τα ύψη όπου αυτό συμβαίνει (με ανάλυση 200 m για εδώ) και δεύτερον, "οδηγεί" τον τρόπο με τον οποίο θα λειτουργούν οι αλγόριθμοι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH.

Εάν ο DECIS ή VERDE δεν μπορεί να χαρακτηρίσει κανένα κομμάτι της ατμόσφαιρας ως «θολό» με το όριο που αρχικά έχει τεθεί, τότε μειώνει το όριο αυτό πχ σε "Ligh Fog" (δες Weather Phenomena ή METCON) με την αντίστοιχη ορατότητα, κρατώντας όμως το όριο των 200 m ως μία καλή χωρική διακριτική ικανότητα. Στην περίπτωση αυτή διαιρείται η ορατότητα του αντίστοιχου φαινομένου (πχ 1 km) με τα 200 m και ο λόγος αυτός (=5), αποτελεί τον διαιρέτη που θα διαιρεθεί το ανώτατο όριο του α_{aer} (λ , R) του αντίστοιχου φαινομένου, για να δοθεί ως τιμή ορίου που θα διάβαζε το AOD εάν σε εκείνα τα 200 m ανίχνευε εκκίνηση "Light Fog".

Η παραπάνω διαδικασία αλλαγής του ορίου ανίχνευσης φαινομένου γίνεται διαρκώς σε όλο το εύρος του σήματος έως ότου ανιχνευτεί κάποιο από τα φαινόμενα. Αν αυτό αδυνατεί να συμβεί στα όρια των εκτιμήσεων φαινομένων του METCON, τότε η ατμοσφαιρα θεωρείται πολύ καθαρή και η ορατότητα δεν επιηρρεάζει τις εκτιμήσεις φαινομένων από την μετεωρολογία. Η ιδέα πάντως είναι ότι η θολότητα ή καθατότητα του ουρανού (με DECIS ή VERDE), με όποιον τρόπο και να μετρηθεί, να μπορεί να εκτιμήσει τον καιρό που θα έβλεπε κατ' εκτίμησή του ένας μετεωρολόγος ή Ελεγκτής Εναερίου Κυκλοφορίας του πύργου ελέγχου αεροδρομίου.

Όταν ο DECIS ή VERDE δεν υποδηλώνει με κανέναν τρόπο θολές ατμοσφαιρικές «φέτες» πάνω από κάποιο ύψος και ειδικότερα, όταν χαμηλά ανιχνεύει πολύ καθαρό ουρανό, τότε είναι πολύ πιθανό ψηλότερα να έχει ανιχνευθεί σχεδόν μια μοριακή ατμόσφαιρα. Έτσι, όταν υφίστανται σχεδόν μοριακές συνθήκες στο ύψος των 15–30 Km, το PBLH κατά κανόνα βρίσκεται σε χαμηλότερα ύψη. Η συνεργασία αλγορίθμων MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή VERDE αποτελεί έναν "έξυπνο" τρόπο, να ανιχνευτεί και να παρακολουθείται η παρουσία του PBLH, σε διαφορετικά ύψη και ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Ένα άλλο παράδειγμα που μπορεί να αναφερθεί, είναι εκείνο μιας σταθερά διαστρωματοποιημένης ατμόσφαιρας, όπου ο DECIS ή VERDE βρίσκει στρώματα θολότητας κάτω από το ύψος στο οποίο έχουμε θέσει ως ανώτερο όριο πιθανών PBLH. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν οι αλγόριθμοι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH, με τα "φίλτρα χρόνου", ρυθμίζεται ο χρόνος καταγραφής 30' ή περισσότερο (αλλά λιγότερο από 60'). Στη συνέχεια, τα υπόλοιπα αρχεία των κοινών «λήξεων» του MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι οι τιμές των PBLH μπορεί να κυμαίνονται μεταξύ 150 m (για χρόνο εγγραφής 15'), 300 m (για χρόνο εγγραφής 30') ή και 500 m (για 60' καταγραφής), σύμφωνα με τη θεωρία της δυναμικής ατμόσφαιρας PBL [Stull, (2013)].

Από την άλλη, στην περίπτωση μιας "καθαρής ατμόσφαιρας" ή μιας "κρυστάλλινα καθαρής ατμόσφαιρας" όπου ο VERDE ή DECIS βρίσκει ελάχιστη (ή καθόλου) θολότητα της ατμόσφαιρας, σε όλα τα διαθέσιμα ύψη, οδηγεί τον MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH ώστε να εξαρτάται κυρίως από τη συμφωνία συγκεκριμένων «χωρικών φίλτρων» και των προϊόντα τους, τα οποία οδηγούν στις επεξεργαζόμενα κοινές «λήξεις», μέσα από το σύνολο αρχείων χρόνου καταγραφής των 15' ή περισσότερο. Έτσι, όπως γίνεται κατανοητό, ο συνδυασμός αλγορίθμων VERDE ή DECIS και VASPAT ή MUSTI-L/D επιτρέπει να μελετηθούν οι μεταβολές των PBLH σε κάθε περίπτωση και με διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Συνοψίζοντας, ο αλγόριθμος DECIS ή VERDE μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά από την τεχνική Denoising - 1/2 ή NOSUB – S/R και αποφασίζει ποιο πακέτο ρυθμίσεων θα χρησιμοποιήσει από τους MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH LOWER ALT-1, LOWER ALT-2, LOWER ALT-3, LOWER ALT-4 ή MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH HIGHER ALT συμπληρωματικά με τις ρυθμίσεις του MUSTI – L/D/PBLH RAIN / SNOW ή VASPAT – L/D/PBLH RAIN / SNOW (αν υφίσταται), για την ανάκτηση του PBLH (Σχήμα 5.10). Το PBLH που ανακτάται εκεί είναι στα 1872,5 m είναι σε συμφωνία με το Σχήμα 5.10 (γ). Τα κόκκινα βέλη υποδηλώνουν το χρονικό πλαίσιο εγγραφής και η λευκή γραμμή υποδηλώνει τον μέσο όρο PBLH, όπως παράγεται από τους αλγόριθμους MUSTI – PBLH ή VASPAT – PBLH και DECIS ή VERDE.

Συγκεκριμένα ο DECIS ή VERDE λειτουργεί ως εξής:

(i) Υπολογίζονται οι τιμές των $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (ή / και $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) στο εύρος R (κάθετα ή με κλίση) και χρησιμοποιούνται ως «είσοδος» για τον αλγόριθμο Weather Phenomena ή METCON για κάθε αρχείο δεδομένων lidar οπισθοσκέδασης. Στη συνέχεια, το R διαιρείται σε

πακέτα εύρους των 200 m (συνιστάται), που ονομάζονται «πακέτα - φέτες» ατμόσφαιρας και στη συνέχεια εφαρμόζεται ο DECIS ή VERDE από το χαμηλότερο διαθέσιμο ύψος για μετρήσεις lidar (τυπικά > 200 m ύψος από την περιοχή του συστήματος lidar, μέχρι και το μέγιστο ύψος της περιοχής ανίχνευσης του PBLH που έχει δηλωθεί από τον χρήστη (τυπικά 700-3000 m για μεσαία γεωγραφικά πλάτη αναλόγως εποχής).

(ii) Στη συνέχεια, υπολογίζεται το οπτικό πάχος (τ) για κάθε «πακέτο - φέτα» ατμόσφαιρας. Η ιδέα είναι, στο επόμενο βήμα, να συγκρίνουμε την τιμή του (τ) κάθε "πακέτου - φέτας" της ατμόσφαιρας των 200 m με αυτή που υπολογίζεται για την περίπτωση της "ModerateFog" αρχικά και μετά λοιπών ατμοσφαιρικών στρωμάτων όπως "Light Fog" κτλ όπως αναλύθηκε παραπάνω, ακολουθώντας τα όρια που ορίζει ο Weather Phenomena ή METCON στα 355 nm ή αντίστοιχα για το μήκος κύματος που το σύστημα lidar εκπέμπει.

(iii) Εάν το $\tau > 2 * 10^{-3}$, το οποίο, σύμφωνα με Weather Phenomena ή METCON και Measures, είναι το όριο της έναρξης του "Moderate Fog" στα 355 nm, τότε θεωρείται ότι αυτό το «πακέτο» είναι θολό. (Διαφορετικά, θα μπορούσε να υποτεθεί ότι αυτό το «πακέτο» ατμόσφαιρας θα μπορούσε να έχει ένα όριο τιμής $\tau > 2 * 10^{-2}$, για εξαιρετικά θολές ατμόσφαιρες, οι οποίες σύμφωνα με Weather Phenomena ή METCON) είναι το όριο του «Cumulus Cloud» στα 355 nm, για $\alpha_{aer}(\lambda, R)$ σε m^{-1} και $C(\lambda, R) = 10$ sr επίσης. Με αυτή την επιλογή, ο χρήστης θα μπορούσε να δώσει διαφορετική σημασία στον ορισμό μιας «θολής ατμόσφαιρας» μέσα στον αλγόριθμο DECIS ή VERDE και συνεπώς, θα ακολουθείται μια διαφορετική προσέγγιση. Για εδώ θα αναλύσουμε τί συμβαίνει διατηρώντας το όριο για "Moderate Fog", δηλαδή την οριακή τιμή $\tau > 2 * 10^{-3}$.

(iv) Στη συνέχεια, ελέγχεται ποιά από τα ατμοσφαιρικά "πακέτα" δείχνουν $\tau > 2 * 10^{-3}$ (βλ. βήμα (iii)) και κρατούνται τα σημεία απόστασης (R_x) όπου συμβαίνει αυτό το φαινόμενο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας, μπορεί κάποιος να έχει μια σαφή κατανόηση της θολότητας της ατμόσφαιρας στην οποία κατευθύνει την εκπομπή του το σύστημα lidar, από την άποψη των χαρακτηρισμένων «θολών ατμοσφαιρικών πακέτων» με το ύψος.

(v) Ο αλγόριθμος DECIS ή VERDE απευθύνεται άμεσα, για την συνέχεια αυτής της διαδικασίας, σε συγκεκριμένες ρυθμίσεις αλγορίθμου MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH, που αφορούν την επιλογή κατάλληλων χωρικών φίλτρων και των προϊόντων τους. Για παράδειγμα, για μια σχεδόν σχεδόν θολή ατμόσφαιρα από απόσταση 600 έως 1000 m ύψους, πρέπει να συμφωνεί το 3°, 4° και το 5° χωρικό φίλτρο (όπως αυτά έχουν οριστεί εδώ).

(vi) Είναι πλέον ώρα να καθοριστεί η θολότητα της ατμόσφαιρας (στο μήκος κύματος των 355 nm). Παραδείγματος χάριν, για το όριο ύψους των κοινών PBLH μεταξύ 210 έως 2600 m και σύμφωνα με την θολότητα που ανιχνεύεται, ορίζεται η αυτή «θολότητα» για κάθε αρχείο εγγραφής ως "Crystal Clear Atmosphere", αν σε όλα ή τα 11/12 των ατμοσφαιρικών «πακέτων» δεν αναγνωρίζονται ως θολά. "Καθαρή ατμόσφαιρα" αν τα 2/12 έως 3/12 των ατμοσφαιρικών «πακέτων» δηλώνονται ως θολά. "Σχεδόν θολή ατμόσφαιρα" εάν αυτό συμβαίνει στα 4/12 έως 5/12 των ατμοσφαιρικών «πακέτων». "Θολή ατμόσφαιρα" αν αυτό συμβαίνει στα 6/12 έως 9/12 των ατμοσφαιρικών «πακέτων» και "Εξαιρετικά θολή ατμόσφαιρα" εάν $t > 2 * 10^{-3}$ στα 10/12 έως 12/12 των ατμοσφαιρικών «πακέτων».

Ο ανωτέρω τύπος κατηγοριοποίησης της «θολότητας» της ατμόσφαιρας συνιστάται, αν και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να ορίσει το δικό του μετρικό σύστημα «θολότητας» που θα χρησιμοποιηθεί μέσα στον DECIS ή VERDE. Σε κάθε περίπτωση, η απόσταση-ύψος των «θολών ατμοσφαιρικών πακέτων» και το αντίστοιχο ύψους τους, είναι το κλειδί για τους αλγορίθμους MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και πως πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα «χωρικά φίλτρα» τους, όσον αφορά τη συμφωνία των συνθηκών που πρέπει να πληρούνται μεταξύ των πινάκων και των προϊόντων τους. (Στο Σχήμα 5.11, παρουσιάζεται περίπτωση συνεργασίας των αλγορίθμων DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH. Το PBLH εκεί ανακτήθηκε στα 1455 m σε συμφωνία με το Σχήμα 5.11 (γ). Τα κόκκινα βέλη υποδηλώνουν το χρονικό πλαίσιο καταγραφής, ενώ η λευκή γραμμή υποδηλώνει τη μέση τιμή PBLH, όπως αυτό ανακτάται από αλγορίθμους MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή VERDE).

(vii) Σε επόμενο βήμα, παράγεται μια μέση τιμή της θολότητας της ατμόσφαιρας για όλα συνολικά τα αρχεία καταγραφής (για 15 ή περισσότερα αρχεία δεδομένων καταγραφής).

(viii) Κάθε αρχείο δεδομένων καταγραφής μπορεί να οδηγήσει στη «ιδιωτική» χρήση των ρυθμίσεων του PBLH, χωριστά, σύμφωνα με τα αποτελέσματα «εξόδου» από DECIS ή VERDE κάθε φορά, προκειμένου να συνισφέρουν αυτόνομα – «ιδιωτικά» αλλά και συλλογικά στο σύνολο των αρχείων καταγραφής για την μελέτη της ατμόσφαιρας στο χρόνο. Επομένως, συνιστάται να χρησιμοποιείται ο DECIS ή VERDE, ξεχωριστά, για κάθε αρχείο δεδομένων εγγραφής, για να οδηγεί αντίστοιχα έκαστο αλγόριθμό MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH με τις δικές του αντίστοιχες ρυθμίσεις.

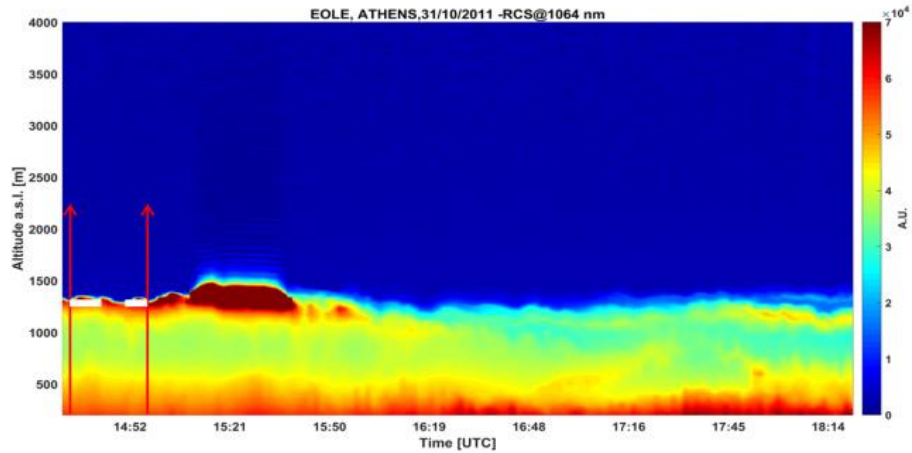
5.9 Φίλτρο KALMAN Vs MUSTI ή VASPAT

Το εκτεταμένο φίλτρο Kalman (EKF - Extended Kalman Filter) είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος αναπτύχθηκε στο Πολυτεχνείο της Μπαρτσελόνας και βασίζεται στην εκτίμηση τεσσάρων χρονικά προσαρμόσιμων συντελεστών μιας απλοποιημένης καμπύλης της μορφής της συνάρτησης σφάλματος που μοντελοποιεί το σύνορο του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και της ελεύθερης τροπόσφαιρας στο σήμα lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) (erf-like model) [Lange et al. (2014, 2015)].

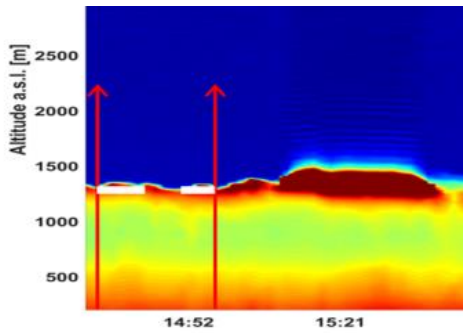
Στην περίπτωση της ανάκτησης PBLH, το EKF βασίζεται στον συνδυασμό σημερινών και προηγούμενων εκτιμήσεων μαζί με ένα πρότυπο μοντέλο, προκειμένου να παράσχει συνεχείς εκτιμήσεις του PBLH [Lange et al. (2014, 2015), Alexiou (2018)]. Το EKF είναι σε θέση να παράσχει ρεαλιστικές τιμές του PBLH σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, στις περισσότερες από τις μελετώμενες περιπτώσεις, υπό διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες, σε σύγκριση με τα τοπικά δεδομένα ραδιοβόλισης και άλλες τεχνικές.

Εδώ συγκρίνονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν με την εφαρμογή των EKF και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH για διάφορες περιπτώσεις ατμοσφαιρικών συνθηκών, όπως παρουσιάζονται από τους [Alexiou et al. (2018)], στις ανακτήσεις του PBLH. Στο Σχήμα 5.12 (αριστερή στήλη) παρουσιάζονται τα γραφήματα σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) που παράγονται από το σύστημα LRSU ΕΜΠ, όπου οι κόκκινες κουκίδες αντιπροσωπεύουν το PBLH που ανακτήθηκε κατά την εφαρμογή της μεθόδου EKF. Τα κόκκινα βέλη αντιπροσωπεύουν τις χρονικές περιόδους κατακόρυφης μέτρησης που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του PBLH από τους αλγόριθμους DECIS ή VEDRE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH. Στο ίδιο σχήμα (δεξιά πλευρά) εμφανίζεται ένα μεγεθυμένο τμήμα των διαγραμμάτων σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS), συμπεριλαμβανομένων των ίδιων χρονικών περιόδων που καθορίζονται από τα βέλη, δείχνοντας με τις άσπρες τετράγωνα κουκίδες τις αντίστοιχες ανακτήσεις PBLH βάσει των αλγορίθμων DECIS ή VEDRE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH.

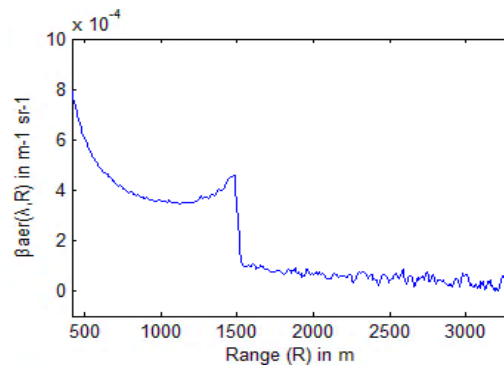
α).



β).



γ).



Σχήμα 5.11: α). Το σήμα lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) που ανακτήθηκε στα 1064 nm από τα δεδομένα LRSU NTUA (31/10/2011). β). Ζουμ της παραπάνω καταγραφής τη χρονική περίοδο 14:33:10 έως 14:56:30 UTC, όπου ο MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH έδωσε εκτίμηση PBLH, γ). $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (14:43:10 UTC) [Pantazis et al. (2018)].

Ως πρώτο παράδειγμα (Σχήμα 5.12a), για την "υπόθεση Etesian", το αποτέλεσμα των αλγορίθμων μας έδωσε ένα μέσο PBLH της τάξης των 1350 m (07:56:50 - 08:22:00 UTC), ενώ το PBLH που ανακτάται από το EKF είναι τελείως διαφορετικό και κοντά στα 2100 m. Για την περίπτωση της «θαλάσσιας αύρας» (Σχήμα 5.12b), οι αλγόριθμοι εδώ έδωσαν ένα μέσο PBLH της τάξης των 1478 m

(09:04:30 έως 09:28:00 UTC), ενώ το PBLH που ανακτήθηκε από το EKF ήταν 1450 m (παρόμοια). Για την περίπτωση "καθαρού ουρανού", το PBLH που ανακτήθηκε από το MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή VERDE ήταν 1125 m (06:19:20 - 06:42:50 UTC) πολύ κοντά σε αυτό που ανακτήθηκε από το EKF (1150 m). Στην περίπτωση "σκόνης", οι αλγόριθμοι εδώ έδωσαν ένα μέσο PBLH της τάξης των 743 m (05:52:50 - 06:16:10 UTC), ενώ το PBLH που ανακτήθηκε από το EKF ήταν της τάξης των 720 m. Στην περίπτωση ύπαρξης "νεφών", οι αλγόριθμοι εδώ έδωσαν ένα μέσο PBLH της τάξης των 1873 m (07:44:30 - 08:07:50 UTC), ενώ το PBLH που ανακτήθηκε από το EKF ήταν της τάξης των 1550 m.

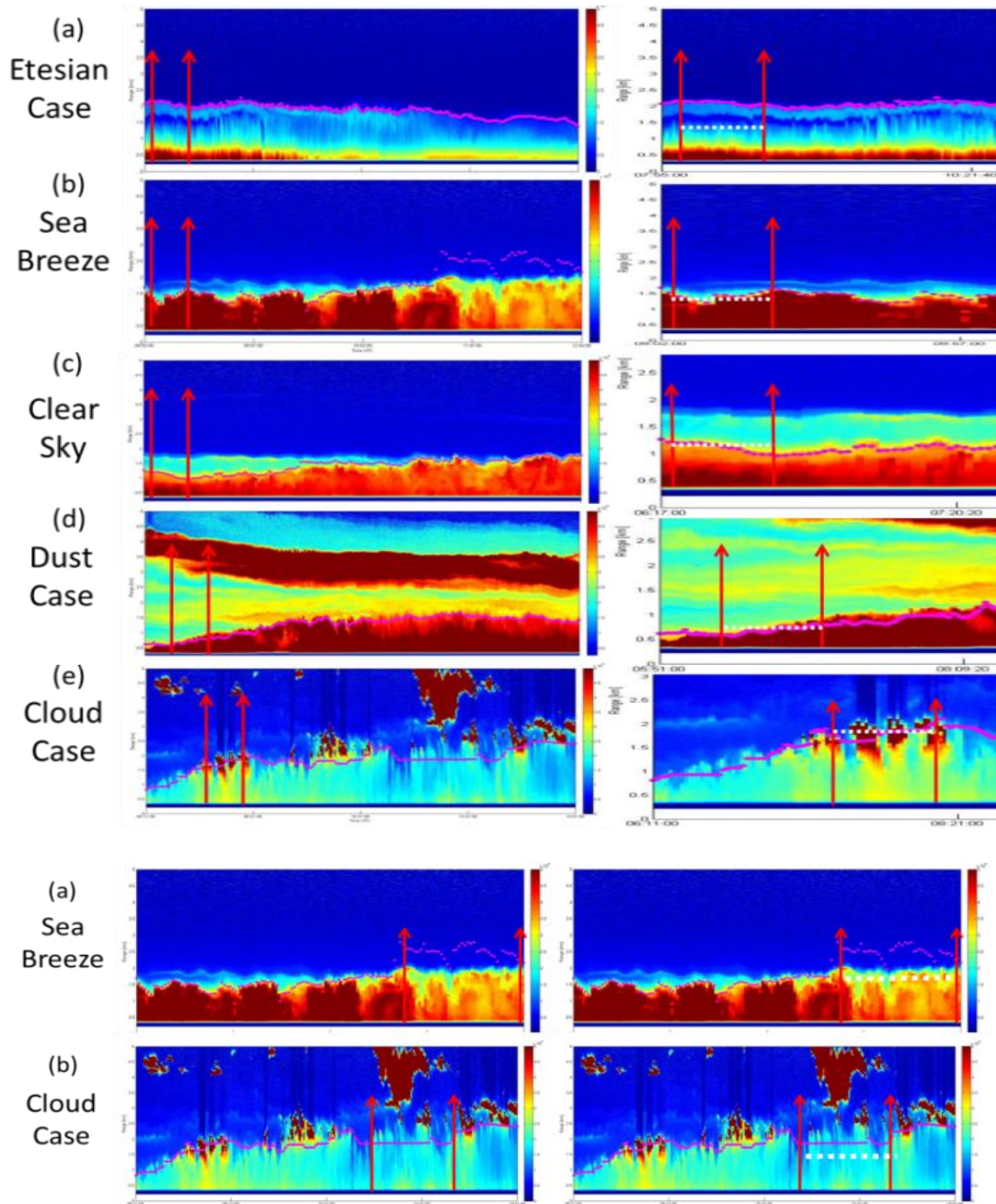
Είναι προφανές ότι οι αλγόριθμοι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή VERDE είναι σε θέση να ανακτήσουν αρκετά σωστά τις τιμές PBLH, στις περισσότερες περιπτώσεις, λαμβάνοντας υπόψη και τις ρεαλιστικές τιμές διακυμάνσεων του PBLH, ακολουθώντας τις παρατηρήσεις του Stull [Stull (2013)]. Οι αλγόριθμοι αυτοί δεν χρειάζονται εκτίμηση meta - PBLH, όπως στην περίπτωση της τεχνικής EKF, όπου ο ίδιος ο χρήστης πρέπει κατά δική του (προσωπική) εκτίμηση (αρχική) να παρέχει ύψος PBL. Αντίθετα, οι DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH είναι σε θέση να παρέχουν εκτίμηση PBLH, αυτόματα, χωρίς την παρέμβαση του χρήστη, σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και με ορισμένο κοινό «κανόνα» αποφεύγοντας προσωπικές εκτιμήσεις έκαστου προσωπικού - χρήστη. (Σε παρακάτω ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος που μπορεί να βελτιωθεί η ακρίβεια των DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH ώστε να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο η ακρίβεια των αλγορίθμων σχετικά με τις ανακτήσεις του PBLH, συνδυάζοντας και αποτελέσματα του Weather Phenomena – PBLH ή METCON – PBLH και μέτρησης του ανέμου με SIBESMEA και WIND Weather Phenomena ή WIND METCON όπου εκεί και η διεύθυνση και ένταση ή όχι του ανέμου, παίζει τον ρόλο της).

Παρακάτω (Σχ. 5.12), παρουσιάζονται περιπτώσεις της ατμόσφαιρας (a – Etesian, b – Sea Breeze, c – Clear Sky, d – Dust, e – Cloud) όπως αυτές παρουσιάστηκαν από [Alexiou et al. (2018)], εφαρμόζοντας την EKF μέθοδο κατά την ανάκτηση του PBLH. Οι αλγόριθμοι εδώ ελέγχθησαν για την αποτελεσματικότητά τους μέσω σύγκρισης με την EKF μέθοδο, για μια περίοδο 20 έως 30' σε κάθε περίπτωση, καθώς αυτό το χρονικό παράθυρο φαίνεται να είναι κατάλληλο για την παραγωγή των κοινών καταγραφών στον πίνακα PPBLH. Όπου η μωβ γραμμή δείχνει τα αποτελέσματα ανάκτησης του PBLH από EKF, ενώ, τα κόκκινα βέλη και η άσπρη διακεκομμένη γραμμή δείχνουν τα αποτελέσματα ανάκτησης από DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH.

Η σύγκριση που παρουσιάζεται εδώ, έδειξε ότι οι αλγόριθμοι DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH βρίσκονται στη σωστή “τροχιά” για να παράγουν το Layering αιωρούμενων σωματιδίων και τη χωρική κατανομή του, καθώς και το PBLH. Στην περίπτωση που το PBLH που ανακτήθηκε από το EKF ήταν λαθασμένο (βλ. παραδείγματα "Etesian" και "Clear sky"), οι αλγόριθμοι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή VERDE μπόρεσαν να διατηρήσουν τις πραγματικές τιμές PBLH χάρη στη νέα αρχή λειτουργίας τους, χωρίς την ανάγκη για προηγούμενη γνώση των PBLH και ένα μοντέλο priori (βλ. Σχήμα 5.12a, περίπτωση "Sea Breeze") (αριστερή πλευρά), μετά τις 11:30 UTC και Σχήμα 5.12b "Περίπτωση νεφών" (αριστερή πλευρά) στο χρονικό διάστημα που μελετήθηκε. Εκεί, οι PBLH τιμές είναι σύμφωνες με εκείνες που προέκυψαν από τους αλγορίθμους MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή VERDE (Σχήμα 5.12a και 5.12b, δεξιά πλευρά) στα 1755 και 1612,5 m αντίστοιχα, σύμφωνα με τα όρια ύψους στο [Alexiou et al. (2018)] για την ανάκτηση PBLH από την EKF – ραδιοβόλιση, στην ίδια χρονική περίοδο.

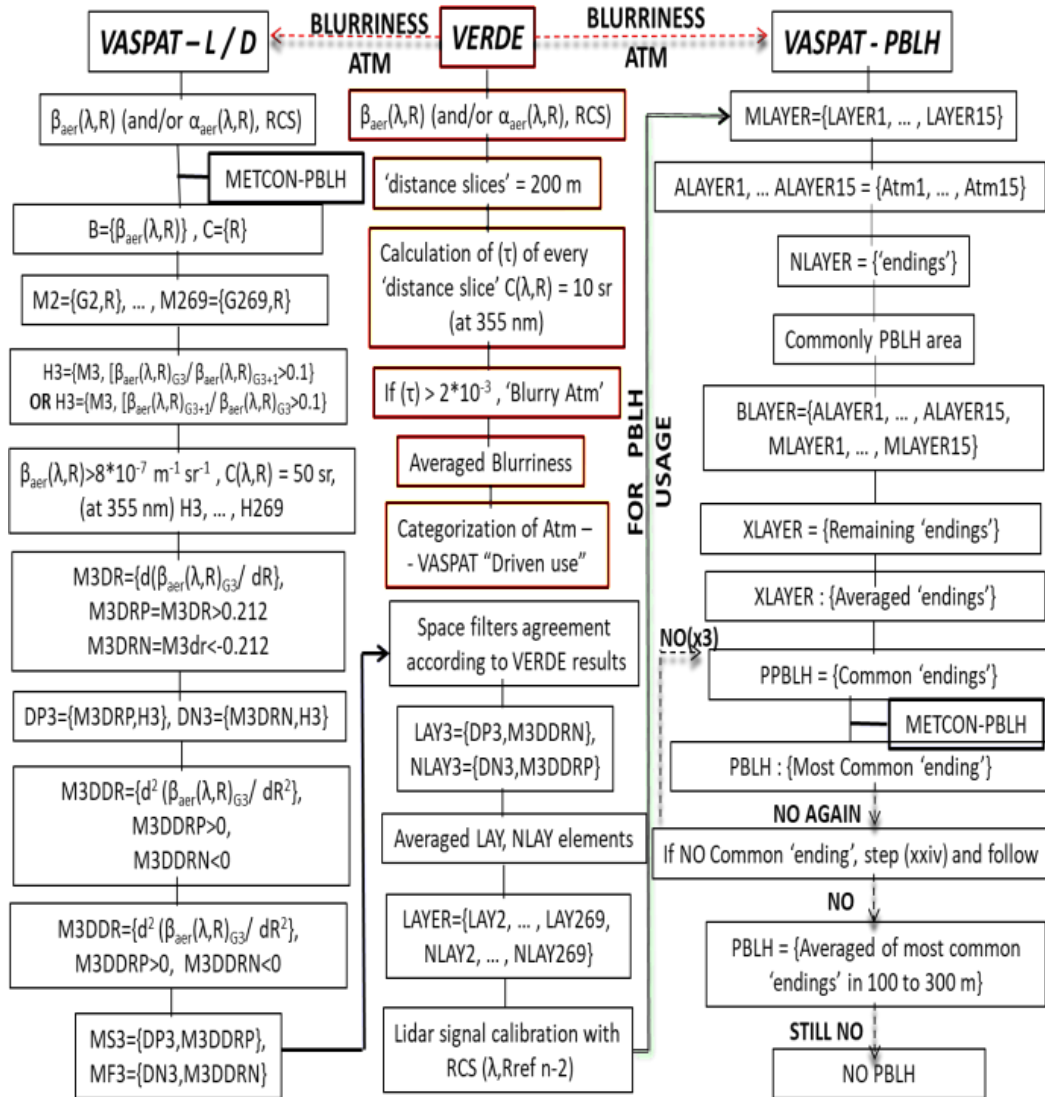
Παραπάνω παρουσιάστηκαν οι αλγόριθμοι DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH προκειμένου να ανακτηθούν οι τιμές της ατμοσφαιρικής στρωματοποίησης σε συνδυασμό με PBLH από ένα σύστημα lidar, που δείχνει κατακόρυφα ή σε τρεις διαστάσεις. Τα αποτελέσματα αυτών των αλγορίθμων, μπορούν να φανούν ως ένα ελκυστικό και χρήσιμο εργαλείο για τους μετεωρολόγους, καθώς και για επιστημονικούς σκοπούς.

Το πιο σημαντικό είναι ότι οι παραπάνω αλγόριθμοι ελέγχθηκαν και αξιολογήθηκαν ως προς τη συνάφεια τους, κυρίως με τη χρήση δεδομένων συστήματος LRSU EMΠ lidar, υπό διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες, διαφορετικές εποχές και για ένα διάστημα 2 ετών (2014-2016). Οι αλγόριθμοι βρέθηκαν να είναι 100% επιτυχείς στην παροχή δεδομένων στρωματοποίησης για διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες (δηλ. Από “Moderate Fog” σε “Light Fog” και στη συνέχεια σε συνθήκες “Cumullus Cloud” κλπ.) σε σύγκριση με την κατακόρυφη κατανομή οπισθοσκέδασης στα 1064 nm. Όσον αφορά την επιτυχία στην ανάκτηση του PBLH, αυτό ήταν της τάξεως του 87%, σε σύγκριση με τις τυπικές τεχνικές ανάκτησης PBLH (π.χ. EKF, ραδιοβολίσεις) αλλά όπως θα φανεί στο τέλος το ποσοστό αυτό αυξάνεται μέσω της μηχανικής μάθησης.



Σχήμα 5.12: Η χωροχρονική εξέλιξη του PBLH όπως προέκυψε χρησιμοποιώντας το εκτεταμένο φίλτρο Kalman (εικόνες αριστεράς πλευράς) και αλγόριθμοι MUST1 – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH, DECIS ή VERDE (εικόνες δεξιά) για διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες [Lange et al. (2014, 2015), Alexiou et al. (2018), Pantazis et al. (2018)].

Τα πλεονεκτήματα των DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH που διαπιστώνονται στην ανάκτηση του PBLH είναι τα εξής:



Σχήμα 5.13: Διάγραμμα ροής διαλειτουργικότητας των αλγορίθμων DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και Weather Phenomena - PBLH ή METCON – PBLH [Pantazis et al. (2018)].

1). Ο σύντομος χρόνος που απαιτείται για την επεξεργασία έκαστου σήματος lidar (λίγα δευτερόλεπτα), ο οποίος είναι εξαιρετικά κρίσιμος ειδικότερα για τα τρισδιάστατα συστήματα lidar, σε σύγκριση με τον πολύ μεγάλο χρόνο (αρκετές ώρες) που απαιτείται από την τεχνική EKF.

