



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**- ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΕΝΤΡΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΕΩΣ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ  
(Κ.Δ.Δ./Ε.Μ.Π)

*Διπλωματική Εργασία*

**ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ DORIS : ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ**  
**ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΩΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ**

---

ΤΣΙΧΛΑΚΗ ΜΥΡΤΩ

Επιβλέπουσα:  
ΤΣΑΚΙΡΗ ΜΑΡΙΑ, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2022



**Dionysos**  
**Satellite**  
**Observatory**



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS**

**SCHOOL OF RURAL & SURVEYING ENGINEERING  
- GEOINFORMATICS ENGINEERING**

**DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY  
(DSO / NTUA)**

*Diploma Thesis*

**DORIS SYSTEM : RAW DATA  
AND PRELIMINARY ANALYSIS**

---

TSICHLAKI MYRTO

Supervisor:  
TSAKIRI MARIA, Professor at NTUA

Athens, July 2022



**Dionysos  
Satellite  
Observatory**



## ΔΗΛΩΣΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Δηλώνω ότι η διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί στο σύνολο της δική μου εργασία, και κανένα τμήμα της δεν έχει χρησιμοποιηθεί για την κτήση άλλου τίτλου σπουδών. Όπου έχει χρησιμοποιηθεί υλικό από άλλες πηγές, αυτές έχουν αναφερθεί με ακρίβεια και πληρότητα.

ΤΣΙΧΛΑΚΗ ΜΥΡΤΩ, Αθήνα Ιούλιος 2022

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια του Τομέα Τοπογραφίας της Σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών και διευθύντρια του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου κ. Μαρία Τσακίρη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγηση, την άμεση υποστήριξη και την συνεχή επικοινωνία της, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Υποψήφιο Διδάκτορα Ξάνθο Παπανικολάου, για το χρόνο που αφιέρωσε, την υποστήριξη και τις γνώσεις που μοιράστηκε μαζί μου.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τα μέλη Ε.Τ.Ε.Π. του τομέα, τον Βαγγέλη Ζαχαρή για την άψογη συνεργασία και αμέριστη βοήθεια και τους Ιορδάνη Γαλάνη και Κωνσταντίνο Ραπτάκη που αποτέλεσαν πηγή ακαδημαϊκής έμπνευσης με τις συμβουλές τους.

Δεν ξεχνώ τους στενούς φίλους που είχα πλάι μου τα χρόνια των σπουδών, και ιδιαίτερα την φίλη και συνεργάτιδά μου Ειρήνη, με την οποία εύχομαι να ακολουθήσουν πολλές ακόμα συνεργασίες.

Τέλος την ευγνωμοσύνη και αγάπη μου θέλω να απευθύνω στους γονείς μου, Γιάννη και Λόις, τον αδερφό μου Κίμωνα και την γιαγιά μου Αναστασία, γιατί πίστεψαν στις δυνατότητές μου, είναι πάντα εκεί για εμένα και χωρίς αυτούς δεν θα είχα φτάσει ως εδώ.

Μυρτώ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση του δορυφορικού συστήματος DORIS (Doppler Orbit determination and Radio-positioning Integrated on Satellite), η μελέτη των δεδομένων DORIS και μια πρωτογενής ανάλυση πάνω σε αυτά. Το σύστημα DORIS σχεδιάστηκε με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό τροχιάς ενός δορυφόρου, και η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο φαινόμενο Doppler. Χωρίζεται στο επίγειο τμήμα, που περιλαμβάνει ένα δίκτυο σταθμών γνωστών συντεταγμένων καλά κατανομημένο ώστε να καλύπτει όλη τη γη και ένα τμήμα διαστήματος που αποτελείται από τους δέκτες του συστήματος που φέρονται στις διάφορες διαστημικές αποστολές (σήμερα 8 και 5 προγραμματισμένες στο άμεσο μέλλον). Τα δεδομένα DORIS/RINEX και τα προϊόντα του συστήματος που διατίθεται από την IDS (International DORIS Service) μελετώνται και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να τροποποιηθεί η εξίσωση Doppler, σε ένα μοντέλο σχετικότητας ώστε να εφαρμόζεται στις μετρήσεις DORIS. Έτσι, πραγματοποιείται μία πρώτη προσέγγιση στις εξισώσεις παρατήρησης DORIS, οι οποίες εφαρμόζονται στην απλοποιημένη μορφή τους, με μέθοδο της βιβλιογραφίας κατά την οποία διαχωρίζεται η ταχύτητα του δορυφόρου σε θεωρητική και υπολογισμένη από μετρήσεις. Ως αποτέλεσμα μοντελοποίησης των παραμέτρων, με κατάλληλη χρήση προγραμματιστικών εργαλείων γίνεται εκτίμηση χαμηλής ακρίβειας, της ταχύτητας του δορυφόρου, ενώ πραγματοποιείται και σύγκριση αποτελεσμάτων τόσο για διαφορετικές χρονικές στιγμές όσο και για δεδομένα που έχουν υποστεί ένα πρώτο στάδιο επεξεργασίας για τη βελτίωση των χρονομέτρων.

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης πρώτου επιπέδου που πραγματοποιήθηκε, για την εκτίμηση της ταχύτητας του δορυφόρου, είναι ικανοποιητική δεδομένης της επιθυμητής ακρίβειας, μερικών χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο. Η διαφορά της θεωρητικής ταχύτητας και αυτής που υπολογίζεται από μετρήσεις είναι αναμενόμενη λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς στην εκτίμηση των παραμέτρων, ενώ συμφωνεί και με τη διακύμανση των υπόλοιπων ποσοτήτων όπως η γωνία ύψους και η μέτρηση Doppler. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης, προκύπτουν και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και ανάλυση υψηλής ακρίβειας.

Λέξεις κλειδιά: δορυφορικό σύστημα DORIS, επεξεργασία δεδομένων DORIS, DORIS RINEX, προσδιορισμός τροχιάς, προσδιορισμός ταχύτητας δορυφόρου

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis, is to give an overview of the DORIS System (Doppler Orbit determination and Radio-positioning Integrated on Satellite) and after introducing DORIS data, to perform a preliminary analysis on them. Doris system was designed to provide precise orbit determination (POD) of a satellite and it employs the Doppler Effect to determine the distance between ground stations and satellites orbiting the Earth. The ground segment consists of ground stations with known positions, well distributed globally, while the space segment involves satellites carrying DORIS receivers (currently 8 missions, and 5 planned to be launched). DORIS/RINEX data and other DORIS products are overviewed, so that the Doppler equation be modified in a relativistic framework to be applied on the measurements. In this relativistic framework based on bibliography, the velocity of the on-board receiver is split into a theoretical and measured component, which are analysed separately. Thus, through modelling and via appropriate programming tools, a low accuracy estimate of the satellite's velocity is achieved, while also comparing the results for different epochs and data of different quality regarding the receiver's clock bias.

The result of this preliminary analysis, estimating the satellite's velocity, agrees with the expected accuracy of a few km/s. Differences between the theoretical and measured component of the velocity are on the expected levels, considering the limitations on the parameters' estimate while complying with the behaviour on the other quantities such as elevation angle and Doppler count. Overviewing the results and conclusions of this analysis, proposals for future research and high quality analysis are made.

**Keywords:** DORIS satellite system, DORIS RINEX, Precise Orbit Determination POD, DORIS data processing

# Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	6
1.1	Γενικά.....	6
1.2	Σύστημα DORIS.....	6
1.3	Επεξεργασία Δεδομένων DORIS.....	7
2	Βασικές Αρχές – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	8
2.1	Σύστημα DORIS.....	8
2.1.1	Εισαγωγή.....	8
2.1.2	Φαινόμενο Doppler.....	8
2.1.3	Αρχή Λειτουργίας DORIS.....	10
2.2	Δομή Συστήματος DORIS.....	12
2.2.1	Επίγειο Τμήμα - Δίκτυο Σταθμών.....	12
2.2.2	Τμήμα Διαστήματος - Αποστολές DORIS.....	14
2.2.3	Πλοήγηση DIODE.....	16
2.2.4	Κέντρο Επεξεργασίας SSALTO.....	17
2.3	Σήμα DORIS.....	18
2.3.1	Τυπικό σήμα (Standard beacon transmission).....	18
2.3.2	Broadcasts uploads – Μεταδεδομένα.....	18
2.4	Προϊόντα DORIS.....	19
2.4.1	Μετρήσεις DORIS.....	19
2.4.2	Τροχίες DORIS και DPOD.....	20
2.4.3	Εβδομαδιαίες συνδυαστικές λύσεις και χρονοσειρές SINEX (weekly & global SINEX).....	20
2.4.4	Ιονοσφαιρικά προϊόντα.....	21
2.4.5	Παράμετροι Προσανατολισμού Γης (Earth orientation parameters EOP) και προσδιορισμός γεώκεντρου.....	21
2.4.6	Προϊόντα εντοπισμού θέσης (Positioning products).....	22



2.4.7 Γωνίες προσανατολισμού (quaternions).....	22
3 Εξίσωση Doppler και Δεδομένα του Συστήματος DORIS.....	25
3.1 Διορθώσεις Χρονομέτρων.....	25
3.2 Χρόνος διάδοσης ενός φωτονίου από τον πομπό στον δέκτη.....	25
3.3 Η εξίσωση παρατήρησης Doppler.....	26
3.4 Όνομα αρχείου DORIS/RINEX.....	30
3.5 HEADER αρχείου DORIS/RINEX.....	30
3.6 Μετρήσεις ανά εποχή DORIS/RINEX.....	33
3.7 Υλοποίηση της παραγόμενης εξίσωσης Doppler - Διόρθωση Ιονόσφαιρας.....	34
4 Εφαρμογή εξισώσεων – Ανάλυση Πρώτου Επιπέδου.....	35
4.1 Δεδομένα από το αρχείο RINEX.....	35
4.2 Δεδομένα από το αρχείο sp3.....	40
4.3 Μοντελοποίηση δεδομένων.....	40
5 Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	50
5.1 Συμπεράσματα.....	50
5.2 Προτάσεις – Ανάλυση υψηλότερης ακρίβειας.....	51
Παράρτημα Α – Κώδικας Modelling.....	52
Παράρτημα Β – Βιβλιοθήκες Python.....	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	56

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2.1: Ατμοσφαιρική διάθλαση κατά τη μετάδοση σήματος Πηγή: Subirana et al., 2013.....	9
Εικόνα 2.2: Σύστημα DORIS: Λαμβανόμενη συχνότητα δορυφόρου κατά μήκος της τροχιάς Πηγή: <a href="https://ggos.org/item/doris/">https://ggos.org/item/doris/</a> .....	11
Εικόνα 2.3: Δίκτυο σταθερών σταθμών DORIS 2020 Πηγή: Ids-Doris.org.....	12
Εικόνα 2.4: Επίγειος σταθμός DIONYSOS DORIS - Διόνυσος.....	13
Εικόνα 2.5: Γεωμετρικά στοιχεία μεταλλικής βάσης & κεραίας DORIS τύπου STAREC, επίγειου σταθμού.....	14
Εικόνα 2.6 Δίκτυο δορυφορικών αποστολών DORIS (2020) Πηγή: <a href="https://ids-doris.org/analysisdocuments/92-satellites.html">https://ids-doris.org/analysisdocuments/92-satellites.html</a> .....	15
Εικόνα 2.7: Εξοπλισμός δορυφόρου: Κεραία, δέκτης και ταλαντωτής USO.....	15
Εικόνα 2.8: Γεωγραφική κατανομή του πλήθους παρατηρούμενων σταθμών του δέκτη DORIS στο δορυφόρο Jason-2 Πηγή: Auriol 2010.....	17
Εικόνα 2.9: Σύστημα DORIS Πηγή: ids.org.....	19
Εικόνα 2.10: Οριζοντιογραφική ταχύτητα 37 σταθμών DORIS συγκρινόμενη με το τεκτονικό μοντέλο πλακών PB2002 Πηγή: Willis et al., 2007.....	20
Εικόνα 2.11: Χρονοσειρές συντεταγμένων, σταθμός <i>DIOB DIONYSOS</i> , με E συμβολίζονται καταγραφές σεισμών. Χρονικό διάστημα 19 Apr 2015 – 29 Dec 2021.....	23

## Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1: Πλήθος ταυτόχρονων παρατηρήσεων σταθμών του δέκτη DORIS στο δορυφόρο Jason-2 (1330km) Πηγή: Auriol 2010.....	16
Διάγραμμα 2.2: Παγκόσμιος χάρτης TEC 2013, από δεδομένα DORIS. Πηγή: CNES.....	21
Διάγραμμα 4.1: Μετρήσεις φάσης L1 και L2, όλα τα περάσματα (πάνω), και εστίαση σε δύο πέρασμα (μέση και κάτω), σταθμός ADHC - TERRE ADELIE 23 Jul 2015.....	36
Διάγραμμα 4.2: C1 και C2 μετρήσεις, όλα τα περάσματα του δορυφόρου (πάνω), απομονωμένο πέρασμα (μέση) και διαφορά C1-C2 για το πέρασμα αυτό (κάτω), σταθμός PAUB PAPEETE 23 Jul 2015.....	37
Διάγραμμα 4.3: Πίεση εδάφους P (100Pa), θερμοκρασία T (°C), υγρασία εδάφους H (%) και συχνότητα F ( $10^{-11}$ ), όλα τα περάσματα για το σταθμό ADHC - TERRE ADELIE 23 Jul 2015.....	38
Διάγραμμα 4.4: Διαφορά $NDOP_{L1}$ και $NDOP_{L1-iono-free}$ διορθωμένο για την ιονόσφαιρα, σταθμός PAUB - PAPEETE 23 Jul 2015.....	43
Διάγραμμα 4.5: Σύγκριση $u_{measured}$ και θεωρητική ταχύτητα $u_{theo}$ (πάνω) και Doppler Count (κάτω), ένα πέρασμα δορυφόρου για το σταθμό PAUB – PAPEETE 23 Jul 2015.....	44
Διάγραμμα 4.6: Σύγκριση $u_{measured}$ και θεωρητική ταχύτητα $u_{theo}$ (πάνω) και Doppler Count $N_{DOP}$ (κάτω), ένα πέρασμα δορυφόρου για το σταθμό PAUB - PAPEETE 04 Jan 2017.....	44
Διάγραμμα 4.7: Διαφορά στα υπόλοιπα $u_{theo}-u_{measured}$ μεταξύ STILO και PANDOR (αριστερά), γωνία ύψους δορυφόρου (πάνω δεξιά) και $NDOP_{L1}$ (κάτω αριστερά), ένα πέρασμα δορυφόρου για το σταθμό ADHC - TERRE ADELIE 23 Jul 2015.....	45
Διάγραμμα 4.8: Διαφορά στα υπόλοιπα $u_{theo}-u_{measured}$ μεταξύ STILO και PANDOR (αριστερά), γωνία ύψους δορυφόρου (πάνω δεξιά) και $NDOP_{L1}$ (κάτω αριστερά), ένα πέρασμα δορυφόρου για το σταθμό PAUB-PAPEETE 04 Jan 2017.....	45
Διάγραμμα 4.9: Διάγραμμα μεγάλων όρων εξίσωσης $u_{theo}$ , πρώτος όρος (πάνω) και δεύτερος (κάτω), όλα τα περάσματα για το σταθμό PAUB - PAPEETE 23 Jul 2015.....	47

Διάγραμμα 4.10: Διάγραμμα μεγάλων όρων εξίσωσης $u_{theo}$ , πρώτος όρος (πάνω) και δεύτερος (κάτω), όλα τα περάσματα για το σταθμό RAUB - PAPEETE 04 Jan 2017.....	47
Διάγραμμα 4.11: Διάγραμμα μεγάλων όρων εξίσωσης $u_{measured}$ , πρώτος όρος (πάνω) και $\Delta u_{RELc}$ (κάτω), ένα πέρασμα για το σταθμό RAUB - PAPEETE 23 Jul 2015.....	48
Διάγραμμα 4.12: Διάγραμμα μεγάλων όρων εξίσωσης $u_{measured}$ , πρώτος όρος (πάνω) και $\Delta u_{RELc}$ (κάτω), ένα πέρασμα για το σταθμό RAUB - PAPEETE 04 Jan 2017.....	48

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Αποστολές DORIS (1990-2021).....	14
Πίνακας 4.1: Πίνακας σταθερών ποσοτήτων για τους υπολογισμούς στις εξισώσεις.....	41

## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ατμοσφαιρική διάθλαση κατά τη μετάδοση σήματος <i>Πηγή: Subirana et al., 2013</i> .....	10
Σχήμα 3.1: Διαδρομή φωτονίου από πομπό σε δέκτη <i>Πηγή: Lemoine et al., 2016</i> .....	26
Σχήμα 3.2: Σχεδιάγραμμα διαφοράς φάσεων Πομπό-Δέκτη <i>Πηγή: Lemoine et al., 2016</i> .....	27

## Πίνακας Συντμήσεων

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
COSPAR	Committee on Space Research
DORIS	Doppler Orbit determination and Radio-positioning Integrated on Satellite
DPOD	Doris Precise Orbit Determination
EOP	Earth Orbit Parameters
GLB	Ground Location Beacon
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IGS	Institut Géographique National
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
LEO	Low Earth Orbit
ODB	Orbit Determination Beacon
POD	Precise Orbit Determination
POE	Precise Orbit Ephemeris
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
SINEX	Solution Independent Exchange format
SLR	Satellite Laser Ranging
SSALTO	Segment Sol Multimission Altimetry and Orbitography
TAI	International Atomic Time
TCG	Geocentric Coordinate Time
TEC	Total Electron Content
TT	Terrestrial Time
UHF	Ultra High Frequency
USO	Ultra Stable Oscillator
UT / UT1	Universal Time
UTC	Coordinate Universal Time
VHF	Very High Frequency
VLBI	Very Long Baseline Interferometry

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Ως δορυφορικό σύστημα εντοπισμού θέσης ορίζεται ένα σύστημα προσδιορισμού απόλυτων και σχετικών συντεταγμένων ορισμένων σημείων, είτε στην επιφάνεια της γης (στο έδαφος, τη θάλασσα ή τον αέρα) είτε πάνω από αυτή, με χρήση τεχνητών δορυφόρων. Η διαδεδομένη πλέον χρήση των δορυφορικών συστημάτων και κυρίως του GPS έχει ως αποτέλεσμα την εξοικείωση όλων των ανθρώπων παγκοσμίως, με τον εντοπισμό θέσης, θεωρώντας τον ως κάτι δεδομένο. Ο χρήστης χρησιμοποιώντας έναν δέκτη, λαμβάνει σήμα από δορυφόρους και έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει τη θέση του στον τρισδιάστατο χώρο, πληροφορία η οποία μπορεί να είναι χρήσιμη ακόμη και με χαμηλή ακρίβεια. Ωστόσο, η ανάγκη για εντοπισμό θέσης ξεπερνά κατά πολύ την καθημερινή κοινή χρήση του, καθώς έχει πλήθος εφαρμογών στις επιστήμες.

Εφαρμογές της Τοπογραφίας όπως η Υδρογραφία, η Ωκεανογραφία, η Αλτιμετρία κ.α. καθιστούν απαραίτητη την ανάγκη για εντοπισμό θέσης και ταχύτητας των δορυφόρων, με υψηλή ακρίβεια. Τα μοντέλα που δημιουργούνται για την καταγραφή της γήινης επιφάνειας, ή την παρακολούθηση συγκεκριμένων φαινομένων όπως το λιώσιμο των πάγων ή οι ατμοσφαιρικές και γεωλογικές αλλαγές γενικότερα, απαιτούν μεγάλη και μακροχρόνια συλλογή δεδομένων, με ακρίβεια αλλά και ευκολία στη χρήση.

Ο προσδιορισμός τροχιάς ενός δορυφόρου παίζει σημαντικό ρόλο στις δορυφορικές αποστολές. Συγκεκριμένα, σε εφαρμογές που απαιτείται ο προσδιορισμός τροχιάς όπως η πλοήγηση δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (LEO), η ακριβής εκτίμηση της εφημερίδας δορυφόρου για ορισμένο διάστημα σε πραγματικό χρόνο είναι αναγκαία (Carvalho et al., 1997). Συνεπώς, ο τρόπος με τον οποίο αυτό μπορεί να είναι εφικτό, έχει αποτελέσει σημαντικό αντικείμενο έρευνας. Ο προσδιορισμός τροχιάς σε πραγματικό χρόνο χρειάζεται να παρέχει πληροφορίες σχετικές με την θέση και την ταχύτητα του δορυφόρου και εξαρτάται από το σύστημα εντοπισμού του δορυφόρου που χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά της διάδοσης σήματος μεταξύ πομπού και δέκτη για να παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες. Τα διαθέσιμα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τέτοιες εφαρμογές είναι τα GNSS (Global Navigation Satellite System), SLR (Satellite Laser Ranging) και DORIS (Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite). Το τελευταίο, αποτέλεσε και το ερευνητικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## 1.2 Σύστημα DORIS

Το DORIS είναι ένα σύστημα προσδιορισμού τροχιάς δορυφόρου που αναπτύχθηκε από το Γαλλικό Διαστημικό Κέντρο CNES μαζί με το Γαλλικό Γεωγραφικό Ινστιτούτο IGN, και έχει τα πλεονεκτήματα χαμηλού κόστους, υψηλής ακρίβειας, εκτενούς βάσης δεδομένων και πλέον, διαθεσιμότητα μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Γενικά, η επεξεργασία των δεδομένων DORIS είναι πιο απλή από αυτή των δεδομένων GPS, αφού οι επίγειοι σταθμοί DORIS λειτουργούν ως σημεία αναφοράς του εντοπισμού, σε αντίθεση με τα δορυφορικά σημεία αναφοράς του GPS που δεν είναι σταθερά και χρειάζονται μεγαλύτερη διαδικασία καταγραφής. Ακόμη, το δίκτυο εντοπισμού του DORIS είναι πυκνό και ομογενές και εύκολο σε χρήση για εντοπισμό πραγματικού χρόνου. Η ακρίβεια που έχει επιτευχθεί στον προσδιορισμό τροχιάς, το καθιστά απαραίτητο εργαλείο σε δορυφορικές αποστολές, ενώ πλέον θεωρείται κρίσιμη η συμβολή του στην υλοποίηση του παγκόσμιου συστήματος αναφοράς ITRF.

Η αρχή λειτουργίας του είναι ανάποδη από αυτή των συστημάτων GNSS, υπό την έννοια ότι οι δέκτες βρίσκονται επί του δορυφόρου ενώ οι πομποί στο έδαφος, σε σταθερούς σταθμούς. Το επίγειο δίκτυο σταθμών περιλαμβάνει 60 λειτουργικούς σταθμούς, ενώ διαρκώς επεκτείνεται με τέτοια κατανομή σταθμών που να επιτρέπει την λήψη σήματος από δορυφόρους σε οποιοδήποτε θέση της τροχιάς τους. Το διαστημικό τμήμα σήμερα, περιλαμβάνει 8 δορυφορικές αποστολές που διαθέτουν εξοπλισμό DORIS και 4 που έχουν προγραμματιστεί για εκτόξευση στο άμεσο μέλλον. Τα δεδομένα πλέον διατίθενται σε μορφή DORIS/RINEX, ενώ υπάρχουν διαθέσιμα και προϊόντα για τις τροχιές, τις συντεταγμένες των σταθμών, την ιονόσφαιρα και τους παραμέτρους προσανατολισμού της γης.

### 1.3 Σκοπός και Δομή εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η επισκόπηση των πρωτογενών δεδομένων DORIS και η προκαταρκτική ανάλυσή τους. Διερευνώνται οι μέθοδοι επεξεργασίας των δεδομένων του συστήματος, τα συναρτησιακά μοντέλα που περιγράφουν τις παρατηρήσεις, την κίνηση των δορυφόρων και τις επιδράσεις της γης και άλλων ουράνιων σωμάτων και γίνεται μία προσπάθεια προσέγγισης των εξισώσεων παρατήρησης και εξαγωγής κάποιων πρώιμων συμπερασμάτων αναφορικά με την ακρίβεια και τη δυνατότητα περαιτέρω ανάλυσης.

Η Εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια και 2 παραρτήματα.

Στο κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση, γίνεται επισκόπηση του συστήματος DORIS. Εξετάζεται το επίγειο και διαστημικό τμήμα, τα κέντρα επεξεργασίας του ο εξοπλισμός στους επίγειους σταθμούς και επί του δορυφόρου, αλλά και το πλήθος και η μορφή διαθέσιμων δεδομένων και προϊόντων DORIS.

Το κεφάλαιο 3, εστιάζει στη μορφή των DORIS RINEX και αναλύεται μία εκ των μεθόδων ανάλυσής τους που αναφέρεται στη βιβλιογραφία των Lemoine et al. (2016), κατά την οποία χρησιμοποιούνται τροποποιημένες εξισώσεις παρατήρησης Doppler ώστε να γίνει εκτίμηση της ταχύτητας του δορυφόρου. Η μέθοδος διαχωρίζει την ταχύτητα του δορυφόρου σε δύο συνιστώσες, τη θεωρητική και την υπολογισμένη από μετρήσεις, ενώ στις εξισώσεις λαμβάνονται υπόψιν με τις κατάλληλες παραμέτρους οι διορθώσεις των χρονομέτρων, η επίδραση της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας.

Στο κεφάλαιο 4, γίνεται συσχέτιση των παραμέτρων των εξισώσεων αυτών, με τις ποσότητες των RINEX και εφαρμόζεται η απλοποιημένη μορφή των εξισώσεων, σε μία ανάλυση πρώτου επιπέδου των πρωτογενών δεδομένων DORIS RINEX. Ως αποτέλεσμα, γίνεται εκτίμηση της ταχύτητας του δορυφόρου, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά σε διαγράμματα.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αξιολογούνται στο Κεφάλαιο 5, στο οποίο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, για τις δυνατότητες αξιοποίησης δεδομένων του συστήματος DORIS στην έρευνα. Ακόμη, αξιολογείται η μέθοδος που εφαρμόστηκε όσον αφορά την δεδομένη επιθυμητή ακρίβεια της ανάλυσης αλλά και τη δυνατότητα για ανάλυση υψηλότερης ακρίβειας. Τέλος, γίνονται προτάσεις σχετικά με επιπλέον έρευνα, και εφαρμογές που μπορεί να έχει η ανάλυση δεδομένων DORIS.

## 2 Βασικές Αρχές – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές αρχές και η βιβλιογραφική ανασκόπηση της παρούσας εργασίας. Παρουσιάζεται η διάρθρωση του συστήματος DORIS, το σήμα, τα διαθέσιμα προϊόντα αλλά και εφαρμογές που μπορεί να έχουν αυτά στην επιστημονική έρευνα.

### 2.1 Σύστημα DORIS

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Το σύστημα DORIS (Doppler Orbit determination and Radio-positioning Integrated on Satellite) σχεδιάστηκε στις αρχές της δεκαετίας 1980, από το Γαλλικό Διαστημικό Κέντρο (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) σε συνεργασία με το Γαλλικό Γεωγραφικό Ινστιτούτο (Institut Géographique National, IGN) και το Ερευνητικό Ίδρυμα Διαστημικής Γεωδαισίας (Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale, GRGS) στα πλαίσια της αποστολής δορυφορικής αλτιμετρίας TOPEX/Poseidon. Οι 2 βασικοί σκοποί ήταν:

- Ο καθορισμός της τροχιάς του δορυφόρου (Precise Orbit Determination POD)
- Ο προσδιορισμός της θέσης του δορυφόρου στην τροχιά αυτή

Η αρχική ανάπτυξη του δικτύου σταθμών στο έδαφος αφορούσε 32 σταθμούς, οι οποίοι είχαν εγκατασταθεί πριν την αποστολή του δορυφόρου Spot-2 το 1990, που έφερε τον πρώτο μηχανισμό DORIS πρώτης γενιάς, με δέκτη μονής συχνότητας. Η επιθυμητή ακρίβεια προσδιορισμού τροχιάς ήταν της τάξης δεκάδων εκατοστών. Εξ' αρχής το σύστημα DORIS χρησιμοποιήθηκε για τον ακριβή προσδιορισμό τροχιών (POD) σε αποστολές αλτιμετρίας. Έτσι κατ' επέκταση, το DORIS παίζει βασικό ρόλο στην ποιότητα των υψομετρικών δεδομένων και των παραγόμενων προϊόντων, όπως η καταγραφή της τοπογραφίας της επιφάνειας ωκεανών και οι αλλαγές στη στάθμη της θάλασσας (Dix-Matthews et al., 2020).

Το σύγχρονο σύστημα DORIS κάνει εφικτή την τάξη ακρίβειας προσδιορισμού τροχιάς  $<0.4$  mm/s (Moreaux et al., 2019), οι δέκτες είναι πλήρως αυτοματοποιημένοι, ενώ οι μετρήσεις και τα προϊόντα πραγματικού χρόνου υπολογίζονται, χρονοσημαίνονται και αποθηκεύονται επί του δορυφόρου.

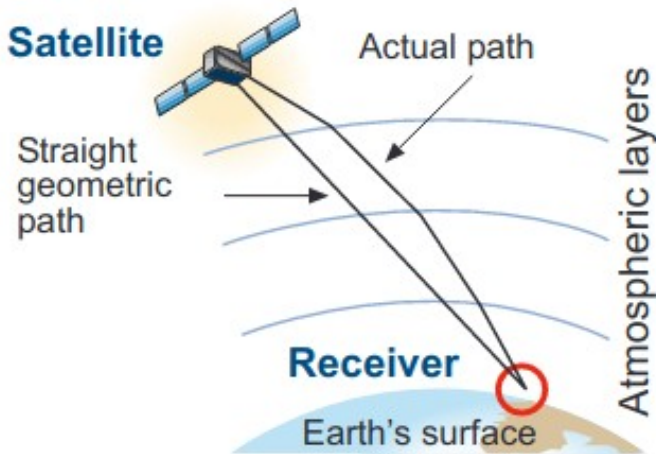
Ο δορυφορικός εντοπισμός με χρήση του φαινομένου Doppler εξηγείται με βασικές αρχές της κυματικής μηχανικής και βασίζεται στην ερμηνεία - ανάλυση συνεχών κυμάτων, εκπεμπόμενων από δορυφόρους. Στην επομένη ενότητα δίνεται μια συνοπτική περιγραφή του φαινομένου για την καλύτερη κατανόηση της αρχής λειτουργίας του συστήματος DORIS.

#### 2.1.2 Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler, είναι αυτό κατά το οποίο παρατηρείται μεταβολή στη συχνότητα που λαμβάνει κάποιος δέκτης όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ αυτού και του πομπού. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που η πηγή πλησιάζει τον παρατηρητή, το κύμα λαμβάνεται από τον δέκτη με υψηλότερη συχνότητα από ότι θα ίσχυε σε ακινησία ενώ, όταν η πηγή απομακρύνεται από τον δέκτη, τότε η συχνότητα του κύματος που αυτός παρατηρεί είναι πιο χαμηλή από ότι θα παρατηρούσε εάν η πηγή ήταν σε σταθερό σημείο (Harkins, 1979).

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δε χρειάζονται μέσο διάδοσης για να μεταφέρουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, η οποία και χρησιμοποιείται στον δορυφορικό εντοπισμό μέσω του φαινομένου Doppler για να μεταφερθεί το σήμα από τους δορυφόρους στους επίγειους σταθμούς ή αντίστροφα. Η ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα  $c_0$ , είναι μία συνάρτηση της ταχύτητας του φωτός στο κενό

και ενός δείκτη ατμοσφαιρικής διάθλασης, ο οποίος είναι απαραίτητος, επειδή πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλλαγή πορείας ενός κύματος, εξαιτίας της διάδοσής του σε ένα ιονισμένο υπόστρωμα της ατμόσφαιρας (Εικόνα 2.1). Η διάθλαση εξαρτάται από το βαθμό ιονισμού του υποστρώματος, τη συχνότητα του κύματος και τη γωνία πρόσπτωσης του κύματος στο υπόστρωμα, ενώ εκφράζεται με τον δείκτη διάθλασης  $n$ , όπου  $c_0 = c / n$ . Σε αυτή τη σχέση το  $c$  είναι σταθερό, αφού είναι η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό και το  $n$  αυξάνεται ανάλογα με την πυκνότητα της ατμόσφαιρας (Haug et al., 1980).