2). Το σύντομο χρονικό διάστημα (λίγα λεπτά) που απαιτείται συνολικά για τις εγγραφές lidar σε σχέση με την μετά επεξεργασία του EKF.

3). Καμία προηγούμενη γνώση δεν απαιτείται για τα προηγούμενα PBLHs, όπως στη μέθοδο EKF.

4). Τα αποτελέσματα εξόδου παράγονται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, σε σύγκριση με το μεταχρονολογημένο PBLH της μεθόδου EKF.

5). Δεν υπάρχει ανάγκη ή εξάρτηση της ικανότητας του χρήστη, να ορίσουμε τις αρχικές συνθήκες επεξεργασίας, να ακολουθηθεί η ανάκτηση PBLH και στη συνέχεια, αν αλλάξουν οι μετεωρολογικές συνθήκες (π.χ. εμφάνιση σύννεφων). Οι αλγόριθμοι DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH δείχνουν ικανοί να παρακολουθήσουν την αλλαγή του PBLH και να μην χάσουν το ίχνος της, όπως στην περίπτωση της τεχνικής EKF, η οποία φαίνεται να αποτυγχάνει, όπως στο Σχήμα 5.12 (Sea Breeze EKF case 11:47-12:47 UTC (αριστερή πλευρά) και Cloud EKF περίπτωση 11:00-12:45 UTC (αριστερή πλευρά) όπου οι τιμές PBLH ήταν συνεπείς με αυτές που υπολογίζονται με αλγόριθμους DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH (δεξιά πλευρά)).

Ως εκ τούτου, φαίνεται ότι οι αλγόριθμοι DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH είναι πλήρως λειτουργικοί, υπό τις όποιες μετεωρολογικές συνθήκες, σε οποιαδήποτε γεωγραφική θέση και εποχή του χρόνου, ως αυτόνομο εργαλείο, χωρίς να απαιτείται παρέμβαση τρίτων για την παραγωγή αποτελεσμάτων και σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Τέλος, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής της εφαρμογής αυτών των αλγορίθμων αλλά και του Weather Phenomena - PBLH ή METCON - PBLH (παρακάτω ενότητα) όπου φαίνεται η διασύνδεσή τους στο Σχήμα 5.13 (πιο κάτω).

5.10 Αλγόριθμος Weather Phenomena – PBLH ή METCON-PBLH

Ο αλγόριθμος Weather Phenomena – PBLH ή METCON – PBLH χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο τον αλγόριθμο Weather Phenomena ή METCON σε μια εντελώς νέα μορφή. Εδώ, τα αποτελέσματα του Weather Phenomena ή METCON εξηγούνται με διαφορετικό τρόπο που συνδυάζει τα λεγόμενα του Stull για τη ύπαρξη του στρώματος της ομίχλης, ως ένα υπαρκτό Boundary Layer φαινόμενο.

Με τη χρήση των αποτελεσμάτων του Weather Phenomena ή METCON,

μπορούν να τεθούν τα ύψη τύπου ομίχλης ως πιθανά ύψη PBLH, ειδικά αν συνδυάζονται με τα κοινά – αναμενόμενα ύψη PBLH της συγκεκριμένης τοποθεσίας και εποχής. Συγκεκριμένα, ο Weather Phenomena ή METCON είναι σε θέση να ανιχνεύει και να παρέχει μετεωρολογικές συνθήκες όπως σύννεφα, ομίχλη κ.λ.π. κατά μήκος της δέσμης lidar, σε σχέση με την απόσταση (R), για κάθε κατακόρυφη ή κεκλιμένη μέτρηση. Επίσης προβαίνει και στον χαρακτηρισμό αυτών των ατμοσφαιρικών συνθηκών (ομίχλη, Haze κ.λπ.) και συνισφέρει στην παροχή δεδομένων τρισδιάστατης ορατότητας, μέσω της 3D Stepping ή LADDER και Visibility ή NAVIS. Εδώ, χρησιμοποιείται για την ανάκτηση του PBLH στο κατακόρυφο, αλλά και τρισδιάστατα, μέσω της τεχνικής Fastplan ή Uniform (βλ. παρακάτω).

Ο αλγόριθμος Weather Phenomena ή METCON παρέχει «οπτική» απεικόνιση των παρόντων διαφορετικών ατμοσφαιρικών στρωμάτων στην κατεύθυνση που το σύστημα lidar εκπέμπει, ακολουθώντας τα βήματα (i) έως (vii) (Weather Phenomena ή METCON). Εδώ θα ακολουθήθει η ίδια αρίθμηση με τα βήματα του αλγορίθμου όπως αυτά περιγράφονται παραπάνω.

Έτσι, μετά την εκτέλεση των παραπάνω βημάτων και τις διακρίσεις των ατμοσφαιρικών συνθηκών που έγιναν από το Weather Phenomena ή METCON, εισάγεται η χρήση για την ανάκτηση PBLH. Ακολουθώντας τα λεγόμενα του Stull όπως ειπώθηκε, λαμβάνονται επιπλέον βήματα όπου το Weather Phenomena ή METCON λειτουργεί από το μέγιστο ωφέλιμο ύψος – απόσταση, όπου ωφέλιμο σήμα (λόγος σήματος προς θόρυβο - SNR πάνω από 3 με 5, ρυθμιζόμενο) ενός συστήματος 3D lidar και προς κατώτερα ύψη – μικρότερες αποστάσεις όπου υπάρχουν είδη ομίχλης (μέτρια ομίχλη, ελαφριά ομίχλη κλπ.) και δίνουν αυτά τα ύψη ως πιθανά PBLHs (Σχήματα 5.14 και 5.15). Ο αλγόριθμος επίσης μπορεί να ξεκινά από το μέγιστο «αναμενόμενο – κοινό» PBLH αντί του μέγιστου ωφέλιμου του σήματος όπως αυτό περιγράφεται στο προς χαμηλότερα ύψη. Ειδικότερα:

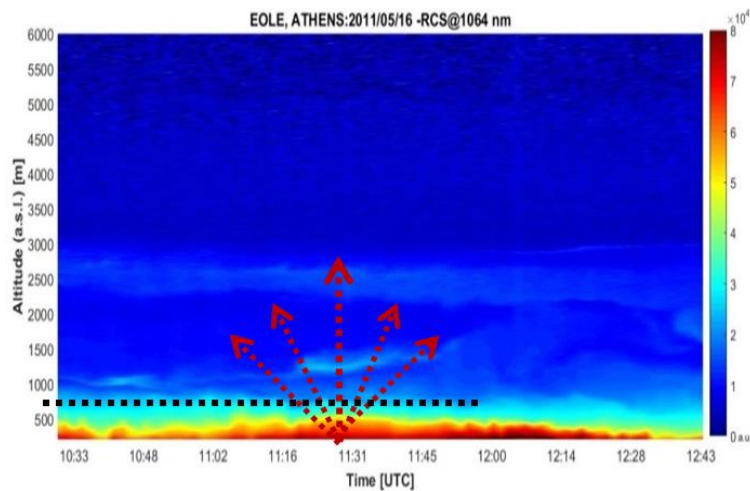
(viii) Επιλέγεται το μέγιστο χρήσιμο ύψος, όπου δηλαδή παρατηρείται ωφέλιμο σήμα (Λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) > 3-5) και / ή μέγιστο κοινό PBLH, προς τα χαμηλότερα ύψη.

(ix) Εάν κάποιο από τα κριτήρια για «Haze» («Haze» - κυρίως για θερμότερα κλίματα) ή «Moderate Fog» («Moderate Fog» - βασικά για πιο υγρά και κρύα κλίματα) πληρωθεί, τότε το αποτέλεσμα είναι «πιθανό PBLH».

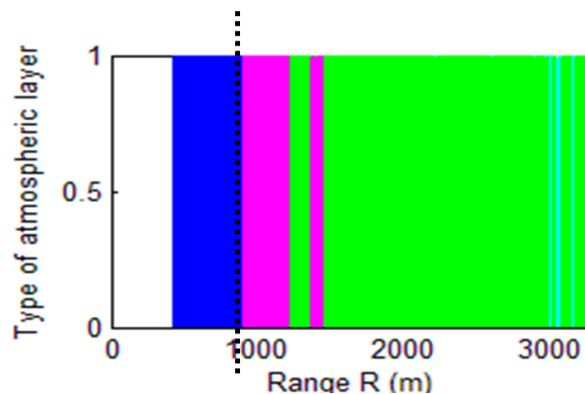
(x) Το υψηλότερο από τα παραπάνω πιθανά PBLH δίνεται ως PBLH (σε αυτόνομη λειτουργία), με προτιμώμενα όρια πρώτα αυτά που αναφέρονται σε ομίχλη, εκκινώντας από το «Light fog» και στη συνέχεια «Thin Fog», ή, τέλος, «Haze» για

θερμά και στεγνά κλίματα ή εκκινώντας με το «Moderate Fog» για πιο υγρά κλίματα.

α).



β).



Σχήμα 5.14: α). Σήμα lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) που ανακτήθηκε στα 1064 nm την 16-05-2011. Παρουσίαση του Weather Phenomena - PBLH ή METCON – PBLH σε 3D, χρησιμοποιώντας την τεχνική "Fastplan ή Uniform". β). Ο αλγόριθμος Weather Phenomena-PBLH ή METCON-PBLH στα 355nm, στις 11:30:10 UTC. [Pantazis et al. (2019)].

Αν χρησιμοποιείται ο Weather Phenomena - PBLH ή METCON - PBLH σε συνδυασμό με τους αλγόριθμους DECIS ή VERDE και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH τότε ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα (xi, xii, xiii) και / ή (xiv):

(xi) Ακολουθούνται τα παραπάνω βήματα (i έως xiii) για όσα αρχεία καταγραφής

επιλεγούν για τον MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και δημιουργείται μια μέση τιμή από κάθε ένα από τα πιθανά PBLH που βρέθηκαν από το βήμα (xiii) αυτού του αλγορίθμου, από την άποψη του ότι κάθε μέση τιμή αναφέρεται σε ένα φάσμα των 10 έως 15 bins (100 έως 150 m) από τα ύψη που προκύπτουν μεταξύ των αρχείων καταγραφής .

(xii) Εκτελείται το βήμα (xxiv) του MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και δίνονται τα αποτελέσματα του βήματος (xv) του Weather Phenomena - PBLH ή METCON - PBLH ως πιθανότατα PBLHs από 10 έως 15 καταγραφές ύψους PBLH ώστε συγκρινόμενα με τα υπόλοιπα πιθανά PBLH του MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH (βήμα (xxiv)), να αποκλειστούν τα υπόλοιπα από πιθανά.

(xiii) Στη συνέχεια θα προχωρεί στο βήμα (xxv) του MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και συνεχίζεται η υπόλοιπη επεξεργασία του τελευταίου αλγορίθμου.

(xiv) Στη συνέχεια, απευθύνεται στο μέρος «εισόδου» των δεδομένων για το β_{aer} (λ , R) (και / ή το α_{aer} (λ , R), σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) του MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH (βήμα (i)) και αν πληρούνται τα κριτήρια για το «Haze» (για θερμότερα κλίματα) ή «Moderate Fog» (Μέτρια ομίχλη - βασικά για περισσότερο υγρά και κρύα κλίματα), ή «Light – ThinFog» (για μεσαία κλίματα) τότε, δίνεται προτεραιότητα στα παράγωγα προϊόντα τους και πιθανά PBLH τους έναντι λοιπών πιθανών PBLH, διπλασιάζοντας τις συμμετοχές τους κατά την ανάκτηση του most common PBLH του πίνακα PPBLH και στη συνέχεια το τελικό αποτέλεσμα είναι το «πιο πιθανό PBLH».

(xv) Τέλος, γύρω από τα ύψη των πιθανών PBLH, ανιχνεύεται η πιθανή ύπαρξη κάθετου ανέμου ανέμου. Αυτό μπορεί να γίνει με μια συσκευή lidar Doppler, ή, σε περίπτωση μονής δέσμης, χωρίς Doppler, μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω αλγόριθμοι SIBESMEA ή / και WIND Weather Phenomena ή WIND METCON. Η ιδέα εδώ είναι ότι στο PBLH και όχι στα PBLH residuals και σε χρονική διάρκεια ή ευρεία οριζόντια απόσταση, δύσκολα ανιχνεύεται κάθετος άνεμος και αν αυτό συμβαίνει, το PBLH βρίσκεται συνήθως σε χαμηλότερο ύψος από αυτό. Οπότε, χρησιμοποιώντας εδώ τους νεοαναφερθέντες αλγορίθμους σε ύψη γύρω από τα πιθανά PBLH όπως αυτά πλέον έχουν διαμορφωθεί στον πίνακα PPBLH, οδηγούν στην πιο αξιόπιστη εξαγωγή του PBLH μέσω προτίμησης αυτών που έχουν σχεδόν μηδενικούς κάθετους ανέμους.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι αλγόριθμοι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή VERDE και τώρα και ο Weather Phenomena - PBLH ή

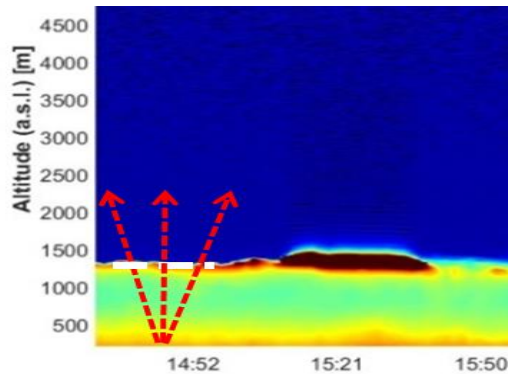
METCON - PBLH αλλά και οι SIBESMEA ή / και WIND Weather Phenomena ή WIND METCON, μπορούν να συνδυαστούν στην ασφαλή και αξιόπιστη ανάκτηση PBLH. Πάνω από το 94% των περιπτώσεων που μελετήθηκαν, υποθέτοντας μια διακύμανση στο PBLH της τάξης των 50-75 m, σε κοντινά σχετικά δεδομένα ραδιοβόλισης που ελήφθησαν από την EMY (σε απόσταση λίγων χιλιομέτρων), για ένα 3D ή κατακόρυφο προσανατολισμό συστήματος lidar (Σχήματα 5.14, 5.15, 6.2). Αυτή η ανοχή των 50–75 m είναι σίγουρα εντός του εύρους της αποδεκτής διακύμανσης του PBLH με τον χρόνο, η οποία σύμφωνα με το Stull, μπορεί να είναι μεταξύ 300–500 m σε χρονικό διάστημα μιας ώρας. Έτσι, ο συνδυασμός των MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH, DECIS ή VERDE και Weather Phenomena - PBLH ή METCON - PBLH αλλά και SIBESMEA ή / και Weather Phenomena - PBLH ή METCON – PBLH που θα παρουσιαστούν παρακάτω, φαίνεται ικανός να παρέχει αξιόπιστο PBLH υπό οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες το lidar μπορεί να επιχειρεί.

5.11 Τεχνική Fastplan ή Uniform

Το κύριο πλεονέκτημα ενός 3D τρισδιάστατου συστήματος lidar είναι ότι μπορεί να εκτελέσει μετρήσεις κεκλιμένου επιπέδου. Στην περίπτωση της ανάκτησης PBLH, προτείνεται εδώ μια νέα, 3D τεχνική η οποία ονομάζεται "Fastplan ή Uniform. Ένα τρισδιάστατο σύστημα lidar εκκινεί την σάρωσή του από κεκλιμένο επίπεδο πχ 20° από το κατακόρυφο (από κατακόρυφη ή σχεδόν κατακόρυφη γωνία), ώστε να είναι σε θέση να αποκτήσει οπισθοσκέδαση με ωφέλιμο σήμα από ύψη πάνω από τα οποία αναμένεται το PBLH.

Εδώ προτείνεται η χρήση κωνικής τρισδιάστατης σάρωσης, ακολουθώντας την περιστροφή της γης (από τη δυτική προς την ανατολική πλευρά), ειδικά για τις χαμηλές ταχύτητες αέρα πάνω από την τοποθεσία του συστήματος lidar και στα ύψη – περιοχή των κοινώς – αναμενόμενων PBLH. Συνίσταται όπως η τροχιά σάρωσης του συστήματος 3D lidar να είναι η ίδια με τη γη, λόγω της αδράνειας των αέριων μαζών όταν αυτές συναντούν τη γεωδαισία μιας επιφάνειας της Γης για πρώτη φορά και ειδικότερα όταν αυτές βρίσκονται σε χαμηλότερα υψόμετρα. Γενικά, επιλέγεται όπως η ανίχνευση γίνεται με φορά αντίθετη της κατεύθυνσης του ανέμου στα αναμενόμενα ύψη PBLH, χωρίς βέβαια αυτό επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Απλά αυξάνει την περιοχή ανίχνευσης στα ήψη ενδιαφέροντος (Σχήμα 5.14). Εκεί, η μαύρη γραμμή υποδηλώνει την ανάκτηση του PBLH με το Weather Phenomena - PBLH ή METCON - PBLH στα 855 m. Όπου το μπλε είναι "Light Fog", το μοβ είναι "Thin Fog", το ανοικτό μπλε είναι "Light Haze" και το πράσινο είναι "Haze". Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή

υποδηλώνει ότι η ανάκτηση PBLH μεταξύ αλλαγής των ατμοσφαιρικών στρωμάτων, όπως υποτίθεται ότι συμβαίνει (βλ. Weather Phenomena - PBLH ή METCON - PBLH).



Σχήμα 5.15: Σήμα lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS) που ανακτήθηκε στα 1064 nm από τα δεδομένα LRSU NTUA (31/10/2011), για την ώρα 14:34:50 UTC. Παρουσιάζεται σε 3D, η ανάκτηση PBLH (Fastplan ή Uniform) στα 1455 m το οποίο εμφανίζεται με λευκή διακεκομμένη γραμμή [Pantazis et al. (2019)].

Η ιδέα είναι ότι με τη σάρωση μιας ευρείας περιοχής πάνω από την θέση ενός συστήματος 3D lidar (ίδιας ή και ευρύτερης περιοχής από εκείνης που σαρώνονται σε σταθερή κατακόρυφη τοποθέτηση), μπορούν να επιτευχθούν τα ίδια ή καλύτερα αποτελέσματα σε ακόμα μικρότερα χρονικά πλαίσια (για παράδειγμα, λιγότερο από 15 λεπτά κατακόρυφης μέτρησης). Με αυτό τον τρόπο, το σύστημα 3D lidar scanning μπορεί να σαρώσει την ίδια ευρεία περιοχή του ουρανού (ή ακόμα και ευρύτερες περιοχές) μέσα σε μικρότερο χρόνο από αυτό που κάνει όταν εκτελεί κατακόρυφη εκπομπή για ανάκτηση PBLH, χρησιμοποιώντας λιγότερα ή τα ίδια αριθμητικά αρχεία καταγραφής δεδομένων συστήματος lidar αλλά σε πολύ μικρότερο χρόνο ή / και για ευρύτερη περιοχή (Σχήμα 5.15).

Η ιδέα του χρονικού πλαισίου που προτάθηκε σε MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή VERDE (πάνω από 15 λεπτά), είχε να κάνει με τη σύλληψη, να παράγει πολλά αρχεία καταγραφής δεδομένων μιας ευρείας περιοχής του ουρανού, ώστε να καταγράψει, να επεξεργαστεί και να συγκρίνει, χρονικά, τα αρχεία αυτά, μέσω της εξαγωγής της πολύτιμη κοινής πληροφορίας αυτών των δεδομένων, δηλώνοντας το PBLH. Με αυτήν την τεχνική, μπορούμε να σαρώσουμε την ίδια ή ακόμα και ευρύτερη περιοχή του ουρανού, στο ίδιο ή χαμηλότερο χρονικό πλαίσιο, καθιστώντας αυτή την ενιαία τεχνική πιο επιχειρησιακή για εφαρμογή, για την

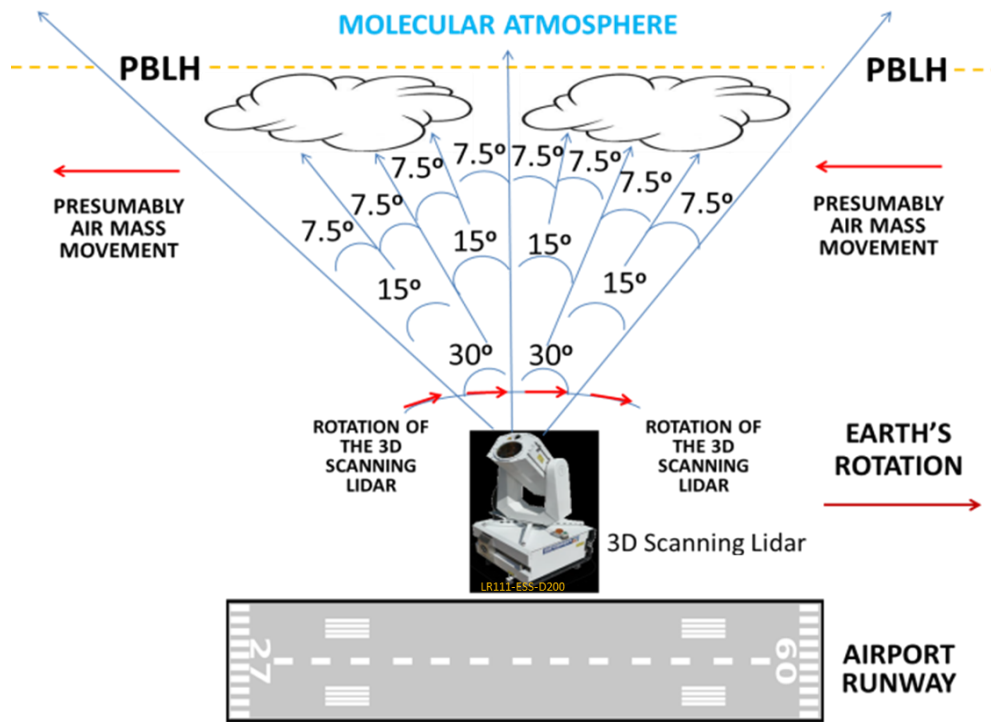
ανάκτηση PBLH σε τρισδιάστατες περιοχές σάρωσης. Συνιστάται, όμως, να γίνεται επεξεργασία στο δυνατόν περισσότερα αρχεία δεδομένων καταγραφής σε σχέση με τις κάθετες μετρήσεις, διότι όσο υπάρχουν περισσότερα αρχεία καταγραφής, τόσο ευρύτερη είναι η περιοχή υπό αναζήτηση και τόσο περισσότερα δεδομένα για επεξεργασία και με ακρίβεια εκτελείται η ανάκτηση PBLH.

Στα Σχήματα 5.16, 5.17, ένα σύστημα 3D lidar σάρωσης που εκτελεί την τεχνική Fastplan ή Uniform, με όμοια σάρωση, με εκείνη της περιστροφής της γης, σε βήματα των 15° ή $7,5^\circ$, προκειμένου να αποκτήσει – εκτιμήσει μια ευρεία περιοχή του ουρανού, καθώς οι μάζες αέρα, κινούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση από εκείνη της γης. Σημειώνεται ότι, εάν τα μετεωρολογικά δεδομένα πρόβλεψης υποδηλώνουν υψηλές ταχύτητες αέριου μάζας στην κοινώς αναμενόμενη περιοχή PBLH και προς την κατεύθυνση της περιστροφής της γης (παρόμοιες ή υψηλότερες ταχύτητες αέρα από αυτή της γραμμικής ταχύτητας του 3D τρισδιάστατου συστήματος lidar), τότε, θα πρέπει να επιλέγεται από τον χρήστη μια αντίθετη κατεύθυνση σάρωσης. Το ίδιο ισχύει και για τις συνήθεις υψηλές ταχύτητες αέρος στα αναμενόμενα PBLH και σε θέσεις όπου οι κινήσεις της μάζας αέρα έχουν να κάνουν με τη σταθερή ροή των αέριων μαζών παγκοσμίως.

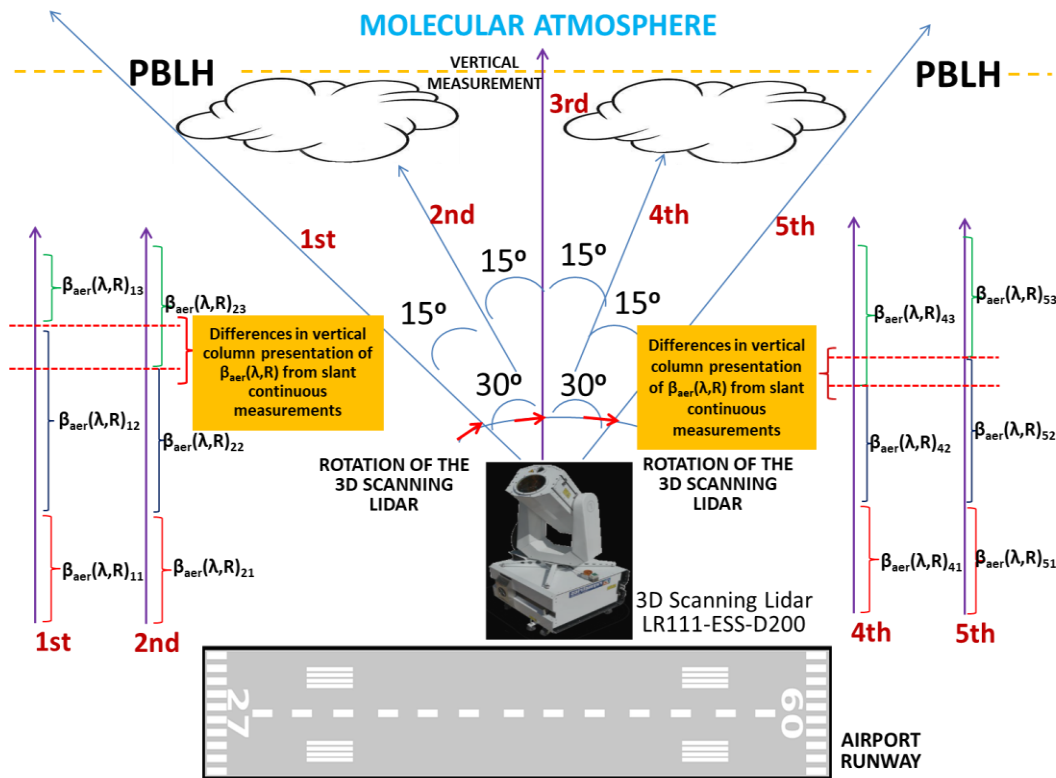
Στα ανωτέρω, υπάρχει η ίδια σκέψη, πώς δηλαδή ότι ο χρήστης θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει την κατεύθυνση της ταχύτητας του αέρα σε κοινές – αναμενόμενες περιοχές PBLH, στη θέση του συστήματος lidar. Με άλλα λόγια, ο χρήστης θα μπορούσε να εξετάσει τη σχετική ταχύτητα μεταξύ των μαζών του αέρα όπως εμφανίστηκαν σε μια θέση, με εκείνη της περιστροφής της γης και της γραμμικής ταχύτητας της σάρωσης του συστήματος lidar σε κοινά ύψη PBLH, την συγκεκριμένη χρονική περίοδο, πριν ξεκινήσει η σάρωση για το PBLH. Η ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου χωρίς την ανάγκη χρήσης Doppler, ανακτάται από τους αλγορίθμους SIBESMEA και WIND Weather Phenomena ή WIND METCON παρακάτω, όπως έχει ήδη ειπωθεί, οπότε ο χρήστης μπορεί από μόνο του να ανακτήσει αυτή την πληροφορία και να δράσει αναλόγως για την ανάκτηση PBLH.

Η ανίχνευση κατεύθυνσης του ανέμου και κίνησης των αέριων μαζών στα PBLH αναμενόμενα ύψη, γίνεται ώστε να αποφευχθεί η καταγραφή, σε πολλές περιπτώσεις, της ίδιας περιοχής του ουρανού, μέσω της απόκτησης των χαρακτηριστικών της ίδιας μάζας αέρα που κινείται μαζί με την κατεύθυνση σάρωσης του συστήματος lidar που σαρώνει με μια γνωστή γραμμική ταχύτητα. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης πιθανόν να υπολόγιζε ένα ψευδές PBLH για αυτό το χρονικό πλαίσιο ή ένα σωστό, σε περίπτωση σταθερής στρωματοποιημένης ατμόσφαιρας. Το φαινόμενο αυτό, εάν συμβεί, θα μπορεί να διορθωθεί σχεδόν άμεσα από τους MUSTI – L/D/PBLH ή

VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή VERDE στην επόμενη επαναλαμβανόμενη εφαρμογή της τεχνικής Fastplan ή Uniform, στην επόμενη σάρωση, όπου θα ακολουθήσει μια νέα περιοχή του ουρανού με το ίδιο (σε περιπτώσεις σωστής πρώτης ανάκτησης PBLH) ή διαφορετικό (σε περίπτωσης πιθανόν λαθεμένης πρώτης ανάκτησης PBLH).



Σχήμα 5.16: Σύστημα 3D lidar που εκτελεί Fastplan ή Uniform τεχνική, με σάρωση "όμοια", με την περιστροφή της γης, σε βήματα των 15° ή 7.5°, προκειμένου να αποκτήσει «εικόνα» μιας ευρείας περιοχής του ουρανού, για τον σκοπό ανάκτησης του PBLH [Pantazis et al. (2019)].



Σχήμα 5.17: Τεχνική Fastplan ή Uniform με εκτέλεση κεκλιμένων μετρήσεων και κατακόρυφες στήλες υπολογισμού του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (ή / και $\alpha_{aer}(\lambda, R)$), σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) [Pantazis et al. (2019)].

Για τις μετρήσεις lidar κεκλιμένου επιπέδου και υπολογισμού του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (και / ή $\alpha_{aer}(\lambda, R)$), σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) η τεχνική 3D Stepping ή LADDER κατέχει ηγετικό ρόλο. Αυτή η τεχνική, για την ανάκτηση PBLH, μπορεί να παράγει τις παραπάνω τιμές αξιόπιστα. Η τεχνική 3D Stepping ή LADDER είναι πολύ αποτελεσματική για εφαρμογή σε μετρήσεις κεκλιμένης απόστασης, προκειμένου να ανακτηθούν οι τιμές $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (και / ή $\alpha_{aer}(\lambda, R)$), σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) κατά την εφαρμογή της. Κατόπιν, οι τιμές αυτές που έχουν ανακτηθεί σε 3D (Σχήμα 5.16), συγκρίνονται για τις διαφορές τους καθ' ύψος (Σχήμα 5.17) σε σχέση με την οριζόντια απόσταση μεταξύ των μετρήσεων, με την ταυτόχρονη αποκάλυψη του «κοινού» ατμοσφαιρικού στρώματος, του PBLH.

Στην Fastplan ή Uniform και για να χρησιμοποιηθούν οι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή VERDE και Weather Phenomena – PBLH ή

METCON – PBLH με τις ρυθμίσεις που παρουσιάζονται εδώ, δεν χρησιμοποιείται η τοποθεσία του συστήματος lidar, εφόσον συμβαίνουν οι παραπάνω απαιτήσεις. Αλλά γίνεται χρήση της στήλης αιωρούμενων σωματιδίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.17, όπως αν γίνονταν κάθετες μετρήσεις και το PBLH ήταν υποθετικά σε μεγαλύτερα ύψη. Για τον λόγο αυτό και οι κεκλιμένες μετρήσεις lidar μεταφράζονται σε ύψος – ωφέλιμο σήμα οπισθοσκέδασης της κατακόρυφης μέτρησης ή το μέγιστο ύψος αναμενόμενου PBLH (όποιο συμβαίνει σε χαμηλότερο ύψος):

$$PBLH = \cos(\phi) * R \quad (83)$$

όπου, ϕ , είναι η κάθετη γωνία εκκινώντας την μέτρησή της από το κατακόρυφο για εδώ.

Βέβαια, οι MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH και DECIS ή VERDE και Weather Phenomena – PBLH ή METCON – PBLH μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για μετρήσεις κεκλιμένου επιπέδου. Οι δύο ρυθμίσεις των αλγορίθμων που πρέπει να ληφθούν υπόψη από τον χρήστη για χρήση της Fastplan ή Uniform στους παραπάνω αλγορίθμους είναι τα βήματα (iv) και (vi) του MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH παραπάνω (Εξ. 83 - 85) από την άποψη της συγκεκριμένης επεξεργασίας, της παραγωγής πρώτης τάξης των πινάκων (M) (κάθε «χωρικού φίλτρου» σε κάθε πίνακα (M) του MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH. Αυτές οι ρυθμίσεις δημιουργήθηκαν στατιστικά κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης αυτών των αλγορίθμων, για κατακόρυφες μετρήσεις και θα πρέπει να θεωρηθούν ότι έχουν ρυθμιστεί σε χαμηλότερες τιμές (ομαλότερες αλλαγές τιμών β_{aer} (λ , R) και l ή α_{aer} (λ , R), σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) λόγω των κεκλιμένων μετρήσεων. Έτσι, για τα δύο παραπάνω βήματα, θα πρέπει να θεωρηθεί ότι ισχύει ο κανόνας του συνημίτονου, σύμφωνα με τη γωνία (ϕ) σε κάθε μέτρηση κλίσης:

$$R = h / \cos(\phi) \Rightarrow h = R * \cos(\phi) \quad (84)$$

και
$$h_{G3} = G3 * \cos(\phi) = 3 * 7.5(m) * \cos(\phi) \quad (85)$$

όπου, h, είναι το ύψος που αντιστοιχεί σε κατακόρυφες μετρήσεις και h_{G3} , είναι αντίστοιχα το ύψος του χωρικού φίλτρου των 3 bins σε κεκλιμένο επίπεδο. Ακολουθώντας την ίδια λογική, στο βήμα (vi) ακολουθούνται (Εξ. 86, 87):

$$\frac{dh}{dR} = \cos(\phi) - R * \sin(\phi) \quad (86)$$

$$\frac{d(\beta_{aer}(\lambda, h))}{dh} = M3DR = \frac{1}{[\cos(\phi) - R^* \sin(\phi)]} * \frac{d(\beta_{aer}(\lambda, R))}{dR} \quad (87)$$

και

Έτσι, σε μετρήσεις κεκλιμένου επιπέδου, ο DECIS ή VERDE θα καθοδηγήσει τις κατάλληλες ρυθμίσεις για τον MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH, για να παρέχει στον χρήστη τη διαστρωμάτωση και την χωρική κατανομή του $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (ή / και $\alpha_{aer}(\lambda, R)$, σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) από την τοποθεσία του συστήματος lidar. Κατόπιν, αναλαμβάνει ο MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH ώστε να αποφανθεί για το most common παραχθέν PBLH από μετρήσεις κεκλιμένου επιπέδου και να το δώσει ως τελικό ύψος PBL.

Οι μετρήσεις κεκλιμένου επιπέδου σε διαφορετικές γωνίες (ϕ), παράγουν διαφορετικά σήματα οπισθοσκέδασης για επεξεργασία, αλλά με μία κοινή πληροφορία, αυτή του κοινού PBLH και αυτή η πληροφορία είναι τώρα πολύ γρήγορα διαθέσιμη, με αποτέλεσμα να ανακτάται αξιόπιστα το PBLH σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Όσο ευρύτερη είναι η περιοχή του ουρανού που έχει σαρωθεί, τόσο ευρύτερος είναι και ο μέσος όρος PBLH που παράγεται ιδιαίτερα σε αρκετά διαταραγμένη ατμόσφαιρα. Αντίστοιχα, σε ομαλή στρωματοποιημένη ατμόσφαιρα, ο ίδιος μέσος όρος αποτελεί ένα πολύ αξιόπιστο PBLH.

5.12 Αλγόριθμος SIBESMEA

Για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, η πιο γνωστή μέθοδος βασίζεται στην εκμετάλλευση του φαινομένου Doppler, το οποίο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση του PBLH [Moreira et al. (2019)]. Μια διαφορετική τεχνική, αλλά πιο συσχετισμένη με αυτή που παρουσιάζεται παρακάτω και βασιζόμενη σε μετρήσεις lidar, είναι αυτή που αναφέρεται στο [Tomás et al. (2015)]. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί τη μέθοδο της ανάκτησης του PBLH από σύστημα lidar οπισθοσκέδασης, αποτελούμενα από κατακόρυφες κατανομές κατά μήκος της δέσμης, η οποία διαμορφώνεται μαθηματικά σε μορφή πίνακα υπό διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει την ύπαρξη του μοντέλου της παγωμένης ατμόσφαιρας [Tomás et al. (2015)] και λειτουργεί με λειτουργίες χρονικής αλληλοσυμπλήρωσης που δεν χρειάζεται να μεγιστοποιηθούν. Ισχύει επίσης και στην περίπτωση κεκλιμένων σαρώσεων που βασίζονται στην τεχνική πολλαπλών γωνιών αζιμουθιακά (οριζόντιες μετρήσεις ανάκτησης ανέμου). Οι κύριες διαφορές των παραπάνω με τους παρουσιαζόμενους εδώ αλγορίθμους είναι ότι, ακόμα και αν

χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα μετρήσεις μίας δέσμης, μπορούμε να παράγουμε ταχύτητα ανέμου σε 2 διαστάσεις (2D), παραμένοντας σε μία μόνο κλίση και υπολογίζοντας επίσης και την 3D ταχύτητα του ανέμου.

Ένας νέος λοιπόν αλγόριθμος που ονομάζεται SIBESMEA (Single BEam Speed MEAsurement) έχει δημιουργηθεί για χρήση σε δέσμη ενός συστήματος 3D lidar, που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο. Συγκεκριμένα, από μία μοναδική δέσμη που δείχνει προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, δημιουργεί αρχεία δεδομένων καταγραφής σήματος οπισθοσκέδασης με τον χρόνο και τα επεξεργάζεται με σκοπό την ανάκτηση της ταχύτητας του ανέμου (κυρίως) σε διάφορα ύψη καθώς και της κατεύθυνσής που παρουσιάζει.

Εναλλακτικά, η ίδια επεξεργασία και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται σε αυτή την Διδακτορική διατριβή, μπορούν να ακολουθηθούν γενικότερα για την περίπτωση ανίχνευσης ιπτάμενων αντικειμένων, όπως αεροσκαφών και Drones, για σαρώσεις ή στάση του συστήματος lidar, χρησιμοποιώντας όρια παραγόντων οπισθοσκέδασης, όπως: $\beta_{aer}(\lambda, R) > 5 * (2 * 10^{-3}) m^{-1} sr^{-1}$, με $C(\lambda, R) = 10 sr^{-1}$ και $\alpha_{aer}(\lambda, R) > 5 * (2 * 10^{-2}) m^{-1}$ (όπου, $\beta_{aer}(\lambda, R) \geq 2 * 10^{-3} m^{-1} sr^{-1}$, με $C(\lambda, R) = 10 sr^{-1}$ και $\alpha_{aer}(\lambda, R) \geq 2 * 10^{-2} m^{-1}$, είναι το αποτέλεσμα μεγιστοποιημένης ανίχνευσης Cloud (από Weather Phenomena ή METCON), συμβάλλοντας και με έτερο τρόπο στην Ασφάλεια Πτήσεων στα αεροδρόμια, όπου επιχειρεί το σύστημα lidar. Στην τελευταία περίπτωση γίνεται ανίχνευση (detection) και παρακολούθηση (tracking) από τα αρχεία καταγραφών οπισθοσκέδασης, για εξαγωγή θέσης και ταχύτητας μικρών και μεγαλύτερων ιπτάμενων αντικειμένων με την απόσταση, τις χωρικές γωνίες (φ , θ) και τον χρόνο.

Συνεχίζοντας για τον άνεμο, με την λήψη των εγγραφών καταγραφής δεδομένων οπισθοσκέδασης με τον χρόνο, γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της ταχύτητας ατμοσφαιρικών συνθηκών και φαινομένων που περιγράφονται στους Weather Phenomena ή METCON και MUSTI – L/D/PBLH ή VASPAT – L/D/PBLH, από την ώρα που αυτά ανιχνεύονται από την δέσμη και εξακολουθεί να παρακολουθείται και να καταγράφεται από αυτή τη δέσμη σήματος σε κάθε απόσταση (R). Με άλλα λόγια, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, γίνεται «αντιστοίχιση» μεταξύ του τμήματος του ατμοσφαιρικού στρώματος που ανιχνεύεται και της «υπογραφής» του σήματος που δίνει κατά την οπισθοσκέδαση με την απόσταση (R), καθώς και την παρακολούθηση αυτής της «υπογραφής σημάτων» με το χρόνο, αλλά προς τα πίσω, για την ίδια ή σχεδόν ίδια σε «μέγεθος», «υπογραφή σήματος» που συμβαίνει κατά την εξαγωγή της ταχύτητας αυτού του τμήματος του ατμοσφαιρικού στρώματος. Ειδικότερα:

(i) Χρησιμοποιείται η τεχνική 3D Stepping ή LADDER (συνίσταται) έως την

κατακόρυφη γωνία για μετρήσεις κεκλιμένου επιπέδου 2D,

(ii) Πραγματοποιείται η καταγραφή δεδομένων οπισθοσκέδασης συστήματος lidar (συνίσταται 10 ή περισσότερων – ρύθμιση από τον χρήστη) και διατηρούνται στη μνήμη.

(iii) Εφαρμόζεται ο Denoising - 1/2 ή NOSUB - S/R ή άλλος αξιόπιστος αλγόριθμος αφαίρεσης θορύβου στα σήματα λήψης.

(iv) Υπολογίζονται τα $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (και / ή $\alpha_{aer}(\lambda, R)$), σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)), αν οι τεχνικές Klett και 3D Stepping ή LADDER για επικλινείς μετρήσεις lidar, έχουν χρησιμοποιηθεί. Γενικότερα, κάθε είδους τεχνική που χρησιμοποιείται για την παροχή έγκυρων και αξιόπιστων (με ελάχιστο προσδιορισμό σφάλματος) σημάτων οπισθοσκέδασης, με επεξεργασία οποιουδήποτε συντελεστή $\beta_{aer}(\lambda, R)$ (και / ή $\alpha_{aer}(\lambda, R)$), σήματος lidar διορθωμένο ως προς την απόσταση (RCLS)) με την απόσταση σε 2D ή και 3D.

(v) Τα συνεχή καταγεγραμμένα σήματα, τοποθετούνται στο επίπεδο για επεξεργασία 2D (κεκλιμένες, κατακόρυφες ή οριζόντιες μετρήσεις). Κατόπιν, τα 2D αυτά σήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για 3D μετρήσεις, υπό διαφορετικές χωρικές γωνίες μέτρησης φ και θ του συστήματος 3D lidar.

(vi) Η «επιφάνεια» που δημιουργείται μεταξύ της έντασης των σημάτων οπισθοσκέδασης κάθε 3, 5 ή περισσότερα bins απόστασης (ρυθμιζόμενος από τον χρήστη) υπολογίζεται για καθένα από αυτά τα συνεχώς καταγεγραμμένα σήματα με την απόσταση, προκειμένου να υπολογιστεί το εμβαδό αυτών των επιφανειών για επεξεργασία σήματος με την απόσταση, δημιουργώντας ως μονάδα μέτρησης τα bins^2 ή άλλες κοινές μονάδες μέτρησης (π.χ. m^2 κ.λπ.) στους υπολογισμούς. Χρησιμοποιείται κατόπιν ένας λόγος «ομοιότητας» αυτών των συνεχών σημάτων μέσω των εμβαδών επιφάνειας που δίνουν ή άλλης τεχνικής ομοιότητας σχήματος-μορφής (τεχνικές ανίχνευσης υπογραφής σήματος), μεταξύ δύο και περισσότερων συνεχόμενων καταγεγραμμένων αρχείων δεδομένων - σημάτων, με την αναλογία να είναι ≥ 0.9 (συνίσταται), από ένα αρχείο δεδομένων που έχει εγγραφεί - σήμα με το ή τα επόμενα. Αυτό στη συνέχεια παρακολουθείται για την ανίχνευση της ίδιας ατμοσφαιρικής στρώσης, όπως αυτή περιγράφεται από την υπογραφή του σήματος κάθε φορά, εντός μιας χωρικής ευρύτητας των ± 3 ή ± 5 bins ή και περισσότερων που ο χρήστης αποφασίζει να χρησιμοποιήσει μεταξύ των συνεχώς καταγεγραμμένων αρχείων δεδομένων - υπογραφών. Η ιδέα εδώ είναι ότι δημιουργούνται φίλτρα μεταβλητής εμβέλειας όπως τα χωρικά φίλτρα MUSTI - L/D ή VASPAT - L/D, για την δημιουργία χωροχρονικών πλαισίων - στιγμιότυπων, προκειμένου να βρεθεί

συγκρίσιμη «ομοιότητα» των σημάτων οπισθοσκέδασης και των υπογραφών που δίνουν, σε κοντινή απόσταση με τον χρόνο. Η παραπέρα σύγκρισή τους, δίνει την δυνατότητα όπως αυτά τα χωροχρονικά πλαίσια ανιχνευτούν σε νέο χρόνο με κάποια καλή ομοιότητα – σύγκρισης με τα παλαιότερα και να υπολογίζεται με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα συγκεκριμένης ατμοσφαιρικής μάζας, οποιασδήποτε έντασης και μήκους.

(vii) Έχοντας χρόνο και εύρος χωροχρονικών πλαισίων - στιγμιότυπων σε ένα ενιαίο πεδίο για 2D επεξεργασία, μπορεί κάποιος να έχει την ταχύτητα ενός αντικειμένου ή την ταχύτητα μια ατμοσφαιρικής κατάστασης – φαινομένου, για περαιτέρω καταγραφή και της επιτάχυνσης ή της επιβράδυνσης της ταχύτητας του ατμοσφαιρικού όγκου που εξακολουθεί να λαμβάνεται από την ίδια δέσμη, χωρίς την ανάγκη δαπανηρού εξοπλισμού Doppler. Με άλλα λόγια, για την μέτρηση της ταχύτητας εδώ χρησιμοποιείται ένα ατμοσφαιρικό 'τμήμα' και η υπογραφή του σε κοντινές αποστάσεις, με το χρόνο, δημιουργώντας ένα ιστορικό «πλαισίων» σημάτων οπισθοσκέδασης (ατομικές υπογραφές σημάτων). Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν κατακόρυφα, οριζόντια ή με κλίση, ενώ στην τελευταία περίπτωση το αποτέλεσμα είναι μια 2D καταγραφή του ανέμου με την απόσταση - ύψος με το χρόνο.

(viii) Ο αριθμός των σημάτων – χωροχρονικών «πλαισίων» ή των αρχείων καταγραφής σχετίζεται με το «ιστορικό» που θέλουμε να παρατηρήσουμε και την αναμενόμενη ελάχιστη και μέγιστη ταχύτητα του ανέμου που αναμένουμε να παρατηρήσουμε σε πλήρη κλίμακα ή την διακριτική ικανότητα μέτρησης της ταχύτητας που επιθυμούμε. Γενικότερα, η υψηλά αναμενόμενη ταχύτητα των ατμοσφαιρικών 'τμημάτων', υπαγορεύει περισσότερα αρχεία δεδομένων ή / και υψηλότερη συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος για επεξεργασία. Όσο χαμηλότερη είναι η αναμενόμενη ταχύτητα μέτρησης των ατμοσφαιρικών 'τμημάτων', τόσο λιγότερα αρχεία δεδομένων και / ή μικρότερη ή μέση συχνότητα δειγματοληψίας απαιτείται. Στην τελευταία περίπτωση και για τη μέτρηση πολύ χαμηλών ταχυτήτων (π.χ. < 5 - 10 κόμβοι), μπορεί να χρειαστεί και υψηλότερη συχνότητα δειγματοληψίας, ώστε να γίνει δυνατή η παρακολούθηση της πολύ χαμηλής ταχύτητας του ανέμου. Αυτό συνίσταται γιατί για περιπτώσεις χαμηλού ανέμου και στρωματοποιημένης αλλά «ήρεμης» ατμόσφαιρας, μπορεί να προκύπτει ευρύτερη ομοιότητα των σημάτων καταγραφόμενης αναστροφής της σάρωσης με περισσότερες από δύο παρόμοιες υπογραφές σημάτων που βρίσκονται εντός της περιοχής μας και του χρόνου αναζήτησης και να συγχέονται ως προς την εξαγωγή αποτελέσματος.

(ix) Οπουδήποτε κατευθύνεται η δέσμη του συστήματος lidar με γωνία (φ) ως προς την κατακόρυφη, τα h και R υπολογίζονται από τις Εξ. 83, 84 και χρησιμοποιούνται για απεικόνιση σε 2D.

(x) Εάν το εμβαδό που υπολογίζεται στο βήμα (v) (ή άλλης αξιόπιστης μεθόδου ανάγνωσης και σύγκρισης «υπογραφής» των σημάτων καταγραφής με την απόσταση και τον χρόνο) αυτού του αλγορίθμου, φαίνεται να μειώνεται διαχρονικά από αρχείο εγγραφής του ενός σήματος στο επόμενο, διατηρώντας από την άλλη την προαναφερθείσα ομοιότητα (αναλογία μεγαλύτερη από 0.9 – συνιστάται) και για υψηλή δειγματοληψία - συχνότητα του σήματος lidar σε μικρή απόσταση, θα μπορούσε να υποθεθεί με ασφάλεια – αξιοπιστία, ότι το υπόλοιπο της μάζας του αέρα ή υδρατμών, αιωρούμενων σωματιδίων κτλ, «ταξιδεύει» στην 3η διάσταση και μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητά του αέρα και στην 3η αυτή διάσταση. Από την άλλη, η παντελής απουσία ταχύτητας της μάζας αέρα, μεταξύ των συνεχών μετρήσεων αλλά με αλλαγές στην έντασή του σε σχεδόν σταθερή απόσταση, ισχύει πάλι για την κίνηση των ανέμων σε αυτή την 3η διάσταση, κατά κύριο λόγο, υποθέτοντας υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος δέσμης. Η ταχύτητα της κινήσεως της μάζας του αέρα στην 3η διάσταση θα μπορούσε να υπολογιστεί με τον ρυθμό απώλειας μάζας αέρα κατά την εν λόγω κατεύθυνση (+ ή -), η οποία κατεύθυνση βασίζεται στο βήμα (xi) παρακάτω.

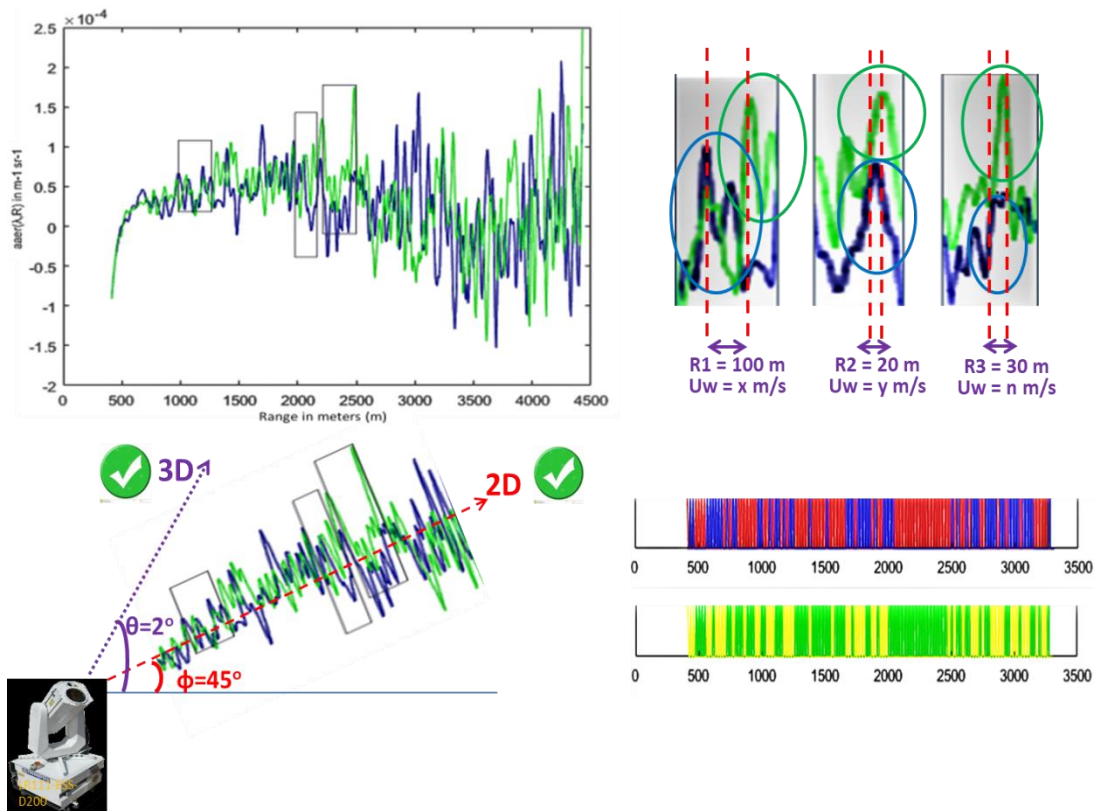
(xi) Για την εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου στην 3η διάσταση, η τεχνική πολλαπλών γωνιών θα μπορούσε να φανεί χρήσιμη, παρόμοια με αυτή της [Tomás et al. (2015)]. Μια μέτρηση σε διαφορετική αζιμούθιακή γωνία, γίνεται στην τρίτη διάσταση με τη χρήση των βημάτων (i) έως (ix) και δημιουργείται και εκεί ένα ιστορικό δεδομένων που καταγραφής για μερικά δευτερόλεπτα ή περισσότερο (ρυθμιζόμενο από το χρήστη).

(xii) Έχει ήδη γίνει μια μικρή αλλαγή γωνίας (συνιστάται της 1° για μέσες αποστάσεις ανίχνευσης αέριας μάζας) από το παραπάνω βήμα και έχουν ληφθεί τα ίδια βήματα με αυτά της μέτρησης της ταχύτητας σε 2D, αλλά τώρα παρατηρείται ομοιότητα μεταξύ των αρχείων δεδομένων αλλαγής γωνίας αζιμούθιου, για να οριστεί το (+) ή (-) (Ανατολή – Δύση ή Βορράς – Νότος στην 3η διάσταση) του ανέμου και να καταγραφεί - παρακολουθηθεί στη συνέχεια. (Αυτά τα τελευταία δύο βήματα, (xi) και (xii) θα μπορούσαν να ακολουθηθούν μόνο μία φορά, στην αρχή της μέτρησης της ταχύτητας ανέμου 3ης διάστασης ή όποτε ο χρήστης χρειάζεται να επαναβαθμονομήσει το σύστημά του 3D lidar στην 3η διάσταση).

(xiii) Δημιουργείται και καταγράφεται κάθε φορά η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου σε 2 και 3 διαστάσεις.

(xiv) (Για την περίπτωση ανίχνευσης (- μέτρησης) 3D vortex σε 2D) Ο αλγόριθμος κοιτά τις υπογραφές του σήματος όπως παραπάνω και προσπαθεί να ανιχνεύσει στον χρόνο, περιπτώσεις όπου η υπογραφή ενός σήματος μειώνεται ή

αυξάνεται σε 2D από την σχετική θέση - απόσταση που βρίσκεται από το σύστημα lidar και παρατηρεί αν σχεδόν ταυτόχρονα άλλες περιοχές του σήματος με τον χρόνο, εμφανίζουν αντίστοιχα αύξηση ή μείωση κατά παρόμοιο ρυθμό (> 0.75 matching στο ρυθμό αύξησης ή αντίστοιχης μείωσης) και αν αυτό συνεχίζεται πάνω από 5 καταγραφές (συνίσταται), δίνεται η περίπτωση αυτή, ως περίπτωση vortex big or small και κατ' εκτίμηση γραμμική ταχύτητα, αναλόγως της έκτασης και ταχύτητας του φαινομένου (εκτίμηση χρήστη).



Σχήμα 5.18: Παρουσίαση αλγορίθμου SIBESMEA. (Κάτω αριστερά): 3D lidar σε 2D και 3D μετρήσεις. (Επάνω αριστερά): SIBESMEA σε εφαρμογή με ενδεικτική αποκάλυψη όμοιων υπογραφών σήματος σε διαφορετικές αποστάσεις. (Επάνω δεξιά): Τρεις περιπτώσεις όμοιων υπογραφών σήματος σε διαφορετικές αποστάσεις με τον χρόνο. [Pantazis et al. (2019)].

Αυτός ο νέος αλγόριθμος μπορεί να αντικαταστήσει έναν ακριβό εξοπλισμό Doppler και να ρυθμιστεί σωστά για να κάνει την ανάκτηση της ταχύτητας ανέμου και 3D δυνατή από μία μόνο δέσμη συστήματος lidar. Σημειώνεται ότι η παρακολούθηση παρόμοιων «υπογραφών» των σημάτων μεταξύ διαδοχικών καταγραφών και από bin σε bin με τον χρόνο, με όριο ομοιότητας άνω του 0.9, αφαιρεί τελείως την πιθανότητα

ανίχνευσης ενός διαφορετικού τμήματος του ατμοσφαιρικού στρώματος σε αυτή τη στενή περιοχή του 1-3bin. Έτσι, όταν ο SIBESMEA υπολογίζει την ταχύτητα του ανέμου ή ιπταμένου αντικειμένου γενικότερα από το σήμα οπισθοσκέδασης με την απόσταση και τον χρόνο, η ακρίβειά του έχει να κάνει μόνο από τη συχνότητα επανάληψης της δειγματοληψίας του σήματος, και της απαίτησης του χρήστη όπως αναλύθηκε παραπάνω.

Δηλαδή η διακριτική ικανότητα του SIBESMEA, έχοντας σήματα οπισθοσκέδασης και επεξεργάζοντας αυτά με τον χρόνο εξαρτάται μόνο από την απαίτηση του χρήστη και της ανάλυσης που ζητά στην περιοχή μελέτης. Γενικότερα, σε έναν αριθμό σημάτων επεξεργασίας υπό διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες που εξετάστηκαν, όσο μεγαλύτερος κρατήθηκε ο ρυθμός δειγματοληψίας και η διατήρηση του συνόλου εξέτασης μιας περιοχής του σήματος των 3-5 bins απόσταση, δεν υπήρξε καμία περίπτωση μη ξεκάθαρης μέτρησης του ανέμου (Σχήμα 5.18 παρακάτω).

Εκεί (Σχήμα 5.18), γίνεται η παρουσίαση αλγορίθμου SIBESMEA. (Κάτω αριστερά) και 3D lidar σε 2D και 3D μετρήσεις. (Επάνω αριστερά). Επίσης, επάνω δεξιά φαίνεται ο αλγόριθμος SIBESMEA σε εφαρμογή με ενδεικτική αποκάλυψη όμοιων υπογραφών σήματος, όπου δίνονται τρεις περιπτώσεις ομοίων υπογραφών σε διαφορετικές αποστάσεις με τον χρόνο. Το μπλε σήμα προηγείται του πράσινου χρονικά. Οι μωβ ενδείξεις αφορούν τις διαφορετικές αποστάσεις που οι υπογραφές αυτές εντοπίστηκαν. (Κάτω δεξιά): Όπου, κόκκινα και μπλε πεδία, αφορούν ανοδικά και καθοδικά ρεύματα αέρα, ενώ τα κίτρινα και πράσινα (από κάτω) αφορούν ανατολικά και δυτικά ρεύματα αέρα.

5.13 Αλγόριθμος WIND Weather Phenomena ή WIND METCON

Ο αλγόριθμος WIND Weather Phenomena ή WIND METCON έχει να κάνει με την παρακολούθηση συγκεκριμένων ατμοσφαιρικών στρωμάτων (π.χ. σύννεφα, ομίχλη κλπ.) και την ταχύτητά τους μέσω 2D ή 3D μετρήσεων. Ωστόσο, η χρήση του Weather Phenomena ή METCON λαμβάνει χώρα όπως φαίνεται και στην ενότητα 3 και τα βήματα (i) έως (vii) του Weather Phenomena ή METCON, προκειμένου να δημιουργηθεί μια απεικόνιση της διαστρωμάτωσης της ατμόσφαιρας στη 3D κατεύθυνση εκπομπής του συστήματος lidar.

Στη συνέχεια, εκκινεί η δημιουργία ενός δεύτερου αρχείου καταγραφής δεδομένων που ακολουθεί τα ίδια βήματα και μετά από αυτό, ένα τρίτο, ένα τέταρτο

κλπ. αρχείο καταγραφής και επεξεργασίας – απεικόνιση Weather Phenomena ή METCON, προκειμένου να εντοπιστούν διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα και πως αυτά ταξιδεύουν στον χρόνο. Συγκεκριμένα:

(viii) Εκκινεί η παρακολούθηση συγκεκριμένων ατμοσφαιρικών στρωμάτων που πραγματοποιείται και προσδιορίζεται από αρχεία καταγραφής και παρακολούθησης διαδοχικών δεδομένων οπισθοσκέδασης, μέσα από την οπτική παρακολούθηση του κέντρου της συγκεκριμένης ατμοσφαιρικής στρώσης, όπως αυτή αναγνώσκεται από τον Weather Phenomena ή METCON (ανεξάρτητα από το πλάτος του συγκεκριμένου στρώματος). Με τον τρόπο αυτό, την ανίχνευσης ενός ατμοσφαιρικού στρώματος και παρακολούθησης του στον χρόνο επιτυγχάνεται η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου. Επίσης, γίνεται και παρακολούθηση των χωρικών ορίων του στρώματος αυτού με τον χρόνο ώστε να μπορούν να εντοπίζονται και οι άνεμοι που δημιουργούνται στα άκρα καθενός από αυτά.

(ix) Η ταχύτητα της αέριας μάζας της συγκεκριμένης στρώσης και τα χωρικά της όρια υπολογίζονται, ανάλογα με την εμβέλεια, κυρίως από το χωρικό κέντρο της ατμοσφαιρικής στρώσης, οπότε και γίνεται γνωστό ότι μια αέρια μάζα πχ. “Moderate Fog” συγκρούεται με μια αέρια μάζα “Haze”, κάποια χρονική στιγμή, καθώς και τις ταχύτητές τους κατά την σύγκρουση και μεταμόρφωσή τους, όπως και τις ταχύτητες στα άκρα τους, για ανάλυσή τους από τον χρήστη. Αυτή τη στιγμή, οι συμβατικοί τρόποι μέτρησης του ανέμου και τρόποι μέτρησης συστήματος lidar αδυνατούν να επιφέρουν το συγκεκριμένο αποτέλεσμα της γνώσης δηλαδή χαρακτηρισμένων ατμοσφαιρικών στρωμάτων, τα χωρικά τους όρια και της συμπεριφοράς τους με τον χρόνο, εντός μιας λιγότερο ή περισσότερο δυναμικής ατμόσφαιρας.

(x) Όταν μια συγκεκριμένη ατμοσφαιρική στρώση δεν ανιχνεύεται πλέον σε μια απόσταση από τα προηγούμενα κεντρικά και χωρικά όρια, μέσω ενός αριθμού διαδοχικών αρχείων δεδομένων καταγραφής, η διαδικασία και ο υπολογισμός της παρακολούθησης της ταχύτητας (π.χ. σύννεφα, ομίχλη κ.λπ.), σταματά για το στρώμα αυτό, ενώ για η παρακολούθηση και υπολογισμός της ταχυτητας των υπόλοιπων στρωματώσεων συνεχίζεται, μαζί με τα νέα ατμοσφαιρικά στρώματα που προκύπτουν από νέα αρχεία διαδοχικών εγγραφών των δεδομένων και νέα παρακολούθηση της ατμόσφαιρας, ακολουθούμενη από την υπολογιζόμενη ταχύτητά τους.

(xi) Η ταχύτητα παρακολούθησης διαδοχικών στρωματώσεων δίδεται στο χρήστη σε 2D ή 3D και ακολουθείται και ο SIBESMEA από το στάδιο (vi) και μετά για την παρακολούθηση των ίδιων ατμοσφαιρικών στρωματώσεων και εξαγωγή κοινών αποτελεσμάτων, μέχρι και το τέλος του ανωτέρω αλγορίθμου.

(xii) Η μέτρηση της ταχύτητας παρακολούθησης στρώσεων 2D και 3D γίνεται διαθέσιμη στο χρήστη.

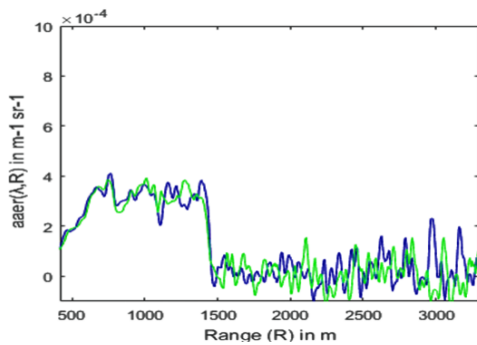
Με τον αλγόριθμο WIND Weather Phenomena ή WIND METCON, η παρακολούθηση όλων των ατμοσφαιρικών στρωμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί, με την δυνατότητα που έχει ο αλγόριθμος να εκτιμά την ταχύτητα των αέριων μαζών για κάθε στρώμα και των χωρικών ορίων αυτού, ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης εκπομπής του συστήματος lidar, σε 2D και σε 3D αλλά και σε κατακόρυφη ή οριζόντια κατεύθυνση. Έτσι, η «σοφή» χρήση αυτού του αλγορίθμου θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε αεροδρόμια για ασφάλεια και σε αστικές περιοχές ή δάση με κίνδυνο φωτιάς ή υπάρχουσα πυρκαγιά ή με άλλους αερομεταφερόμενους βιολογικούς παράγοντες - αερολύματα που ταξιδεύουν, προκειμένου να εντοπιστούν και να παρακολουθηθούν συγκεκριμένα, σημαντικά για την δημόσια υγεία, ατμοσφαιρικά στρώματα που δρουν ως μεταφορικά μέσα, καθώς και την ταχύτητά τους.

Αυτός ο νέος αλγόριθμος θα μπορούσε να αναπαράγει ή και να αντικαταστήσει τον ακριβό εξοπλισμό συστήματος Doppler lidar και να καταστήσει δυνατή την ανάκτηση της ταχύτητας παρακολούθησης της ατμόσφαιρας σε 3D, από μία και μόνο δέσμη σε μια κατακόρυφη γωνία (φ) και αζιμούθιο (θ) (Σχήμα 5.19). Η ακρίβεια της μέτρησης της ταχύτητας ανέμου των ατμοσφαιρικών στρωμάτων, περιορίζεται μόνο από την αβεβαιότητα που περιβάλλει τις μετρήσεις μιας συσκευής lidar και της επιλεγούμενης μεθόδου και την διακριτική του ικανότητα και όχι από την αποτελεσματικότητα παρακολούθησης του ίδιου του αλγορίθμου. Έτσι, ο WIND Weather Phenomena ή WIND METCON δεν φέρει ο ίδιος κάποιο συγκεκριμένο σφάλμα κατά την μέτρηση, καθώς μετατρέπει τις μετρήσεις του συστήματος lidar σε ταχύτητα κίνησης διαφορετικών ατμοσφαιρικών στρωμάτων (ανέμου), διατηρώντας και αναλύοντας – επεξεργάζοντας το ιστορικό των δεδομένων των καταγραφών οπισθοσκέδασης.

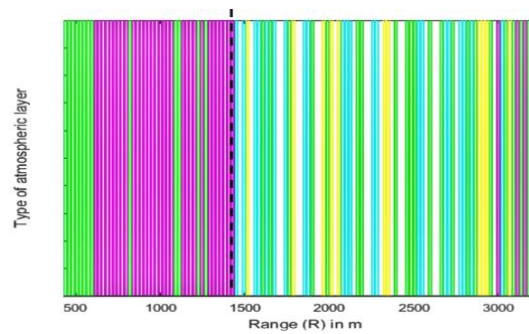
Στο σχήμα αυτό (Σχήμα 5.19), παρουσιάζεται ο αλγόριθμος WIND Weather Phenomena ή WIND METCON. Στο (Σχήμα 5.19α) δίνεται ο συντελεστής εξασθένησης lidar με διαδοχικά σήματα κάθε 10" (χρονική διαφορά). Αντίστοιχα στο (Σχήμα 5.19β) ο αλγόριθμος Weather Phenomena – PBLH ή METCON – PBLH που παρέχει ανάκτηση PBLH στα 1405 m με μαύρη διακεκομμένη γραμμή, σε συμφωνία με σήματα του (Σχήματος 5.19α). Στο (Σχήμα 5.19γ) δίνεται ο αλγόριθμος WIND Weather Phenomena ή WIND METCON με παρουσίαση τεσσάρων διαδοχικών αρχείων καταγραφής δεδομένων lidar κάθε 10". Η παρακολούθηση του συγκεκριμένου ατμοσφαιρικού στρώματος ξεκινά σε ύψος ~1500 m (αριστερά) και ταξιδεύει μέχρι και τα 1750 m σε 30" (δεξιά), παρουσιάζοντας μία ταχύτητα

παρακολούθησης ατμοσφαιρικού στρώματος "Light Haze" (κίτρινο χρώμα) της τάξης των 8,3 m/s και έπειτα χάθηκε ως συγκεκριμένο στρώμα ατμοσφαιρικό στρώμα. Η κίνηση των αερίων μαζών μέσω της ανίχνευσης της ατμοσφαιρικής στρώσης και η αντικατάσταση του "ελεύθερου" χώρου μεταξύ άλλων, από έτερη ατμοσφαιρική στρώση, απεικονίζει την κίνηση των αερίων μαζών και τις μεταβολές γύρω από τα ανακτηθέντα PBLH.