Εικόνα 2.1: Ατμοσφαιρική διάθλαση κατά τη μετάδοση σήματος  
 Πηγή: Subirana et al., 2013

Η συχνότητα παρατηρητή  $f_s$  και η συχνότητα πηγής  $f_r$  συνδέονται από την σχέση (2.1) (Meng et al., 2015) όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός ( $c = 299\,792\,456.2 \pm 1.1$  m/s),  $u_r$  η ταχύτητα του δέκτη και  $u_s$  η ταχύτητα του πομπού. Σε περίπτωση που ο δέκτης πλησιάζει τον πομπό χρησιμοποιείται (+), ενώ εάν απομακρύνεται (-).

$$f_r = \frac{(c \pm u_r)}{(c \pm u_s)} f_s \quad (2.1)$$

Υπάρχουν δύο διαφορετικές εφαρμογές του φαινομένου Doppler, (α) με τον δέκτη στον επίγειο σταθμό και τον πομπό επί του δορυφόρου (TRANSIT) και (β) με τον πομπό στον επίγειο σταθμό και το δέκτη επί του δορυφόρου (DORIS).

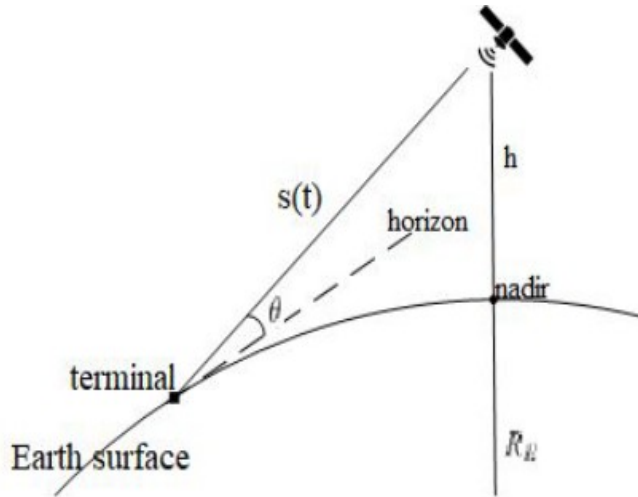
Στην πρώτη περίπτωση, του παλιού συστήματος TRANSIT, τα σήματα λαμβάνονταν από επίγειους σταθμούς (Εικόνα 2.1), όπου και αναλύονταν ώστε να προσδιοριστεί η θέση ενός εκ των δεκτών. Οι δέκτες των συστημάτων έφεραν έναν ταλαντωτή υψηλής ακρίβειας, και λάμβαναν σήματα σε μία προκαθορισμένη ραδιοσυχνότητα. Οι δορυφόροι του, χρησιμοποιούσαν τις ραδιοσυχνότητες VHF και UHF (150MHz – 400MHz). Κάθε μία από τις στεθερές συχνότητες που λαμβάνονταν σε κάποιο σταθμό, ήταν επηρεασμένη από το φαινόμενο Doppler και έτσι μπορούσε να προσδιοριστεί η απόσταση του δορυφόρου από μετρήσεις ακτινικών ταχυτήτων.

Στην δεύτερη περίπτωση, του DORIS (Εικόνα 2.2), ο πομπός βρίσκεται στον επίγειο σταθμό, έχει ένα σταθερό ταλαντωτή και εκπέμπει μία σταθερή συχνότητα  $f_s$  προς το δέκτη του δορυφόρου. Επειδή ο δορυφόρος κινείται με μεγάλη ταχύτητα ως προς τον εκάστοτε ακίνητο παρατηρητή στη Γη ( $u_s=0$ ), η συχνότητα  $f_r$ , που θα δεχθεί ο παρατηρητής στο δέκτη του, είναι διαφορετική, εξ αιτίας του φαινομένου Doppler. Αν  $u$  η ταχύτητα του δορυφόρου και  $\theta$  (Σχήμα 2.1) η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της τροχιάς



του και του παρατηρητή, η συχνότητα με την οποία λαμβάνει το σήμα ο παρατηρητής θα είναι (Nieto et.al. 2018):

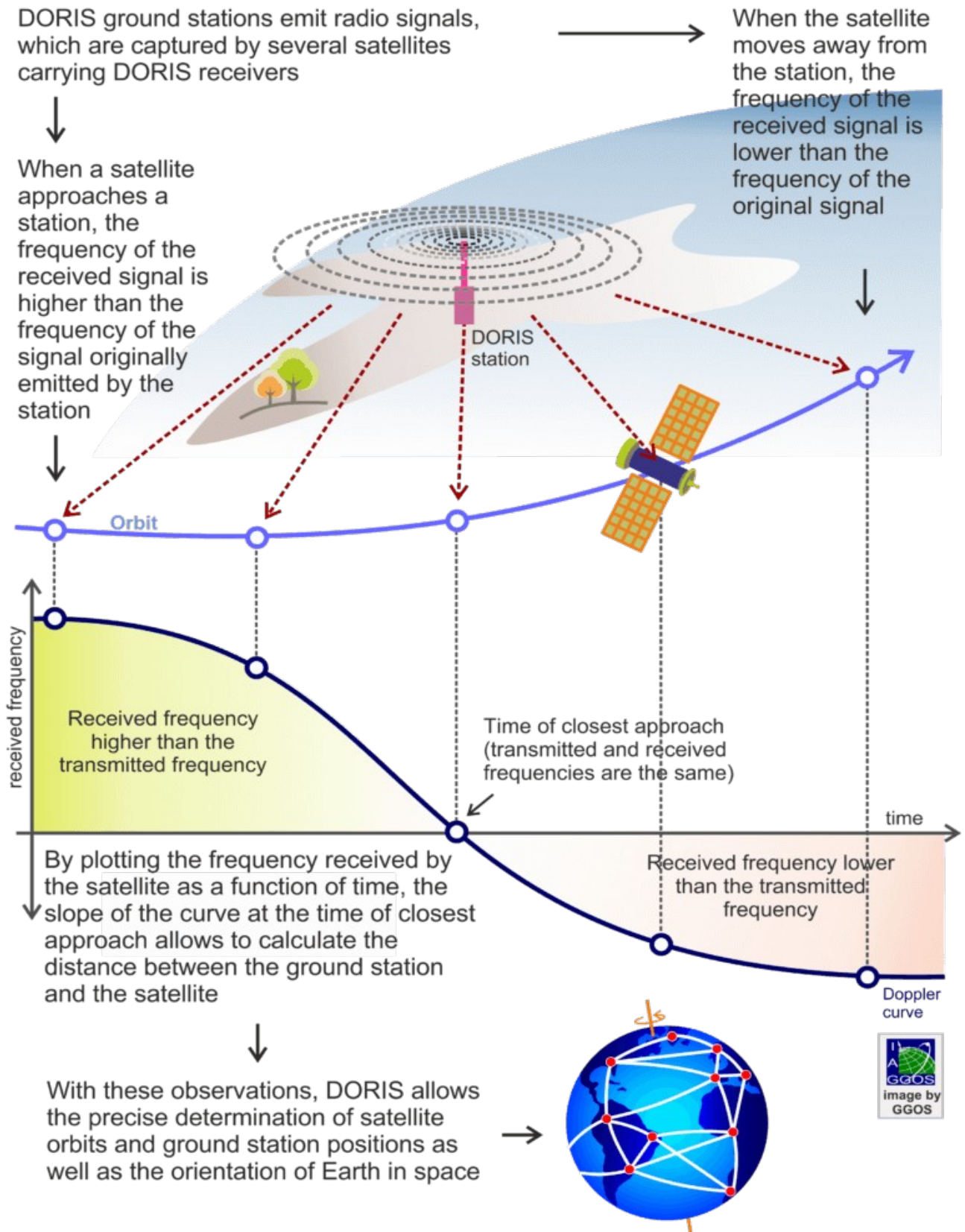
$$f_r = f_s \pm f_s \frac{u}{c} \cos\theta \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.1: Ατμοσφαιρική διάθλαση κατά τη μετάδοση σήματος  
 Πηγή: Subirana et al., 2013

### 2.1.3 Αρχή Λειτουργίας DORIS

Το σύστημα DORIS βασίζεται σε μετρήσεις Doppler που εκτελούν δορυφορικοί δέκτες (Εικόνα 2.2) περίπου κάθε 10 s, για τα σήματα που λαμβάνουν από σταθερούς επίγειους σταθμούς, οι οποίοι διαθέτουν δύο ειδών δέκτες, προσδιορισμού τροχιάς (orbit determination beacons, ODB), ή επίγειου εντοπισμού θέσης (ground location beacon, GLB). Με αυτές τις μετρήσεις, προσδιορίζεται η σχετική ταχύτητα των δορυφόρων ως προς τους σταθμούς. Κάθε αναμεταδότης/δέκτης επί του δορυφόρου είναι διπλής συχνότητας και λειτουργεί στις συχνότητες 2036.25 MHz και 401.25 MHz, στις οποίες εκπέμπουν συνεχώς σήματα οι επίγειοι σταθμοί DORIS (Kramer, 2002).

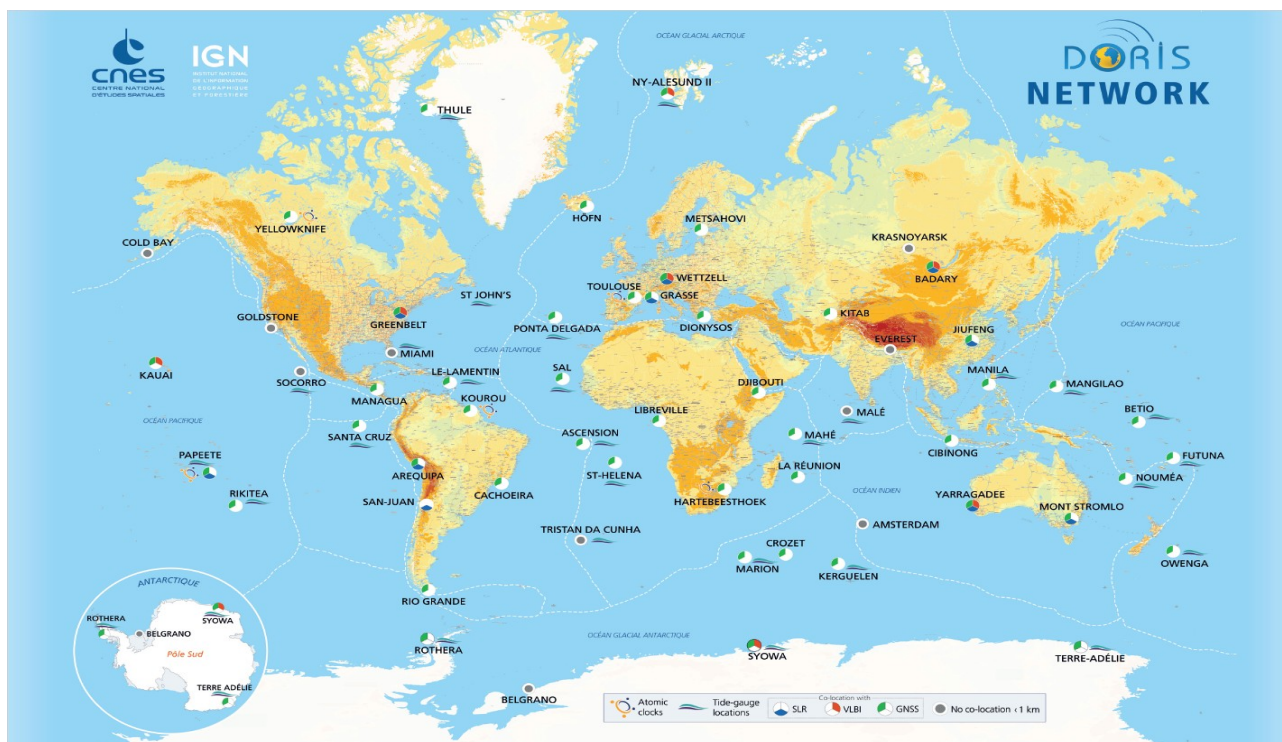


Εικόνα 2.2: Σύστημα DORIS: Λαμβανόμενη συχνότητα δορυφόρου κατά μήκος της τροχιάς Πηγή: <https://ggos.org/item/doris/>

## 2.2 Δομή Συστήματος DORIS

### 2.2.1 Επίγειο Τμήμα - Δίκτυο Σταθμών

Το σήμα του συστήματος DORIS εκπέμπεται στο διάστημα από το επίγειο δίκτυο σταθμών DORIS, του οποίου η ανάπτυξη και συντήρηση ελέγχονται από τις υπηρεσίες CNES και IGN. Αποτελείται από 60 σταθερούς επίγειους σταθμούς (Εικόνα 2.3) σε περισσότερες από 30 χώρες.



Εικόνα 2.3: Δίκτυο σταθερών σταθμών DORIS 2020 Πηγή: Ids-Doris.org

Οι περισσότεροι ορίζονται ως τροchioγραφικοί σταθμοί (orbitalgraphy beacons, BO) και χρησιμοποιούνται ως σημεία γεωαναφοράς στο λογισμικό καθορισμού τροχιών. Υπάρχουν επίσης, σταθμοί αναμετάδοσης πληροφοριών χρόνου (time beacons, BT) των οποίων τα χρονόμετρα συνδέονται με ατομικά χρονόμετρα, και κάποιοι κύριοι σταθμοί (master beacons, BM) όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, για εκπομπή δεδομένων.

Στην Ελλάδα αυτή τη στιγμή, υπάρχει ο σταθμός DIONYSOS (DIOB), στο Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου, της σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Εικόνα 2.4), ενώ μέχρι το 2014 λειτουργούσε και ο σταθμός GAVDOS, στο νησί της Γαύδου, σταθμός που ενδεχομένως να επαναλειτουργήσει στα επόμενα χρόνια. Σημειώνεται πως εμφανίζονται 2 καταγραφές για το σταθμό του Διονύσου, DIOA και DIOB επειδή άλλαξε το σημείο στο οποίο ήταν τοποθετημένη η κεραία, ενώ στις χρονοσειρές καταγράφονται και οι μετρήσεις του σταθμού GNSS, DYNG (<https://ids-doris.org/network/sitelogs/station.html?code=DIONYSOS>).



Εικόνα 2.4: Επίγειος σταθμός DIONYSOS DORIS - Διόνυσος

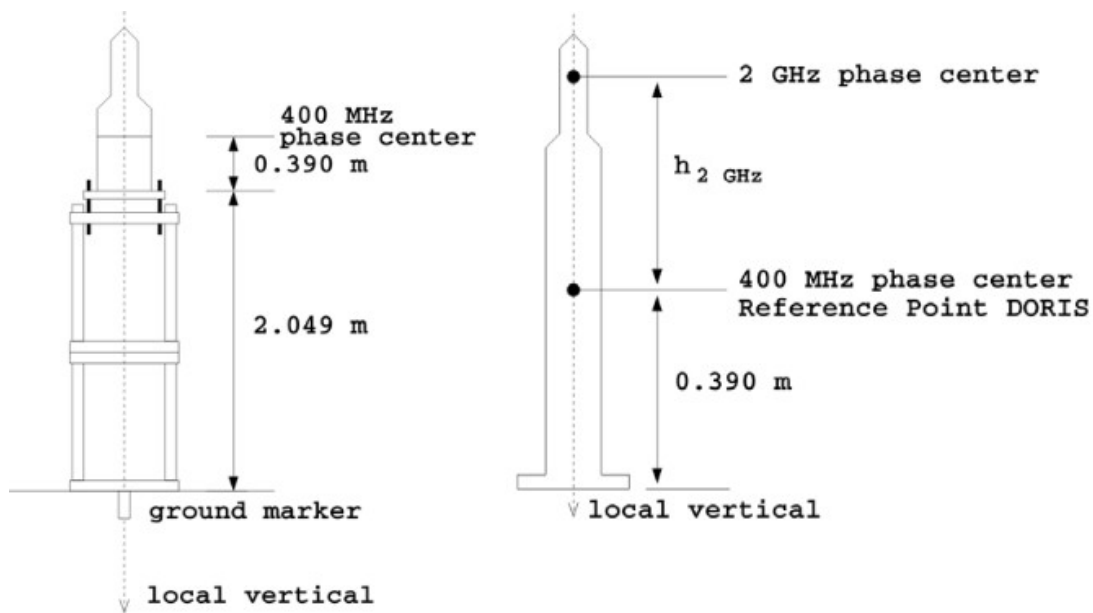
Έως και το 2013, 38 σταθμοί DORIS είχαν ιδρυθεί σε τοποθεσίες όπου λειτουργούν και σταθμοί άλλων μεθόδων υψηλής ακρίβειας διαστημικής γεωδαισίας (VLBI, SLR, GNSS). Αυτοί οι σταθμοί κάνουν εφικτή την αυτοβαθμονόμηση του συστήματος. Για όλους τους σταθμούς υπάρχει ενημέρωση για τοπικά γεγονότα όπως για κενά στη μετάδοση σήματος, προβλήματα που μπορεί να προκύπτουν στον εξοπλισμό αλλά και ειδοποιήσεις για σεισμούς απόστασης έως 500km και μεγέθους πάνω από 6.