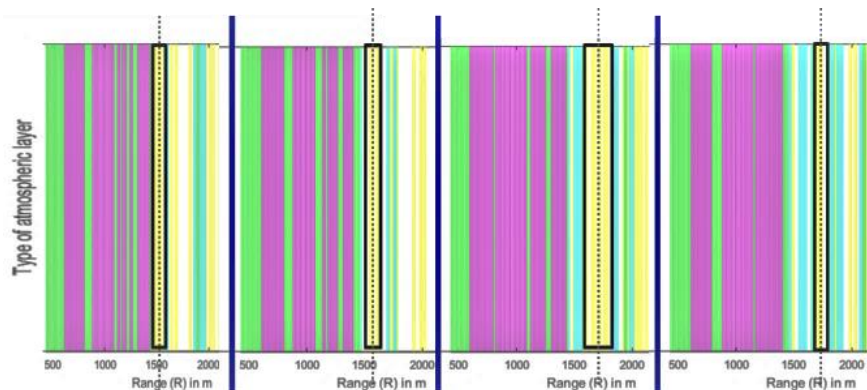
α).



β).



γ).



Σχήμα 5.19: Παρουσίαση αλγορίθμου WIND Weather Phenomena ή WIND METCON. α). Συντελεστής εξασθένισης lidar με διαδοχικά σήματα κάθε 10". β). Ο Weather Phenomena – PBLH ή METCON – PBLH με ανάκτηση PBLH στα 1405 m. γ). Ο WIND Weather Phenomena ή WIND METCON σε τέσσερα διαδοχικά αρχεία καταγραφής [Pantazis et al. (2019)].

Φαίνεται ότι η κατακόρυφη κίνηση των αερίων μαζών πάνω από το ύψος του PBLH, σταματά την χρονική περίοδο της ανάλυσης και το PBLH παραμένει σταθερό σε όλη τη διάρκεια καθώς και το είδος του ατμοσφαιρικού στρώματος ("Light Fog" – πράσινο χρώμα), ενώ, υπάρχει κίνηση και μεταμόρφωση του ατμοσφαιρικού

στρώματος ακριβώς πάνω από το PBLH και είναι συνεχής (από "Light Haze" – κίτρινο χρώμα, σε "Thin Fog" – γαλάζιο χρώμα). Όπου το Purple είναι "Light Fog", το γαλάζιο είναι "Thin Fog", το κίτρινο είναι "Light Haze" και το πράσινο είναι "Haze". Η διακεκομμένη γραμμή στο (Σχήμα 5.19γ) αντιπροσωπεύει το κινούμενο «κέντρο» του ατμοσφαιρικού στρώματος.

Τέλος, η απεικόνιση του WIND Weather Phenomena ή WIND METCON στην διάρκεια συνεχών μετρήσεων καταγραφής απεικονίζεται με τα τέλη των οποίων χρονικά δηλώνονται από τις παχιές μπλε γραμμές [Pantazis et al. (2019)]. Οι ανωτέρω αλγόριθμοι μπορούν να διαδραματίσουν ζωτικό ρόλο σε περιπτώσεις μελέτης που συμβάλλουν στην κίνηση της ατμόσφαιρας γύρω από PBLH και άλλα μείγματα ατμοσφαιρικών στρωμάτων ενδιαφέροντος, σε οποιοδήποτε ύψος.

6.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Σε αυτή την Διδακτορική διατριβή παρουσιάστηκαν νέοι αλγόριθμοι επεξεργασίας και τεχνικές σε σήματα οπισθοσκέδασης συστήματος lidar ή / και 3D lidar, σύμφωνα με τις εργασίες που τέθησαν υπό διεθνή κρίση από [Pantazis et al. (2017 – 2019)], ώστε να δοθεί στον χρήστη ένα πλήρες φάσμα «προϊόντων» που μπορούν να εφαρμοστούν σε μία μονή δέσμη lidar και υπό οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες στις οποίες μπορεί το lidar αυτό να επιχειρεί. Συγκεκριμένα, μέσω μέτρησης από δέσμη laser εντός των ανωτέρω καιρικών συνθηκών, γίνεται υπολογισμός διαφόρων ατμοσφαιρικών παραμέτρων, οι οποίες, μέσω κατάλληλης επεξεργασίας που περιγράφεται σε αυτή την Διδακτορική Διατριβή, αποφαίνονται για μια σειρά «προϊόντων» όπως η 3D ορατότητα, το ύψος του ΑΟΣ, η ταχύτητα του ανέμου κτλ.

Τα πλεονεκτήματα των παρουσιαζόμενων αλγορίθμων που προκύπτουν είναι ποικίλα και σημαντικά. Τα περισσότερα από αυτά έχουν αναφερθεί εν μέρει στην παρουσίαση εκάστου αλγορίθμου και τεχνικής, αλλά συνοπτικά θα μπορούσαν να αναφερθούν τα εξής:

1). Γίνεται δυνατή η μέτρηση παραμέτρων της ατμόσφαιρας μέσω συστήματος lidar καταγραφών οπισθοσκέδασης επί κεκλιμένου επιπέδου (3D), μέσω της δημιουργίας μίας νέας και ασφαλούς τεχνικής, χρησιμοποιώντας γνωστές αξιόπιστες μαθηματικές και φυσικές μεθόδους, όπως εκείνες των οριακών. Η τεχνική αυτή δίνει την δυνατότητα μέτρησης και εντός ανομοιογενούς ατμόσφαιρας χωρίς επισφαλείς παραδοχές. Στο σημείο αυτό ξεπερνά την προϋπάρχουσα τεχνολογία, καθότι εκεί οι μετρήσεις lidar κεκλιμένης απόστασης, ήταν δυνατές μόνο κατόπιν επισφαλών υποθέσεων, με μετρήσεις σημείου (in situ) ή με υποθέσεις ομογενούς ή στρωματοποιημένης ατμόσφαιρας, σε απόσταση.

2). Δεν απαιτείται η χρήση δαπανηρού εξοπλισμού Doppler lidar συστήματος για μια «ακριβή» εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου. Αυτή πλέον γίνεται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση (3D), σε πραγματικό, με ακρίβεια και με ταυτόχρονη εκτίμηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας “εν κινήσει”, σε σχέση με την απόσταση και τον χρόνο. Επίσης, οι ανωτέρω αλγόριθμοι δεν ακολουθούν τους περιορισμούς που

περιβάλλουν μία Doppler μέτρηση, με την ανάγκη μέτρησης μετά από την ύπαρξη ακτινικής ταχύτητας ανέμου καθώς και σχετικής τιμής κατωφλίου για υπολογισμό της.

Για παράδειγμα, η δυνατότητα εκτέλεσης μετρήσεων του Aeolus και του Aladin που φέρει, μετρούν την ταχύτητα του ανέμου μόνο σε Ανατολή και Δύση και όχι σε Βορρά και Νότο, σύμφωνα και με την παρουσίαση της ESA στο διεθνές συνέδριο του Hefei της Κίνας το 2019. Ο περιορισμός αυτός προκύπτει από την κίνηση του δορυφόρου και του συστήματος lidar που φέρει σε Βορρά – Νοτο, με την βέλτιστη γωνία ανίχνευσης του ανέμου στην Γη, αυτή των 90° οριζόντια (κάθετα δηλαδή στην κίνηση του δορυφόρου), οπότε και μπορεί να μετρά την ταχύτητα του ανέμου μόνο κατά την διεύθυνση Ανατολή – Δύση (Σχήμα 6.1).

Αυτό βέβαια δεν ισχύει για τους εδώ παρουσιαζόμενους αλγορίθμους και τεχνικές, καθώς και τον τρόπο επεξεργασίας τους, τα οποία επιτρέπουν την 3D ανίχνευση του ανέμου ακόμη και από σταθερή γωνία εκπομπής. Αν για παράδειγμα το Aladin δεν χρησιμοποιούσε σύστημα Doppler lidar αλλά απλά, μονής δέσμης, τότε αυτό, τοποθετημένο σε σταθερές χωρικές γωνίες πχ $\varphi=60^\circ$ προς την επιφάνεια της Γης και $\theta = 45^\circ$ αζιμούθιο, μαζί με την κίνηση του δορυφόρου, θα μπορούσε να ανιχνεύσει και να χαρακτηρίσει την ατμόσφαιρα που διαπερνά, επεξεργάζοντας το σήμα οπισθοσκέδασης και δίνοντας ως σημαντικές πληροφορίες την ταχύτητα του ανέμου σε όλα τα ύψη μαζί με ορατότητα, το και ύψος PBL 24/7 ανά την υφήλιο κτλ.

3). Γίνεται δυνατή η ανάκτηση του PBLH σε 3D μέσω μίας νέας αξιόπιστης τεχνικής, λαμβάνοντας υπόψη μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω στο (1), κάνοντας δυνατή την 3D ανάκτηση του PBLH.

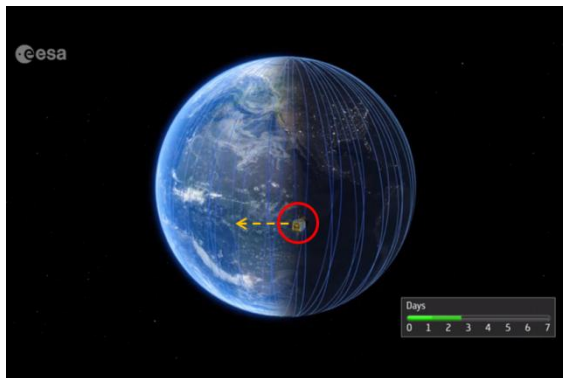
4). Γίνεται δυνατή η ανάκτηση του PBLH σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο (Near Real Time - NRT), 24/7, μέσω των αλγορίθμων επεξεργασίας που αναπτύχθηκαν.

5). Δεν απαιτείται προηγούμενη γνώση του ύψους του PBL για οριοθέτηση συνθηκών από έμπειρο χρήστη αλλά ούτε και μετά-ανάλυση δεδομένων.

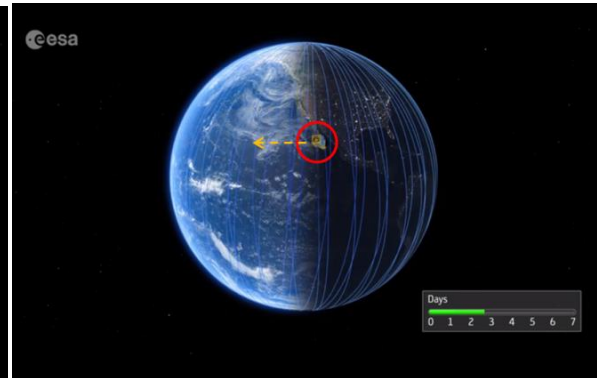
6). Το PBLH καθώς και η ταχύτητα του ανέμου, μπορούν να ανακτηθούν με ποικίλους τρόπους όπως αναλύθηκε, σε πολύ μικρό χρόνο και να συγκριθούν για την συνάφεια τους, με σκοπό την βελτιστοποίησή τους και την μηχανική μάθηση. Η συνεργασία των αλγορίθμων όπως αυτή των DECIS ή VERDE και MUSTI-L/D/PBLH ή VASPAT-L/D/PBLH καθώς και των Weather Phenomena - PBLH ή METCON- PBLH και WIND Weather Phenomena ή WIND METCON, καθιστούν δυνατή τη μέτρηση σε πραγματικό χρόνο, μέσω κατακόρυφων ή κεκλιμένων μετρήσεων με επιτυχία των

περιπτώσεων που αναλύθηκαν αρχικά της τάξεως του 87% και η οποία με συλλογική συνεργασία και μηχανική μάθηση μπορεί να επιτύχει έως και 94% επιτυχία, σε ύψος εύρους 50-75 m στις περιπτώσεις που ελέγχθησαν.

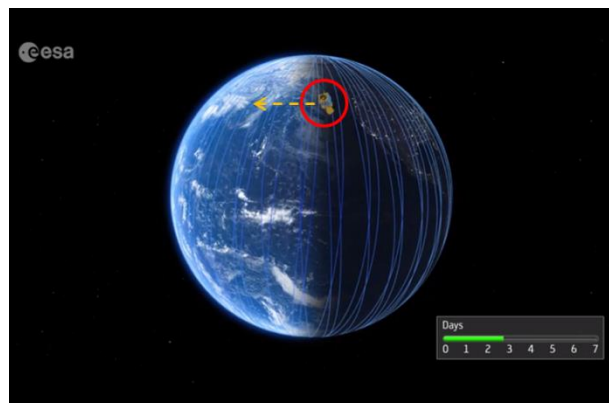
α).



β).



γ).

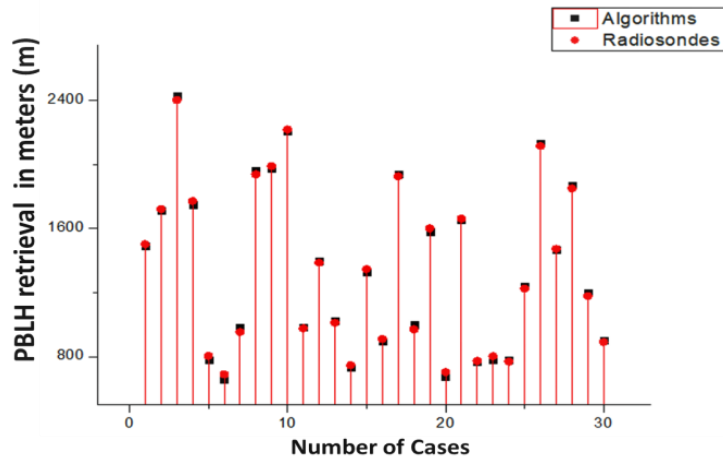


Σχήμα 6.1: Δορυφόρος Aeolus που φέρει το Aladin με διεύθυνση κίνησης Βορρά – Νότο, με φορά από τη θέση (α), στη (β), στη (γ) κτλ και ένδειξη της κατεύθυνσης συστήματος lidar μέτρησης (90°) κατά μήκος της κίνησης του δορυφόρου (κίτρινο βέλος) κατά την διεύθυνση Ανατολή – Δύση

[https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Aeolus/Aeolus_satellite].

Στο Σχήμα 6.2 παρακάτω, καταγράφηκαν 30 περιπτώσεις μετρήσεων lidar και συγκρίθηκαν με δεδομένα ραδιοβόλισης της EMY, την ίδια ημερομηνία και ώρα (περίπου), πάνω από την Αθήνα, δείχνοντας την επιτυχή – σύμφωνη ανάκτηση του

PBLH εντός των 35 m, σε όλες αυτές τις περιπτώσεις για ένα εύρος μετρήσεων συνολικής διάρκειας 2 ετών (2014-2016).



Σχήμα 6.2: Η ανάκτηση PBLH με το σύστημα EOLE NTUA lidar μετά την εφαρμογή των και την επεξεργασία των αλγορίθμων με κατάλληλες ρυθμίσεις (μαύρα τετράγωνα), σε σύγκριση με τα δεδομένα ραδιοβόλισης της EMY (κόκκινοι κύκλοι) την ίδια ημερομηνία και ώρα (περίπου) τα έτη 2014 έως 2016 [Pantazis et al. (2019)].

7). Οι αλλαγές στο PBLH μπορούν επίσης να παρακολουθούνται σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο (NRT) και για σκοπούς έρευνας. Μελέτες περιπτώσεων ατμοσφαιρικής διαστρωμάτωσης και ταχύτητάς τους μπορούν να δημιουργηθούν γύρω από το PBLH και άλλα μείγματα ατμοσφαιρικών στρωμάτων ενδιαφέροντος, από οποιοδήποτε ύψος υπάρχει ωφέλιμο σήμα οπισθοσκέδασης lidar.

8). Γίνεται αξιόπιστη χρήση συγκεκριμένων ορίων των παραμέτρων εξασθένησης, οπισθοσκέδασης και λόγου lidar, επί του ίδιου σήματος οπισθοσκέδασης lidar, για την ανίχνευση συγκεκριμένων και πλέον κατηγοριοποιημένων ατμοσφαιρικών στρωματώσεων, σύμφωνα με ICAO, WMO και Measures, σε αντίθεση με την υπάρχουσα τεχνολογία η οποία δεν χρησιμοποιεί αντίστοιχο τρόπο. Τα ατμοσφαιρικά στρωματα από δεδομένα συστήματος lidar αποκτούν πλέον χαρακτηρισμό και κατηγοριοποίηση βάσει της εκτίμησης της ορατότητας .

9). Η παρακολούθηση του είδους – κατηγορίας του ατμοσφαιρικού στρώματος καθώς και η ταχύτητά του και οι μεταβολές αυτής, μπορούν να καταγράφονται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση σε πραγματικό χρόνο και ύψος.

10). Επιδεικνύεται μια διαλειτουργικότητα των νέο-αναπτυχθέντων αλγορίθμων, ικανή να λειτουργήσει κάτω από διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες και χωρίς την παρέμβαση του χρήστη (unsupervised), παράγοντας όλα τα εξαγόμενα προϊόντα χωρίς επίβλεψη, αλλά και αυτοβελτιώνοντας την χρήση των ορίων που χρησιμοποιεί κάθε φορά σε σχέση με τις παραμέτρους εξασθένησης, οπισθοσκέδασης και λόγου lidar, αναλόγως των μετεωρολογικών συνθηκών που αντιμετωπίζει.

11). Όλοι οι αλγόριθμοι μπορούν να λειτουργήσουν συλλογικά ή / και αυτόνομα (εκτίμηση χρήστη).

12). Με ένα σύστημα lidar, τοποθετημένο, ακόμη και σε μία μόνο διόπτευση εκπομπής, παράγεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός χρήσιμων «προϊόντων», μέσω επικλινούς μέτρησης και υπολογισμού ατμοσφαιρικών παραμέτρων, σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο, όπως: ανίχνευση και χαρακτηρισμός ατμοσφαιρικής διαστρωμάτωσης με την απόσταση και τον χρόνο, ταχύτητα ανέμου σε 3D, χαρακτηρισμός της επικρατούσης ατμόσφαιρας και εκτίμηση επικρατούντων καιρικών συνθηκών, ύψος PBL και ορατότητα.

13). Οι ανωτέρω τεχνικές και αλγόριθμοι μπορούν περαιτέρω να χρησιμοποιηθούν και για την περίπτωση ανίχνευσης ιπτάμενων αντικειμένων (αεροσκαφών κτλ) ακόμη και μικρού μεγέθους (Drones – minidrones) προσφέροντας Ασφάλεια στα αεροδρόμια και περιοχές ενδιαφέροντος, κάτω από διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες και διαχωρίζοντάς τα από αυτές.

14). Δεν υπάρχει απαίτηση για ηλεκτρονικό υπολογιστή υψηλών προδιαγραφών και ενέργειας καθώς και χρόνου επεξεργασίας.

15). Δεν απαιτείται περαιτέρω εξοπλισμός πέραν του ενός lidar ελαστικής οπισθοσκέδασης για έναν μεγάλο αριθμό «προϊόντων», μειώνοντας σημαντικά το κόστος στην έρευνα και τις επιχειρήσεις, αλλά από την άλλη και δεν αποκλείεται η χρήση περαιτέρω εξοπλισμού όπως π.χ. η χρήση ενός Raman lidar ακόμη και για σύγκριση ελαστικού και μη-ελαστικού σήματος οπισθοσκέδασης σύμφωνα με την μέθοδο, όπου η τεχνική 3D Stepping ή LADDER και οι λοιποί αλγόριθμοι και τεχνικές, βρίσκουν πλήρη εφαρμογή.

Η χρήση μιας τέτοιας συσκευής lidar που εμπεριέχει τους περιγραφόμενους αλγορίθμους και τεχνικές στην επεξεργασία της, βρίσκει εφαρμογές όπως είπαμε στην Ασφάλεια Πτήσεων και Εδάφους στα αεροδρόμια (Κατακόρυφη και Επικλινής Ορατότητα – SVR, Ορατότητα διαδρόμου Απο-Προσγείωσης αεροδρομίων – RVR), στην Διαστημική και τα πρόγραμμα σχετικά με δορυφορικές μετρήσεις (“Earth

Observation” κτλ), την Μετεωρολογία (καταγραφή ομίχλης κλπ.), καθώς και την Αεροπλοΐα (Μετεωρολογικές αναφορές (METARs)) και την ασφάλεια της Ναυσιπλοΐας. Επίσης, γίνεται δυνατό όπως αυτή η συσκευή lidar να χρησιμοποιηθεί και από την κοινότητα της τηλεπισκόπησης γενικότερα, αλλά δίνει και την δυνατότητα και καθιστά εφικτή την έρευνα και τις επιχειρήσεις και σε κοινότητες που δεν δύναται να φέρουν περίπλοκο και δαπανηρό εξοπλισμό στην κατοχή τους.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της παρούσας Διδακτορικής διατριβής ήταν η μελέτη ενός νέου και έξυπνου - καινοτόμου συστήματος Light Detection And Ranging (LIDAR), τριών διαστάσεων (3D), για τη μέτρηση μετεωρολογικών και ατμοσφαιρικών παραμέτρων με κύρια εφαρμογή στην Ασφάλεια Πτήσεων στα αεροδρόμια. Ο σκοπός αυτός φαίνεται πως επετεύχθει, όπως αναλύθηκε και δίνεται η δυνατότητα στην Διδακτορική αυτή Διατριβή όπως επεκτείνει τις εφαρμογές της και σε περαιτέρω τομείς και κοινότητες όπως, στην Αεροπλοΐα γενικότερα, την Μετεωρολογία, τη Συγκοινωνιολογία, την Ναυσιπλοΐα, τη Διαστημική, καθώς και στην Έγκαιρη προειδοποίηση ενδιαφερομένων - πολιτών από επερχόμενα φαινόμενα (Γενική Γραμματεία προστασίας του πολίτη), όπως αυτό της ομίχλης, του ισχυρού ανέμου, της ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης κτλ. Το σύστημα αυτό βασίζεται στην Τηλεπισκόπηση από απόσταση (Remote Sensing) με έξυπνο τρόπο επεξεργασίας και χωρίς την ανάγκη χρήσης περαιτέρω ακριβού εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα συσκευής Doppler, κάνοντάς την προσιτή και σε οργανισμούς ή επιστημονικές κοινότητες που δεν δύναται να φέρουν περίπλοκο και δαπανηρό εξοπλισμό στην κατοχή τους.

Κατά την διάρκεια αυτής της Διδακτορικής Διατριβής ελήφθη υπόψη όπως το έξυπνο αυτό σύστημα να ανανεώσει και να αναβαθμίσει σοβαρά την υπάρχουσα τεχνολογία, χωρίς να επιβαρύνει οικονομικά τον «παραγωγό» μιας τέτοιας συσκευής (έμπορο), αλλά, αντιθέτως, να αυξήσει το επίπεδο εμπορίας του και κατά επέκταση την επιχειρηματικότητα στον χώρο της τηλεπισκόπησης, θέτοντας και οικονομικά, πέραν των επιστημονικών, κριτήρια. Επίσης, ελήφθη υπόψη όπως αυτό συμβάλει στην Ασφάλεια των Μεταφορών, την Μετεωρολογία και την έγκαιρη πρόβλεψη μέσω εισαγωγής αξιόπιστων δεδομένων lidar καταγραφών 24/7 σε πραγματικό χρόνο, σε υπάρχοντα μοντέλα πρόβλεψης, καθώς και τις κοινότητες Τηλεπισκόπησης και Διαστήματος παρατήρησης της ατμόσφαιρας.

Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι και τεχνικές που αναλύθηκαν παραπάνω αφορούσαν την έρευνα και εφαρμογή (Research and Development - R&D) που διεξήχθη κατά την διάρκεια της Διδακτορικής διατριβής, για την ανάπτυξη ενός τέτοιου "έξυπνου" συστήματος 3D lidar.

Έρευνα επίσης διεξήχθη γύρω από τα χαρακτηριστικά αυτού του συστήματος, όπως για παράδειγμα το μήκος-η κύματος που είναι βέλτιστα για εκπομπή, το (τα) είδος-η laser που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, μέθοδοι επεξεργασίας καθώς και ανάκτησης δεδομένων κτλ. Τα «προϊόντα» που παρέχει ένα τέτοιο καινοτόμο σύστημα καλύπτουν

ένα μεγάλο εύρος κρίσιμων πληροφοριών της κατάστασης της ατμόσφαιρας στον χώρο που περιβάλλει ένα αεροδρόμιο, αρχικά, ή έναν άλλο χώρο ενδιαφέροντος, όπως για παράδειγμα μια δασική έκταση ή ακόμη και μία κατοικημένη περιοχή σε ώρα αιχμής το καλοκαίρι.

Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να αποτελέσει αρωγό στην κοινότητα της ασφάλειας των πολιτών στις αερομεταφορές κτλ και έναυσμα για την θέσπιση αυστηρότερων ορίων και προτύπων από τον ICAO (IMO, WMO). Η υλοποίηση μίας τέτοιας συσκευής στα αεροδρόμια, προβλέπεται να αλλάξει μελλοντικά, αλλά με θετικό τρόπο, τα όρια - προτυποποίηση (standardization) των συσκευών τηλεπισκόπησης από τον ICAO (ή / και IMO, WMO), όπως στην περίπτωση της ορατότητας και του scatterometer, όπου σήμερα δέχεται όπως μία τέτοια συσκευή, μπορεί να παρέχει ορατότητα σε απόστάσεις των 10 km με in situ (επιτόπιες) μετρήσεις. Η θέσπιση αυτή σκοπό θα έχει την προσφορά στην κοινωνία και την ασφάλεια των πολιτών, καθώς και την εξέλιξη στις μεταφορές και την Μετεωρολογία, μέσα σε ένα έντονα μεταβλητό περιβάλλον καιρικών συνθηκών, σε πολύ μικρό χρόνο, σύμφωνα και με τις προβλέψεις των ξαφνικών και εντονότερων καιρικών φαινομένων τώρα και στο μέλλον, λόγω της έντασης του φαινομένου του θερμοκηπίου, που αλλάζει δραστικά τα δεδομένα στην πρόβλεψη χρόνο με τον χρόνο!

Το σύστημα αυτό, θα συνεισφέρει κατά ένα βέλτιστο τρόπο στην συνολική διαχείριση της Εναέριας Κυκλοφορίας και των υποδομών της (υλικοοικονομοτεχνικά) και συνάμα στην αύξηση της ικανότητας εξυπηρέτησης αεροσκαφών. Ειδικότερα αυτής των πολυσύχναστων αεροδρομίων, προσφέροντας και στην ενίσχυση της οικονομίας του τομέα και στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, συνεισφέροντας παράλληλα και στην οικολογία της περιοχής.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά διεθνούς κύρους με κριτές:

Pantazis A., Papayannis A., Georgousis G., “LIDAR algorithms for atmospheric slant range visibility, meteorological conditions detection and atmospheric layering measurements”, Appl. Opt., 56, 6440-6448 (2017).

Pantazis A., Papayannis A., Georgousis G., “LIDAR algorithms in 3D scanning for atmospheric layering and planetary boundary layer height retrieval: comparison with other techniques”, Appl. Opt., 57, 8199-8211 (2018).

Pantazis A., Papayannis A., “LIDAR algorithms and technique in 3D scanning for Planetary Boundary Layer Height and Single Beam – Single pointing Wind speed retrieval.”, Appl. Opt., 58, 2284-2293-6448 (2019).

Ανακοινώσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια με κριτές:

Pantazis A., “LASER Detection & Applications (LIDARs)”, Alumni Defence Conference - Grandfield University, War museum - Athens (2018).

Pantazis A., Papayannis A., Georgousis G., “LIDAR algorithms for atmospheric slant range visibility, meteorological conditions detection and atmospheric layering measurements”, Proc. 28th International Laser Radar Conference, 25-30 June 2017, Bucharest, Romania, EPJ Web of Conferences, 176, 11003 (2018).

Pantazis A., “LIDARs usage in C – UAS/ MUS / UGV/ UNV / CBRN EW”, Counter UAS Workshop, Ramstein, Germany (2018).

Pantazis A., Papayannis A., GeorgoussisG., “Algorithms for Planetary Boundary Layer Height Determination for 3D Scanning LIDAR Systems”, ELC2018, Thessaloniki (2018).

Pantazis A., Papayannis A., GeorgoussisG., “LIDAR algorithms for atmospheric slant-range visibility, planetary boundary layer height, meteorological phenomena and atmospheric layering measurements”, COMECAP2018, Alexandroupoli (2018).

Pantazis A., “LIDARs in Aviation Safety”, International Aviation Safety Conference, Athens (2018).

Pantazis A., “C – UAS/ CBRN EW”, Counter UAS Conference, Sheraton Pentagon City, Washigton D. C. USA (2019).

Pantazis A., Papayannis A., “Set of algorithms and techniques for accurate 3d, single beam – single pointing, LIDAR measurements for slant range visibility, planetary boundary layer height and wind speed retrieval, atmospheric layers spatial distribution and categorization in real time”, ILRC29, Hefei, China (2019).

Pantazis A., “Novel algorithms for accurate 3D, single beam – single pointing, LIDAR measurements”, MTFS M4IR 2019, Athens (2019).

Pantazis A., “LIDARs Usage in Maritime Operations and ECO – Autonomous Shipping, for Protection, Safety and Navigation”, MSAW, CMRE, Italy (2019).

Pantazis A., “Light Detection And Ranging (LIDARs) systems in usage by Unmanned Underwater Gliders (UUGs)”, 6WMAUGT, CMRE, Italy (2019).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ackermann J., "The Extinction-to-Backscatter Ratio of Tropospheric Aerosol: A Numerical Study", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 15, 1043 – 1050, Germany (1998).

Adam M., Vladimir A. Kovalev V., Cyle Wold, Jenny Newton, Markus Pahlow, Wei M. Hao, Marc B. Parlange, "Application of the Kano–Hamilton Multiangle Inversion Method in Clear Atmospheres", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24, 2014-2028 (2007).

Adam M., "Development of LIDAR techniques to estimate atmospheric optical properties", Baltimore, Maryland (2005).

Adam M., "Notes on Rayleigh scattering in LIDAR signals", *Applied Optics*, 51, No. 12, 2135-2149 (2012).

Adam M., "Vertical versus scanning LIDAR measurements in a horizontally homogeneous atmosphere", *Appl. Opt.* 51, 4491-4500 (2012).

Aerodrome Meteorological Observation and Forecast Study Group (AMOFSG), AMOFSG/10-SN No. 11 (2013).

Alexiou D., Kokkalis P., Papayannis A., Rocadenbosch F., Argyrouli A., Tsaknakis G., Tzani C.G., "Planetary boundary layer height variability over Athens, Greece, based on the synergy of Raman LIDAR and radiosondes data: Application of the Kalman filter and other techniques (2011–2016)", *Proc. 28th International LASER RADAR Conference*, 25-30 June 2017, Bucharest, Romania, EPJ Web of Conferences, 176, 06007 (2018).

Alpers M., et al., "Temperature LIDAR measurements from 1 to 105 km altitude using resonance, Rayleigh, and Rotational Raman scattering", *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 793–800 (2004).

Ampilova N. B., Igor P. Soloviev, Yuri V. Shupletsov, "Differential equations and control processes - On Application of Fractal Analysis Methods", *Electronic Journal* (2013).

Ansmann A., Boesenberg J., Chaikovski A., et al., "Long-range transport of Saharan dust in northern Europe: the 11-16 October 2001 outbreak observed within EARLINET", *J. Geophys. Res.*, 108, noD24, 4783, doi:10.1029/2003JD003757 (2003).

Ansmann A., et al., Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman LIDAR. *Opt. Lett.*, 15, 746-748 (1990).

Ansmann A., Riebesell M., Wandinger U., Weitkamp C., Voss E., Lahmann W., Michaelis W., “Combined Raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio,” *Appl. Phys. B55*, 18 (1992).

Ansmann A., Wandinger U., Riebesell M., Weitkamp C., Michaelis W., “Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter LIDAR”, *Appl. Opt.*, 31, 7113-7131 (1992).

Ansmann M. A., Althausen D., Jaenisch V., Wandinger U., Mueller D., Arshinov Y., Bobrovnikov S., Serikov I., “Relative humidity profiling in the troposphere with a Raman LIDAR”, *Appl. Opt.* 41, 6451-6462 (2002).

Araújo Coelho A., Jean-Louis Brenguier, Thierry Perrin, “Droplet Spectra Measurements with the FSSP-100. Part I: Low Droplet Concentration Measurements”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1748-1755 (2005).

Armante R., Noelle Scott, Cyril Crevoisier, Virginie Capelle, Laurent Crepeau, Nicole Jacquinet, Alain Chédin, “Evaluation of spectroscopic databases through radiative transfer simulations compared to observations. Application to the validation of GEISA 2015 with IASI and TCCON”, *Molecular Spectroscopy*, 327, 180-192 (2016).

Baars H., Ansmann A., Engelmann R. Althausen D., “Continuous monitoring of the boundary-layer top with LIDAR”, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 7281–7296 (2008).

Balis D., Amiridis V., Zerefos C., Kazatzidis A., Kazadzis S., Bais A., Meleti C., Papayannis A., Matthias V., Dier H., “Study of the effect of different type of aerosols on UV-B radiation from measurements during EARLINET”, *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 307-321 (2004).

Behrendt A., et al., Profiles of second- to fourth-order moments of turbulent temperature fluctuations in the convective boundary layer: first measurements with rotational Raman LIDAR, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 5485–5500 (2015).

Behrendt A., Nakamura T., Onishi M., Baumgart R., Tsuda T., “Combined Raman LIDAR for the measurement of atmospheric temperature, water vapor, particle extinction coefficient, and particle backscatter coefficient”, *Appl. Opt.*, 41, 7657–7666 (2002).

Behrendt A., Reichardt J., “Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman LIDAR by use of an interference-filter-based polychromator”, *Appl. Opt.*, 39, 1372-1378 (2000).

Bennett A., “Introduction to atmospheric visibility estimation”, Bristol Industrial and Research Associates Limited, 1-5 (2012).

Benson C. L., Sumanth P. D., Colling A P, “A Quantitative Analysis of Possible Futures of Autonomous Transport”, INEC (2018).

Bergh H., Calpini B., Durieux E., Fioranni L., Jaquet L., Ziomas I. Zerefos C., "The Role of Urban and Suburban Aerosols on Solar UV Radiation Over Athens, Greece", *Atmos. Environ.*, 32, 2193-2201 (1998).

Bosenberg J., "Study on retrieval algorithms for a backscatter lidar. Final report", Max-Planck-Inst. Fur Meteorol., Hamburg, Germany, MPI-Rep. 226 (1997).

Brian K., Kazumi Nakada, Roger Wayson, Simon Christie, Christopher Paling, Michael Bennett, David Raper, Virginia Raps, Jonathan Levy, Christopher Roof, "Understanding Airport Air Quality and Public Health Studies Related to Airports", Federal Aviation, ACRP Report 135 (2015).

British Standard, "Safety of LASER products - Part 1: Equipment classification and requirements", BS EN 60825-1 (2007).

Brooks, I., "Finding Boundary Layer Top: Application of a wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles", *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 1092–1105 (2003).

Burton S. P., et al., "Aerosol classification from airborne HSRL and comparisons with the CALIPSO vertical feature mask", *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 1397–1412 (2013).

Cachorro V. E., De Frutos A. M., Gonzalez M. J., "Analysis of the relationships between junge size distribution and angstrom a turbidity parameters from spectral measurements of atmospheric aerosol extinction", *Atmospheric Environment*, 1585-1591 (1993).

Chen C., Dubovik Oleg, Henze K. Daven, Lapyonak Tatyana, Chin Mian, Ducos Fabrice, Litvinov Pavel, Huang Xin, Li Lei, "Retrieval of desert dust and carbonaceous aerosol emissions over Africa from POLDER/PARASOL products generated by the GRASP algorithm", *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 12552-12580 (2018).

Chibaudo J. B., Krawczyk R., "Water-vapor, temperature and wind velocity measurements from space using 2 μm Tm:Ho:YAG, SPIE 1714, 258-269 (1992).

Christian Grund J., Robert M. Banta, Joanne L. George, James N. Howell, Madison J. Post, and Ronald A. Richter, Ann M. Weickmann, "High-Resolution Doppler LIDAR for Boundary Layer and Cloud Research", 18, 376-393 (2001).

Christian J., "The size distribution and aging of natural aerosols as determined from Electrical and optical data on the atmosphere", Air Force Cambridge Research Center, 1585-1591 (1955).

CIMO (Commission for Instruments and Methods of Observation) (WMO-No. 807, 2008).

CIMO, "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation", WMO (2008).

Cohen A., "Horizontal visibility and the measurement of atmospheric optical depth of LIDAR", *Applied Optics*, 14, No. 12, 2878-2872 (1975).

Collis R. T. H., "LIDAR", Stanford Research Institute, N72-25357.

Comerón A., et al., "Current research in LIDAR technology used for the remote sensing of atmospheric aerosols", *Sensors*, 17, 1450, 2017. doi:10.3390/s17061450 (2017).

Contini D., Mastrantonio G., Viola A., Argentini S., "Mean Vertical Motions in the PBL Measured by Doppler SODAR: Accuracy, Ambiguities, and Possible Improvements", 21, 1532-1544 (2003).

Cooney J., "Measurement of atmospheric temperature profiles", *J. Appl. Meteor.*, 11, 108-112 (1972).

Cozzolino G., "Water condensation for submicronic particles abatement", PhD Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II (2013).

Crosby J. D., "Visibility sensor accuracy: what's realistic?", *EnviroTech Sensors*, 15.5.

Dai G., et al., "Calibration of Raman LIDAR water vapor profiles by means of AERONET photometer observations and GDAS meteorological data", *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 2735-2748 (2018).

David N., Omry Sendndik, Hagit Messsger, Pinhnhas Alpert, "Cellular network infrastructure. The Future of Fog Monitoring?", *American Meteorological Society*, 1688-1698 (2015).

David N., Sendndik O., Messsger H., Alpert P., "Cellular Network Infrastructure. The Future of Fog Monitoring?", *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 96, 1687 (2015).

Degeffie D.T., El-Madany T. S., Hejkal J., Held M., Dupont J. C., Haeffelin M., Klemm O., "Microphysics and energy and water fluxes of various fog types at SIRTA, France", *Elsevier/atmos, Atmospheric Research* 162–175 (2015).

Deirmendjian D., "Scattering and Polarization Properties of water clouds and hazes in the visible and infrared", *Appl. Opt.*, 3, 187-196 (1964).

Deirmendjian D., "Electromagnetic scattering on spherical polydispersions", *American Elsevier Publishing Co., Inc.*, New York (1969).

Distribution Systems at Aerodromes. WMO No. 731, Geneva, (1990).

Dubovik O., Holben B. N., Eck T. F., Smirnov A., Kaufman Y. J., King M. D., Tanr'è D., Slutsker I., "Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations", *J. Atmos. Sci.*, 59, 590–608 (2002a).

Duck T. J., Firanski Bernard, Frank Lind D., Sipler Dwight, "Aircraft-protection RADAR for use with atmospheric LIDARs", Optical Society of America, 4937-4945 (2005).

Dupont E., "Etude méthodologique et expérimentale de la couche limite atmosphérique par télédétection laser », Thèse de doctorat, Université Paris 6 (1991).

Durieux E., Calpini B., Clappier A., Fiorani L., Flamm M., Jaquet L., van den Bergh H., "An innovative high repetition rate shot per shot acquisition system and its application to a new kind of tropospheric LIDAR measurements", Kluwer Academic Publishers, 245-267 (1994).

Egli S., Maier F., Bendix J., Thies B., "Vertical distribution of microphysical properties in radiation fogs — A case study", Elsevier/atmos, Atmospheric Research, 130–145 (2015).

Elias T., Jolivet Dominique, Dupont Jean Charles, Haeffelin Martial, Burnet Frédéric, "Preliminary results of the PreViBOSS project: description of the fog life cycle by ground-based and satellite observation", SPIE, 853406-1 - 853406-11 (2013).

Eloranta E. W., "High spectral resolution LIDAR. LIDAR: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere", K. Weitkamp, Ed., Springer-Verlag 143-163 (2005).

Elterman L., "Relationships Between Vertical Attenuation and Surface Meteorological Range", Applied Optics, 1804-1810 (1970).

Endlich, R.M., "An automated method for determining the mixing layer depth from lidar observations, Atmos. Environ., 13, 1051-1056 (1979).

Eymard L., Weill A., "Investigation of real air convective structure in the PBL using a dual Doppler RADAR and a Doppler SODAR", American Meteorological Society, 21, 1891-1906 (1982).

Falconer K., "Fractal Geometry Mathematical Foundations and Applications", John Wiley and sons Ltd (1990).

Fenn R. W., Mill J. D., Clough S. A., Rothman L. S., Gallery W. O., Shettle E. P., Good R. E., Volz F. E., Kneizys F. X., "Optical and infrared properties of the atmosphere", Chpt: 18.

Fenn R. W., "Correlation Between Atmospheric Backscattering and Meteorological Visual Range", Applied Optics, 293-295 (1966).

Fenn R., et al., "Optical and infrared properties of the atmosphere, Handbook of Geophysics and Space Environment", Air Forces Research Laboratory (1985).

Fernald F. G., Herman B. M., Reagan J. A., "Determination of aerosol height distribution by LIDAR", J. Appl. Meteor., 11, 482-489 (1972).

Fernald F. G., "Analysis of atmospheric LIDAR observations - some comments", *Appl. Opt.*, 23, 652-653 (1984).

Ferrara R., Fiocco G., Tonna G., "Evolution of the Fog Droplet Size Distribution Observed by LASER Scattering", *APPLIED OPTICS*, 2517-2521 (1970).

Ferrare R. A., et al., "A comparison of water vapour measurements made by Raman LIDAR and radiosondes", *J. Ocean. Atmos. Techn.*, 12, 1177–1195 (1995).

Filisetti A., et.al., "Developments and applications of underwater LIDAR systems in support of marine science", *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*, (Oct. 2018).

Fitzgerald J. W., "Effect of Relative humidity on thw aerosol backscattering coefficient at 0.694 and 10.6 μm wavelengths", *Applied optics*, 411-418 (1984).

Flamant, C., "Lidar determination of the entrainment zone thickness at the top of the unstable marine atmospheric boundary layer, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 83, 247-284 (1997).

Founda D., Kazadzis Stelios, Mihalopoulos Nikolaos, Gerasopoulos Evangelos, Lianou Maria, Raptis Panagiotis, "Long-term visibility variation in Athens (1931–2013): a proxy for local and regional atmospheric aerosol loads", *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 11219–11236 (2016).

Freudenthaler V., Homburg F., Jäger H., "Optical parameters of contrails from LIDAR measurements: Linear depolarization", *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3715–3718 (1996).

Gaudio P., et al., "Detection and monitoring of pollutant sources with LIDAR/DIAL techniques", *J. Physics: Conference Series* 658, 012004, doi:10.1088/1742-6596/658/1/0120 (2015).

Gerasopoulos E., Kalivitis N., Kouvarakis G., Hillamo R., Mihalopoulos N., "Aerosol loadings over eastern mediterranean and the contribution of saharan dust", *Institute for Environmental Research and Sustainable Development* (2007).

Giannakaki E., Balis D., Amiridis V., Kazadzis S., "Optical and geometrical characteristics of cirrus clouds over a Southern European LIDAR station", *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5519–5530 (2007).

Gong W., Mao F., Song S., "Signal simplification and cloud detection with an improved Douglas-Peucker algorithm for single-channel LIDAR", *Meteorol. Atmos Phys.* 113, 89-97 (2011).

Gottfried H., "The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air", *Institut fur Meteorologie, Johannes Gutenberg-Uniuersitiit, Mainz, Germany*.

Gottfried H., "Vertical profiles of the scattering coefficient of dry atmospheric particles over Europe normalized to air at standard temperature and pressure", *Atmospheric Environment*, 32, No. 10, pp. 1743-1755, (1998).

Griggs M., "Relationship of Optical Observations to Aerosol Mass Loading", *Journal of the Air Pollution Control Association*, 356-358 (2012).

Gross S., Tesche M., Feudenthaler V., Toledano C., Gasteiger J., Wiegner M., Ansmann A., Althausen D., Greiss A., Seefeldner M., "Characterization of Saharan dust, marine aerosols, and mixtures of biomass-burning aerosols and dust by means of multi-wavelength depolarization and Raman LIDAR measurements during SAMUM 2", *TellusB*, 63, 4, 706-724 (2011).

Groß S., Esselborn M., Weinzierl B., Wirth M., Fix A., Petzold A., "Aerosol classification by airborne high spectral resolution LIDAR observations", *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 2487–2505, <https://doi.org/10.5194/acp-13-2487-2013> (2013).

Grund C., Banta R., George J., Howell J., Post M., Richter R., Weickmann A., "High-Resolution Doppler LIDAR for boundary layer and cloud research", *J. Atmos. Ocean. Techn.*, 18, 376-393 (2000).

Gultepe I., Muller D, Boybeyi Z., "A New Visibility Parameterization for Warm-Fog Applications in Numerical Weather Prediction Models", *Applied Meteorology and Climatology*, 1469-1480 (2006a).

Gultepe I., Isaac A., "Visibility versus precipitation rate and relative humidity", Environment Canada.

Gultepe I., Kuhn T., Pavlonis M., Calvert C., Gurka J., Heymsfield A., Liu P. S. K., Zhou B., Ware R., Ferrier B., Milbrandt J., Bernstein B., "Ice fog in arctic during fram-ice fog project. Aviation and nowcasting applications", *American Meteorological Society*, 211-226 (2013).

Gultepe I., Tardif R., Michaelides S., Cermak J., Bott A., Bendix J., Muller M., Pagowski M., Hansen B., Ellrod G., Jacobs W., Toth G., Cober S., "Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives", *Birkhauser Verlag*, 1121-1159 (2007).

Gultepe I., Zhou B., Milbrandt J., Bott A., Li Y., Heymsfield A., Ferrier B., Ware R., Pavlonis M., Kuhn T., Gurka J., Liu P., Cermak J., "A review on ice fog measurements and modeling", *Elsevier/atmos, Atmospheric Research*, 2–19 (2015).

Guyot G., Gourbeyre C., Febvre G., Shcherbakov V., Burnet F., Dupont J., Sellegri K., Jourdan O., "Quantitative evaluation of seven optical sensors for cloud microphysical measurements at the Puy-de-Dôme Observatory, France", *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 4347–4367 (2015).

Haarig M., Ansmann A., Baars H., Jimenez C., Veselovskii I., Engelmann R., Althausen D., “Depolarization and LIDAR ratios at 355, 532, and 1064 nm and microphysical properties of aged tropospheric and stratospheric Canadian wildfire smoke”, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 11847-11861 (2018).

Haeffelin M., Bergot T., Elias T., Tardif R., Carrer D., CHaZette P., Colomb M., Drobinski P., Dupont E., Dupont J., Gomes I., Musson-Genon I., Pietras C., Plana-Fattori A., Protat A., Rangognio J., Raut J., Rémy S., Richard D., Sciare J., Zhang X., “Paris Fog. Shedding new Light on Fog Physical Processes”, *BAMS*, 767-783 (2010).

Hagard A., “Extinction and Visibility Measurements in the Lower Atmosphere with UV-YAG-LIDAR”, National Defence Research Institute, 32-33.

Hauti N., Tarel Jean-Philippe, Lavenant Jean, Didier Aubert, “Automatic Fog Detection and Estimation of Visibility Distance through use of an Onboard Camera”, *Machine Vision Applications manuscript*.

Hayman M., et al., Design of a low cost diode LASER-based High Spectral Resolution LIDAR (HSRL), *EPJ Web of Conferences*, 119, 06006, 2016.

He Q. S., C. C. Li¹, J. T. Mao¹, A. K. H. Lau², and P. R. Li⁴, “A study on the aerosol extinction-to-backscatter ratio with combination of micro-pulse LIDAR and MODIS over Hong Kong”, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3243–3256 (2006).

Heese B., Flentje H., Althausen D., Ansmann A., Frey S., “Ceilometer LIDAR comparison: backscatter coefficient retrieval and signal-to-noise ratio determination”, *Atmos. Meas. Tech.* 3, 1763 (2010).

Hélière A., et al., “EarthCARE instruments description”, European Space Agency, Report EC-TN-ESA-SYS-0891 (2017).

Hess M., Koepke P., Schult I., “Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC”, *American Meteorological Society*, 79, No. 5, 831-844 (1998).

Holzworth, G.C., “Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States”, *Mon. Weather Rev.*, 92, 235–242 (1964).

Hooper W., Eloranta E., “LIDAR measurements of wind in the planetary boundary layer: The method, accuracy and results from joint measurements with radiosonde and kytoon”, *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 990-1001 (1985).

Horvath H., Gustav “Mie and the scattering and absorption of light by particles: Historic developments and basics”, *J. Quant. Spectros. Rad. Trans.*, 110, 787–799 (2009).

http://www.icao.int/publications/Documents/9974_en.pdf

<http://www.ott.com/en-us/products/meteorological-sensors-26/ott-parsivel2-LASER-weather-sensor-1536/>

Huang M., Zhiqiu Gao, Shiguang Miao, Fei Chen, Margaret A. LeMone, Ju Li, Fei Hu, Linlin Wang, "Estimate of Boundary-Layer Depth Over Beijing, China, Using Doppler LIDAR Data During SURF-2015", *Boundary-Layer Meteorol*, 162, 503-522 (2017).

Husar R., Holloway Janet, "The Properties and Climate of Atmospheric Haze", Washington University (1984).

ICAO, "Air Traffic Services", Annex11 (2001).

ICAO, "Flight Safety and Volcanic Ash", Document 9974-ANB/487, (2012).

ICAO, "Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices", Doc 9328 AN/908 (2005).

ICAO, "Operation of Aircraft", Annex 6 (2010).

Ingrao H., "A bibliography on methods of atmospheric visibility measurements relevant to air traffic control and related subjects", department of transportation federal aviation administration, ReportfNo.FAA-RD-73-128 (1973).

IPCC: Climate Change 2013. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), "The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA 1535 (2013).

ISO, "Air Quality Environmental Meteorology. Part 1 : Ground-based Remote Sensing of Visual Range by LIDAR", ISO/FDIS 28902-1: 2011(E), ISO Office (2011).

Jacobson M., "Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols", *Nature*, 409, 695-697 (2001).

Kahn B., Chahine M., Stephens G., Mace G., Marchand R., Wang Z., Barnet C., et al. 2008. "Cloud Type Comparisons of AIRS, CloudSat, and CALIPSO Cloud Height and Amount." *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 1231– 1248 (2008).

Kalivitis N., et al. "Atmospheric new particle formation as a source of CCN in the eastern Mediterranean marine boundary layer", *Atmos. Chem. Phys.* 15, 9203–9215 (2015).

Klett J., "LIDAR inversion with variable backscatter extinction ratios," *Appl. Opt.* 24, 1638-1643 (1985).

Klett J., "Stable analytical inversion for processing LIDAR returns," *Appl. Opt.* 20, 211-220 (1981).

Kohl R., "Discussion of the interpretation problem encountered in single-wavelength LIDAR transmissometers", *Applied Meteorology*, 17, 1034-1038 (1978).

Kokkalis P., Papayannis, A., Mamouri, R., Tsaknakis, G., Amiridis, V., "The EOLE LIDAR system of the National Technical University of Athens", *Proc. 26th International LASER RADAR Conference (26th ILRC)*, 25–29 June 2012, Porto Heli, Greece, 629–632 (2012).

Kokkalis P., "Using paraxial approximation to describe the optical setup of a typical EARLINET lidar system," *Atmos. Meas. Tech.* 10, 3103–3115 (2017).

Kopke P., Hess Michael, Schult Ingrid, Shettle Erik, "Global Aerosol Data Set", Max Plank Institut fur Meteorologie, Report No. 243.

Kovalev V., Cyle Wold, Alexander Petkov, Wei Min Hao, "Application of the backscatter near-end solution for the inversion of scanning LIDAR data", *EPJ Web of Conferences*, 119, 25001, ILRC 27 (2016).

Kovalev V., Cyle Wold, Alexander Petkov, Wei Min Hao, "Modified technique for processing multiangle LIDAR data measured in clear and moderately polluted atmospheres", *Applied Optics*, 4957-4966 (2011).

Kovalev V., W. E. Eichinger, "Elastic LIDAR," Wiley Interscience (2004).

Kunz G., Bekman H., Benoist K., Cohen L., van den Heuvel J., Frank J., van Putten, "Detection of small targets in a marine environment using LASER RADAR", TNO Defense, Security and Safety, Remote Sensing of the Coastal Oceanic Environment (2005).

Kunz G., de Leeuw Gerrit, "Inversion of LIDAR signals with the slope method", *Optical Society of America*, 3249-3256 (1993).

Kuśmierczyk-Michulec J., "Optical Measurements of Atmospheric Aerosols in Air Quality Monitoring", *InTech* (2011).

Labzovskii L., Papayannis A., Biniotoglou I., Banks R., Baldasano J., Toanca F., Tzani C., Christodoulakis J., "Relative humidity vertical profiling using LIDAR-based synergistic methods in the framework of the Hygra-CD campaign", *Annales Geophysicae*, 36, 213-229 (2018).

Landolfo E., Papayannis A., De Freitas A., Vieira N., Souza R., Gonçalves A., Castanho A., Artaxo P., Sánchez-Ccoyllo O., Moreira D., Jorge M., "Tropospheric aerosol observations in São Paulo, Brazil using a compact LIDAR system", *Int. J. Remote Sens.* 26, 2797 (2005).

Lange D., Rocadenbosch F., Tiana-Alsina J., Frasier S., "Atmospheric boundary layer height estimation using a Kalman filter and a frequency-modulated continuous-wave RADAR", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 53, 3338-3349 (2015).

Lange D., Rocadenbosch F., Tiana-Alsina J., Saeed U., Tomás S., "Atmospheric boundary layer height monitoring using a Kalman filter and backscatter LIDAR returns", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 52, 4717-4728 (2014).

Leroy M., "Aerodrome meteorological observation and forecast study group (AMOFSG)", AMOFSG/10-SN No. 11 (2013).

Leroy M., "Information about a Draft ISO Standard: Ground-based remote sensing of visual range", ICAO, AMOFSG/8-IP/7 (2010).

Lorga G., Stefan S., "Sensitivity of cloud albedo to aerosol concentration and spectral dispersion of cloud droplet size distribution", *Atmósfera*, 247-269 (2007).

Lyth D., "UK Met Office investigations into LASER disdrometers", UK Met Office, Present Weather Trial at Eskdalemuir, Scotland (2008).

M. A., et al., "Temperature LIDAR measurements from 1 to 105 km altitude using resonance, Rayleigh, and Rotational Raman scattering", *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 793–800 (2004).

Madonna F., "Ceilometer aerosol profiling versus Raman LIDAR in the frame of the INTERACT campaign of ACTRIS", *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 2207–2223 (2015).

Malamou A., C. Pandis, P. Frangos, P. Stefaneas, A. Karakasiliotis, D. Kodokostas, "Applications of the Modified Fractal Signature Method for terrain Classification from Synthetic Aperture RADAR Images", *Elektronika IR Elektrotehnika*, ISSN 1392-1215, Cornell University library, arXiv:1401.2899v1 (2014).

Mallant R., Gerard P., Kos, "An Optical Device for the Detection of Clouds and Fog", *Aerosol Science and Technology*, 196-202 (2007).

Malm W., "Introduction to Visibility", CIRA (1999).

Mamouri R., Amiridis V., Papayannis A., Giannakaki E., Tsaknakis G., Balis D., "Validation of CALIPSO space-borne derived aerosol vertical structures using a ground-based LIDAR in Athens", *Greece. Atmos. Meas. Techn.*, 2, 513-522 (2009).

Mamouri R., Papayanis A., Tsaknakis G., Amiridis V., "Six-month ground-based water vapour Raman LIDAR measurements over Athens, Greece and system validation", *Optoelectronics and Advanced Materials*, 3546 – 3548 (2007).

Mamouri R., Papayannis A., Amiridis V., Muller D., Kokkalis P., Rapsomanikis S., Karageorgos E., Tsaknakis G., Nenes A., Kazadzis S., Remoundaki E., "Multi-wavelength Raman LIDAR, sun photometric and aircraft measurements in combination with inversion models for the estimation of the aerosol optical and physico-chemical properties over Athens, Greece", *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 1793–1808 (2012).

Mamouri R., Papayannis A., Tsaknaki G., Amiridis V., Koukouli M., "First water vapor measurements over Athens, Greece, obtained by a combined Raman-elastic backscatter LIDAR system", *ÓPTICA PURA Y APLICADA* 41 (2) 109-116 (2008).

Mao J., "Noise reduction for LIDAR returns using local threshold wavelet analysis", *Opt Quant Electron*, 43, 59–68 (2012).

Marais W., Yu Hen Hu, Holz Robert, Eloranta Edwin, "A new approach to inverting and de-noising backscatter from LIDAR observations", *EPJ Web of Conferences*, ILRC 27, 119, 25004, (2016).

Massot-Campos M. et.al., "Optical Sensors and Methods for Underwater 3D Reconstruction", *Sensors*, (Dec. 2015).

Mattis I., Ansmann A., Müller D., Wandinger U., Althausen D., "Dual-wavelength Raman LIDAR observations of the extinction to-backscatter ratio of Saharan dust", *Geophys. Res. Lett.* 29, 1306 (2002).

McClatchey R., Fenn R., Selby J., Volz F., Garing J., "Optical Properties of the Atmosphere", AIR FORCE Cambridge Research Laboratories, AFCRL-72.0497 Environmental Research Papers, NO. 411 (1972).

McGill W., Skinner R., Irgang T., "Analysis techniques for the recovery of winds and backscatter coefficients from a multiple-channel incoherent Doppler LIDAR", *Appl. Opt.* 36, 1253-1268 (1997).

Measures R., "LASER remote sensing. Fundamentals and Applications," Krieger, Sys No 9247, MEA 621.3678 (1992).

Melfi S., J. Spinhinre, Chou S, Palm S., "LIDAR Observations of vertically organized convection in the Planetary Boundary Layer over the ocean", *Climate and Applied Meteorology*, 24, 806-821 (1985).

Melfi S., Whiteman D., Ferrare R., "Observation of atmospheric fronts using Raman LIDAR moisture measurements", *J. Appl. Meteor.*, 28, 789-806 (1989).

Melfi S., Whiteman D., "Observation of lower-atmospheric moisture structure and its evolution using a Raman LIDAR", *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 66, 1288-1292 (1985).

- Melfi S., "Remote measurements of the atmosphere using Raman scattering", *Appl. Opt.*, 11, 1605–1610 (1972).
- Menut L., Flamant C., Pelon J., Flamant P., "Urban boundary-layer height determination from LIDAR measurements over the Paris area", *Appl. Opt.*, 38, 945–954 (1999).
- Meulen J., "Visibility Measuring Instruments: Differences between Scatterometers and Transmissometers", Royal Netherlands Meteorological Institute (2016).
- Mitra V., et.al., "LIDAR Detection of Underwater Objects Using a Neuro-SVM-Based Architecture", *IEEE Transactions on Neural Networks*, (Apr. 2005).
- Moreira Gregori de Arruda, Juan Luis Guerrero-Rascado, Jose A. Benavent-Oltra, Pablo Ortiz-Amezcuca, Roberto Román, Andrés E. Bedoya-Velásquez, Juan Antonio Bravo-Aranda, Francisco Jose Olmo Reyes, Eduardo Landulfo, Lucas Alados-Arboledas, "Analyzing the turbulent planetary boundary layer by remote sensing systems: the Doppler wind lidar, aerosol elastic lidar and microwave radiometer", *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 1263–1280 (2019).
- Morille Y., Haeffelin M., Drobinski P., J. Pelon, "STRAT: An automated algorithm to retrieve the vertical structure of the atmosphere from single-channel LIDAR data", *Atmos. Oceanic Techn.* 24, 761-775 (2007).
- Muller D., Freudenthaler V., Esselborn M., Wiegner M., Heese B., Tesche M., Ansmann A., Althausen D., Wirth M., Fix A., Ehret G., Knippertz P., Toledano C., Gasteiger J., Garhammer M., M. Seefeldner, "Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006, 2009", *Tellus*, 61B, 165-179 (2009).
- Müller D., Ansmann A., Mattis I., Tesche M., Wandinger U., Althausen D., Pisdani G., "Aerosol-type-dependent LIDAR ratios observed with Raman LIDAR", *J. Geophys. Res.*, 111, D16202, doi:10.1029/2006JD008292 (2007).
- Munkel, C. Rasanen, J., "New optical concept for commercial lidar ceilometers scanning the boundary layer", *Proc. SPIE*, 5571, 364 (2004).
- Munkel, C., Eresmaa, N., Rasanen, J., Karppinen, A., "Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer", *Boundary Layer Meteorol.*, 124, 117–128 (2007).
- Nicolae D., et al., "Recent Advances in Atmospheric LIDARs", INOE Publishing, Romania (2009).
- Noll K., Pillat Michael, "Size Distribution of Atmospheric giant particles", *Atmospheric environmental Pergamon press*, 527-540 (1970).
- Nowottnick E., et al., "Global aerosol model evaluation using CALIOP aerosol types", *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 3647–3669 (2015).

Pantazis A., Papayannis A., Georgousis G., "LIDAR algorithms for atmospheric slant range visibility, meteorological conditions detection and atmospheric layering measurements", Appl. Opt., 56, 6440-6448 (2017).

Pantazis A., Papayannis A., Georgousis G., "LIDAR algorithms for atmospheric slant range visibility, meteorological conditions detection and atmospheric layering measurements", Proc. 28th International LASER RADAR Conference, 25-30 June 2017, Bucharest, Romania, EPJ Web of Conferences, 176, 11003 (2018).

Pantazis A., Papayannis A., Georgousis G., "LIDAR algorithms in 3D scanning for atmospheric layering and planetary boundary layer height retrieval: comparison with other techniques", Appl. Opt., 57, 8199-8211 (2018).

Pantazis A., Papayannis A., Georgoussis G., "Algorithms for Planetary Boundary Layer Height Determination for 3D Scanning LIDAR Systems", ELC2018, Thessaloniki (2018).

Pantazis A., Papayannis A., Georgoussis G., "LIDAR algorithms for atmospheric slant-range visibility, planetary boundary layer height, meteorological phenomena and atmospheric layering measurements", COMECAP 2018, Alexandroupoli (2018).

Pantazis A., Papayannis A., Georgoussis G., "LIDARs for atmospheric slant range visibility, meteorological conditions detection and atmospheric layering measurements", 5ο Αεροπορικό Συνέδριο 2018, Ελληνική Αεροπορική Ένωση, Αθήνα (2018).

Pantazis A., Papayannis A., "LIDAR algorithms and technique in 3D scanning for Planetary Boundary Layer Height and Single Beam – Single pointing Wind speed retrieval.", Appl. Opt., 58, 2284-2293-6448 (2019).

Pantazis A., Papayannis A., "Set of algorithms and techniques for accurate 3d, single beam – single pointing, LIDAR measurements for slant range visibility, planetary boundary layer height and wind speed retrieval, atmospheric layers spatial distribution and categorization in real time", ILRC29, Hefei, China (2019).

Pantazis A., "C – UAS / CBRN EW", Counter UAS Conference, Sheraton Pentagon City, Washington D. C. USA (2019).

Pantazis A., "LASER Detection & Applications (LIDARs)", Alumni Defence Conference - Grandfield University, War museum - Athens (2018).

Pantazis A., "LIDARs in Aviation Safety", International Aviation Safety Conference, Athens (2018).

Pantazis A., "LIDARs usage in C – UAS / MUS / UGV / UNV / CBRN EW", Counter UAS Workshop, Ramstein, Germany (2018).

Pantazis A., "LIDARs Usage in Maritime Operations and ECO – Autonomous Shipping, for Protection, Safety and Navigation", MSAW, CMRE, Italy (2019).

Pantazis A., "Light Detection And Ranging (LIDARs) systems in usage by Unmanned Underwater Gliders (UUGs)", 6WMAUGT, CMRE, Italy (2019).

Pantazis A., "Novel algorithms for accurate 3D, single beam – single pointing, LIDAR measurements", MTF5 M4IR 2019, Athens (2019).

Papayannis A., Balis D., Amiridis V., Chourdakis G., Tsaknakis G., Zerefos C., Castanho A., Nickovic S., Kazadzis S., Grabowski J., "Measurements of Saharan dust aerosols over the Eastern Mediterranean using elastic backscatter-Raman LIDAR, spectrophotometric and satellite observations in the frame of the EARLINET project", *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2065-2079 (2005).

Papayannis A., Balis D., Amiridis V., Chourdakis G., Tsaknakis G., Zerefos C., Castanho A., Nickovic S., Kazadzis S., Grabowski J., "Mediterranean using elastic backscatter-Raman LIDAR, spectrophotometric and satellite observations in the frame of the EARLINET project", *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2065–2079 (2005).

Papayannis A., et al., "An overview from hygroscopic aerosols to cloud droplets: The Hygra-CD Campaign in the Athens basin", *Science Total Environ.*, 574, 216-233 (2017).

Papayannis A., Mamouri R., Kokkalis P., Amiridis V., Kristiansen N., Stohl A., Balis D., Giannakaki E., Nicolae D., Tsaknakis G., Belegante L., Nemuc A., Veselovskii I., Korenskiy M., Allakhverdiev K., Huseyinoglu M., Baykara T., "Optical properties and vertical extension of ash layers over the Eastern Mediterranean as observed by Raman LIDARs during the Eyjafjallajökull eruption" May 2010, *Atmos. Environ.*, 48, 56-65, (2012a).

Papayannis A., Mamouri R., Remoundaki E., Bourliva A., Tsaknakis G., Amiridis V., Kokkalis P., Veselovskii I., Kazadzis S., Kolgotin A., Nenes A., Fountoukis C., "Optical-microphysical properties and chemical characterization of Saharan dust aerosols using a multi-wavelength Raman LIDAR, in situ sensors and modeling", *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 4011-4032 (2012b).

Pappalardo G., Amodeo A., Pandolfi M., Wandinger U., Ansmann A., Bösenberg J., Matthias V., Amiridis V., Tomasi F., Frioud M., Iarlori M., Komguem L., Papayannis A., Rocadenbosch F., Wang X., "Aerosol LIDAR intercomparison in the framework of the EARLINET project. 3. Raman LIDAR algorithm for aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio", *Appl. Opt.* 43, 5370 (2004).

Peixoto J., Ort A., "Physics of Climate, American Institute of Physics", N. York (1993).

Persad G., Caldeira K., "Divergent global-scale temperature effects from identical aerosols emitted in different regions", *Nature Comm.*, 9:3289, doi:10.1038/s41467-018-05838-6 (2018).

Petty G., Huang Wei, "The Modified Gamma Size Distribution Applied to Inhomogeneous and Nonspherical Particles: Key Relationships and Conversions", *Atmospheric Sciences*, 1460-1473 (2011).

Pichugina Y., et al., "Doppler LIDAR-Based Wind-Profile Measurement System for Offshore Wind-Energy and Other Marine Boundary Layer Applications", *J. Appl. Meteor.Climatol.*, 51, 327-349 (2012).

Plank V., "Implications of the khrgian-mazin distribution function for water clouds and distribution consistencies with aerosols and rain", Phillips laboratory, Directorate of Geophysics, Air Force Systems command hanscom air force base, MA 01731-5000 (1991).

Poluzzi V., Trentini A., Scotto F., Ricciardelli I., Ferrari S., Maccone C., Bacco D., Zigola C., Bonafè G., Ugolini P., Bertacci G., Pietrogrande M., Visentin M., Gilardoni S., Paglione M., Rinaldi M. Facchini M., "Preliminary results of the project "Supersito" concerning the atmospheric aerosol composition in Emilia Romagna region, Italy: PM source apportionment and aerosol size distribution", *Sustainable Development*, 2, 689-698 (2015).

Porter J., Lienert B., Shiv Sharma, "Using Horizontal and Slant LIDAR Measurements to Obtain Calibrated Aerosol Scattering Coefficients from a Coastal LIDAR in Hawaii", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1445-1454 (2000).

Quan J., Zhang Q., He H., Liu J., Huang M., Jin H., "Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP)", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8205-8214 (2011).

Rayleigh L., Strutt J., "On the transmission of light through the atmosphere containing small particles in suspension and on the origin of the blue sky", *Phil Mag.*, 47, 375-84 (1909).

Razenko I., Eloranta E., "Advances in atmospheric temperature profile measurements using High Spectral Resolution LIDAR", *EPJ Web of Conferences* 176, 01023 (2018).

Robinson R., Andrews A., Gardiner T., Uprichard I., Woods P., "Differential Absorption LIDAR Measurements of VOC Emissions from Wytch Farm Crude Oil Gathering Station", *NPL Report COEM 13* (1998).

Robinson R., Woods, M. Milton J., "DIAL measurements for air pollution and fugitive loss monitoring", *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.*, 2506, 140-149 (1995).

Rocadenbosch F., Comero´ Adolfo, "Error analysis for the LIDAR backward inversion algorithm", *Applied Optics*, 38, No. 21, 4461-4474 (1999).

Rocadenbosch F., "LIDAR—Aerosol Sensing", *Universitat Polite`cnica de Catalunya, Marcel Dekker Inc* (2003).

Rosenfeld D., Sherwood S., Wood R., Donner, L. "Climate effects of aerosol cloud interactions". *Science* 343, 379–380 (2014).

Russell P., Bergstrom R., Shinozuka Y., Clarke A., DeCarlo P., Jimenez J., Livingston J., Redemann J., Dubovik O., Strawa A., "Absorption Ångström exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition," *Atmos. Chem. Phys.* 10, 1155–1169 (2010).

Russell P., Livingston John, "Slant-LIDAR Aerosol Extinction Measurements and their Relation to Measured and Calculated Albedo changes", *Climate and Applied Meteorology*, 1204-1221 (1984).

Sasano Y., Browell E., "Light scattering characteristics of various aerosol types derived from multiple wavelength LIDAR observations", *Appl. Opt.*, 28, 1670-1979 (1989).