Οι θέσεις των κεραιών του δικτύου των σταθμών, αναφέρονται στο πλαίσιο αναφοράς ITRF2008, που αποτελεί και το επίσημο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος DORIS.

### Εξοπλισμός Επίγειου Σταθμού

Κάθε επίγειος σταθμός είναι εξοπλισμένος με :

- έναν εξαιρετικά σταθερό ταλαντωτή (Ultra Stable Oscillator, USO).
- μία κεραία διπλής συχνότητας, που εκπέμπει προς όλες τις διευθύνσεις (omnidirectional antenna).
- μία μετεωρολογική μονάδα, με μετρήσεις θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας για την τροποσφαιρική διόρθωση.
- μία μπαταρία, για παροχή αυτονομίας σε περίπτωση διακοπής παροχής ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 2.5: Γεωμετρικά στοιχεία μεταλλικής βάσης & κεραίας DORIS τύπου STAREC, επίγειου σταθμού

Στην Εικόνα 2.5 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της βάσης στην οποία στηρίζεται η επίγεια κεραία, αλλά και της ίδιας της κεραίας, η συγκεκριμένη είναι τύπου STAREC. Εφόσον ο δέκτης πραγματοποιεί μετρήσεις διπλής συχνότητας, έχει 2 κέντρα φάσης, ένα για κάθε συχνότητα (2 GHz και 400 MHz).

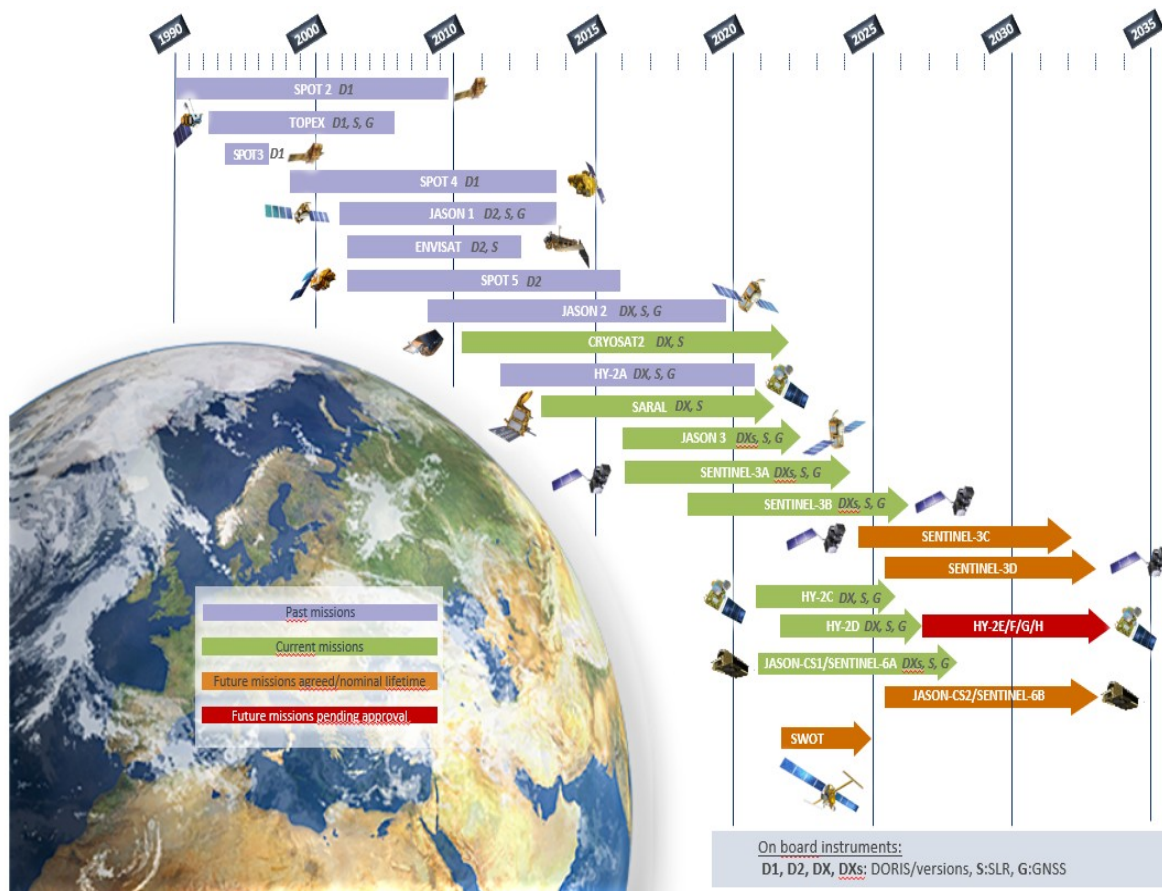
## 2.2.2 Τμήμα Διαστήματος - Αποστολές DORIS

Το σύστημα DORIS δεν έχει προκαθορισμένο δίκτυο δορυφόρων, αλλά οι δέκτες του τοποθετούνται σε δορυφόρους με διάφορους σκοπούς, χαμηλής κυρίως τροχιάς (LEO). Τα τροχιακά δεδομένα είναι ανοικτά και παρέχονται δωρεάν στην γεωδαιτική κοινότητα. Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τις χρονικές διάρκειες για όλες τις αποστολές δορυφόρων DORIS. Αυτή τη στιγμή είναι ενεργές 8 δορυφορικές αποστολές: HY-2D, HY-2C, Sentinel 6A, Sentinel 3B, Jason 3A, Sentinel 3A, SARAL, Cryosat2.

Όνομα	Έναρξη Αποστολής	Λήξη Αποστολής
HY-2D	2021-05-19	-
SENTINEL-6A	2020-11-21	-
HY-2C	2020-09-21	-
SENTINEL-3B	2018-04-25	-
SENTINEL-3A	2016-02-16	-
JASON-3	2016-01-17	-
SARAL	2013-02-25	-
HY-2A	2011-08-15	2020-09-14
CRYOSAT-2	2010-04-08	-
JASON-2	2008-06-20	2019-10-10
STPSat-1	2007-03-09	2009-10-07
SPOT-5	2002-05-04	2015-12-11
ENVISAT	2002-04-01	2012-05-09
JASON-1	2001-12-07	2013-06-21
SPOT-4	1998-03-24	2013-06-24
SPOT-3	1993-09-26	1996-11-14
TOPEX/POSEIDON	1992-08-10	2005-10-09
SPOT-2	1990-01-22	2009-07-29

Πίνακας 2.1: Αποστολές DORIS (1990-2021)

Στην Εικόνα 2.6 φαίνεται το δορυφορικό δίκτυο DORIS, συμπεριλαμβανομένου μελλοντικών αποστολών.



Εικόνα 2.6 Δίκτυο δορυφορικών αποστολών DORIS (2022) Πηγή: <https://ids-doris.org/analysisdocuments/92-satellites.html>

## Εξοπλισμός Δορυφόρου

Ο εξοπλισμός επί του δορυφόρου αποτελείται από (Jayles et al., 2006):

- έναν δέκτη που πραγματοποιεί μετρήσεις Doppler και δέχεται βοηθητικά δεδομένα (auxiliary data)
- έναν (ή δύο στις τελευταίες αποστολές) εξαιρετικά σταθερό ταλαντωτή USO, ίδιο με αυτόν που διαθέτουν οι επίγειοι σταθμοί.
- μία κεραία διπλής συχνότητας, που εκπέμπει προς όλες τις διευθύνσεις (omnidirectional antenna, DIODE)
- μία μονάδα ελέγχου οργάνων (instrument control unit).



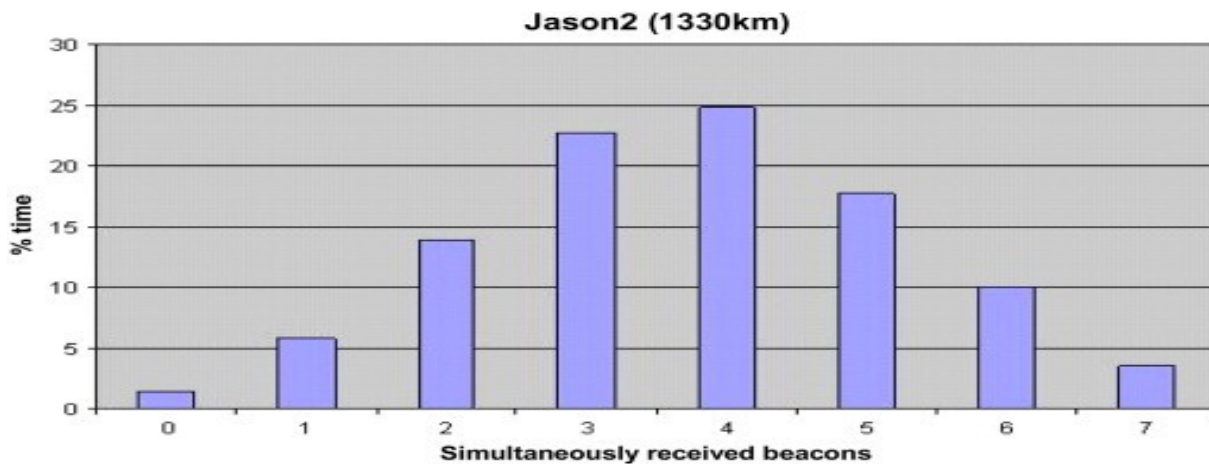
Εικόνα 2.7: Εξοπλισμός δορυφόρου: Κεραία, δέκτης και ταλαντωτής USO

### 2.2.3 Πλοήγηση DIODE

Το DIODE (Doris Immediate on-board Orbit Determination) είναι μία εξελεγχόμενη λειτουργία του δέκτη DORIS, η οποία υπολογίζει τη θέση και την ταχύτητα του δορυφόρου – ένα λειτουργικό σύστημα προσδιορισμού τροχιάς σε πραγματικό χρόνο, επί του δορυφόρου. Εισήχθηκε πρώτη φορά το 1991, και αναπτύχθηκε από την CNES με τεχνική υποστήριξη από την εταιρία COFRAMI. Έπειτα από τη δοκιμαστική χρήση του στην αποστολή SPOT4 (1998), ενσωματώθηκε ως μόνιμο χαρακτηριστικό σε όλες τις αποστολές DORIS. Οι εκτιμήσεις θέσης και ταχύτητας του DIODE εκφράζονται στο ITRF2008 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο στο δορυφόρο, αλλά και να εισάγονται στην μεταδιδόμενη πληροφορία ώστε να παρέπονται ακριβείς παράμετροι τροχιάς στην επίγεια επεξεργασία (Jayles et al., 2015).

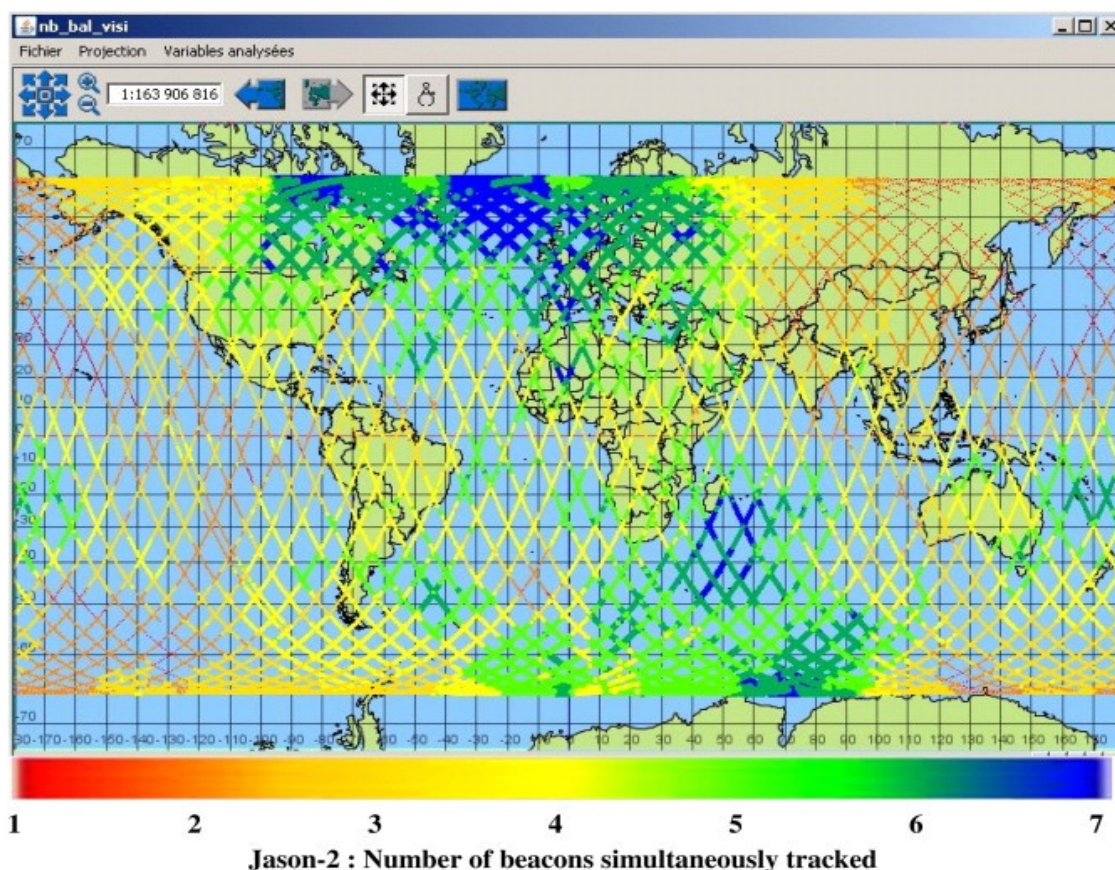
Σημαντικό πλεονέκτημα του DIODE είναι η αύξηση της αυτονομίας του συστήματος DORIS. Με γνωστή τροχιά, το λογισμικό επί του δορυφόρου μπορεί να προβλέψει τους επόμενους σταθμούς που θα είναι ορατοί από το δορυφόρο, να κάνει την βέλτιστη επιλογή από αυτούς και να προγραμματίσει τον κύκλο παρακολούθησης σταθμών.

Χάρη στο DIODE, και τις κεραίες νέας γενιάς “DGXX” που διαθέτουν 7 κανάλια διπλής συχνότητας, κάθε δέκτης μπορεί πλέον, από την αποστολή Jason-2 και έπειτα, να λαμβάνει σήμα από έως και 7 δέκτες ταυτόχρονα.



Διάγραμμα 2.1: Πλήθος ταυτόχρονων παρατηρήσεων σταθμών του δέκτη DORIS στο δορυφόρο Jason-2 (1330km)  
 Πηγή: Auriol 2010

Τον περισσότερο χρόνο πτήσης του Jason-2 (ύψος 1330km) είναι ταυτόχρονα ορατοί 4 σταθμοί όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.1, των οποίων η γεωγραφική κατανομή φαίνεται στην Εικόνα 2.8, με έως και 7 ταυτόχρονες παρατηρήσεις στον Βόρειο Ατλαντικό και το Νότιο Ινδικό Ωκεανό (Auriol, 2010).



Εικόνα 2.8: Γεωγραφική κατανομή του πλήθους παρατηρούμενων σταθμών του δέκτη DORIS στο δορυφόρο Jason-2  
 Πηγή: Auriol 2010



## 2.2.4 Κέντρο Επεξεργασίας SSALTO

Το κέντρο επεξεργασίας SSALTO εδρεύει στην CNES, Toulouse, αποτελεί το κέντρο ελέγχου του συστήματος DORIS, καθώς κέντρο επεξεργασίας δεδομένων για πολλαπλούς σκοπούς. Συγκεκριμένα το SSALTO είναι υπεύθυνο για τα εξής:

- έλεγχος δικτύου σταθμών DORIS
- λήψη εκπεμπόμενων μηνυμάτων από τους δορυφόρους και την προ-επεξεργασία τους
- τεχνολογική αρχειοθέτηση
- ακριβής προσδιορισμός τροχιών (POD)
- ακριβής προσδιορισμός θέσης σταθμών
- έλεγχος αξιοπιστίας συστήματος DORIS

Εκτός από τα προϊόντα πραγματικού χρόνου που στέλνονται στους δορυφόρους, το SSALTO παράγει τροχιές και δεδομένα αλτιμετρίας, επεξεργάζοντας τα δεδομένα DORIS με συγκεκριμένο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια.