Sassen K., "The polarization LIDAR technique for cloud research: a review and current assessments", *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 72, 1848– 1866 (1991).

Sawamura P., "Aerosol optical and microphysical retrievals from a hybrid multiwavelength LIDAR dataset", *DISCOVER-AQ 2011. Atmos. Meas. Techn.*, 7, 3095–3112 (2014).

Schlenker W., Reed Walker W., "Airports, Air Pollution, and Contemporaneous Health", *Columbia edu* (2015).

Segeistein D., "The complex refractive index of water", Master Thesis, University of Missouri-Kansas City (1981).

Seinfeld J., et al. "Improving our fundamental understanding of the role of aerosol-cloud interactions in the climate system", *Proc. Natl Acad. Sci.* 113, 5781–5790 (2016).

Seinfeld J., Pandis S., "Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change", Eds. J. Wiley and Sons Inc., NewYork, USA (1998).

Shannuan M., et al., "Dual-frequency Doppler LIDAR for wind detection with a superconducting nanowire single-photon detector", *Opt. Expr.*, 42, 3541-3544 (2017).

Shettle E., Fenn R., "Models of the aerosols of the lower troposphere and effects of humidity variations on their optical properties", Air Force Geophysics Laboratory, Optical Physics Division, Project 7670 (1979).

Sicard M., Chazette Patrick, Pelon Jacques, Gwang Won Jae, Soon-Chang Yoon, "Variational method for the retrieval of the optical thickness and the backscatter coefficient from multiangle LIDAR profiles", 41, No. 3, 493-502 (2002).

Sicard M., Pérez C., Rocabenbosch F., Baldasano J., García-Vizcaino D., "Mixed-Layer depth determination in the Barcelona coastal area from regular LIDAR measurements: methods, results and Imitations", *Bound.-Layer Meteor.*, 119, 135-157 (2006).

Spandonidis C., Giordamli C., "Data-centric Operations in Oil & Gas Industry by the Use of 5G Mobile Networks and Industrial Internet of Things (IIoT)", *ICDT*, 1-5 (2018).

Spandonidis C., Themelis N., Christopoulos G., Giordamli C., "Evaluation of Ship Energy Efficiency Predictive and Optimization Models Based on Noon Reports and Condition Monitoring Datasets", *Data Analytics*, 103-108 (2018).

SPEC Inc "Fast Forward Scattering Spectrometer Probe Technical Manual Rev. 1.0" (2011).

Stone J., "Bayes' Rule: A tutorial analysis to Bayesian Analysis", Sebtel press (2013).

Stull R., "An Introduction to Boundary Layer Meteorology", Kluwer Academic Publishers (1988).

Stull R., "An Introduction to Boundary Layer Meteorology", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2013).

Symposium on Nova Science Publishers, "Metrological assurance for environmental control", International measurement confederation, Proceedings of the 2nd Symposium on Nova Science Publishers (1988).

Tackett J., et al., "CALIPSO LIDAR level 3 aerosol profile product", *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 4129–4152 (2018).

Tang Y., Hong Ma, Dihua Xi, Xiaogang Mao, Ching Y. Suen, "Modified Fractal Signature (MFS): A New Approach to Document Analysis for Automatic Knowledge Acquisition", *IEEE Transactions on knowledge and Data Engineering*, 747-762 (1997).

Taylor V., "Runway Visual Range", *TMS Photometrics*, A1-A10.

Tesche M., Ansmann A., Muller D., Althausen D., Heese B., "Vertical profiling of Saharan dust with Raman LIDARs and HSRL in southern Maroco during SAMUM", *Tellus*, 61B, doi: 10.1111/j.1600-08889.2008.00390.x (2009).

Tesche M., Gror S., Ansmann A., Muller D., Althausen D., "Profiling of Saharan dust and biomass burning smokewith multiwavelength polarization Raman LIDAR at Cape Verde", *Tellus* 63B, doi: 10.UU/j.l600-0889.20U.00548.x, (2011).

Tomasi C., "Evaluation of the Atmospheric Content of Particulate Mass from Visibility Observations", *IL NUOVO CIMENTO*, 223-246 (1982).

Tomás S., Rocadenbosch F., “Wind retrieval from multiangle backscatter LIDAR profiles through anisotropic aerosol structures”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 7758–7776 (2015).

Tonna G., “Backscattering, extinction, and liquid water content in fog: a detailed study of their relations for use in LIDAR systems”, *Optical Society of America*, 1132-1140 (1991).

Tsaknakis G., Papayannis A., Kokkalis P., Amiridis V., Kambezidis H., Mamouri R., Georgoussis G., Avdikos G., “Inter-comparison of lidar and ceilometer retrievals for aerosol and planetary boundary layer profiling over Athens, Greece”, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 1261-1273 (2011).

TSI, Model 3563 Integrating Nephelometer: Operation and Service Manual, P/N 1933563, Revision F (2005).

Tunick A., Tikhonov Nikolay, Vorontsov Mikhail, Carhart Gary, “Characterization of optical turbulence (Cn²) data measured at the ARL A_LOT facility”, ARL-MR-625, 1-26 (2005).

Turner D., Feltz W., Ferrare R., “Continuous water vapor profiles from operational ground-based active remote sensors”, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 81, 1301-1312 (2000).

Van de Hulst H., “Light Scattering by Small Particles”, Dover Publ. Inc., New York, USA (1981).

Vieeze W., Oblanas J., Collis R., “Slant range visibility measurement for aircraft landing operations” (SRI, February 1972).

Volpe J., “US experience using Forward Scattermeters for Runway visual range”, NTIS, PB97-163646 (1997).

Vratolis S., Fetfatzisa P., Argyrouli A., Papayannis A., Müllere D., Veselovskij I., Bougiatioti A., Nenesd A., Remoundakii E., Diapouli E., Manousakas M., Mylonaki M., Eleftheriadis K., “A new method to retrieve the real part of the equivalent refractive index of atmospheric aerosols”, *Aerosol Science*, 117, 54-62 (2018).

Walterspiel J., “LIDAR Design, Construction and Measurements of Volcanic Aerosols on Hawaii”, Diploma Thesis, Universities of Zurich and Hawaii (2008).

Wandinger U., et al., “Optical and microphysical characterization of biomass-burning and industrial-pollution aerosols from multiwavelength LIDAR and aircraft measurements”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 107, LAC 7-1–LAC 7-20 (2002).

Wang T., Latatit R., Lawrence R., Ochs G., “LASER Weather Identifier: Present and Future”, NOAA, 1747-1753 (1982).

Weitkamp C., "LIDAR: range-resolved remote sensing of the atmosphere", Springer Verlag, New York (2005).

Werner C., Streicher Jürgen, Leike Ines, Münkel Christoph, "Visibility and Cloud LIDAR".

Werner C., "Slant range visibility determination from LIDAR signatures by the two-point method", Optics and LASER technology, 27-36 (1981).

Whiteman D., Demoz B., Di Girolamo P., et al., "Raman LIDAR measurements during the International H2O Project. Part I: Instrumentation and analysis techniques", J. Atmos. Oceanic Techn., 23, 157-169 (2006).

Whiteman D., Melfi S., Ferrare R., "Raman LIDAR system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere", Appl. Opt., 31, 3068–3081 (1992).

Whiteman D., "Examination of the traditional Raman LIDAR technique.II. Evaluating the ratios for water vapor and aerosols", Appl. Opt., 42, 2593-2608 (2003).

Wiegner M., Geiss A., "Aerosol profiling with the Jenoptik ceilometer CHM15KX". Atmos. Meas. Tech., 5, 1953–1964 (2012).

Wiegner M., "What is the benefit of ceilometers for aerosol remote sensing? An answer from EARLINET", Atmos. Meas. Tech., 7, 1979–1997 (2014).

Wilkerson T., Cornelsen Scott, Earl Curtis, Huish David, Cutts James, Call Seth, Anderson Mark, Schwemmer Geary, "Monitoring of air motion using LIDAR and video observations".

Wilkerson Thomas, Egberta Cameron, Andrusa Ionio, Andersona Mark, "Advances in Wind Profiling by Means of LIDAR and Video Imagery of Clouds and Aerosols", Proceedings of SPIE, 4723, 130-146 (2002).

Wilson R., Milton E., Nield J., "Are visibility-derived AOT estimates suitable for parameterizing satellite data atmospheric correction algorithms?", International Journal of Remote Sensing, 1-15 (2015).

Winker D., Vaughan M., Hunt W., "The CALIPSO mission and initial results from CALIOP", Proc. SPIE, 6409, doi:10.1117/12.698003 (2006).

Winker D., Vaughan M., Omar A., Hu Y., Powell K., Liu Z., Hunt W., Young S., "Overview of the CALIPSO Mission and CALIOP Data Processing Algorithms." J. Atmos. Oceanic Techn. 26, 2310–2323 (2009).

WMO/GAW, "Aerosol measurement procedures guidelines and recommendations", (2003).

WMO, "Guide on Meteorological Observation and Information".

WMO, "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation", WMO-No.8, Geneva (2010).

WMO2008 VISIBILITY MEASUREMENT_Ed2008_PartI_Ch9_Up2010_en

WMO 2008 PRECIPITATION MEASUREMENT, WMO8, Ed2008 PartI Ch6 Up (2010).

WMO 2008 VISIBILITY MEASUREMENT_Provisional2014Ed_P-I_Ch-9

WMO – ICAO, "Meteorological Service for International Air Navigation", Annex 3, (2007).

Wright W., Proctor E., Gasiorok L., Liston E., "Apreliminary study of air pollution measurement by active remote sensing techniques", NASA, CR-132724 C89 (1966).

Wu J., Luo Jianguo, Zhang Liya, Xia Lan, Zhao Deming, Tang Jianping, "Improvement of aerosol optical depth retrieval using visibility data in China during the past 50years", AGU, 13370–13387 (2014).

Wulfmeyer V., Janjic T., "Twenty-Four-Hour Observations of the Marine Boundary Layer Using Shipborne NOAA High-Resolution Doppler LIDAR", 1723-1744, (2005).

www.actris.net

www.primordialphoton.com

Xia H., et al., "Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler LIDAR for low tropospheric wind observation", Appl. Opt. 46, 7120–7131 (2007).

Kondratyev K., Ivlev L., Krapivin V., Varotsos C., "Atmospheric Aerosol Properties", Praxis publishing, ISBN: 978-3-540-26263-3 (2006).

Yorks J., et al., "The Airborne Cloud-Aerosol Transport System: Overview and Description of the Instrument and Retrieval Algorithms", J. Atmos. Ocean. Technol., 31, 2482–2497 (2014).

Zhao C., Wang Yuzhao, Wang Qianqian, Li Zhanqing, Wang Zhien, Liu Dong, "A new cloud and aerosol layer detection method based on micropulse LIDAR measurements", Geophysical Research: Atmospheres, 6788-6802 (2014).

Zieger P., Weingartner E., Henzing J., Moerman M., de Leeuw G., Mikkila J., Ehn M., Petaja T., Clemer K., van Roozendaal M., Yilmaz S., Frieß U., Irie H., Wagner T., Shaiganfar R., Beirle S., Apituley A., Wilson K., Baltensperger U., "Comparison of ambient aerosol extinction coefficients obtained from in-situ, MAX-DOAS and LIDAR measurements at Cabauw", Atmospheric Chemistry and Physics, 2605-2624 (2011).

Zuev V., et al., “Tropospheric temperature measurements with the pure rotational Raman LIDAR technique using nonlinear calibration functions”, Atmos. Meas. Tech., 10, 315–332 (2017).

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γιαννακάκη Ε., “Μελέτη των οπτικών και φυσικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων με μεθόδους τηλεπισκόπησης LASER”, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ (2009).

Ζιακόπουλος Δ., Φραγκούλη Π., “Το εγχειρίδιο του Μετεωρολόγου – Προγνώστη”, ΕΜΥ (2015).

Κόκκαλης Π., “Μελέτη τροποσφαιρικών αερολυμάτων με επίγειες και δορυφορικές τεχνικές- ανάλυση μερτήσεων και στατιστική επεξεργασία”, Διδακτορική διατριβή, ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ, Αθήνα (2014).

Λαζαρίδης Μ., “Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2η έκδοση, ISBN 978-960-418-246-6 (2010).

Μπαλής Δ., “Τηλεπισκόπηση της σύστασης της ατμόσφαιρας με χρήση πηγών LASER”, Αριστοτελείο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης τμήμα Φυσικής, Προγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Φυσική Περιβάλλοντος.

Μαμούρη Ρ. “Τηλεπισκόπηση της ατμόσφαιρας με χρήση πηγών laser και δορυφορικών δεκτών: πειράματα και υπολογιστικές προσομοιώσεις. Εφαρμογή στα αιωρούμενα σωματίδια, το όζον και τους υδρατμούς και επίδραση τους στην κλιματική αλλαγή στην περιοχή της ΝΑ Μεσογείου”, Διδακτορική Διατριβή ΕΜΠ, Αθήνα (2009).

Πανταζής Α., “Μεταϋλικά συντονισμού Mie με ευρυζωνική ή/και πολυζωνική απόκριση”, Διπλωματική εργασία Διατμηματικό Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών - Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές, ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ (Ιούλιος 2015).

Πανταζής Α., “Τεχνική LIDAR και εφαρμογές στη Φυσική Περιβάλλοντος, την Μετεωρολογία και την Ασφάλεια Πτήσεων”, Διπλωματική εργασία Διατμηματικό Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών - Μαθηματική Προτυποποίηση στις Σύγχρονες Τεχνολογίες και την Οικονομία, ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ (Οκτώβριος 2015).

Παπαγιάννης Α., Σημειώσεις: «LASER και Εφαρμογές τους στην Βιοϊατρική και το Περιβάλλον», Έκδοση Ε.Μ.Π., 2014.

Παπαγιάννης Α., Σημειώσεις: «Φυσική περιβάλλοντος», Έκδοση Ε.Μ.Π., 2015.

Χουρδάκης Γ., “Σχεδίαση και ανάπτυξη παλμικών LASER αερίων και συστήματος τηλεπισκόπησης (RamanLIDAR) με σκοπό την καταγραφή των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας”, Διδακτορική διατριβή, ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ, Αθήνα (2004).