## 2.3 Σήμα DORIS

Το σήμα DORIS είναι ένα σήμα ραδιοσυχνότητας, το οποίο αποτελείται κυρίως από δύο συνιστώσες (Jayles et al., 2006).

### 2.3.1 Τυπικό σήμα (Standard beacon transmission)

Η μετάδοση των τυπικών σταθμών (beacons) αποτελείται από δύο φέρουσες συχνότητες, που διαμορφώνονται από το εκπεμπόμενο μήνυμα, το οποίο δίνει συγκεκριμένες πληροφορίες για την κεραία, (ταυτότητα, κατάσταση, τάση παροχής, επίπεδο μπαταρίας, εσωτερική θερμοκρασία, μετεωρολογικά δεδομένα, πληροφορίες συγχρονισμού). Η μία συχνότητα (2036.25 MHz) χρησιμοποιείται για την ακριβή μέτρηση Doppler, ώστε να καθοριστεί η ακτινική ταχύτητα μεταξύ δορυφόρου και δέκτη και η άλλη (401.25 MHz) για να εξαλειφθούν σφάλματα καθυστέρησης διάδοσης κυμάτων που οφείλονται στην ιονόσφαιρα. Στους σύγχρονους δέκτες έχει ενσωματωθεί ένας κώδικας ελέγχου της αξιοπιστίας του σήματος.

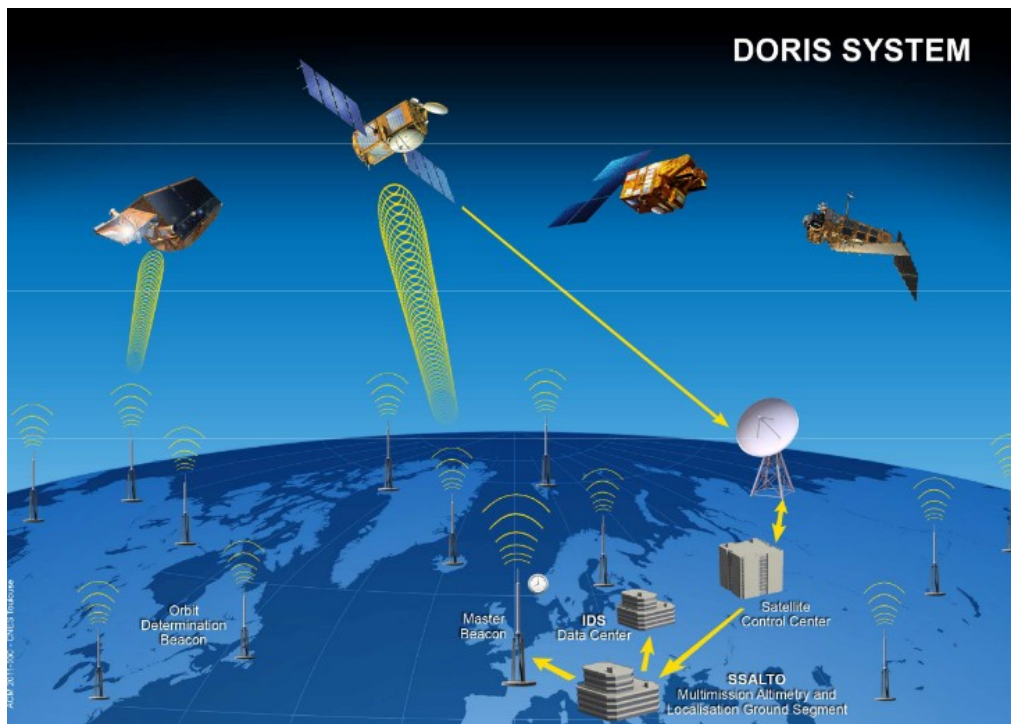
Τα παρατηρούμενα μεγέθη είναι η συχνότητα του σήματος και ένα ιδιαίτερο τμήμα του μηνύματος το οποίο χρησιμοποιείται για τη χρονοσήμανση. Αυτές οι πληροφορίες μετατρέπονται σε Doppler και μετρήσεις για χρονοσήμανση, από τους δέκτες επί του δορυφόρου (Jalabert et.al. 2018).

### 2.3.2 Broadcasts uploads – Μεταδεδομένα

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.9, τα δεδομένα εκπομπής (broadcasts uploads) μεταδίδονται από συγκεκριμένους κύριους σταθμούς master beacons (BM) (Toulouse – France, Kourou – French Guyana, Hartebeesthoek – South Africa). Έπειτα, στο κέντρο επεξεργασίας SSALTO παράγονται δεδομένα που περιέχουν πληροφορίες για το επίγειο δίκτυο σταθμών, τις οποίες χρησιμοποιούν οι δέκτες επί του δορυφόρου και συγκεκριμένα αφορούν (Jayles et al., 2006):

- Ακριβείς συντεταγμένες των κεραιών DORIS (για συγκεκριμένη εποχή) ώστε να υπολογίζονται εβδομαδιαία στο SSALTO οι νέες συντεταγμένες των δεκτών. Αυτές, παρέχονται στους δορυφόρους και πραγματοποιείται προσδιορισμός και χρονοσήμανση, με επεξεργασία μετρήσεων Doppler και συγχρονισμού χρονομέτρων (Jayles et.al., 2004).

- Ακριβείς χρονικές δεσμεύσεις για σταθμούς αναμετάδοσης πληροφορίας χρόνου (time beacons), των οποίων τα χρονόμετρα έχουν παραμετροποίηση ως προς τον διεθνές ατομικό χρόνο TAI. Η χρονική μετατόπιση και απόκλιση των master beacons μετρούνται περιοδικά και ελέγχονται με την ζητούμενη ακρίβεια πριν μεταδοθούν στο διάστημα με χρονικά δεδομένα εκπομπής (broadcast time uploads). Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται από το λογισμικό του DIODE επί του σκάφους, για τον ακριβή συσχετισμό του χρονόμετρου στο δορυφόρο DORIS με την κλίμακα χρόνου TAI.
- Δεδομένα γενικού συγχρονισμού χρόνου, συσχετισμοί δηλαδή των UTC και UT1 με τον χρόνο TAI.



Εικόνα 2.9: Σύστημα DORIS Πηγή: ids.org

## 2.4 Προϊόντα DORIS

### 2.4.1 Μετρήσεις DORIS

Οι πρωτογενείς μετρήσεις των DGXX λειτουργικών συστημάτων DORIS είναι διαθέσιμες από την IDS (<https://cddis.nasa.gov/archive/doris/data/>), σε μορφή DORIS RINEX 3.0 (Receiver Independent Exchange Format), οποίων η δομή αναλύεται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο. Τα δεδομένα αυτά διατίθενται από το CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) και είναι ημερήσια (24 ώρες).

Έχοντας υποστεί επεξεργασία και συσχετιστεί με τα προϊόντα ακριβούς τροχιάς, παράγονται αρχεία που αφορούν σε επεξεργασμένα δεδομένα περίπου 7-10 ημερών/αρχείο (pre-processed measurements). Οι μετρήσεις DORIS παρέχονται στην επιστημονική κοινότητα μέσω της IDS, σε μορφή αρχείου DORIS 1.0 (πριν το 2002) 2.1, 2.2 (από το 2008) από τα κέντρα των:

- NASA/CDDIS (Noll and Dube, 2004)
- IGN (Tavernier et al., 2003)

Σημαντικό χαρακτηριστικό των αρχείων DORIS 2.2 αποτελεί η διόρθωση για την South Atlantic Anomaly (SAA), την επίδραση της υψηλής ακτινοβολίας, που εντοπίζεται σε περιοχή του νότιου Ατλαντικού, στην λαμβανόμενη από το δορυφόρο συχνότητα.

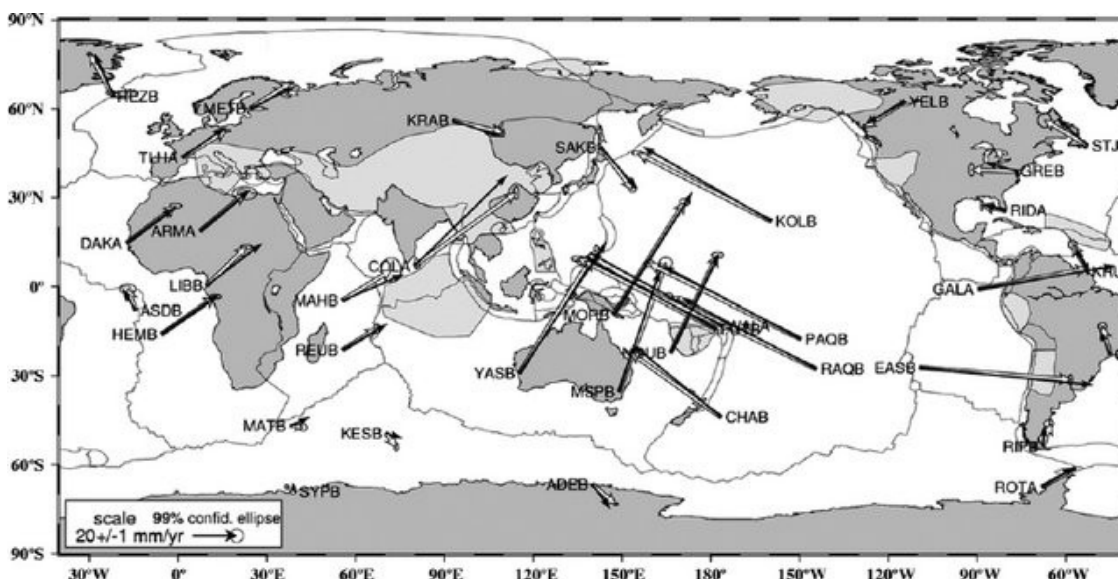
Οι μετρήσεις χρονοσήμανσης χρησιμοποιούνται μόνο για να προσδιοριστούν οι μετρήσεις Doppler στην κλίμακα χρόνου TAI. Η ακρίβειά τους (μερικά μικροδευτερόλεπτα μs, που το καθένα αντιστοιχεί σε 300m) τα καθιστά ελάσσονος σημασίας για την αναλυτική επεξεργασία. Έτσι, μόνο οι μετρήσεις Doppler παρέχονται στο IDS, αφού έχουν χρονοσημανθεί σωστά.

#### 2.4.2 Τροχιές DORIS και DPOD

Η εφημερίδα τροχιών (precise orbit ephemeris, POE) παρέχεται σε μορφή αρχείου sp1, sp3 και sp3c format (<https://cddis.nasa.gov/archive/doris/products/orbits/ssa/>) και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε επιστημονικά projects, καθώς βοηθά στην επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων. Με αυτή την αναλυτική επεξεργασία επιτυγχάνεται ποιότητα προσδιορισμού τροχιών της τάξης 1-3cm, σε αποστολές όπως οι TOPEX/Poséidon (Nouël et al., 1994), Jason-1 (CHOI et al., 2004) και Envisat (Zandbergen et al., 2003).

Παράγονται επίσης ταχεία δεδομένα, με καθυστέρηση λίγων ημερών, για άμεση επεξεργασία γρήγορου ελέγχου. Δεδομένα πραγματικού χρόνου DORIS είναι επίσης διαθέσιμα όταν η καθυστέρηση είναι πολύ μικρή (λίγες ώρες). Για παράδειγμα τα προϊόντα Jason-1 OSDR (Operational Sensor Data Records) παρέχονται στην αποστολή Jason-2 για τον προσδιορισμό τροχιάς POD, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ακρίβεια 1cm στην ακτινική συνιστώσα (Zelensky et al., 2010).

Τα DPOD περιέχουν συντεταγμένες και ταχύτητες σε εποχή 2000.0, όλων των σταθμών DORIS που χρησιμοποιούνται για POD και αποτελεί επέκταση του ακριβή προσδιορισμού τροχιάς ITRF (Moreaux et al., 2019). Οι λύσεις DPOD είναι διαθέσιμες σε SINEX format και έχουν υπολογιστεί για τα ITRF, ως DPOD2000, DPOD2005, DPOD2008, DPOD2014 (<https://cddis.nasa.gov/archive/doris/products/dpod/>). Μπορεί να είναι πολύ χρήσιμα ακόμη και για την εκτίμηση του γεωλογικού μοντέλου όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.10 όπου οι Willis et al., (2007) συγκρίναν το γεωλογικό μοντέλο από τις ταχύτητες των σταθμών που προκύπτουν από τα SINEX, με το τεκτονικό μοντέλο του Bird PB2002 και τα δύο συμφωνούσαν με ικανοποιητική ακρίβεια.



Εικόνα 2.10: Οριζοντιογραφική ταχύτητα 37 σταθμών DORIS συγκρινόμενη με το τεκτονικό μοντέλο πλακών PB2002  
Πηγή: Willis et al., 2007.

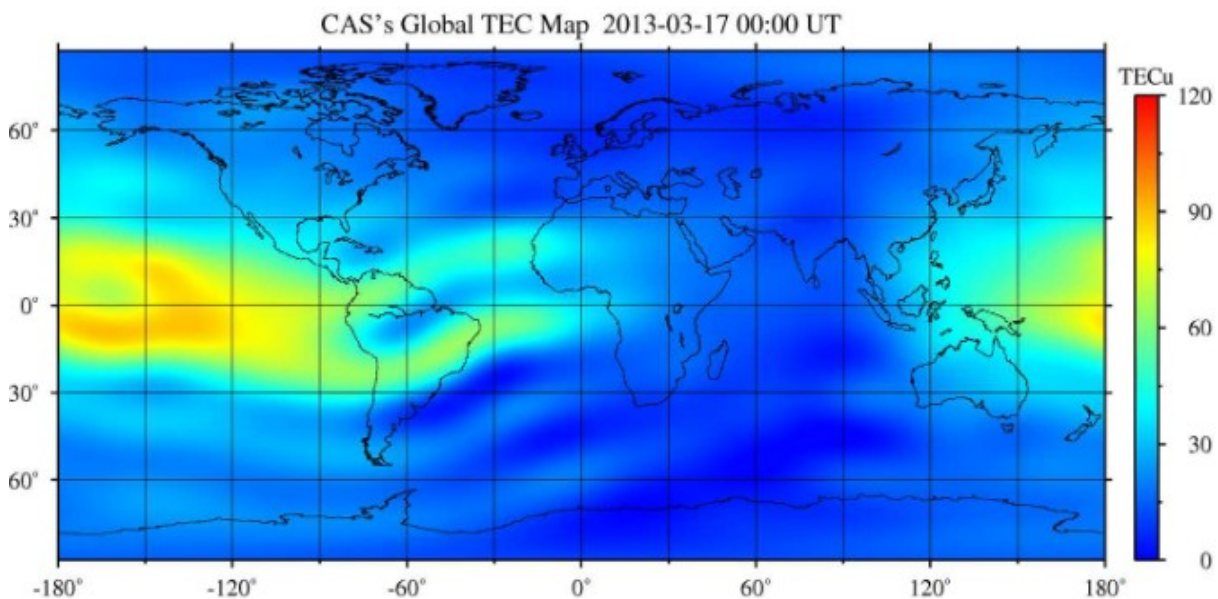
### 2.4.3 Εβδομαδιαίες Συνδυαστικές Λύσεις και Χρονοσειρές SINEX (Weekly & Global SINEX)

Οι λύσεις SINEX (Solution Independent Exchange) περιλαμβάνουν εβδομαδιαίες θέσεις σταθμών, ημερήσιες παραμέτρους προσανατολισμού γης (EOP) και έναν πίνακα συσχέτισης. Κάθε 3 μήνες (με καθυστέρηση 3 μηνών), τα 6 κέντρα ανάλυσης του IDS συνδυάζουν τις λύσεις και αφού γίνει συνόρθωση με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, προκύπτει το προϊόν συνδυαστικών εβδομαδιαίων λύσεων, διαθέσιμα στο [https://cddis.nasa.gov/archive/doris/products/sinex\\_series/](https://cddis.nasa.gov/archive/doris/products/sinex_series/) (Moreaux et al., 2016).

Για να μπορούν να αξιοποιηθούν τα δεδομένα ευρέως, έχει δημιουργηθεί το αρχείο global SINEX, το οποίο περιέχει αστρονομικές και γεωδαιτικές παραμέτρους για να περιγραφεί η θέση και η κίνηση των σταθμών DORIS, προσανατολισμό της γης, σχετική ως προς το κέντρο της γής, κίνηση του δικτύου επίγειων σταθμών και κίνηση των δορυφόρων. Ακόμη, περιλαμβάνονται παράμετροι για τοπικά μοντέλα όπως αυτά που περιγράφουν την επίδραση της τροπόσφαιρας στη διάδοση σήματος (Seitz et al., 2021). Είναι και αυτά διαθέσιμα ως αρχεία SINEX ([https://cddis.nasa.gov/archive/doris/products/sinex\\_global/](https://cddis.nasa.gov/archive/doris/products/sinex_global/)).

### 2.4.4 Ιονοσφαιρικά Προϊόντα

Αυτά τα δεδομένα είναι διορθώσεις για την ιονόσφαιρα, δεν μπορούν να επανυπολογιστούν και είναι σε iono format (<https://cddis.nasa.gov/archive/doris/products/iono/ssa>). Οι διορθώσεις αφορούν στον δείκτη TEC (Total Electron Content), που είναι σχετικός με την επίπτωση της ιονόσφαιρας στη διάδοση των ραδιοκυμάτων (Afraimovich et.al. 2008). Οι χαμηλές τροχιές των δορυφόρων DORIS σημαίνει πως οι δορυφόροι βρίσκονται κάτω από την ιονόσφαιρα (<1000m) και άρα μετρούν τον δείκτη TEC για περιοχές κάτω από αυτή, σε αντίθεση με τους δορυφόρους του GPS (>1000m) (Tavernier et al., 2005). Οι Yin and Michell (2011) στην έρευνά τους για την συμβατότητα των ιονοσφαιρικών εικόνων από GPS με τα ιονοσφαιρικά δεδομένα DORIS, διαπιστώνουν ότι τα δεδομένα μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό βοήθημα και να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά, εξαιτίας της υψηλής χρονικής και χωρικής τους ακρίβειας, δημιουργώντας χάρτες καλής ακρίβειας όπως αυτός στο Διάγραμμα 2.2.



Διάγραμμα 2.2: Παγκόσμιος χάρτης TEC 2013, από δεδομένα DORIS.  
Πηγή: CNES

#### 2.4.5 Παράμετροι Προσανατολισμού Γης (Earth orientation parameters EOP) και Προσδιορισμός Γεώκεντρου

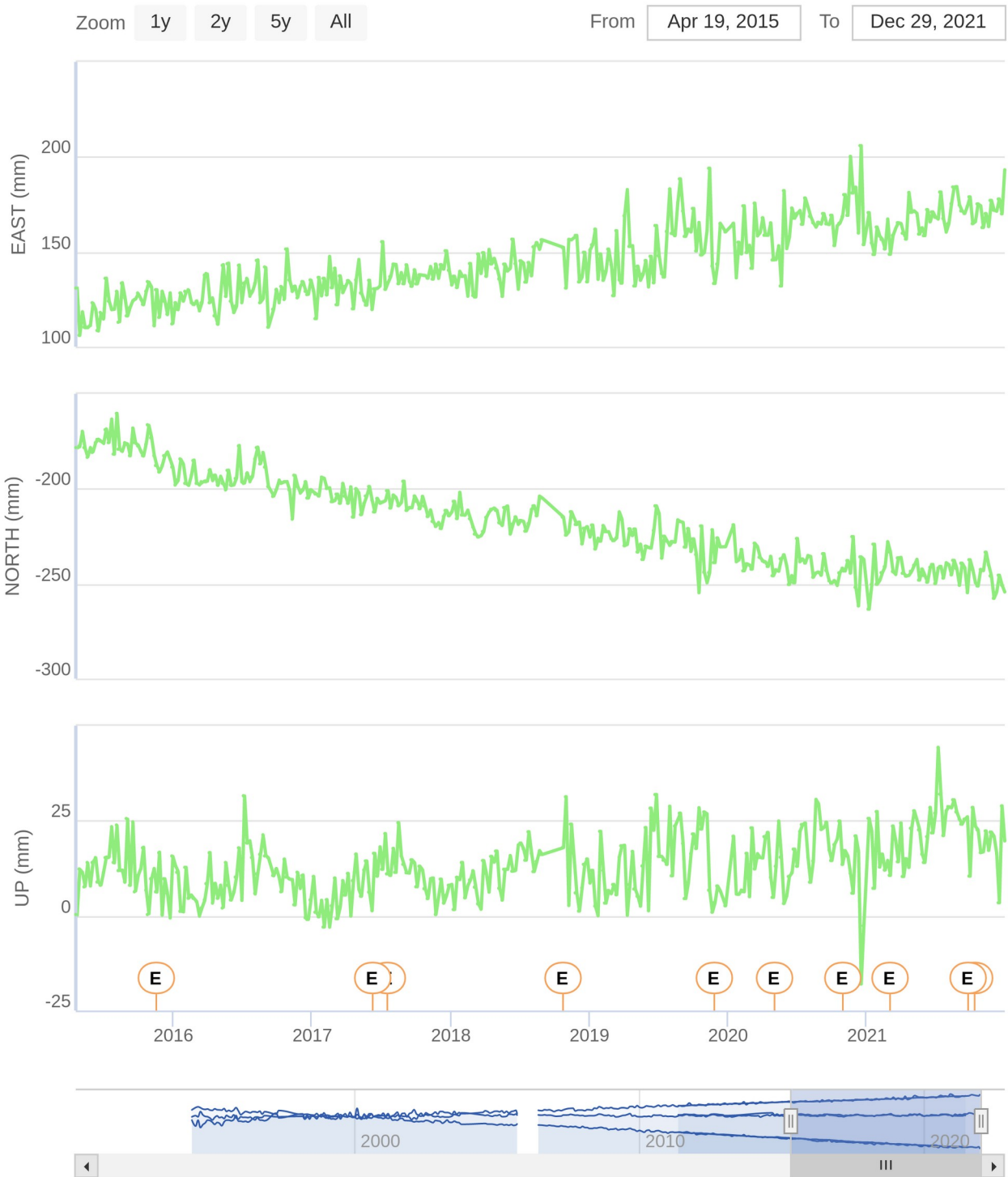
Οι παράμετροι προσδιορισμού της γης, δηλαδή διόρθωση για τις πολικές συντεταγμένες και ο ρυθμός μεταβολής τους, υπολογίζονται ημερήσια. Εβδομαδιαίες χρονοσειρές παραμέτρων προσανατολισμού της γης, είναι διαθέσιμες από το CDDIS και παρέχονται σε αρχεία μορφής eop format (<https://cddis.nasa.gov/archive/doris/products/eop/>). Τα δεδομένα είναι υψηλής ακρίβειας, και κάποιες έρευνες (Lian et al., 2018) έχουν δείξει ότι σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι πιο ικανοποιητικά από αυτά άλλων μεθόδων όπως SLR και VLBI. Οι δορυφόροι DORIS έχουν χαμηλότερες τροχιές από αυτούς του GPS και επομένως είναι πιο ευαίσθητοι στην επίδραση της βαρύτητας της γης. Ταυτόχρονα, επειδή οι μετρήσεις DORIS βασίζονται σε μετάδοση ραδιοκυμάτων, η ακρίβειά τους δεν εξαρτάται από την παρουσία ή μη, νεφών. Ωστόσο επειδή οι μετρήσεις DORIS δείχνουν να παρουσιάζουν συστηματικά σφάλματα στον ζενίθιο άξονα, εξετάζεται πως μπορεί να βελτιωθεί η ακρίβεια των δεδομένων (Couhert et al., 2018). Ο προσδιορισμός του γεώκεντρου θεωρείται εξαιρετικά κρίσιμος, αφού το γεώκεντρο αποτελεί το κέντρο του διεθνούς συστήματος αναφοράς TRF, επομένως τα δεδομένα αυτά είναι πολύ σημαντικά για την επιστημονική κοινότητα (Feissel-Vernier et al., 2006). Χρονοσειρές προσδιορισμού του γεώκεντρου είναι διαθέσιμες από το IDS σε μορφή αρχείου geoc (<https://cddis.nasa.gov/archive/doris/products/geoc/>).

#### 2.4.6 Προϊόντα Εντοπισμού Θέσης (Positioning products)

Τα προϊόντα εντοπισμού θέσης αφορούν σε χρονοσειρές διαφορών συντεταγμένων επίγειων σταθμών, σε μορφή stcd (<https://cddis.nasa.gov/archive/doris/products/stcd/>). Παράγονται από τα κέντρα ανάλυσης IDS από επεξεργασία των εβδομαδιαίων λύσεων SINEX και οι χρονοσειρές παρέχονται εβδομαδιαία στην επιστημονική κοινότητα μέσω της IGN-JPL αλλά και με διαφορετική χρονική συχνότητα από τις υπηρεσίες LEGOS-CLS, INASAN, GSFC/Geoscience Australia και SSALTO (Tavernier et al., 2005). Στην Εικόνα 2.11 φαίνονται οι χρονοσειρές συντεταγμένων για το σταθμό του Διονύσου DYNG, για το χρονικό διάστημα 19 Apr 2015 – 29 Dec 2021.

#### 2.4.7 Γωνίες Προσανατολισμού (Quaternions)

Οι γωνίες προσανατολισμού του δορυφόρου (quaternions) αποτελούν προϊόντα που είναι διαθέσιμα για λίγους μόνο δορυφόρους (Jason-1, Jason-2, Jason-3, Saral) και παρέχονται σε καθημερινή βάση (<https://cddis.nasa.gov/archive/doris/ancillary/quaternions/>) σε ASCII format όπως φαίνεται στο παρακάτω τμήμα αρχείου στη σελίδα 24. Είναι πολύ σημαντικά για την μοντελοποίηση τροχιάς του δορυφόρου, αστελούνται από 4 παραμέτρους, μία κλίμακα και 3 γωνίες, αναφέρονται στην κλίμακα χρόνου J2000 και καλύπτουν περίοδο 28 ωρών ώστε να υπάρχει 2ωρη επικάλυψη μεταξύ διαδοχικών μερών (Zeitlhöfler, 2019).



Highcharts.com

Εικόνα 2.11: Χρονοσειρές συντεταγμένων, σταθμός DIOB DIONYSOS, με E συμβολίζονται καταγραφές σεισμών. Χρονικό διάστημα 19 Apr 2015 – 29 Dec 2021

Τμήμα αρχείου quarternions.

```
# Parameters : QISLEST1 QISLEST2 QISLEST3 QISLEST4
# Start date : 2017/01/05 22:00:00
# End date : 2017/01/07 02:00:00
# Parameter unit : none none none none
# Minimum value :0.000551 -0.744554 -0.755653 -0.667419
# Maximum value :0.755134 0.749760 0.755716 0.744083
2017/01/05 22:00:15.255 1556830720 0.724956 2007 1827928831 0.425598 2007 1840748286 0.214291 2007 2158744575 -0.497378 2007
2017/01/05 22:00:47.255 1549773312 0.721669 2007 1859696127 0.432994 2007 1933381630 0.225075 2007 2186271999 -0.490969 2007
2017/01/05 22:01:19.129 1542407424 0.718239 2007 1890921983 0.440265 2007 2025125118 0.235756 2007 2214152191 -0.484478 2007
2017/01/05 22:01:51.129 1534625792 0.714616 2007 1921994751 0.447499 2007 2117306622 0.246487 2007 2242741247 -0.477821 2007
2017/01/05 22:02:23.129 1526534400 0.710848 2007 1952495871 0.454601 2007 1104311039 0.257117 2007 2271659775 -0.471088 2007
2017/01/05 22:02:55.129 1518134016 0.706936 2007 1982441471 0.461573 2007 1149536511 0.267647 2007 2300897279 -0.464281 2007
2017/01/05 22:03:27.253 1509315584 0.702830 2007 2012233471 0.468510 2007 1194887679 0.278206 2007 2330846207 -0.457308 2007
2017/01/05 22:03:59.128 1500201216 0.698586 2007 2041438463 0.475309 2007 1239797759 0.288663 2007 2361121023 -0.450259 2007
2017/01/05 22:04:31.128 1490792960 0.694205 2007 2070056959 0.481973 2007 1284251903 0.299013 2007 2391692799 -0.443141 2007
2017/01/05 22:05:03.128 1480956672 0.689624 2007 2098491903 0.488593 2007 1328809727 0.309388 2007 2422959871 -0.435861 2007
2017/01/05 22:05:35.128 1470827264 0.684907 2007 2126332671 0.495075 2007 1372899839 0.319653 2007 2454514431 -0.428514 2007
2017/01/05 22:06:07.252 1460415744 0.680059 2007 1076791296 0.501420 2007 1416511487 0.329807 2007 2486358527 -0.421100 2007
2017/01/05 22:06:39.127 1449582336 0.675014 2007 1090295808 0.507709 2007 1460184063 0.339976 2007 2518884863 -0.413526 2007
2017/01/05 22:07:11.127 1438476544 0.669843 2007 1103500544 0.513857 2007 1503320063 0.350019 2007 2551677183 -0.405891 2007
2017/01/05 22:07:43.127 1427091712 0.664541 2007 1116405760 0.519867 2007 1545963007 0.359948 2007 2584723711 -0.398197 2007
2017/01/05 22:08:15.127 1415270912 0.659037 2007 1129177344 0.525814 2007 1588634111 0.369883 2007 2618407935 -0.390354 2007
2017/01/05 22:08:47.127 1403192064 0.653412 2007 1141642240 0.531619 2007 1630776063 0.379695 2007 2652367615 -0.382448 2007
2017/01/05 22:09:19.127 1390859776 0.647670 2007 1153784064 0.537273 2007 1672370943 0.389379 2007 2686526463 -0.374494 2007
2017/01/05 22:09:51.127 1378099968 0.641728 2007 1165783552 0.542860 2007 1713945599 0.399059 2007 2721342975 -0.366388 2007
2017/01/05 22:10:23.252 1365085440 0.635667 2007 1177461504 0.548298 2007 1754975999 0.408612 2007 2756361471 -0.358235 2007
2017/01/05 22:10:55.126 1351816960 0.629489 2007 1188833536 0.553594 2007 1795448063 0.418035 2007 2791581183 -0.350034 2007
2017/01/05 22:11:27.126 1338124800 0.623113 2007 1200040704 0.558812 2007 1835868159 0.427446 2007 2827441407 -0.341685 2007
2017/01/05 22:11:59.126 1324189440 0.616624 2007 1210927616 0.563882 2007 1875715839 0.436724 2007 2863485951 -0.333293 2007
2017/01/05 22:12:31.126 1310032640 0.610031 2007 1221491968 0.568802 2007 1914935551 0.445856 2007 2899671039 -0.324868 2007
2017/01/05 22:13:03.125 1295448064 0.603240 2007 1231883776 0.573641 2007 1954073599 0.454968 2007 2936494335 -0.316294 2007
2017/01/05 22:13:35.125 1280636928 0.596343 2007 1241946624 0.578326 2007 1992615167 0.463942 2007 2973460991 -0.307687 2007
2017/01/05 22:14:07.126 1265613568 0.589347 2007 1251683840 0.582861 2007 2030531839 0.472770 2007 3010551295 -0.299051 2007
2017/01/05 22:14:39.125 1250155776 0.582149 2007 1261230336 0.587306 2007 2068360959 0.481578 2007 3048266495 -0.290270 2007
2017/01/05 22:15:11.249 1234504960 0.574861 2007 1270440960 0.591595 2007 2105529599 0.490232 2007 3086084863 -0.281465 2007
2017/01/05 22:15:43.125 1218644480 0.567476 2007 1279335168 0.595737 2007 2142062847 0.498738 2007 3124010495 -0.272635 2007
2017/01/05 22:16:15.125 1202360320 0.559893 2007 1288018432 0.599780 2007 1089221888 0.507208 2007 3162502911 -0.263672 2007
2017/01/05 22:16:47.125 1185891072 0.552224 2007 1296368896 0.603669 2007 1107085568 0.515527 2007 3201097215 -0.254687 2007
2017/01/05 22:17:19.125 1169236224 0.544468 2007 1304392960 0.607405 2007 1124616704 0.523690 2007 2184542974 -0.245686 2007
2017/01/05 22:17:51.123 1152163328 0.536518 2007 1312202752 0.611042 2007 1142050304 0.531809 2007 2263023102 -0.236549 2007
2017/01/05 22:18:23.248 1134917376 0.528487 2007 1319660032 0.614515 2007 1159160832 0.539776 2007 2341541374 -0.227409 2007
2017/01/05 22:18:55.123 1117501696 0.520377 2007 1326807296 0.617843 2007 1175916032 0.547579 2007 2420166654 -0.218256 2007
2017/01/05 22:19:27.248 1099664384 0.512071 2007 1333683200 0.621045 2007 1192600832 0.555348 2007 2499792126 -0.208986 2007
2017/01/05 22:19:59.247 1081643264 0.503679 2007 1340275456 0.624114 2007 1208930048 0.562952 2007 2579702014 -0.199683 2007
2017/01/05 22:20:31.123 2126833919 0.495192 2007 1346541568 0.627032 2007 1224970240 0.570421 2007 2659836414 -0.190354 2007
2017/01/05 22:21:03.123 2090091775 0.486637 2007 1352488448 0.629802 2007 1240648960 0.577722 2007 2739948798 -0.181028 2007
```

...