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| Instrument name | Key specifications | Primary measurements | Derived parameters | Type of measurement (in situ / Profile) | Comments | ICAO code | Vendor/ Manufacturer | References |
|-------------------------------------|--|--|---------------------------|--|---|-----------|--------------------------|---------------------------|
| R-MAN 510 | Nd:YAG elastic, Nitrogen Raman, 355 nm parallel/cross Lidar signals, N ₂ 387nm Raman, Averaging time 1s to 10min | α , β , clouds, aerosol (9 layers, 3 types), PBL, AOD, Particle typing, Visibility, | Lidar Ratio, Volcanic ash | Structure layer reports (Clouds, Aerosol, PBL) | Analogue & photon counting in each channel, 7.5 to 20000m / 15 to 65000ft | | <i>LEOSPHERE, France</i> | <i>LEOSPHERE Products</i> |
| WINDCUBE v2 (& Offshore) | Doppler Lidar (Horizontal, Vertical), 1.54 μ m pulsed fiber Laser, Averaging time 1s to 10min, H & V wind speed, Max height 200 m, Portable, Accuracy 0.1m/s, veloc. range: 0 to 60m/s | Wind speed & Direction | Turbulence, Wind shear | Vertical mapping (profile) | | | <i>LEOSPHERE, France</i> | <i>LEOSPHERE Products</i> |
| WINDCUBE 100S/200S/400S | 3D, Doppler Lidar (Horizontal, Vertical) 3.5/6/10km, 1.54 μ m pulsed laser, Averaging | Wind speed, Cloud, Aerosol | CNR, PBL, TPH sensor | Vertical profile | | | <i>LEOSPHERE, France</i> | <i>LEOSPHERE Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--------------------------|--|--|--|------------------|---|--|--------------------------|---------------------------|
| | time 1 to 10min, range res: 50 to 200m, 58 gates, 40°/s rot, Accuracy 0.2, 0.3m/s, Wind speed -30 to +30m/s, Point accuracy 0.03o, Range 8 & 15 km | | | | | | | |
| WINDCUBE 400S-AT | 3D, Doppler Lidar (Horizontal, Vertical) 10 km 1.54µm pulsed fiber laser, Averaging time 0.5 to 10min, range res: 75 to 200m, rot speed 30°/s, Accuracy 0.5m/s, Wind speed -30 to +30m/s, Max range 14km | Wind speed | PPI, RHI, LOS, DBS wind shear, microbursts | Vertical profile | Operating ambient temperature -25°C to +45°C, dust & splash water resistant, Operating humidity: 10 to 100%, Resistant to salty environment, airports | | <i>LEOSPHERE, France</i> | <i>LEOSPHERE Products</i> |
| Wind iris | Doppler Lidar, 1.54 pulsed Laser, measuring distances 10 measurements simultaneously, range 40 – 400m | Horizontal wind speed | | In situ | Farm wind, Accuracy 0.1 m/s, -10 to +40m/s, 0 to 100% operation humidity, Temp -30 to +60°C | | <i>LEOSPHERE, France</i> | <i>LEOSPHERE Products</i> |
| FLidar (Offshore) | Laser, 12 programmable heights, 1s to | Atmospheric pressure (600 to 1100 hPa) | | In situ | Floating Lidar, Offshore, 0 to 100% Humidity, Ultrasonic | | <i>LEOSPHERE, France</i> | <i>LEOSPHERE Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|------------------------|---|--|---|--------------------|----------------|--|---------------------------|----------------------------|
| | 10min horizontal wind speed, 40 to 200m, 0 to 360o wind direction, 0 to 55m/s | | | | wind sensor | | | |
| Vertical Lidars | Nd:YAG Laser, 355 co/cross polar, 387 Nitrogen Raman, 408 Water vapour Raman, 532 co/cross polar, 607 Nitrogen Raman, 1064 backscatter, Simultaneous analogue & photon counting | Elastic / Inelastic, backscattering, Water vapour, Aerosol | Volcanic ash, meteorological conditions | Profile (Vertical) | | | <i>RAYMETRICS, Greece</i> | <i>RAYMETRICS Products</i> |
| LR111-ESS-D200 | Nd:YAG, 3D, 355 co/cross polar, 387 Nitrogen Raman, Analogue & photon counting, Range 10-15 km | Elastic / Inelastic backscattering, Visibility | Cloud base height, fog detection, pollution, dust - ash tracking, aerosol characterization, smoke detection | 3D Profile | Remote control | | <i>RAYMETRICS, Greece</i> | <i>RAYMETRICS Products</i> |
| LR111-D300 | Nd:YAG, Ice/water, 355 co/cross polar, 387 Nitrogen Raman, 408 Water vapour Raman, Analogue & photon counting | Elastic / Inelastic backscattering, cloud detection | Volcanic ash, Humidity profile, Cloud layering, Dust, Smoke, PBL, Aerosol, AOD, Water vapour | Profile (Vertical) | Rain sensor | | <i>RAYMETRICS, Greece</i> | <i>RAYMETRICS Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|--|--|---|--|--|--|------------------------------|--------------------------------|
| CINRAD/CC | 5.3 to 5.65 GHz, pos res: 150m | Backscattering Targets, velocity, Watery/cloudy phenomena | Meteorological phenomena (Rain, Wind) | Profile | | | <i>SUN CREATE, China</i> | <i>SUN CREATE Products</i> |
| 3836 C TYPE | 5.3 to 5.5 GHz, 3D Dual polar pulsed Doppler Radar, Range 400km (targets), 150km (whether phenomena), 24km Height, Accuracy 50m distance / 200m height / 1m/s velocity, Pos range 150m / Height 200m | Backscattering Targets, Watery/cloudy | Meteorological phenomena (Rain, Wind..) | Profile | | | <i>SUN CREATE, China</i> | <i>SUN CREATE Products</i> |
| PHASSED ARRAY RADARS | 9.35 to 9.39 GHz, Phased array 5 to 100km, Accuracy 50m distance / 200 to 300m height / 1m/s velocity, Ground clutter <3000m | Backscattering Targets, Dangerous whether | Dangerous Meteorological phenomena | 1D | | | <i>SUN CREATE, China</i> | <i>SUN CREATE Products</i> |
| WP-6000 | 0.445 GHz, Max height >8km, wind velocity <1.5m/s, height res: 120 to 240m | Backscattering Tropospheric wind | Aviation whether, Disastrous whether monitoring, forecal | Troposphere horizontal wind profiling, Vertical airflow | | | <i>SUN CREATE, China</i> | <i>SUN CREATE Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|------------------|---|---|---|---|--|--|------------------------------|--------------------------------|
| WP-3000 | 1.230 GHz, Temporal res 2min high/low 5 Beams, Phased array & Digitized pulse Doppler, Max height 5km, 0 to 360 Azimuth, Wind speed 0 to 60m/s, Accuracy 1m/s, res 50m, vertical airflow +/- 20m/s | Backscattering Wind tracking | Air pollution forecast, whether applications | 3D Wind profiling | | | <i>SUN CREATE, China</i> | <i>SUN CREATE Products</i> |
| W-Band | 94 GHz, Cloud Dual polar Coherent Doppler Radar, Max range 30km, Flight device height >5000m | Backscattering Cloud detection | dBz, LDR, average radial velocity, velocity spectrum width, Vertical airflow, Cloud layer, Depolarization | Dynamic 3D structure inversion technique | | | <i>SUN CREATE, China</i> | <i>SUN CREATE Products</i> |
| SCRMP | 35 GHz, Max range 30km, min 150m detection, speed - 8.5m/s to +8.5m/s | Backscattering Cloud detection | Cloud base/thickness/s tate/droplet, Depolarization | 3D monitoring (profile) | | | <i>SUN CREATE, China</i> | <i>SUN CREATE Products</i> |
| C-BAND CW | 5.53 GHz, CW & coherent Doppler Radar, Linear FM, <15km range, velocity accuracy 0.2m/s, range positioning res: 30m | Backscattering Cloud detection, vertical velocity | 1530m height precipitation clouds | Cloud monitoring (profile) | | | <i>SUN CREATE, China</i> | <i>SUN CREATE Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------------------|---|----------------------------------|---|---|--|------|---------------------------------|-------------------------------------|
| X-BAND Doppler | 9.37 to 9.39 GHz, PRF 400 to 2000Hz, PW 0.4μs, Range 36km, Range resolution 60m | Backscattering Targets | Mean radial velocity, Rainfall situation | Rainfall monitoring (profile) | Vertical pointing, L& match | | <i>SUN CREATE, China</i> | <i>SUN CREATE Products</i> |
| MIRA-35C / MIRA-35 | 34.8 to 35.2 GHz, max 1000 range gates, PW 100 to 400ns, PRF 2.5 to 10kHz, BW 0.5 & 1°, Range res: 30 to 45m, Linear polar, co/cross polar, Velocity res: 5cm/s, min time res: 0.1s | Backscattering Targets | Cloud structure / cloud scanning, Mean velocity, Spectral width | Doppler spectra & reflectivity cloud vertical profile | | | <i>METEK, Germany</i> | <i>METEK Products</i> |
| MRR-2 | 24.23GHz, BW 1.5, Averaging interval 10 - 3600 s, Height resolution 10 - 200m, Detection threshold: height 500 m, Height range up to 6000 m with 30 range gates | Profiles of Doppler spectra | Drop size distributions, rain rates, liquid water contents, radar reflectivity factors, Doppler velocities, path integrated attenuation | Vertical profiling of drop size distribution rain rate, liquid water content & further microphysical parameters | | | <i>METEK, Germany</i> | <i>METEK Products</i> |
| CS120A/CS125 | IR region (850nm), 42° scatter angle (good MOR), fall speeds, temperature, high | IR forward scattering visibility | MOR (fog, snow), whether type | In situ | Downward pointing optics, SYNOP codes, | 9837 | <i>CAMPBELL SCIENTIFIC, USA</i> | <i>CAMPBELL SCIENTIFIC Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-------------------|---|---|--|---------|---|--|--------------------------|---|
| | speed sampling, relative humidity sensor, Max reported visibility 75km, res: 1m, Accuracy up to 15km | | | | | | | |
| ZephIR 300 | CW, Backscattering, IR region, 50 data points/s, 360° Azimuth, Range 10 to 200m, Speed accuracy >0.5m/s | Wind measurements, aerosol, Dust, pollen, water droplets | | In situ | | | CAMPBELL SCIENTIFIC, USA | CAMPBELL SCIENTIFIC Products |
| PWS100 | Present Weather Sensor, Measuring Area: 40 cm ² per light sheet, Laser Source: Near-infrared diode, Peak Wavelength: 830nm, Modulation Frequency: 96 kHz, Size Accuracy: ±5% for particles greater than 0.3mm, Velocity Accuracy: ±5% for particles >0.3mm, Visibility Range: 0 to | Particle Size: 0.1mm to 30mm, Particle Velocity: 0.16 m/s to 30 m/s | Types Of Precipitation Detected: Drizzle, Rain, Snow Grains, Snow Flakes, Hail, Ice Pellets, Graupel, Mixed (combination of types above) | | laser-based sensor that measures precipitation and visibility by accurately determining the size and velocity of water droplets in the air. | | CAMPBELL SCIENTIFIC, USA | https://www.campbellsci.com/pws100 |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------------------|--|-------------------------------|---|-----------------------------------|--|--|------------------------------------|--|
| | 20000m | | | | | | | |
| RDR 250 | C BAND, PRF 310, 786,1180, PW 0.8, 2μs, Dual polarity operation, 200km range, unambiguous velocity 16m/s at 100km | Watery Backscattering Targets | Hydrology, Wind shear detection, composite imaging, image data distribution | Software analysis - profile | | | <i>RADTEC ENGINEERING Inc, USA</i> | <i>RADTEC ENGINEERING Inc Products</i> |
| RDR 250GC | C/ near S BAND, PRF 250 to 2400 (adjustable), PW 0.4, 0.8, 2μs, Dual polarity operation, 200km range | Watery Backscattering Targets | Hydrology, Wind shear detection, composite imaging, image data distribution | Software analysis - profile | | | <i>RADTEC ENGINEERING Inc, USA</i> | <i>RADTEC ENGINEERING Inc Products</i> |
| TDR TWT Series | C/ near S BAND, PRF 200 to 300pps, PW 0.5 to 10μs, Dual polarity operation, 200km range, max unambiguous velocity 40m/s at 50km, remote workstations | Watery Backscattering Targets | Hydrology, Wind shear detection, composite imaging, image data distribution | Image display terminals - profile | Better storm penetration capability (near S BAND) | | <i>RADTEC ENGINEERING Inc, USA</i> | <i>RADTEC ENGINEERING Inc Products</i> |
| TDR Klystron Series | C BAND, PRF 200 to 2000pps, PW 0.5 to 10μs, 200km range, max unambiguous velocity 26m/s at | Watery Backscattering Targets | Hydrology, Wind shear detection, composite imaging, image data distribution | Image display terminals - profile | Remote workstations, Better storm penetration capability (near S BAND) | | <i>RADTEC ENGINEERING Inc, USA</i> | <i>RADTEC ENGINEERING Inc Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--|---|-------------------------------------|--|--|---|--|--|--|
| | 50km | | | | | | | |
| Transportable Whether Radar systems | C / X BAND | Watery Backscattering Targets | Hydrology, Wind shear detection, composite imaging, image data distribution | Software analysis - profile | Transportable systems based on proven RDR-250 series | | <i>RADTEC ENGINEERING Inc, USA</i> | <i>RADTEC ENGINEERING Inc Products</i> |
| WRM 200 | 5.5 to 5.7GHz, BW <1°, PW 0.5, 0.8, 1, 2μs, PRF 200 to 2400Hz Integrated cross polar, scan 40°/s, 3D | Watery Backscattering Targets | weather surveillance, severe weather monitoring, hydro meteorological applications, e.g. flood forecasting, airport wind shear detection, hurricane/typho on/cyclone tracking | IRIS software applications - precipitation | Real-time target identification(hail, graupel, rain, snow, wet snow, non-met), Accurate attenuation correction, Rainfall estimation based on KDP | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |
| WRM 100 | 5.5 to 5.7GHz, BW <1°, PW 0.5, 0.8, 1, 2μs, PRF 200 to 2400Hz, single / Dual polar, scan 40°/s, 3D, , Range res N*15m, up to 4050 bins | Watery Backscattering Targets | weather surveillance, severe weather monitoring, hydro meteorological applications, e.g. flood forecasting, airport wind shear detection, hurricane/typho | IRIS software applications - precipitation | Remote control / monitoring | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------|---|--------------------------------------|---|---|--|--|-------------------------|-------------------------|
| | | | on/cyclone tracking | | | | | |
| WRK 200 | 5.6 to 5.65 GHz, BW <10, PW 0.5, 1, 2, 5μs, PRF 250 to 2125 Hz, Dual polar, Doppler, scan 40°/s, 3D, Range res N*15m, up to 4200 bins | Watery Backscattering Targets | classifying targets into categories (hail, snow pellets, snow or rain), | IRIS software applications – precipitation, hydrometeor classification software | Identify & filter out non-meteorological targets, scan: PPI, RHI, Volume, Vector, Manual | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |
| WRK 100 | 5.6 to 5.65 GHz, BW <10, PW 0.5, 1, 2, 5μs, PRF 250 to 2125 Hz, Single / Dual polar, 3D | Watery Backscattering Targets | | IRIS software applications - precipitation | Scan: PPI, RHI, Volume, Vector, Manual, Range res N*15m, up to 4050 bins, remote control / monitoring | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |
| LT31 | Transmissometer, White light source (best accuracy - diode LED), 10 to 10000m | Integrated forward scattering | RVR, MOR | In situ | Background luminance sensor, 30/50/75m baseline length, Meets the ICAO & WMO requirements for RVR & visibility | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |
| FS11 | Near infrared Light Emitting Diode, Time 1/3/10min, range +/- 100 5 to 10000m & +/-200 10000 to 75000m | Forward scattering RVR (5 to 75000m) | | In situ | Meets FAA & ICAO specifications for RVR & visibility measurement, also for aeronautical & SYNOP visibility | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-----------------------|--|---|--|---|---|--|-------------------------|-------------------------|
| PWD50 | Visibility sensor | Forward scattering, MOR 10 to 35000m | | In situ | | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |
| PWD10 to PWD20 | Visibility sensor | Forward scattering, MOR 10 to 20000m, precipitation intensity | Accumulation & amount of new snow | In situ | Identifies up to 7 different types of precipitation (rain, freezing rain, drizzle, freezing drizzle, mixed rain/snow, snow, ice pellets) Fog, mist, haze (smoke, s&) or clear | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |
| CL51 | InGaAs diode, 910 nm pulsed LIDAR, 6 to 120s reporting cycle | Backscattering Cloud hits (up to 3 layers) & status information | Detection of cirrus clouds | Backscatter vertical profiling up to 49000ft | Cloud reporting up to 43000ft | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |
| CL31 | InGaAs diode, 910 nm pulsed LIDAR, Reporting res 10ft, reporting cycle 2 to 120s, Range 0 to 25000ft | Backscattering Cloud hits (up to 3 layers) & status information | Cloud base height & vertical visibility | Backscatter vertical profiling up to 25000ft | | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |
| FS11P | Near infrared Light Emitting Diode, Time 1/3/10min , range +/- 10o 5 to 10000m & +/-20o 10000 to 75000m | Forward scattering, Multi parameter measurement, RVR 5 to 75000m | Present weather covering obscuration, precipitation type & intensity, optionally background luminance, 7 different types of precipitation | In situ | Meets FAA & ICAO specifications for RVR & visibility measurement, also for aeronautical & SYNOP visibility | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------------------------|---|--|---------|------------------------------|--|-------------------------|---|
| | | | (rain, freezing rain, drizzle, freezing drizzle, mixed rain/snow, snow, ice pellets), Fog, mist, haze (smoke, s&) or clear | | | | | |
| PWD22 / PWD52 | Visibility sensor | Forward scattering, MOR 10 to 20000m / 10 to 35000m , Identifies up to 7 different types of precipitation (rain, freezing rain, drizzle, freezing drizzle, mixed rain/snow, snow, ice pellets) Fog, mist, haze (smoke, s&) or clear | Precipitation intensity, accumulation & amount of new snow | In situ | | | <i>VAISALA, Finland</i> | <i>VAISALA Products</i> |
| FD12P | Forward scatter visibility | Measures visibility up to 50 km, intensity & amount of liquid & solid precipitation | | In situ | | | <i>VAISALA, Finland</i> | http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/FD12P%20User%20Guide%20in%20English.pdf |
| CT25K | Laser-Ceilometer, 905nm, single-lens | Reports up to three cloud layers | | Profile | Excellent performance at low | | <i>VAISALA, Finland</i> | http://www.skyvie.w.co.uk/acatalog/C |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------|--|--|---|---|---|--|-----------------------|-----------------------|
| | design, Measurement range: 0 - 25000 ft (acquisition time 15s), Resolution: 50ft, Range gates: pulsed diode, InGaAs MOCVD, Eye Safety: Class WM EN60825, Class 1 12CRF1040, Measurement cycle: programmable 15 to 120s, Automatic window heater and protection shield | simultaneously, Vertical profile of backscatter. Fog and cloud-base height | | | altitudes, Approved by the FAA | | | <i>T25K.html</i> |
| R2S-UMB | 24GHz Doppler Radar, Res up to 0.01mm/m ² | Watery backscattering | Comparison between the speed rate & the size of drops, the quantity of rain or its intensity | Data processing from UMB Lufft protocol | Rain/snow/snow- covered rain/freezing rain/hail is determined to the speed rate of the rain | | <i>LUFFT, Germany</i> | <i>LUFFT Products</i> |
| CHM-15k | Optical LIDAR Ceilometer | Aerosol / Clouds backscattering | Total cloud cover, cloud layers, cloud penetration depths, VOR, max. detection, range, quality index aerosol | Data telegram, aerosol backscatter profiles | Output interval, date, time, unit, sky condition index, status, range up to 5000ft | | <i>LUFFT, Germany</i> | <i>LUFFT Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|--|--|-----------------------|---------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| | | | layer, aerosol layer heights | | | | | |
| VS20 -UMB | Optical sensor | Forward light scattering, Visibility up to 3000m | | In situ | mainly for roads | | <i>LUFFT, Germany</i> | <i>LUFFT Products</i> |
| FMCW-94-SP / FMCW-94-DP | 92.3 – 95.7 GHz, Range res: 1 to 16m, Doppler res: +/- 1.5cm/s, 89 GHz passive channel integral LWP detection, Doppler cloud Radar, Doppler vel range +/- 9m/s Dual polar, Max range 10km | Watery Backscattering Targets, Additional sensors (station) [P, T, RH, RR, Snow, WS, WD] | Vertical velocity, Hydrometeor (with Dual polar) | Vertical LWC profiles | | | <i>RPG, Germany</i> | <i>RPG Products</i> |
| TAU-225 / TAU-225-350 | 225 / 225 & 350GHz | Radiometer | Atmospheric opacity (optical thickness) | In situ | For radio astronomy experiments | | <i>RPG, Germany</i> | <i>RPG Products</i> |
| DP-RR | 6 / 10 / 19 / 36GHz at two Orthogonal Dual polar | Rain radiometer | Rain Liquid water path, Cloud Liquid water path | In situ | | | <i>RPG, Germany</i> | <i>RPG Products</i> |
| DP-SR | 1.4/6/10/19/36/90 /150 GHz, at two Orthogonal Dual polar, | Surface radiometer | soil moisture, ocean salinity, surface snow, emissivity measurements | In situ | Planar 64 square patch array | | <i>RPG, Germany</i> | <i>RPG Products</i> |
| MWSC-160 | 160.8GHz, BW 0.45° FWHM | Scintillometer | Hydrology, Weather | | 0.5 to 10km | | <i>RPG, Germany</i> | <i>RPG Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--|---|---|--|---|---|--|--------------------------------|------------------------------------|
| | | | forecasting, Radiation | | | | | |
| HATPRO | Radiometer, 22-31 GHz (7 channel filter bank humidity profiler & LWP radiometer) & 51-58 GHz (7 channel filter bank temperature profiler), Optical resolution: 3.5° (2.5° HPBW at 22 (51) GHz, Radiometric resolution: 0.3 – 0.4 K RMS at 1.0 s integration time, Range 0 to 10km | Downwelling brightness temperatures | Vertical profiles of atmospheric temperature, vertical profile of atmospheric humidity (relative & absolute humidity), Liquid Water path (LWP), Integrated Water Vapor (IWV), wet delay, dry delay | Humidity & Temperature Profiler | Cloud LWP, PWV, atmospheric temperature | | <i>RPG, Germany</i> | <i>RPG Products</i> |
| E-600/700XD/700D P/750 (Military) | X Band Weather Radar (9.375 +/- 25 GHz), 360° rotation & 0-15° tilt, PRF 106Hz | Watery Backscattering, Lightning dispersion system, Lightning detection sensor system, Wind speed & direction, Real-time display of reflectivity, radial velocity | Vertical scanning capability for cell height study (RHI) | Distribute images via FTP, vertical wind profiles | Portable Doppler Radar, Dual polar, Range display (10,20,40,80,160 & 240 NM), spectrum width products with map backgrounds, Display of archived weather products (composite reflectivity, echo tops | | <i>EWR, USA</i> | <i>EWR Products</i> |
| OWI-650 LP-WIVIS | Scintillation with optical forward | Visibility/RVR Dynamic Range | Rain, freezing rain, snow, | | Portable (Military use) Present | | <i>OPTICAL SCIENTIFIC, USA</i> | <i>OPTICAL SCIENTIFIC Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--------------------------|---|---|--|-------------------------|--|--|--------------------------------|------------------------------------|
| | scatter & optional acoustic, Data Reporting Update Rate 1min | 0.001 to 10+ km, Ambient Light Dynamic Measurement Range 0 to 9,99 candles/m ² | freezing drizzle, mist, mixed, fog, haze, clear, hail & ice pellets | | Weather Type Identification | | | |
| OWI-432 | Optically measures precipitation induced scintillation & extinction coefficient | Visibility / RVR Dynamic Range 0.001 to 50+ km, Ambient Light Dynamic Measurement Range, 0 to 9,990 candles / m ² | Rain, snow, drizzle, mixed, hail & ice pellets, Additionally sensors: Temp/Humidity, Wind Speed/Direction, Cloud Height, Barometric Pressure | | Present Weather Sensor, applies algorithms to automatically determine the precipitation type, precipitation rate, & visibility | | <i>OPTICAL SCIENTIFIC, USA</i> | <i>OPTICAL SCIENTIFIC Products</i> |
| OWI-430 DSP-WIVIS | Scintillation with optical forward scatter & optional acoustic, Data Reporting Update Rate 1min | Visibility / RVR Dynamic Range 0.001 to 50+ km, Ambient Light Dynamic Measurement Range 0 to 9,990 candles / m ² , detects & quantifies rain, snow, drizzle, freezing & mixed precipitation conditions | Rain, snow, drizzle, mixed, hail & ice pellets | | Present Weather Type Identification | | <i>OPTICAL SCIENTIFIC, USA</i> | <i>OPTICAL SCIENTIFIC Products</i> |
| ORG-815-DS | Optical Rain Gauge (Optical Forward | True rain | | Hydrological profiling, | Working for airports, transportation | | <i>OPTICAL SCIENTIFIC, USA</i> | <i>OPTICAL SCIENTIFIC Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-----------------|--|--|------------------|-----------------------------------|--|--|--------------------------------|------------------------------------|
| | Scintillation), IR Beam, Rain Resolution 0.001 mm | | | research, or synoptic observation | authorities (such as state DOT's), businesses, municipalities, universities, research institutions, military, & other government agencies | | | |
| LOA-005 | Long-baseline Optical Anemometer, Optical scintillation, infrared beam, wind threshold 0.01 m/s, distances of 100 meters to over 10 km, Wind Range 0.01 to 40 m/s, Wind Path Length 0.1 to 10 Km | True path-averaged crosswind & turbulence remote measurement | | | For applications where wind field direction is also needed, two systems can be setup in an "X" pattern, Environmental: – Emergency response – Plume dispersion – Roof vent flows, Airport Safety: – Wake vortex – Runway crosswinds – Downdrafts / micro bursts, Weapons Testing: – Artillery trajectory -Laser propagation – Chemical dispersion, Micrometeorology: – Convergence /Divergence – Diffusion Studies | | <i>OPTICAL SCIENTIFIC, USA</i> | <i>OPTICAL SCIENTIFIC Products</i> |
| LAS MkII | Scintillometer, | Make local | Data processing, | | Meteorological | | <i>KIPP & ZONEN,</i> | <i>KIPP & ZONEN</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------|---|--|---|---|---|--|--|--------------------------------------|
| | 850nm, Scintillation Bandwidth 10e-17 to 10e-11, Carrier frequency 6.5 to 7.5 kHz (50% duty cycle), Range 100 m to 4.5km | measurements of the surface energy balance components, including evapotranspiration, structure parameter of the refractive index of air (Cn ²) | Internal processing of Cn ² , sensible heat flux & other parameter | | sensor kit Includes wind speed, temperature & pressure sensor | | <i>Netherlands</i> | <i>Products</i> |
| POM-01 | Sky radiometer, 315, 400, 500, 675, 870, 940, 1020 nm, Wavelength accuracy 2nm | Measurement modes Direct sun, zenith (cloud), azimuth scan, sun- disk, x-scan, Integrated: sun position sensor, rain sensor, adjustable st& for leveling | Multi-Band filter radiometer UV, Visible & NIR radiometer, second system with an Indium Gallium Arsenide infrared detector | In situ, software does not provide any post- processing or analysis of the ASCII data files | Measurement method Filter wheel, photo-diode detector, Sun tracker tripod base, sun sensor & rain sensor included, Multi-Band & spectral measurement of direct solar radiation, Multi-Band measurement of diffuse & scattered solar radiation, Temperature stabilized detection systems, UV- enhanced silicon photo-diode | | <i>KIPP & ZONEN, Netherlands</i> | <i>KIPP & ZONEN Products</i> |
| POM-02 | Sky radiometer, 315, 340, 380, 400, 500, 675, 870, 940, 1020, 1627 & | Measurement modes Direct sun, zenith (cloud), azimuth scan, sun- | Multi-Band filter Radiometer UV, Visible & extended NIR | In situ | UV-enhanced silicon & InGaAs photo- diodes, monitoring aerosols of larger size | | <i>KIPP & ZONEN, Netherlands</i> | <i>KIPP & ZONEN Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------------|---|--|--|--|---|--|--|--------------------------------------|
| | 2200nm, Wavelength accuracy 2nm | disk, x-scan, Integrated: sun position sensor, rain sensor, adjustable st& for leveling | radiometer, second system with an Indium Gallium Arsenide infrared detector | | at longer wavelengths, | | | |
| PGS-100 | Radiometer that uses a solid state spectrometer with a CCD detector array, 350nm to 1050nm, Wavelength accuracy 0.5nm | Measures the direct solar radiation | | In situ, software allows selection of the spectrum acquisition modes, graphically displays the results & stores the data for analysis | Solid-state grating spectrometer Visible & NIR, Silicon CCD array detector, Mounting kits are available for the Kipp & Zonen SOLYS 2 & 2AP sun trackers, used together with a thermopile type pyrheliometer & pyranometer(s), which measure the broadBand solar radiation | | <i>KIPP & ZONEN, Netherlands</i> | <i>KIPP & ZONEN Products</i> |
| Brewer MkIII | Spectrophotomete r, Dual spectrometer with low noise PMT detector, Resolution 0.6nm, 286.5 nm to 363 nm, Wavelength stability 0.01 nm (over full temperature | Total column measurement Ozone & Sulphur Dioxide, UV measurement Spectral, plus UVA, UVB, UVE, UVI | Ozone & SO ₂ measurement wavelengths 303.2, 306.3, 310.1, 313.5, 316.8 & 320.1 nm; direct sun view through UV-quality quartz window: measurement cycle time 1.6s | In situ | Automatic total column Ozone & Sulphur Dioxide observations Reference quality spectral Ultraviolet radiation measurements UVA, UVB, UVE & UV Index | | <i>KIPP & ZONEN, Netherlands</i> | <i>KIPP & ZONEN Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|---|---|---------|------------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------|
| | range) | | | | | | | |
| AERI / P-AERI / ASSIST | Atmospheric Emitted Radiance Interferometer, 520–3,020 cm^{-1} (3.3–19.2 μm), 0.5 cm^{-1} unpolar res., <1 min time res | Downwelling spectral infrared radiance | Cloud phase & microphysics, atmospheric temperature | | Passive remote sounding instrument | | <i>University of Idaho, USA</i> | <i>ARM INSTRUMENTS</i> |
| Ceilometer | 905-nm wavelength, 15-m vertical res., 15-s time res. | Backscatter | Cloud-base height | Profile | | | <i>DOE ARM, USA</i> | |
| MPL | Micropulse Lidar, 532-nm wavelength, 5 s time res., 15 m vertical res., 2° to 4° off zenith | Relative backscatter, hybrid linear–circular depolarization ratio | Cloud-base height, phase, microphysics | | | | <i>DOE ARM, USA</i> | <i>ARM Instruments</i> |
| POSS | Precipitation Occurrence Sensor System, Bistatic, X-band, Doppler radar X-Band (10.5 GHz), 1 min time res., single volume near surface | Reflectivity, Doppler spectra | Precipitation rate | In situ | | | <i>Environment, Canada</i> | <i>McGill Facilities</i> |
| CAPABL | 523nm wavelength, 15-s time res., 30-m vertical res., three- | Backscatter, linear depolarization ratio, diattenuation | Cloud-base height, phase, microphysics | | | | <i>NOAA / ESR, USA</i> | |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------------|---|---|--|---------|---|--|---|---|
| | channel receiver, 2°–11° off zenith | | | | | | | |
| Sodar | Sonic Detection And Ranging, 2100Hz, <1-m vertical res., 1-s time res. | Reflectivity | Boundary layer depth | | | | NOAA / ESRL, USA | http://www.epa.gov/scram001/guidance/met/mmgrma.pdf |
| MMCR | Millimeter wavelength Cloud Radar, Ka Band (34.86GHz), 8mm wavelength, 2s time res., 45m vertical res., max Duty cycle 25%, PRF max 20KHz, PW 0.3/0.6μs | Reflectivity, mean doppler velocity, doppler spectrum width, doppler spectra | Cloud boundaries, phase, microphysics; cloud-scale dynamics | | | | NOAA Earth System research Laboratory (ESRL), USA | ARM Instruments |
| S-Band radar | S-Band, dual-polarization | Backscattering Radar, Data are collected at 24 elevations angles (from 0.5° to 34.4°) every 5 min | Automated algorithms of weather detection & identification, Combination of pulse repetition frequencies in order to maximize the range for which reflectivity & velocity information can be obtained | Profile | Dual-polarization information is obtained by transmitting at a 45° polarization, & receiving horizontally & vertically polarized waves simultaneously | | McGill, Canada | McGill Facilities |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------------|--|--|--|--|--|--|-----------------------|--------------------------|
| VPR / VertiX | Precipitation echoes at high resolution, X-Band vertically pointing radar (VertiX) | Detect all precipitation targets, ice clouds & turbulence associated with developing cumulus clouds (barely), capable of measuring the Doppler velocity of targets | | Detailed radar images of weather as it passes overhead | VertiX is a boat radar transmitter-receiver, parabolic antenna, locally developed data collection system | | <i>McGill, Canada</i> | <i>McGill Facilities</i> |
| VHF profilers | 30–300 MHz radars (52 MHz, 40 to 55 MHz will help avoid the problems related to signal contamination due to birds & insects) | Detect echoes from irregularities of radio refractive index caused by fluctuations in temperature, humidity, & fluctuations in electron density (through Bragg scattering) | Precipitating particles (through Rayleigh scattering) | Vertical profiles of three component (U,V, W) of wind, in the troposphere & lower stratosphere , vertical profiles of DSD (drop size distribution) | Studying the dynamics of the atmosphere, 2-way beam halfwidth of 1.6° (one Doppler beam) | | <i>McGill, Canada</i> | <i>McGill Facilities</i> |
| UHF Profilers | UHF wind profiler radar, Doppler | High resolution measurements of wind, turbulence, & echo strength in a vertical column above the radar site, targets include: rain, | Doppler shift of the echoes in each direction are compared to determine the wind speed & direction | Profile | Wind measurements are made typically by pointing the radars antenna beam in 3 (or sometimes 5) different directions, profiler can also | | <i>McGill, Canada</i> | <i>McGill Facilities</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------|--|--|---|-----------------------|--|--|------------------------------|-----------------|
| | | snow, & turbulent fluctuations of the clear air | | | occasionally see birds & insects & even smoke plumes, profiler can also measure temperature using a Radio Acoustic Sounding System (RASS), in which sound waves are emitted & tracked by the radar, Speed of the sound waves is related to air temperature | | | |
| MWRHF | Microwave radiometer high freq., Frequencies: 90, 150 GHz, 2–4 s time res. | Downwelling brightness temperatures | Cloud LWP, PWV | | | | University of Wisconsin, USA | ARM Instruments |
| MWRHF | Microwave radio high freq., Frequencies: 90, 150 GHz, 2–4-s time res. | Downwelling brightness temperatures | Cloud LWP, PWV | | | | University of Wisconsin, USA | ARM Instruments |
| C-SARP | C-Band dual-polarization Doppler weather radar, simultaneous transmit & receive (STAR) mode, | Linear depolarization ratio (LDR), reflectivity, radial velocity & spectra width | Differential reflectivity, correlation coefficient, & specific differential phase | Zenith cloud profiles | Provision to provide estimates of rainfall rates & identification of precipitation types | | ARM, USA | ARM Instruments |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------|--|---|---------------------------------|-----------------------------|--|--|----------|-----------------|
| | 6.25GHz, 200ns to 2μs, PRF 200Hz to 2.7kHz | | | | | | | |
| KASACR | Fully coherent dual-frequency, dual-polarization Doppler radar, X-Band: 9.7GHz, PW 100ns to 40μs, PRF max 10 kHz / Ka-Band: 35.3GHz, PW 50ns to 13μs, PRF up to 10KHz / W-Band: 94.0GHz, PW 50ns to 2μs, transmit horizontal linear polar, PRF up to 20kHz | Co-polar & cross-polar radar reflectivity, Doppler velocity, spectra width & spectra when not scanning, Linear depolarization ratio | | Zenith cloud profiles | Deployment location determines whether the second radar is a W-Band (1.7 kW peak power) or X-band & (20 kW peak power) | | ARM, USA | ARM Instruments |
| KAZR | Zenith-pointing Doppler radar, 35GHz, res of approximately 30m from near-ground to nearly 20km in altitude, 35GHz, PW 100ns to 20μs, PRF max 20kHz, Duty cycle 25% | Doppler moments (reflectivity, vertical velocity & spectral width) | Ability to study cloud dynamics | Vertical profiles of clouds | Doppler cloud radar | | ARM, USA | ARM Instruments |
| MWARC | 95GHz | Doppler, Radar reflectivity | | | MarineWARC radar | | ARM, USA | ARM Instruments |
| RWP | 915MHz, Doppler | Backscattered signal | Horizontal wind | Wind | The second ARM | | ARM, USA | ARM Instruments |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--------------|--|--|---|---|---|--|----------|-----------------|
| | shifts | strength between (nominally) 0.1 km & 6 km | field can be derived | profiler | Mobile Facility (AMF2) has a 1290MHz system capable of changing the beam-pointing angle on a pulse-by-pulse basis so that it can compensate for ship motions when deployed at sea | | | |
| SWACR | 95GHz, Doppler | Backscattered signal strength | Boundary-layer Range-Height Indicator scan, Cross-Wind Range-Height Indicator scan, Horizon-to-horizon Range-Height Indicator | Velocity-Azimuth Display scan, Vertical Pointing scan - Profile | Cloud Radar, filtered spectral data, co-polarized mode, filtered spectral data, cross-polarized mode | | ARM, USA | ARM Instruments |
| WACR | Zenith pointing Doppler radar, 95.04GHz, only co-polarization & cross-polarization modes, Duty cycle 0.1%, PRF max 20kHz, PW 0.3μs | Reflectivity, radial velocity & spectral width | determine cloud boundaries (e.g., cloud bottoms & tops), spectra, power, Doppler velocity & spectral width are calculated | Raw spectra files | Up to 15 km, extent and composition of clouds | | ARM, USA | ARM Instruments |
| WSACR | Fully coherent dual-frequency, dual-polarization Doppler, deployment | Co-polar & cross-polar radar reflectivity, Doppler velocity, spectra width & spectra | | Zenith cloud profiles | Polarimetric Doppler Radar consisting of three different radar | | ARM, USA | ARM Instruments |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--------------|--|---|---|-----------------------|---|--|----------|-----------------|
| | location determines whether the second radar is a W-band (1.7 kW peak power) or X-band (20 kW peak power), X-Band: 9.7GHz, PW 100ns to 40μs, PRF max 10 kHz / Ka-Band: 35.3GHz, PW 50ns to 13μs, PRF up to 10KHz / W-Band: 94.0GHz, PW 50ns to 2μs | when not scanning & linear depolarization ration | | | | | | |
| XSACR | Fully coherent dual-frequency, dual-polarization Doppler radar, Ka-Band, deployment location determines whether the second radar is a W-band (1.7 kW peak power) or X-band (20 kW peak power), X-Band: 9.7GHz, PW 100ns to 40μs, PRF max 10 kHz / Ka-Band: | Co-polar and cross-polar radar reflectivity, Doppler velocity, spectra width & spectra when not scanning, | Differential Reflectivity (Zdr), correlation coefficient (rho-hv) & specific differential phase (phi-dp). | Zenith cloud profiles | Polarimetric Doppler radar consisting of three different radar, will operate more like a weather (precipitation) radar in deployments where local weather radar coverage is lacking | | ARM, USA | ARM Instruments |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--------------|--|--|---|---|---|--|-----------------|------------------------|
| | 35.3GHz, PW 50ns to 13μs, PRF up to 10KHz / W-Band: 94.0GHz, PW 50ns to 2μs | | | | | | | |
| XSAPR | Dual-polarization Doppler weather radar, simultaneous transmit & receive (STAR) mode, 9.35 to 9.45GHz, PW 200ns to 2μs, Max Duty cycle 0.1%, PRF 200Hz to 2.7kHz | Three Doppler moments (reflectivity, radial velocity, and spectra width) | Differential reflectivity, correlation coefficient, and specific differential phases | Zenith cloud profiles | Estimates of rainfall rates and identification of precipitation types | | <i>ARM, USA</i> | <i>ARM Instruments</i> |
| DL | Doppler Lidar, near-IR (1.5 microns) | Attenuated backscatter, Range & time resolved measurements of radial velocity & attenuated backscatter, wind velocities under clear-sky conditions | Micron-sized aerosols, Full upper-hemispheric scanning capability, enabling the 3D mapping of turbulent flows in the atmospheric boundary layer | 3D mapping of turbulent flows in the atmospheric boundary layer | Heterodyne detection technique, in which the return signal is mixed with a reference laser beam (i.e. local oscillator) of known frequency, on-board signal processing computer | | <i>ARM, USA</i> | <i>ARM Instruments</i> |
| HSRL | High Spectral resolution Lidar | Measurements are computed from ratios of the particulate | Aerosol optical depth, volume backscatter coefficient, cross | | Narrow optical bandwidth, nearly eliminates noise due to scattered sunlight | | <i>ARM, USA</i> | <i>ARM Instruments</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-------------|--|--|---|--|---|--|----------|-----------------|
| | | scattering to the measured molecular scattering | section, & depolarization | | | | | |
| RL | Raman Tripled Nd:YAG Lidar, Tx 355nm unpolar, Rx: 408nm/ 387nm Nitrogen/ 353nm Temp/ 355nm Temp, PRF 30Hz, 61cm diameter telescope, 0.3mrad NFOV 2mrad WFOV (~0.4 nm bandpass) | Simultaneous photon counting & analog w/7.5m range resolution, Photon Count Rate | | Vertical profiles of water-vapor mixing ratio & several cloud & aerosol related quantities | | | ARM, USA | ARM Instruments |
| CEIL | Near-infrared pulses | Light scattered, Cloud-base height, vertical visibility, & potential backscatter signals by aerosol | Detects up to three cloud layers simultaneously, planetary boundary-layer heights | Profile | Max vertical range 7700m | | ARM, USA | ARM Instruments |
| LDIS | Parsivel2 laser disdrometer at 780nm | measures the reduction of total signal as a hydrometeor passes through a horizontally oriented fan-shaped laser-beam | observations of the particle size distribution over the range of 0.06mm to 24mm and classify precipitation type | In situ | spread out over a beam 30mm wide, classification into 32 size/type classes specified by WMO, fall velocity, precipitation rate, moments of the hydrometeor size | | ARM, USA | ARM Instruments |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | distribution | | |
|--------------|---|---|---|-------------------------|---|--|---|
| PASS | Photoacoustic (microphone) Soot Spectrometer (PASS-3), laser at 781nm (Red), 532nm(Green), 405nm(Blue) | The laser power is measured with the integrating sphere/ photodetector | Photoacoustic method for light absorption (Babs) and integrated nephelometry for light-scattering (Bscat) | In situ | Auxiliary Parameters: Temperature, Pressure, Relative Humidity, Dew Point Temperature | | <i>ARM, USA</i> <i>ARM Instruments</i> |
| UHSAS | ultra-high sensitivity aerosol spectrometer, high-powered near infrared laser | illuminate the aerosol sample volume and collects and measures the scattered radiation over a large solid angle | resolve the size distribution between 55 nanometers and 3000 nanometers in 100 size-bins | In situ | | | <i>ARM, USA</i> <i>ARM Instruments</i> |
| AIR | Atmospheric Imaging Radar, transmission of a vertical fan beam 20 degrees in elevation, 9.55GHz (X-band), Wavelength: 3.14cm, PW 1-15μs, PRF 1-2000Hz, Duty Cycle 2%, Pulse Bandwidth 5MHz, Rotation Rate: Up to 20° sec ⁻¹ , Range Res: | Backscattering Radar | High temporal convective storm analysis | Profile – Imaging Radar | Rapid scanning tornado scale radar platform | | <i>OKLAHOMA UNIVERSITY, USA</i> <i>OKLAHOMA UNIVERSITY RADAR SYSTEMS</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------|--|----------------------|--|---------|--|--|---------------------------------|--|
| | 150 m (Short Pulse) 30 m (With Pulse Compression), Horizontal polar | | | | | | | |
| RaXPoI | Rapid X-band Polarimetric Radar, 9.73GHz (X-band), Wavelength: 3.08cm, PW 0.1 to 40μs, PRF 1 to 10KHz, Automatic frequency hopping mode for independent sampling during rapid-scan, Rotation rate: Up to 180°/s in azimuth Up to 36°/s in elevation, Simultaneous dual-polar, Receiver bandwidth: 0.5 to 40MHz, volume scan to be completed 20s | Backscattering Radar | | Profile | A versatile platform to support a wide variety of meteorological, engineering & educational investigation of the atmosphere, radar systems & signal processing, truck based platform | | <i>OKLAHOMA UNIVERSITY, USA</i> | <i>OKLAHOMA UNIVERSITY RADAR SYSTEMS</i> |
| PX-1000 | Polarimetric X-band 1000, Dual-channel | Backscattering Radar | | Profile | Transportable, solid-state, polarimetric (independent H/V | | <i>OKLAHOMA UNIVERSITY, USA</i> | <i>OKLAHOMA UNIVERSITY RADAR SYSTEMS</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------|--|----------------------|---|---------|---|--|---------------------------------|--|
| | independent transmit, 9.55GHz (X-band), Wavelength: 3.14cm PW 1-70μs, PRF 1-2000Hz, Rotation rate up to 50° sec ⁻¹ , Receiver bandwidth 5 MHz | | | | channels) radar | | | |
| CPPAR | Cylindrical Polarimetric Phased Array Radar, 2.9GHz (S-band), Wavelength: 10.34cm, PW 1-100μs, Max Duty Cycle: 15% Max Pulse Bandwidth: 20MHz, Dual Linear polar | Backscattering Radar | | Profile | Capable of maintaining broadside polarimetric purity at all azimuthal pointing angles, Sensitivity Without Pulse Compression: 20 dBZ at 10km With Pulse Compression: 20 dBZ at 50km | | <i>OKLAHOMA UNIVERSITY, USA</i> | <i>OKLAHOMA UNIVERSITY RADAR SYSTEMS</i> |
| PLUVIAN | High resolution polarimetric Doppler FM-CW weather radar, X-band | Backscattering Radar | Precipitation monitoring & estimation, Precipitation categorization & classification, Urban flood avoidance | Profile | Real-time information, fully polarimetric features & advanced processing algorithms improve the hydrometeors | | <i>METASENSING, Netherlands</i> | <i>METASENSING Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-------------------------|--|---|---|------------|--|--|--------------------------|--------------------------------------|
| | | | | | categorization & the clutter suppression, resulting in accurate rainfall estimates in urban areas | | | |
| METEOR 700C/735C | high-powered C-Band weather radar, 5.43 – 5.8GHz, PW 0.5 to 3.5 μ s, 250 to 2400Hz, Operational Range / 200 km / 600 km Technical Range Doppler, Dual-Polar, Superheterodyne, dual downconversion receiver, 3D | Backscattering radar, categorization of different types of hydrometeor such as drizzle, rain, hail & snow | Standard Radar Meteorological Products PPI, MPPI, RHI, CAPPI, PseudoCAPPI, MCAPPI, MAX, VCUT, MVCUT, EHT | 3D profile | Categorization of different types of hydrometeor such as drizzle, rain, hail & snow | | <i>SELEX ES, Germany</i> | <i>SELEX ES METEOROLOGY Products</i> |
| METEOR 1700C | high-powered C-Band weather radar, dual polar option (Horizontal / Horizontal and vertical), 5.6 to 5.65GHz, PW 0.4 to 4.5 μ s, 250 – 2000Hz, Operational Range / 200 km / 600 km | Backscattering Radar | Standard Radar Meteorological Products PPI, MPPI, RHI, CAPPI, Pseudo CAPPI, MCAPPI, MAX, VCUT, MVCUT, EHT | 3D profile | weather detection and warning in clutter-polluted environments, precise detection and tracking of thunderstorms, wind shear, gust fronts and other severe weather phenomena at medium ranges | | <i>SELEX ES, Germany</i> | <i>SELEX ES METEOROLOGY Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------------|--|--|---|------------|--|--|--------------------------|--------------------------------------|
| | Technical Range, 8 rpm, 3D | | | | | | | |
| METEOR 700S | high-powered S-Band weather radar, single or dual polar, Doppler, 2.7 to 2.9GHz, PW 0.5 to 3.3μs, PRF 250 – 2000Hz, Operational Range / 400 km / 600 km Technical Range, Superheterodyne, dual downconversion Receiver, Min Processing Res 15m, 3D | Backscattering Radar | Standard Radar Meteorological Products PPI, MPPI, RHI, CAPPI, Pseudo CAPPI, MCAPPI, MAX, VCUT, MVCUT, EHT | 3D profile | precise detection and tracking of thunderstorms, mesoscale convective systems and other severe weather phenomena in tropical regions, categorization of different types of hydrometeor such as drizzle, rain, hail and snow. | | <i>SELEX ES, Germany</i> | <i>SELEX ES METEOROLOGY Products</i> |
| METEOR 1700S | high-powered S-Band weather radar system, single or dual polar (Horizontal / Horizontal and vertical), Doppler, 2.7 to 2.9GHz, PW 0.4 – 4.5μs, PRF 250 to 2000 Hz, Operational Range / 400 km / 600 km Technical Range, | Backscattering Radar, precipitation at long ranges, detection and tracking of thunderstorms, wind shear and other severe weather phenomena in tropical regions | Standard Radar Meteorological Products PPI, MPPI, RHI, CAPPI, PseudoCAPPI, MCAPPI, MAX, VCUT, MVCUT, EHT | 3D profile | categorization of different types of hydrometeor such as drizzle, rain, hail and snow | | <i>SELEX ES, Germany</i> | <i>SELEX ES METEOROLOGY Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--------------------|--|---|--|------------|---|--|--------------------------|--------------------------------------|
| | Superheterodyne, dual downconversion receiver, 3D | | | | | | | |
| METEOR 60DX | highly sensitive X-Band weather radar, Doppler, 9.3 to 9.5GHz, PW 0.3 to 3.3μs, PRF 250 to 3000Hz, Operational Range / 100 km / 600 km Technical Range, 3D, Dual polar Horizontal & vertical | Backscattering Radar, precipitation intensity | Hydrometeor classification, Standard Radar Meteorological Products PPI, MPPI, RHI, CAPPI, PseudoCAPPI, MCAPPI, MAX, VCUT, MVCUT, EHT | 3D profile | Mounted on a trailer, Weather surveillance and tracking Severe weather indication Hydrological forecasting (e.g. flood forecasting), Wind shear detection at airports | | <i>SELEX ES, Germany</i> | <i>SELEX ES METEOROLOGY Products</i> |
| RAINSCANNER | 9410 (± 30 MHz) or 9375 (± 30 MHz), PRF 833 to 1500Hz, PW 1200 to 500ns, Pulse Length (Resolution) 180 to 75m, 12 rpm | Backscattering Radar, detection of rainfall intensity at short ranges | | Profile | | | <i>SELEX ES, Germany</i> | <i>SELEX ES METEOROLOGY Products</i> |
| SHEARSCOUT | combining one or more of the following meteorological sensors: LLWAS Weather Radar, Doppler Lidar, Dual polar | | | Profile | combines dual polarized Doppler radar and Doppler Lidar technologies to issue alerts of runway orientated shear and adverse | | <i>SELEX ES, Germany</i> | <i>SELEX ES METEOROLOGY Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------|--|--|---|---------|---|--|------------------|-----------------------|
| | | | | | weather in wet and dry conditions. | | | |
| VPF-710 | Visibility sensor, 10m to 75Km, Forward scatter meter with 39° to 51° Angle, Measurement Error 2% at 2,000m | | Suited for use in Runway Visual Range (RVR) | In situ | Unaffected by obstacle warning lights, Easy integration of Biral ALS-2 Ambient Light Sensor, measurement range, the latest generation of IR obstacle lights are not a problem | | <i>BIRAL, UK</i> | <i>BIRAL Products</i> |
| VPF-510 | Visibility sensor, 10m to 75Km, Forward scatter meter with 39° to 51° Angle, Measurement Error 2% at 2,000m/ 6% at 15km/ 10% at 20Km | Report Meteorological Optical Range (MOR) or Extinction coefficient (EXCO) | | In situ | Suited to offshore & marine applications | | <i>BIRAL, UK</i> | <i>BIRAL Products</i> |
| SWS-100 | Visibility sensor, 10m to 75km, Forward scatter meter with 39° to 51° angle, centered at 45°, Output rate: 10 to 300s | | Monitors visibility & obstruction to vision caused by dust, fog, rain, drizzle, snow & hail | In situ | Not be influenced by local lights sources, even those that flash, Relay 1 = Fault Relay 2 = visibility (user selectable value) Relay 3 = | | <i>BIRAL, UK</i> | <i>BIRAL Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-----------------|--|--|---|---------|--|--|------------------|-----------------------|
| | | | | | precipitation yes/no or snow yes/no or visibility (user selectable) | | | |
| SWS-10LW | Visibility sensor, 10m to 75km, Forward scatter meter with 39° to 51° angle, centered at 45°, Output rate: 10 to 300s | Visibility (MOR) | | In situ | Low power, light weight sensor, For use in aviation applications the sensor can optionally be fitted with an interface to the ALS-2 Ambient Light Sensor | | <i>BIRAL, UK</i> | <i>BIRAL Products</i> |
| SWS-050 | Visibility sensor, 10m to 40km, Forward scatter meter with 39° to 51° Angle, Output rate: 10 to 300s | Visibility (MOR) & Extinction Coefficient (EXCO) | | In situ | Use in road & aviation applications as well as meteorological observation networks, not to be influenced by local lights sources, even those that flash. | | <i>BIRAL, UK</i> | <i>BIRAL Products</i> |
| VPF-750 | Visibility & Present Weather Sensor, 10m to 75Km, Forward scatter meter with 39° to 51° Angle, Output rate: 10 to 300s | | Distinguishing frozen from liquid precipitation, with the added advantage of identifying freezing precipitation | In situ | reporting of freezing precipitation in addition to the weather codes typically available from a forward scatter sensor, Unaffected by obstacle warning | | <i>BIRAL, UK</i> | <i>BIRAL Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------|--|---|---|---------|---|--|------------------|-----------------------|
| | | | | | lights Easy integration of Biral ALS-2 Ambient Light Sensor, designed for use in aviation applications | | | |
| VPF-730 | Visibility & Present Weather Sensor, 10m to 75Km, Forward scatter meter with 39° to 51° Angle, Output rate: 10 to 300s | | Distinguishing frozen from liquid precipitation | In situ | Present & Past weather conditions Unaffected by obstacle warning lights, Easy integration of Biral ALS-2 Ambient Light Sensor | | <i>BIRAL, UK</i> | <i>BIRAL Products</i> |
| SWS-250 | Visibility & Present Weather Sensor, 10m to 75Km, Forward scatter meter with 39° to 51° Angle, Output rate: 10 to 300s | Visibility (MOR, EXCO and TEXCO) | Fog, haze, drizzle, snow, hail and other non-frozen precipitation | In situ | Identifies a wide range of present & past weather conditions, Easy integration of the Biral ALS-2 ambient light sensor | | <i>BIRAL, UK</i> | <i>BIRAL Products</i> |
| SWS-200 | Visibility & Present Weather Sensor, 10m to 75Km, Forward scatter meter with 39° to 51° Angle, Output rate: 10 to 300s | Instantaneous and averaged visibility outputs | Meteorological Optical Range (MOR) as well as reporting the presence of liquid & frozen precipitation | In situ | Optional interface to the ALS-2 Ambient Light Sensor, Aviation applications | | <i>BIRAL, UK</i> | <i>BIRAL Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---|---|--|--|---|--|------------------------------|-----------------------------------|
| SWS-200LW | Low Power Visibility & Present Weather Sensor, 10m to 75Km, Forward scatter meter with 39° to 51° Angle centered at 45°, Output rate: 10 to 300s | Visibility | MOR, fog, haze, drizzle, rain, snow and general precipitation | In situ | Compatible with ALS- 2 Ambient Light Sensor | | <i>BIRAL, UK</i> | <i>BIRAL Products</i> |
| SODAR PCS2000- 64 | Doppler SODAR (Sonic Detection And Ranging), 1500 to 2600Hz 2000 to 2200Hz, Horizontal wind speed ±50 m/s / Vertical >10m/s, 0 to 360°, Integration time: 600-1800s. Min 10s or More, min height 15m, max height >1500m, BW 7-12° | Back scattered sound signals | | Vertical profiles of the horizontal wind vector and turbulence in the lower parts of the atmosphere | | | <i>BIRAL (METEK), UK</i> | <i>BIRAL (METEK) Products</i> |
| RASS for SODAR PCS2000 | RASS (Radio Acoustic Sounding System) addition to the SODAR PCS2000, Linear polar, 1290 MHz ± | Scattering of vertically emitted radio waves at vertically emitted acoustic waves, Atmospheric | Detection of inversion heights & quantitative measurements of the inversion strength on the | Vertical profile of the virtual temperature | Used with SODAR PCS2000 | | <i>BIRAL (METEK), UK</i> | <i>BIRAL (METEK) Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------|--|--|--|---------------------|---|--|--|---|
| | d MHz (d to be specified by the customer), CW, BW 5MHz | temperature stratification | basis of the temperature gradients | | | | | |
| LPM | Laser Precipitation Monitor, 785nm | Amount, intensity & type of precipitation | Discriminate drizzle (DZ), freezing drizzle (FZDZ), rain (RA), freezing rain (FZRA), hail (GR), snow (SN), snow grains (SG), ice needles (IC), soft hail (GS), ice grains (PL) | In situ | | | <i>BIRAL (Adolf Thies GmbH & Co. KG), UK</i> | <i>BIRAL (Adolf Thies GmbH & Co. KG) Products</i> |
| CBME80B | Cloud Ceilometer, Range 0 – 7,500 m / 0 – 25,000 ft, Accuracy Greater of ±10 m, Reporting interval Periodic (15 – 120 s) | Based on LIDAR principle | Cloud height (up to 3 layers) or vertical visibility Cloud amount / sky condition | Backscatter profile | | | <i>BIRAL (ELIASSON ENG), UK</i> | <i>BIRAL (ELIASSON ENG) Products</i> |
| AOT-100 | Aerosol Optical Tweezers, Particle radius 3µm to 10µm, Particle geometry: Spherical (outer shell), Particle | Holding particles in an optical trap enables many different parameters to be studied continuously over | | In situ | trapping and holding aerosol particles for extended study, Particles held in a highly focused laser trap, Simultaneous trapping of multiple | | <i>BIRAL, UK</i> | <i>BIRAL Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--------------------|--|---|---|---------|--|--|-----------------------------|-----------------------------|
| | material: Transparent to 532nm light, Number of particles trapped simultaneously 1 to 4, Particle size resolution 1nm, Real refractive index 0.05% accuracy, Raman spectral resolution 0.037nm at 650nm, time resolution <1s | times varying from milliseconds to hours | | | particles | | | |
| OFS 250 | Fog Sensor ONED, narrow beam of red laser light (650nm), limit of 5Km, samples from about one minute are taken | Backscatter technique, amount of water particles i.e. fog in the air that limit the visibility | | | Visibility sensor, digital output provides values up to 10Km visibility but with less accuracy than the one of 5Km | | <i>EIGENBRODT, Germany</i> | <i>EIGENBRODT Products</i> |
| Distrometer | Laser precipitation monitor, 785 nm, Particle size 0,1 to > 8 mm, Particle velocity: 0,2 to 20m/s, Visibility precipitation MOR 0 to 10Km | Optical laser basing measuring principle, amount, intensity particle size & the velocity of precipitation | Discriminates the different arts of precipitation as drizzle, rain, hail, snow, snow grains, graupel (small hail / snow pellets), & ice pellets, calculates the | In situ | Typical applications at meteorological applications, Hydrology, traffic control, scientific examination, airport weather monitoring systems, Adjustment of | | <i>THIES CLIMA, Germany</i> | <i>THIES CLIMA Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|----------------------|--|---------|-----------------------|--|-----------------|---------------------|
| | | | intensity, volume (water equivalent) & the precipitation spectrum (diameter & velocity) as well as the meteorological visibility (MOR) in the rain & the radar reflectivity (Z) | | weather radar systems | | | |
| DEFENDER C250/C350/C500 | 5.2 to 5.9GHz/5.4 to 5.9GHz, PW: 0.2 to 2μs/0.2 to 3μs, Range res. 16m, PRF 200 to 2400Hz, Range 600Km, max vel. 128m/s, Single Polar - Linear Horizontal, Dual-Polarization - Linear Horizontal/Vertical , up to 10rpm | Backscattering Radar | | Profile | | | <i>EEC, USA</i> | <i>EEC Products</i> |
| DEFENDER C1000/CK250 | 5.4 to 5.9GHz/5.6 to 5.65GHz, PW 0.2 to 3μs/0.4 to 0.45μs, Range res. 16m, PRF 200 to 2400Hz, max vel. | Backscattering Radar | | Profile | | | <i>EEC, USA</i> | <i>EEC Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---|---|-------------------------|--|---------|-----------------------|--|-----------------|---------------------|
| | Up to 128m/s, Single Polarization - Linear Horizontal Dual-Polarization - Linear Horizontal/Vertical , up to 10rpm, Range 600Km | | | | | | | |
| DEFENDER S850/S1000/SK85 0/SK1000H | 2.7 to 3GHz/3.5 to 3.6GHz, PW 0.2 to 2μs/0.4 to 0.45μs, Range res. 16m, PRF 200 to 2400Hz, Max vel. 256m/s, up to 10rpm, Range 600Km, Dual polar | Backscattering Radar | | Profile | | | <i>EEC, USA</i> | <i>EEC Products</i> |
| DEFENDER X200 | 8.5 to 9.6GHz, 0.2 to 2μs, Range res. 16m, PRF 200 to 2400Hz, Range 600Kmmax vel. 64m/s, up to 10rpm, Linear Horizontal Feed Horn Dual-Polarization Linear Horizontal/Vertical | Backscattering Radar | Discrimination between different types of precipitation and non- meteorological signals such as birds, insects, dust storms, or even the debris field of an approaching tornado | Profile | | | <i>EEC, USA</i> | <i>EEC Products</i> |
| RANGER X1/X5 | 9.2 to 9.7GHz, 0.4 | Backscattering | estimates of | Profile | Supports land, sea, & | | <i>EEC, USA</i> | <i>EEC Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-------|---|---|--|---------------|--|--|--------------|------------------|
| | to 100μs, PRF 100 to 2500Hz, max vel. 64m/s, Dual Polarization Orthogonal Feed (Simultaneous H + V) | technique | rainfall, discrimination between different types of precipitation & non-meteorological signals such as birds, insects, dust storms, or even the debris field of an approaching tornado | | air deployment environments, Applications: offshore oil platforms, rapid deployment, regional airports, water management | | | |
| PA-XS | Acoustic Wind profiler, Up to 9 emitted frequencies on each of two coplanar beams, central freq. 6.7KHz, average altitude range: 400m min alt: 10 m | Acoustic wave velocity, Pressure/ temperature/ humidity measurements are included | | Wind profiler | It interconnects with the Sodar through WiFi at a distance of up to a one hundred meters | | REMTECH, USA | REMTECH Products |
| PAO | Acoustic Wind profiler, Up to 9 emitted frequencies on each of two coplanar beams, central freq. | Acoustic wave velocity, Pressure/ temperature/ humidity measurements are included | | Wind profiler | It interconnects with the Sodar through WiFi at a distance of up to a one hundred meters | | REMTECH, USA | REMTECH Products |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------|---|----------------------|--|---------|--|--|----------------------|------------------------|
| | 3.6KHz, average altitude range: 700m min alt: 20m | | | | | | | |
| WR-2100 | Dual polarimetric (Vertical and Horizontal), simultaneously transmitted/received, 9.4GHz, BW 2.7°, 3D, 16RPM, Max range 50Km, Doppler | Backscattering Radar | Reflectivity factor Zh (dBZ), Doppler velocity V (m/s), Doppler velocity width W (m/s), Cross polarization difference phase ϕ_{dp} (deg), Specific differential phase KDP (deg/km), Correlation coefficient between two polarizations ρ_{HV} , Differential reflectivity factor ZDR, Rainfall intensity R (mm/h) | Profile | Outputs dual polarimetric Doppler information (Zdr, Kdp) for computing diameter of precipitation particles as well as discriminating types of precipitation (rain, snow, etc.), 3D scan to observe the vertical structure of a cumulonimbus, Suitable for localized meteorological monitoring as well as for monitoring of short localized rainstorm, when networked into "Multi-Radar System" | | <i>FURUNO, Japan</i> | <i>FURUNO Products</i> |
| WR-50 | Horizontal polar, 9GHz band, BW 5°, 3D, 16RPM, max range 30Km | Backscattering Radar | Reflectivity factor Zh (dBZ), Doppler velocity V (m/s), Rainfall intensity R (mm/h) | Profile | Outputs movement velocity of nimbus and detects hoH2ontai movement of nimbus at a fast rate | | <i>FURUNO, Japan</i> | <i>FURUNO Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-------------------------|--|-------------------------|---|---------|--|--|--|--|
| ULM S Band Radar | 2.7-2.9 GHz (10 cm @ 2.7 GHz), PW 0.8 to 4.0μs, BW 0.95° | Backscattering Radar | | Profile | Made at latest of 2015 and waiting for FAA approval | | <i>ULM (Enterprise Electronics Corporation (EEC USA), GERMANY</i> | <i>ULM (Enterprise Electronics Corporation (EEC USA)), GERMANY</i> |
| WSR-88D | 2.7-3.0 GHz (10.71 cm), 1.57 & 4.57μs, BW 1° | Backscattering Radar | | Profile | | | <i>ULM (Enterprise Electronics Corporation (EEC USA)), GERMANY</i> | <i>ULM (Enterprise Electronics Corporation (EEC USA)), GERMANY</i> |
| MAX | X-Band (9450 MHz), Dual polar (H+V, H), PW 0.4 / 0.8 / 1 / 2.0ms, PRF 250 to 2000Hz, BW 0.95°, 3D | Backscattering Radar | Variables Recorded: Z, V, W, ZDR, fDP, KDP, rhv, LDR | Profile | Tornadoes and damaging winds /Tornadoes and severe winds associated with QLMCS's /Kinematics of tornadic rainbands during the landfall of tropical cyclones (TC) / Boundary detection, interaction and prediction, Investigate the relationships among lightning, deep convection and severe storms, /Investigate the predictability of lighting initiation (associated with convective initiation), evolution and | | <i>UAH (BARON), USA</i> | <i>UAH (BARON), USA</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | cessation, /Quantitative precipitation estimation and forecasting (QPE) | | | |
|---------------------------------|--|--|--|---------|---|--|-------------------|---------------------|
| JMA-912 Rainwatchcer | X-Band Polarimetric Radar, Rainfall Sensor, 9.7 to 9.8GHz, PW 1/50μs, max PRF 2500Hz, Maximum Doppler Velocity 12/ 24/ 36/ 48 m/s (depend on PRF), max range 120Km, 3D | Backscattering Radar | Output Raw data: Uncorrected Reflectivity (Zu), Corrected Reflectivity (Zc) Doppler Velocity (V), Spectral Width (W) Differential Reflectivity (ZDR), Correlation Coefficient (ρ _{hv}) Differential Phase (ΦDP), Specific Differential Phase (KDP) Liner Depolarization Ratio (LDR) | Profile | | | <i>JRC, Japan</i> | <i>JRC Products</i> |
| JMA-540 Rainwatcher | C-Band Polarimetric Radar, Linear /Horizontal & Vertical Dual Polarization | Backscattering Radar, Received Signal Power (Pr) Radar Reflectivity (Z _{hh}) | Polarization Data Output: Differential Reflectivity (ZDR) Differential | Profile | | | <i>JRC, Japan</i> | <i>JRC Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|---|---|---------|--|--|-------------------|---------------------|
| | (Simultaneous & Alternative H/V), 5.60 - 5.65 GHz (Option: 5.25 - 5.35 GHz, 5.65 - 5.80 GHz), PW 1/5/50/100μs, PRF 250 to 1200Hz, Staggered PRF Ratio Non, 3:2, 4:3 or 5:4 (selectable), Max Doppler Vel: 16/32/48/64 m/s (depend on PRF), Range 300 to 400Km Duty Cycle ≤ 10 %, 3D, Max 6RPM | Doppler Velocity (Vh) Spectral Width (Wh) | Phase (ΦDP) Specific Differential Phase (KDP) Correlation Coefficient (ρhv) Liner Depolarization Ratio (LDRvh/hv) | | | | | |
| JMA-254 Rainwatcher | Doppler Radar, 2.7 to 2.9GHz, PW 1/2/50/100μs, PRF 250 to 1200Hz, Staggered PRF Ratio Non, 3:2, 4:3 or 5:4 (selectable), Maximum Doppler Velocity 19/ 38/ 57/ 76 m/s (depend on PRF), Range 400 to 450Km, Polarization Linear, | Backscattering Radar, Basic Data Output: Received Signal Power (Pr) Radar Reflectivity (Zhh) Doppler Velocity (Vh) Spectral Width (Wh) | Polarization Data Output: Differential Reflectivity (ZDR) Differential Phase (ΦDP) Specific Differential Phase (KDP) Correlation Coefficient (ρhv) Liner Depolarization Ratio (LDRvh/hv) | Profile | | | <i>JRC, Japan</i> | <i>JRC Products</i> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------|---|---|---|---------|--|--|--|---|
| | Horizontal (option: H/V Dual Polarization), 3D, Duty Cycle $\leq 10\%$ | | | | | | | |
| FM-120 | Single particle forward-scattering, optical (Laser) spectrometer, Fog monitoring device, 2–50 μm size range | Droplet spectra | | In situ | Collects forward-scattered photons within an annular cone that is approximately 3.5° to 12° from the laser beam. | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/FM-120.pdf |
| MPS | Meteorological Particle Spectrometer, 50 μm to >6.4mm, Res.:25/50 or 100micron, 0 to 2000 particles/cm ³ , Particle-by-particle Fall Velocity:5 to 500cm/s, Inter-arrival Time of Particles: 0.001 to 100 sec | Size distribution, fall velocity & rain rate of droplets, Single-particle light imaging | Particle diameter, Particle number concentration, Liquid water content (LWC), Effective diameter (ED), Median volume diameter (MVD) | In situ | Optical disdrometer, 2-D particle images, Particle Analysis & Display System (PADS) | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/products/ground-based/MPS |
| CCN | Cloud Condensation Nuclei Counter, 6000particles/sec at supersaturations below 0.2%, 20000 particles/sec at supersaturations | Single-particle light scattering (for activated nuclei), Temperature, Pressure | | | Comes equipped with single (CCN-100) or dual (CCN-200) columns for extended versatility & oth versions can be | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/CCN.pdf |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------|---|---|---|---------|--|--|--|---|
| | above 0.3%, Particle Size Range 0.75 to 10 μ m, Sampling: 1 Hz/s, Supersaturation Range:0.07 to 2.0% | | | | operated on the ground or on aircraft. | | | |
| SPIN | Spectrometer Ice Nuclei, Size Range of activated particles 0.8 to 20 μ m | Single-particle light scattering (both normal and polarized light) | Particle diameter, Particle phase | | | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/SPIN.pdf |
| WIBS-4A | Wideband Integrated Bioaerosol Sensor, 635nm diode Laser, Fluorescence Excitation: Dual wavelength, 280 & 370nm, Fluorescence Emission: Dual wavelength, 310 to 400nm & 420 to 650nm, Particle Size Range: 0.5 to 15 μ m | Detection of the common bioaerosol components tryptophan & NADH | | In situ | Particle size (determined by light scattering), Three separate fluorescence measurements (F1, F2, F3), Particle Asymmetry Factor (AF), Particle Concentration, The instrument uses a UV xenon source to excite fluorescence in individual particles. Unlike UV lasers, the UV xenon source allows for the precise selection of particular UV wavebands, Airborne or ground based | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/WIBS-4A.pdf |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|------------|---|---|--|---------|--|--|--|---|
| PAX | Photoacoustic Extinctionmeter, Laser 870nm, optional 405 nm & 532nm Available, Modulation frequency: 1500Hz nominal, square wave, Angular Integration for Scattering 6 to 174°, Response Time <10s, one-second resolution | Absorption coefficient, Babs Scattering coefficient, Bscat, Temperature, pressure & relative humidity | Black carbon (BC) mass, Extinction coefficient, Bext, Single scattering albedo, SSA, Dew Point | In situ | Includes analytical spectrometer with internal data storage, data playback & archiving software, Direct in-situ measurement of light absorption & scattering in a single instrument, Absorption measurement correlates to black carbon mass concentration, Reciprocal nephelometry provides scattering coefficient sensitivity, Suitable for fixed site, mobile or airborne sampling | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/PAX.pdf |
| SP2 | Single Particle Soot Photometer, Nd:YAG Laser: 1064nm, Pump Laser: 808nm, Scattering signal: 200 to 430nm diameter, Incandescent signal: depends on | Single-particle laser incandescence, Single-particle light scattering, Temperature, Pressure | BC mass distribution as function of particle diameter, Particle number distribution as a function of particle size | In situ | Suitable for airborne or ground-based use (fixed-site or mobile sampling), Black carbon in water, snow or ice | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/SP2.pdf |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------|---|--|---|---------|---|--|--|---|
| | particle density, but 70 to 500nm, Response Time: 1Hz for standard output products | | | | | | | |
| PASS-3 | Photoacoustic Soot Spectrometer, 3 Wavelength, Modulation Frequency 1500Hz, square wave, Laser Three wavelengths: 781nm (2 W) / 532nm (0.4 W) / 405nm (0.6 W) | Aerosol light absorption and scattering, Temperature, Pressure, Relative humidity, Dew point temperature | | In situ | The laser beam is square-wave modulated at the frequency that matches the resonance acoustic frequency of the resonator, Photoacoustic method for light absorption and integrated nephelometry for light scattering, Ideal for black carbon measurement (BC) (781 nm absorption measurement is highly specific to BC), The PASS-3 is suitable for fixed site, mobile & airborne sampling. | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/PASS-3.pdf |
| BCPD | Back-Scatter Cloud Probe with Polarization Detection, Laser | Single-particle light scattering: S polarized back-scattered light, P | Particle diameter, Particle number concentration, | In situ | Ground-based or airborne applications, no contamination from | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/BCPD.pdf |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--------------|--|---|---|---------|---|--|--|---|
| | 658nm, Particle Size Range 2 to 50µm, 0 - 1,000 particles/cm ³ , Air Speed Range 10 - 250m/s, Sampling Frequency Selectable, 0.04 to 20s | polarized back-scattered light, Temperature » Pressure | Liquid water content (LWC), Effective diameter (ED), Median volume diameter (MVD) | | ice crystal shattering & no airflow distortion | | | |
| CDP-2 | Cloud droplet Probe, forward-scattering optical Spectrometer, Laser 658 nm, Particle Size Range 2 to 50µm, 0 - 2,000 particles/cm ³ , Air Speed Range 10 - 250 m/s, Sampling Frequency Selectable, 0.04 to 20s, Refractive Index: Non-absorbing, 1.33, Light Collection Angles Optical design: 4° to 12° Optical performance: 1.7° to 14° | Single-particle light scattering, | Particle diameter, Particle number concentration, Liquid water content (LWC), Effective diameter (ED), Median volume diameter (MVD) | In situ | Mounts easily on aircraft, towers, unmanned airborne vehicles (UAV), and spray rigs, Hurricane and storm research, Agricultural & industrial spray characterization | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/CDP-2.pdf |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--|--|---|----------------|--|--|---|--|
| <p>CIP / GCIP (Ground)</p> | <p>Cloud Imaging Probe, Laser 658nm, Air Speed Range: 10 to 300 m/s, Liquid water content from 0.01 to 3 g/m³, 15μm resolution</p> | <p>Measured Particle Size Range: 7.5μm to 1.55mm,</p> | | <p>In situ</p> | <p>Shadow images of particles passing through a collimated laser beam are projected onto a linear array of 64 photodetectors, suitable for fixed site, mobile or airborne sampling</p> | | <p><i>Droplet measurement technologies, USA</i></p> | <p>http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/CIP.pdf</p> |
| <p>CPSPD</p> | <p>Cloud Particle Spectrometer with Polarization Detection, Laser 658nm, Particle Size Range 0.65 to 30μm, 20000 particles per second, Air Speed Range 10 to 250m/s, Light Collection Angles Forward Scatter: 13° to 47° Back Scatter: 133° to 167°, Sampling Frequency for Histogram Data Selectable: 0.04 to 20s</p> | <p>Forward-scattered light, Back-scattered light, Polarization state</p> | <p>Particle diameter, Particle number concentration, Liquid water content (LWC), Effective diameter (ED), Median volume diameter (MVD), Polarization ratios</p> | <p>In situ</p> | <p>aircraft-mounted probe that measures cloud droplets, ice crystals, volcanic ash and other airborne particles, Cloud and ice crystal studies, Aerosol-cloud interactions, Volcano emissions research</p> | | <p><i>Droplet measurement technologies, USA</i></p> | <p>http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/CPSPD.pdf</p> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|------|--|---|--|---------|---|--|--|---|
| CAPS | cloud, aerosol and precipitation spectrometer, Laser: 658nm, Air Speed Range: 10 to 200m/s, Light Collection Angles: 4° to 12°, 168° to 176°, Non-absorbing Refractive Index: 1.3 to 1.7, Sampling Frequency: Selectable, 0.05 to 25Hz | Measured Particle Size Range: 0.51µm to 50µm, measured LWC range is 0 to 3 g/m ³ | | In situ | suitable for fixed site, mobile or airborne sampling, Optical Array Probe with 64 elements: 62 sizing elements, end diode rejection, Multipurpose, research-grade cloud spectrometer that includes three DMT instruments plus temperature and relative humidity sensors, Forward & Back Scatter Light Sensors, dual back measurement with S & P polarization of the scattered light | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/CAPS.pdf |
| CCP | cloud combination probe, Laser: 658nm, 0 - 2,000 particles/cm ³ , Air Speed Range:10 to 250 m/s, Sampling Frequency: Selectable, 0.05 to | Measured Particle Size Range:2µm to 50µm | | In situ | Shadow images of particles passing through a collimated laser beam are projected onto a linear array of 64 photodetectors, | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/CCP.pdf |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|--|--|---|---------|--|--|--|---|
| | 25Hz, Non-absorbing Refractive Index: Non-absorbing, 1.33, Light Collection Angles: 4° - 12° | | | | Light-scattering probe with 10, 20, 30, or 40 size bins (user programmable) | | | |
| PIP | Precipitation Imaging Probe, Laser: 660nm, Air Speed Range: 10 to 200m/s, 100particles/cm ³ | Measured Particle Size Range: 100µm to 6.2mm | | In situ | Suitable for fixed site, mobile or airborne sampling, Cloud chambers, Agricultural and industrial spray characterization | | <i>Droplet measurement technologies, USA</i> | http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/Brochures/PIP.pdf |
| OTT Parsivel² | Laser precipitation disdrometer measuring all precipitation types, Optical sensor wave length 780nm, Particle velocity 0.2 to 20m/s, Minimal intensity 0.001 mm/h drizzle/rain, Maximal intensity 1.200mm/h, Accuracy ±5 % (liquid) / ±20 % (solid) | liquid precipitation 0.2 to 5mm, solid precipitation 0.2 to 25mm, Precipitation type, intensity, drop size distribution, radar reflectivity | 8 precipitation types (drizzle, drizzle/rain, rain, snow/rain, snow, snow grain, sleet, hail) radar reflectivity Z | In situ | | | <i>OTT Hydromet, Germany</i> | http://www.ott.com/en-us/products/meteorological-sensors/ott-parsivel2-laser-weather-sensor/ |
| SVS1 | Visibility Sensor, Proven 42° forward | | | In situ | Applications: Airport, maritime, Tunnels, | | <i>EnviroTech Sensors, USA</i> | http://www.envirotechsensors.com/pdf |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--|--|--|---------|--|--|------------------------------------|--|
| | scatter angle, Visibility 30m to 16 km standard, Range: 10m to 10 km optional, Accuracy: ± 10% RMSE, Time Constant: 60s, Source: 880nm LED, Extinction Range: 100 to 0.1863 km ⁻¹ standard; (300 to 0.30 km ⁻¹ optional) | | | | Bridges, Roads | | | s/2011/SVS1%20Sen- try%20Visibility%2 0Sensor_2011.pdf |
| SVSEEx | 8 km (5 mile) visibility range, Forward scatter measurement technique, Accuracy: +/- 10% RMSE, Time Constant: 60s, Scatter Angle: 42 deg nominal, Source: 880nm LED | | | In situ | Applications: Offshore platforms, Chemical plants | | <i>EnviroTech Sensors, USA</i> | http://www.enviro- techsensors.com/se nsors-visibility- SVSEEX.php |
| 400-6000 Visibility Sensor | Forward scattering measurement technique, Scatter angle: 42° nominal, Accuracy: 3m, Source: Infrared | | | In situ | Environmental: Temperature: -40° to +130° F (-40° to +55° C) Humidity: 0-100% Power requirements: | | <i>NovaLynx, USA</i> | http://novalynx.co m/store/pc/400- 6000-Visibility- Sensor-15p879.htm |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--|---|--|---|---------------------|---|--|--------------------------|---|
| | LED | | | | 17 W | | | |
| Products Visibility 400-CBME80 Cloud Ceilometer | Backscattering Technique, Low power diode laser, Range: 10 to 7500m / 30 to 25000 ft, Resolution: 10 m / 30 ft, Accuracy: Greater of ± 10 m / 30 ft or $\pm 1\%$ of height (against reflector) | | Output data: Cloud height (up to three bases) or vertical visibility, Cloud amount Ceilometer status, Backscatter profile | Backscatter profile | Operation temperature: -40 to +55 °C | | NovaLynx, USA | http://novalynx.com/store/pc/400-CBME80-Cloud-Ceilometer-15p880.htm |
| 400-SVS1 Sentry Visibility Sensor | (Similar to SVS1 above Envirotech) 42° forward scatter angle, Visibility Range: 30m to 16km standard, Extinction Range: 100 - 0.1863 km ⁻¹ standard, Accuracy: $\pm 10\%$ RMSE, Source: 880nm LED | | | In situ | MOR is calculated by the user by converting the received signal strength (extinction coefficient, s) using Koschmeider's formula, MOR (Km) = 3/s, Environmental Operating Temperature: -40 to 60 °C Operating Humidity: 0-100% | | NovaLynx, USA | http://novalynx.com/store/pc/400-SVS1-Sentry-Visibility-Sensor-15p881.htm |
| OTT PARSIVEL | (Similar to OTT Parsivel2 above OTT Hydromet) Laser-based optical | Particle Size & Velocity, Precipitation spectra | | In situ | simultaneous measurement of Particle Size & Velocity of all | | OTT Messtechnik, Germany | http://www.ott.com/download/ott-parsivel-white-paper/ |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|------------------------|---|---|--|---------|---|--|--------------------------------------|---|
| | Disdrometer, 400µm max size range | | | | liquid & solid precipitation | | | |
| MR-41 | Optical rain sensor, Infrared/red transmitter & receiver | | | | Not sensitive for dust or dirt | | <i>Mierij Meteo, Netherlands</i> | http://pdf.directindustry.com/pdf/mierij-meteo/rain-sensor-model-mr-41/54729-81475.html |
| MV-11 | Laser Visibility Sensor, infrared LED transmitter, Forward scattering, range of 0 to 16km | | | In situ | | | <i>Mierij Meteo, Netherlands</i> | http://www.mierijmeteo.nl/?gp_portfolio_item=mv-11 |
| MV-32 | Laser Visibility Sensor, semiconductor laser & a µController system, Laser Wavelength: 650nm | | | In situ | For road weather monitoring systems like fog warning for traffic. | | <i>Mierij Meteo, Netherlands</i> | http://www.mierijmeteo.nl/?gp_portfolio_item=mv-32 |
| Degreanne DF320 | Forward scatter sensor Visibilimeter, 490– 750 nm, 550 nm peak sensitivity | accurate & tracable values over a wide range (up to 70 Km) | Runway Visual Range-RVR , and aeronautic visibility-AV, as defined by ICAO standards associated with a luminancemeter | In situ | Also can be used for other application such as synoptic meteorology, road or harbor. | | <i>CUERS, France</i> | http://www.degrea-ne-horizon.com/IMAGES/GB/meteo/chapitres/visibilite/T305111C-DF320-GB.pdf |
| Degreanne | Forward scatter | Accurate & tracable | | In situ | It is specially built for | | <i>CUERS, France</i> | http://www.degrea |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-----------------------|--|--|---|----------------|--|--|-----------------------------|---|
| <p>DF20+</p> | <p>sensor Visibilimeter, MOR 5m to 70km, 1m resolution 20Hz with phase change, 350 to 900nm halogen white light balanced lamp , 25000 hours (3 years), parametrable from 30 s to 10min, Acquisition period of scatter coefficient : 0,5s</p> | <p>values over a wide range up to 70Km</p> | | | <p>synoptic meteorology application. Also can be used for aeronautical purposes, road or harbor.</p> | | | <p><i>ne- horizon.com/IMAG ES/GB/meteo/chapi tres/visibilite/T305 006C-DF20+-GB.pdf</i></p> |
| <p>TR 30AC</p> | <p>Transmissometer, Acquisition : Every 0.5s, 30- 75m base lengh (30m optimum), 10 to 25000m, According to ICAO and WMO specifications for RVR and visibility (CAT I a à CAT III b), White light halogene lamp amplitude modulated, 1 to</p> | <p>Calculates the meteorological optical range (MOR) and, associated with a luminancemeter (LU 320) and a runway light intensity transmitter</p> | <p>Runway visual range (RVR) & the aeronautical visibility (AV), as defined by ICAO standards</p> | <p>In situ</p> | <p>Background luminance sensor LUCIA 320</p> | | <p><i>CUERS, France</i></p> | <p><i>http://www.degrea ne- horizon.com/IMAG ES/GB/meteo/chapi tres/visibilite/T311 001A-TR30AC- GB.pdf</i></p> |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|----------------|---|---|---|---------|--|--|---------------|---|
| | 10 minutes sliding mean of the valid data | | | | | | | |
| TR 30DB | Transmissometer, white light source modulated at 30 Hz, exploitation in dual base (15-75 m), Acquisition : Every 0.5s, Normalisation with respect to the measured emitted flux. 1 to 10 minutes sliding mean of the valid data, White light halogene lamp amplitude modulated 400nm to 700nm (photopic curve) | transmission ability of the atmosphere (TAA), calculates the meteorological optical range (MOR) – 10 to 10000m | Associated with a luminancemeter (LU 320) and a runway light intensity transmitter, calculate the runway visual range (RVR) and the aeronautical visibility (AV), as defined by ICAO standards. | In situ | Background luminance sensor LU 320 Runway light intensity transmitter | | CUERS, France | http://www.degrea ne-horizon.com/IMAGES/GB/meteo/chapitres/visibilite/T305012D-TR30DB-GB.pdf |
| ALC30 | Laser-Ceilometer, Pulsed Microchip Laser device at 1535 nm wavelength; fully eye safe class 1 (complies with norms ANSI - Z – | Can report up to three cloud layers, full backscatter profile, monitoring status, clouds hits, clouds amount for each cloud layer, vertical | | Profile | Operating according to the LIDAR principle | | CUERS, France | http://www.degrea ne-horizon.com/IMAGES/GB/meteo/chapitres/hauteur_nuages/T305024E-ALC%2030-GB.pdf |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--|---|-------------------|--|--|--|--|--|--|
| | <p>136, IEC 825, EN 60825-1), tilting position insures a total protection against direct solar radiation, Maximum range: 15m to 7500m (50ft to 25000ft.), acquisition time: 10s, Resolution: 15 m (50 ft), Accuracy: $\pm 7,5$ m, Measurement cycle: adjustable from 15s, Transmitter: microchip technology employing a passively Q-switched Erbium doped glass laser, 1535 nm, energy per pulse 6μJ, Receiver: INGaAs PIN photodiode mounted on a thermoelectric cooler, Optical: bi-static system</p> | <p>visibility</p> | | | | | | |
|--|---|-------------------|--|--|--|--|--|--|