### 3 Εξίσωση Doppler και Δεδομένα του Συστήματος DORIS

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι εξισώσεις παρατήρησης της μέτρησης Doppler, ενώ γίνεται και μία συνοπτική παρουσίαση των δεδομένων DORIS/RINEX. Συγκεκριμένα, εξηγείται πως συνδυάζονται οι μετρήσεις φάσης με τη μέτρηση Doppler, καθώς και πως αυτό μεταφράζεται έπειτα ως μέτρηση εύρους απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη. Οι εξισώσεις που αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο ακολουθούν την προσέγγιση των Lemoine et al. (2016). Σχετικά με το DORIS/RINEX, παρουσιάζεται η μορφή του Header αλλά και των διαδέσιμων δεδομένων σε αυτά. Αναλυτική περιγραφή του DORIS/RINEX format παρέχεται στην ιστοσελίδα της υπηρεσίας IDS, στο αρχείο “RINEX DORIS 3.0 (Issue 1.7)”. Στην παρούσα ενότητα, γίνεται σύντομη αναφορά στα δεδομένα του αρχείου rinex έτσι ώστε να συνδεθούν με τις ποσότητες που αναφέρονται στις εξισώσεις.

#### 3.1 Διορθώσεις Χρονομέτρων

Η μετατροπή από τον ιδιοχρόνο ενός χρονομέτρου  $\tau$ , στον συντεταγμένο χρόνο  $t$  (coordinate time) πραγματοποιείται μέσω της εξίσωσης 3.1 (Petit and Luzum, 2010).

$$dt \approx \left[ 1 - \frac{U}{c^2} - \frac{V^2}{2c^2} \right] dt \quad (3.1)$$

όπου  $U$  είναι το βαρυτικό δυναμικό στην τοποθεσία του χρονομέτρου,  $V$  η ταχύτητα του χρονομέτρου στο σύστημα συντεταγμένων που αναφέρεται, και  $c$  η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

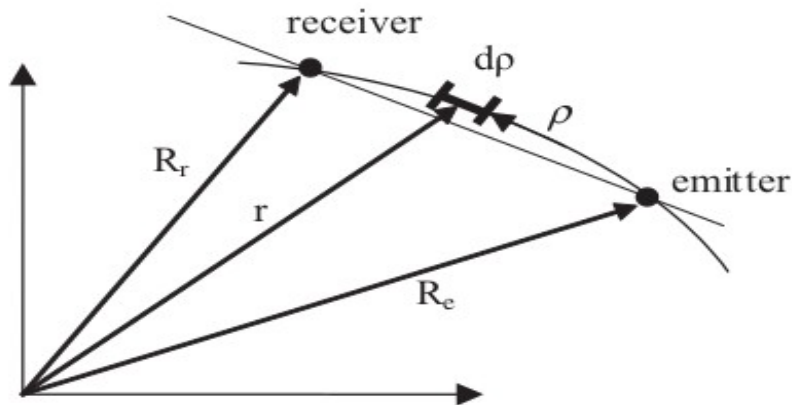
#### 3.2 Χρόνος Διάδοσης ενός Φωτονίου από τον Πομπό στον Δέκτη

Ο χρόνος για να διαδοθεί ένα φωτόνιο από τον πομπό στον δέκτη μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση (3.2) :

$$\Delta t_{travel} \approx \frac{\rho}{c} + 2 \frac{\mu}{c^3} \ln \left( \frac{R_e + R_r + \rho}{R_e + R_r - \rho} \right) \quad (3.2)$$

όπου δείκτης  $e$  για πομπό (emitter) και δείκτης  $r$  δέκτης (receiver),  $\rho$  η καμπυλόγραμμη διαδρομή του φωτονίου (Σχήμα 3.1),  $\mu = GM$ , με  $G$  την βαρυτική σταθερά και  $M$  την μάζα της γης και  $R_e$ ,  $R_r$  η γεωμετρική απόσταση του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα, από το κέντρο του συστήματος αναφοράς κοντά στο κέντρο μάζας της γης.





Σχήμα 3.1: Διαδρομή φωτονίου από πομπό σε δέκτη  
 Πηγή: Lemoine et al., 2016

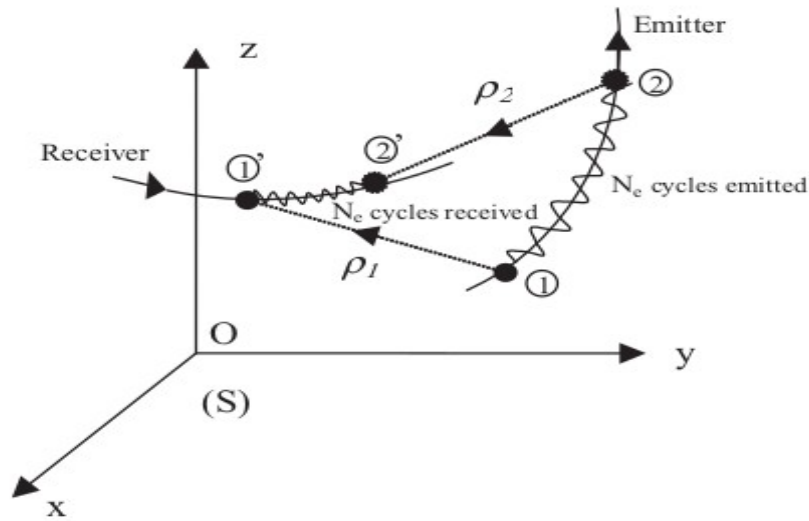
### 3.3 Η Εξίσωση Παρατήρησης Doppler

Κατά τη μετάδοση σήματος, διακρίνονται 4 χρονικά γεγονότα.

1. Μετάδοση σήματος του 1ου κύκλου από τον πομπό.
- 1'. Λήψη 1ου κύκλου από τον δέκτη
2. Ολοκλήρωση μετάδοσης του τελευταίου κύκλου  $N_e$  από τον πομπό.
- 2'. Ολοκλήρωση λήψης του κύκλου  $N_e$  από τον δέκτη.

Τα γεγονότα αυτά χρονοσημαίνονται με  $\tau_{e1}, \tau_{e2}$  για τον πομπό και  $\tau_{r1}, \tau_{r2}$  για τον δέκτη, ο καθένας στην κλίμακα του ιδιοχρόνου του, και με  $t_1, t_1', t_2, t_2'$  στον χρόνο του συστήματος αναφοράς (coordinate time). Κατά το χρονικό διάστημα  $\Delta\tau = \tau_{r2} - \tau_{r1}$  ο δέκτης έχει λάβει και τους  $N_e$  κύκλους που μετέδωσε ο πομπός, για τους οποίους ισχύει  $N_e = f_e \cdot \Delta\tau_e$ , με  $f_e$  την ιδιοσυχνότητα (proper frequency) του πομπού (Σχήμα 3.2). Ο δέκτης διαθέτει ακόμη, έναν ταλαντωτή (oscillator) ο οποίος για το χρονικό διάστημα  $\Delta\tau_r$  έχει παράγει  $N_r$  κύκλους, με  $N_r = f_r \cdot \Delta\tau_r$  και  $f_r$  την ιδιοσυχνότητα του δέκτη. Η αριθμητική διαφορά μεταξύ των κύκλων  $N_e$  και  $N_r$ , είναι η μέτρηση Doppler, εξίσωση (3.3), η οποία πραγματοποιείται από τον εξοπλισμό του δέκτη.

$$N_{DOP} = N_e - N_r \Rightarrow N_{DOP} = f_e \Delta\tau_e - f_r \Delta\tau_r \quad (3.3)$$



Σχήμα 3.2: Σχεδιάγραμμα διαφοράς φάσεων Πομπού-Δέκτη  
Πηγή: Lemoine et al., 2016

Στο αρχείο RINEX η μέτρηση Doppler ισούται με τη διαφορά μεταξύ δύο μετρήσεων φάσης, πραγματοποιημένες σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, και άρα με διαφορετική χρονοσήμανση στον ιδιοχρόνο του δέκτη. Εκφράζοντας το χρονικό διάστημα  $\Delta t_e$  ως συνάρτηση του  $\Delta t_r$ , προκύπτει η τελική εξίσωση (3.4)

$$\frac{c}{f_e \Delta t_r} N_{DOP} \approx c \frac{f_e - f_r}{f_e} - \left( 1 - \frac{U_e}{c^2} - \frac{V_e^2}{2c^2} \right) \frac{\rho_2 - \rho_1}{\Delta t_r} + \Delta u_{REL} \quad (3.4)$$

Η εξίσωση αυτή, η οποία είναι ομογενής με τη σχετική ταχύτητα, χωρίζεται σε δύο τμήματα, την ταχύτητα από παρατήρηση  $u_{measured}$ , και τη θεωρητική  $u_{theo}$ . Έτσι η συνάρτηση παίρνει διπλό τύπο όπως φαίνεται στην (3.5):

$$u_{measured} = \frac{c}{f_e} \left( f_e - f_r - \frac{N_{DOP}}{\Delta t_r} \right) + \Delta u_{REL} \quad (3.5)$$

$$u_{theo} = \left( 1 - \frac{U_e}{c^2} - \frac{V_e^2}{2c^2} \right) \frac{\rho_2 - \rho_1}{\Delta t_r}$$

με  $\Delta u_{REL}$  την σχετική διόρθωση του ρολογιού για το βαρυτικό δυναμικό  $U$  όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.6):

$$\Delta u_{REL} = \frac{1}{c} \left( U_r - U_e + \frac{V_r^2 - V_e^2}{2} \right) + 2 \frac{\mu}{c^2 \Delta t_r} \left[ \ln \left( \frac{R_1 + R_1' + \rho_1}{R_1 + R_1' - \rho_1} \right) - \ln \left( \frac{R_2 + R_2' + \rho_2}{R_2 + R_2' - \rho_2} \right) \right] \quad (3.6)$$

Ο διαχωρισμός της σχετικής ταχύτητας σε μετρημένη και θεωρητική είναι αυθαίρετη και παρατίθεται όπως αναλύεται από τους Lemoine et. al στην βιβλιογραφία (2016). Έχει το βασικό πλεονέκτημα ότι κατά τη

διάρκεια της διαδικασίας προσαρμογής τροχιάς όλοι οι όροι που δεν περιέχουν προσαρμοσμένες παραμέτρους μπορούν να συμπεριληφθούν στην “μετρημένη” ταχύτητα  $u_{measured}$  ενώ οι όροι με τις προσαρμοσμένες παραμέτρους στην “θεωρητική ταχύτητα” και να επαναπροσδιορίζονται σε κάθε επανάληψη.

Η προσαρμογή τροχιάς πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις  $u_{measured}$  και  $u_{theo}$ , αφού έχουν πρώτα διαμορφωθεί οι εξισώσεις (5) και (6) για να περιλαμβάνουν τις διορθώσεις Ιονόσφαιρας  $\Delta u_{IONO}$  και Τροπόσφαιρας  $\Delta u_{TROP}$ , που προφανώς επηρεάζουν τη μετάδοση σήματος. Ακόμη, λαμβάνονται υπόψη και οι αποκλίσεις των σχετικών συχνοτήτων,  $\Delta f_e/f_{eN}$  και  $\Delta f_r/f_{rN}$  καθώς οι πραγματικές συχνότητες (True) δεν είναι ίδιες με τις ονομαστικές (Nominal). Έτσι οι  $f_e$  και  $f_r$  αντικαθίστανται με  $f_{eT}$  και  $f_{rT}$  για τις οποίες ισχύει  $f_{eT} = f_{eN}(1 + \Delta f_e/f_{eN})$  και  $f_{rT} = f_{rN}(1 + \Delta f_r/f_{rN})$ . Οι διαφορές στη συχνότητα  $\Delta f_e$  και  $\Delta f_r$  είναι 100% συσχετισμένες, επομένως αρκεί να προσδιοριστεί μόνο μία εκ των 2 μέσα στην εξίσωση, και συγκεκριμένα επιλέγεται η  $\Delta f_e$  που αναφέρεται στον πομπό, καθώς στο σύστημα DORIS, υπάρχουν πολλαπλοί επίγειοι πομποί, ενώ μόνο ένας δέκτης για κάθε δορυφόρο. Αυτό επειδή, χρειάζεται καλή αρχική εκτίμηση για το  $\Delta f_r$  για να προσδιοριστεί με υψηλή ακρίβεια η τιμή του  $\Delta f_e$ . Μία καλή εκτίμηση του  $\Delta f_e/f_e$  είναι η μέτρηση F του RINEX, η οποία δίνεται  $\cdot 10^{-11}$ .

Ακολουθώντας την μεθοδολογία του διαχωρισμού σε θεωρητικό και μετρημένο τύπο της εξίσωσης, που αναλύθηκε προηγουμένως, στο  $u_{theo}$  υπεισέρχονται τα  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\Delta u_{TROP}$  και  $\Delta f_e/f_{eN}$  που εξαρτώνται από προσαρμοσμένες παραμέτρους, ενώ στο  $u_{measured}$  τα  $\Delta u_{IONO}$ ,  $\Delta u_{TROP}$  που δεν περιλαμβάνουν προσαρμοσμένες παραμέτρους. Έτσι προκύπτει η εξίσωση παρατήρησης (3.7) με διπλό τύπο:

$$u_{measured} = \frac{c}{f_{eN}} \left( f_{eN} - f_{rT} - \frac{N_{DOP}}{\Delta t_r} \right) + \Delta u_{IONO} + \Delta u_{REL} \quad (3.7)$$

$$u_{theo} = \left( 1 - \frac{U_e}{c^2} - \frac{V_e^2}{2c^2} \right) \frac{\rho_2 - \rho_1}{\Delta t_r} + \Delta u_{TROP} - \frac{c \left( \frac{N_{DOP}}{\Delta t_r} + f_{rT} \right)}{f_{eN}} \frac{\Delta f_e}{f_{eN}}$$

όπου:

- ο δείκτης e αναφέρεται στον πομπό (emitter) και ο δείκτης r στον δέκτη (receiver)
- ο δείκτης N αναφέρεται στην θεωρητική (nominal) και ο δείκτης T στην πραγματική (true) συχνότητα
- $u_{measured}$  η μετρημένη σχετική ταχύτητα μεταξύ πομπού και δέκτη για τα χρονικά γεγονότα 1κ και 1', βασισμένη στη μέτρηση κύκλων Doppler NDOP και διορθωμένη για την επίδραση της ιονόσφαιρας
- $u_{theo}$  η θεωρητική (ή υπολογισμένη) σχετική ταχύτητα πομπού – δέκτη για τα χρονικά γεγονότα 1' και 2', διορθωμένη για την επίδραση της τροπόσφαιρας και την ψευδαίσθηση συχνότητας (frequency bias)  $\Delta f_e/f_{eN}$  του πομπού
- $f_{rT} = f_{rN}(1 + \Delta f_r/f_{rN})$  η εκτίμηση της πραγματικής συχνότητας του δέκτη
- $U_r$  και  $U_e$  το βαρυτικό δυναμικό του δέκτη και του πομπού αντίστοιχα
- $\Delta u_{IONO}$  η ιονοσφαιρική διόρθωση
- $\rho$  η γεωμετρική απόσταση πομπού - δέκτη

$\Delta u_{REL} = \Delta u_{RELC} + \Delta u_{RELT}$  η σχετική διόρθωση που αποτελείται από 2 μέρη, την διόρθωση του χρονομέτρου  $\Delta u_{RELC}$  και τη διόρθωση διαδρομής μετάδοσης  $\Delta u_{RELT}$  όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.8).

$$\Delta u_{RELC} = \frac{1}{c} \left[ U_r - U_e + \frac{V_r^2 - V_e^2}{2} \right] \quad (3.8)$$

$$\Delta u_{RELT} = 2 \frac{\mu}{c^2 \Delta \tau_r} \left[ \ln \left( \frac{R_1 + R_1' + \rho_1}{R_1 + R_1' - \rho_1} \right) - \ln \left( \frac{R_2 + R_2' + \rho_2}{R_2 + R_2' - \rho_2} \right) \right]$$

Και η εξίσωση για τον υπολογισμό του δυναμικού:

$$U_r = \frac{\mu}{r} \left( 1 - \left( \frac{a_e}{r} \right)^2 J_2 \frac{3 \sin^2(\varphi) - 1}{2} \right) \quad (3.9)$$

Με σταθερές για το συγκεκριμένο μοντέλο μηδενικών παλιρροϊκών παραμορφώσεων, σύμφωνα με τον πίνακα “Table 1.1: IERS numerical standards” των Petit et al. (2010), τη γεωκεντρική σταθερά βαρύτητας  $\mu = GM = 3.986004418 \cdot 10^{14} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$ , το μεγάλο ημιάξονα της γης  $a_e = 6378136.6 \text{ m}$ , τον δυναμικό συντελεστή επιπλάτυνσης της Γης  $J_2 = 1.0826359 \cdot 10^{-3}$ . Το  $\varphi$  και η γεωμετρική απόσταση  $r$  για κάθε δεδομένη θέση του δορυφόρου υπολογίζονται από τα  $X, Y, Z$  που παρέχονται από το sr3 αρχείο.