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|-----------------|---|------------------------------|--|---------|--|--|---------------|---|
| | including a 200 mm diameter receiver aperture & a fiber collimation | | | | | | | |
| PCL 1300 | Wind profiling radar, Using the backscattering properties of electromagnetic waves through the continuous sounding of the atmosphere, vertical profile at altitudes ranging from 75m up to 5km, Frequency 900 to 1300 MHz (1290 MHz suggested), Resolution 75m to 375m, Intrinsic wind speed accuracy < 1m/s, Intrinsic wind direction accuracy < 10°, Periodicity of profile computation Adjustable from | Wind profile and Measurement | | Profile | Options : Available in three or five panel configuration, Temperature profile when combined with a Radio Acoustic Sounding System (RASS) or a Temperature / humidity profiling radiometer. | | CUERS, France | http://www.degrea ne-horizon.com/IMAGES/GB/meteo/chapitres/profileur_vent/T305062C-PCL%201300-GB.pdf |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | 2min | | | | | | | |
|----------------|--|---|--|---------|--|--|---------------|---|
| PST 50 | VHF Freqs, Using backscattering properties of electromagnetic waves through the continuous sounding of the atmosphere, vertical profiles at altitudes ranging from 1500m up to 20km, Spatial resolution from 300m, Intrinsic wind speed accuracy<1m/s Intrinsic wind direction accuracy<10°, Integration Rate 10 to 60min | vertical wind profile : strength and direction | | Profile | no noise pollution, no electromagnetic pollution thanks to weak secondary foils, Measurement of wind in altitude for numeric models of professional weather forecast at synoptic scale. | | CUERS, France | http://www.degrea ne-horizon.com/GB/meteorology/autonomous-measurements/wind-profiler-PST50.html |
| PDN 35G | Doppler radar at 35GHz, Polarization Crossed horizontal, Range> 10000m, Resolution Adjustable from 45m up to 375m | Study physical phenomena inside clouds, provides the drop speed and Doppler spectra of hydrometers located in a cloud, as well as the vertical profile of the reflectivity in a | | Profile | Research organizations in charge of forecasting the development and life-cycle of clouds in the troposphere have been using the PDN 35G, autonomous system that functions continuously 24h a | | CUERS, France | http://www.degrea ne-horizon.com/GB/meteorology/autonomous-measurements/vertical-cloud-profile-PDN35G.html |

WEATHER Tx/Rx DEVICES

| | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|-----|--|--|--|
| | | cloud, cloud edges can be determined as well | | | day | | | |
|--|--|--|--|--|-----|--|--|--|