Στην εξίσωση (3.7) οι όροι  $-U_e/c^2 - V_e^2/2c^2$  και  $\Delta u_{RELT}$  θεωρούνται “μικροί όροι” καθώς φτάνουν σε μέγιστο τις τιμές  $11 \cdot 10^{-6}$  και  $6 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  αντίστοιχα. Ακόμη, εφόσον οι πομποί είναι τοποθετημένοι σε σταθερά σημεία στο έδαφος, το  $(1 - U_e/c^2 - V_e^2/2c^2)$  είναι σταθερό για κάθε σταθμό. Έτσι η μικρή σχετική απόκλιση της συχνότητας απορροφάται από τον όρο  $\Delta f_e/f_{eN}$  και η εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί στην τελική μορφή (εξίσωση 3.10) η οποία θα χρησιμοποιηθεί και στο επόμενο κεφάλαιο κατά την επεξεργασία :

$$u_{measured} = \frac{c}{f_{eN}} \left( f_{eN} - f_{rT} - \frac{N_{DOP}}{\Delta \tau_r} \right) + \Delta u_{IONO} + \Delta u_{RELC} \quad (3.10)$$

$$u_{theo} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\Delta \tau_r} + \Delta u_{TROP} - \frac{c \left( \frac{N_{DOP}}{\Delta \tau_r} + f_{rT} \right)}{f_{eN}} \frac{\Delta f_e}{f_{eN}}$$

Το  $u_{theo}$  περιλαμβάνει ποσότητες οι οποίες προκύπτουν από το sr3 αρχείο. Συγκεκριμένα, για να προσδιοριστεί το  $\rho_2 - \rho_1$ , χρειάζεται να έχει υπολογιστεί η γεωμετρική απόσταση του δορυφόρου από το κέντρο του συστήματος αναφοράς, με δεδομένα τα  $X, Y, Z$ , με γεωμετρική απόσταση  $\rho = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$  για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή.

Ακόμη

$$U_e + \frac{V_e^2}{2} = U_{GEO} \quad (3.11)$$

Με το  $U_{GEO}$  να είναι σταθερά ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ), το δυναμικό στην επιφάνεια της γης  $U_{GEO} / c^2 = 6.969290134 \cdot 10^{-10}$ .

### 3.4 Όνομα αρχείου DORIS/RINEX

Το όνομα του αρχείου είναι της μορφής sssrxYYDDD.LLL.Z όπου :

sss η συντόμευση του δορυφόρου  
rx σταθερό μέρος rx = rinex  
YY τελευταία 2 ψηφία έτους από τα πρώτα δεδομένα του αρχείου  
DDD 3ψήφιος αριθμός ημέρας τους έτους από τα πρώτα δεδομένα του αρχείου  
LLL version του αρχείου, όταν αυτό αντικαθίσταται, ξεκινώντας με 001 από την αρχική έκδοση  
Z κεφαλαίο Z, δείκτης ότι το αρχείο είναι συμπιεσμένο (Unix)

### 3.5 HEADER αρχείου DORIS/RINEX

Παρακάτω παρατίθεται ένα δείγμα Header αρχείου rinex σε δύο τμήματα, συγκεκριμένα του ja3rx20234.001.Z

Οι ποσότητες περιγράφονται όπως αναλύονται στο “RINEX DORIS 3.0” αρχείο της IDS.

1ο Τμήμα HEADER:

```
3.00          0          D          RINEX VERSION / TYPE
Expert        CNES        20200810 090016 UTC PGM / RUN BY / DATE
G = GPS R = GLONASS E = GALILEO S = GEO M = MIXED D = DORIS COMMENT
CRYOSAT-2    SATELLITE NAME
2010-013A    COSPAR NUMBER
SPA_BN1_5.5.2 CNES        OBSERVER / AGENCY
CHAIN1       DGXX          1.00    REC # / TYPE / VERS
DORIS        STAREC       ANT # / TYPE
          1.8480      -0.2000      -0.7510    APPROX POSITION XYZ
          1.6312       0.0112       0.0137    CENTER OF MASS: XYZ
D 10  L1 L2 C1 C2 W1 W2 F P T H    SYS / # / OBS TYPES
  2020  08  09  00  00  28.8536687  DOR    TIME OF FIRST OBS
D 100  2  C1 C2    SYS / SCALE FACTOR
D          2.000    L2 / L1 DATE OFFSET
...
```

#### RINEX VERSION/TYPE

Η παρούσα έκδοση Rinex είναι 3.00 και οι σημάνσεις :

```
D  DORIS
G  GPS
R  GLONASS
E  GALILEO
S  GEO
M  MIXED
```

#### PGM / RUN BY / DATE

Ο τύπος του χρόνου αρχείων RINEX, που εμφανίζεται στην δεύτερη καταγραφή header.

PGM η πηγή επεξεργασίας

RUN BY η υπηρεσία που επεξεργάζεται τα δεδομένα

DATE η ημερομηνία μορφής yyyymmdd hhmmss zone

Με zone: κωδικός 3-4 χαρακτήρων για τη ζώνη ώρας, UTC επί το πλείστον, ή LCL όπου έχει γίνει χρήση τοπικής ζώνης ώρας.

#### SATELLITE NAME

Το όνομα του δορυφόρου που φέρει τον δέκτη με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

JASON-2, CRYOSAT-2, HY-2A, SARAL, JASON-3, SENTINEL-3..

### COSPAR NUMBER

Ο αριθμός COSPAR του δορυφόρου, ο οποίος αποτελεί έναν διεθνές αριθμό που ορίζεται για κάθε τεχνητό αντικείμενο στο διάστημα και αποτελείται από το έτος αποστολής, έναν τριψήφιο αύξοντα αριθμό αποστολής για εκείνο το έτος και έναν κωδικό 1-3 ψηφία για το αντικείμενο της αποστολής.  
Το 2016-002A αντιστοιχεί στην αποστολή Jason – 3.

### OBSERVER/AGENCY

Σε αυτό το πεδίο καθορίζεται η ταυτοποίηση επεξεργασίας και η υπηρεσία που παρέχει το αρχείο RINEX (CNES).

### REC# / TYPE / VERS

REC η αλυσίδα (chain) που χρησιμοποιήθηκε από το το DORIS, “CHAIN1” (ή CHAIN2)  
TYPE ο τύπος του οργάνου DORIS π.χ. “DGXX -S”  
VERS η έκδοση του software που χρησιμοποιείται επί του δορυφόρου DORIS/DIODE π.χ. “1.00”

### ANT# / TYPE

Το νούμερο της κεραίας (εάν υπάρχουν περισσότερες από μία), εδώ είναι “DORIS” και ο τύπος της κεραίας “STAREC”.

### APPROX POSITION XYZ

Για την επεξεργασία των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από τους δέκτες επί των δορυφόρων, χρειάζεται να παρέχεται πληροφορία για την θέση του σημείου αναφοράς της κεραίας σε σύστημα αναφοράς προσαρμοσμένο στο όργανο της κεραίας.

### CENTER OF MASS

Το κέντρο μάζας της κεραίας επί του διαστημικού οχήματος, το οποίο καθορίζεται με XYZ προ της εκτόξευσης. Η εξέλιξη της αδράνειας και του κέντρου μάζας του δορυφόρου παρέχονται από ξεχωριστό αρχείο στο ίδιο σταθερό σύστημα συντεταγμένων.

### SYS / # / OBS TYPES

D ένδειξη για DORIS και πλήθος μετρήσεων (“10”), με τύπους μετρήσεων:

L	Φάση (1 και 2)
C	Ψευδοαπόσταση (1 και 2)
W	Λαμβανόμενο επίπεδο ισχύος (1 και 2), για κάθε συχνότητα (μονάδα dBm)
F	Σχετική διαφορά συχνότητας ταλαντωτή δέκτη (f-f0) / f0 (μονάδα 10 <sup>-11</sup> )
P	Πίεση εδάφους στο σταθμό, σε 100 Pa (mBar)
T	Θερμοκρασία εδάφους στο σταθμό, σε βαθμούς Κελσίου
H	Υγρασία Εδάφους στο σταθμό, σε ποσοστό τοις εκατό

### TIME OF FIRST OBS

DOR για τον χρόνο του συστήματος DORIS, ο οποίος αφορά τον ιδιοχρόνο του δέκτη επί το δορυφόρου (μετρημένος με αναφορά στον χρόνο TAI).

## SYS / SCALE FACTOR

D για μετρήσεις DORIS

Ο συντελεστής 100 χρησιμοποιείται για να διαχωριστούν τα αποθηκευμένα δεδομένα ψευδοαπόστασης. Μόνο οι τύποι μετρήσεων C1 και C2 συμπεριλαμβάνονται.

## L2 /L1 DATE OFFSET

Αυτή η τιμή (με μονάδα το 1 ms milisecond) αντιπροσωπεύει την διαφορά μεταξύ της ημερομηνίας μέτρησης φάσης στα 400 MHz και της ημερομηνίας μέτρησης φάσης στα 2GHz.

Συμβατικά, η τιμή αυτή είναι θετική εάν η μέτρηση στα 400MHz πραγματοποιείται μετά από τη μέτρηση φάσης στα 2 GHz.

2ο Τμήμα HEADER :

54					# OF STATIONS
D01	SVAC NY-ALESUND II	10338S003	3	0	STATION REFERENCE
D02	THUB THULE	43001S005	3	0	STATION REFERENCE
D03	REZB REYKJAVIK	10202S003	3	0	STATION REFERENCE
D04	MEUB METSAHOVI	10503S016	3	0	STATION REFERENCE
D05	TLSB TOULOUSE	10003S005	3	0	STATION REFERENCE
D06	GR4B GRASSE	10002S019	4	-15	STATION REFERENCE
D07	WEUC WETTZELL	14201S046	3	18	STATION REFERENCE
D08	PDOC PONTA DELGADA	31906S004	4	0	STATION REFERENCE
D09	SARC SAL	39601S005	3	0	STATION REFERENCE
D10	ASEB ASCENSION	30602S005	3	0	STATION REFERENCE
D11	HEMB ST HELENA	30606S004	4	0	STATION REFERENCE
D12	CADB CACHOEIRA PAULISTA	41609S002	3	0	STATION REFERENCE
D13	RISC RIO GRANDE	41507S008	3	0	STATION REFERENCE
D14	BEMB BELGRANO	66018S002	3	0	STATION REFERENCE
D15	SYQB SYOWA	66006S005	3	0	STATION REFERENCE
D16	ADHC TERRE ADELIE	91501S005	3	0	STATION REFERENCE
...					

## #OF STATIONS

Αριθμός σταθμών για τους οποίους οι μετρήσεις αποθηκεύονται στο αρχείο.

## STATION REFERENCE

Λίστα πληροφοριών για τους σταθμούς για τους οποίους αποθηκεύονται οι μετρήσεις στο αρχείο. Κάθε σταθμός περιγράφεται μία φορά με στοιχεία:

- Τον εσωτερικό αύξοντα αριθμό σταθμού Dxx, όπου xx η χρονική σειρά παρατήρησής τους
- Τον όνομα του σταθμού (Συντόμευση και πλήρες όνομα)
- Τον αριθμό DOMES (π.χ. 412015002")
- Τον τύπο σταθμού ("3" η "4")
- Έναν συντελεστή (K) διαφοράς συχνότητας

3ο Τμήμα Header:

5						# TIME REF STATIONS
D05	-1.388					TIME REF STATION
D16	1.454					TIME REF STATION
D26	1.868					TIME REF STATION
D48	2.097					TIME REF STATION
D52	1.794					TIME REF STATION
2020	08	09	00	00	0.0000000	TIME REF STAT DATE
END OF HEADER						
...						

## # TIME REF STATIONS

Αριθμός σταθμών αναφοράς χρόνου, οι οποίοι συμμετέχουν στο συγκεκριμένο προϊόν DORIS RINEX.

### TIME REF STATION

Δίνονται 3 παράμετροι :

- Τον εσωτερικό αύξοντα αριθμό σταθμού Dxx
- Τη διαφορά μεταξύ του χρόνου αναφοράς του σταθμού και του χρόνου TAI, κατά την ημερομηνία που αναφέρεται στο πεδίο TIME REF STAT DATE, σε μονάδα ms.
- Την απόκλιση της κάθε κεραίας χρόνου (time beacon) από την ημερομηνία που αναφέρεται στο πεδίο TIME REF STAT DATE. Η μονάδα είναι 1 E-14 sec/sec.

### TIME REF STAT DATE

Αυτή η ημερομηνία αναφέρεται στη μέρα της πρώτης μέτρησης που πραγματοποιήθηκε, από την πρώτη κεραία αναφοράς χρόνου στο παρόν προϊόν DORIS RINEX, στις 00h 00m 0:000000 s.

## 3.6 Μετρήσεις ανά Εποχή DORIS/RINEX

Από το ίδιο αρχείο, παρατίθεται τμήμα των μετρήσεων:

```
> 2020 08 09 00 00 36.339947800 0 4 -4.486279061 0
D01 -2842170.917 -1386533.911 133572867.73011 133573070.08911 -120.450 7
      -110.300 7 297.739 1008.304 1 -0.299 1 87.516 1
D02 -783668.621 -3522228.206 109421450.29712 109421787.56212 -126.400 7
      -118.000 7 297.739 1008.304 1 -0.299 1 87.516 1
D03 -2476670.247 -2141012.193 -130358598.67913 -130358546.15313 -114.500 7
      -103.300 7 297.739 1011.821 1 8.245 1 81.304 1
D04 -748274.330 -147441.500 125625038.88614 125625196.31914 -131.300 7
      -116.600 7 297.739 1006.212 1 10.489 1 74.027 1
...

```

Εφόσον κάθε δέκτης DGXX μπορεί να πραγματοποιήσει έως 7 ταυτόχρονες παρατηρήσεις, κάθε εποχή μετρήσεων ξεκινά με μία καταγραφή εποχής κάτω από την οποία αναγράφονται τα στοιχεία όσων μετρήσεων έχουν πραγματοποιηθεί.

Όπως φαίνεται στο τμήμα του αρχείου που παρατίθεται, κάθε εποχή ξεκινά με ">" και περιλαμβάνει τα εξής πεδία: έτος, μήνα, μέρα, ώρα, λεπτά, δευτερόλεπτα, σήμανση εποχής ("0" στο παράδειγμα), πλήθος σταθμών που πραγματοποιήθηκε μέτρηση ("4"), η απόκλιση του χρονομέτρου του δέκτη  $\tau_{\text{offset}}$  σε δευτερόλεπτα και σήμανση του χρονομέτρου του δέκτη ("0" πάλι στο παράδειγμα). Το πρώτο τμήμα χρονοσήμανσης εποχής (έτος, μήνας, μέρα, ώρα, λεπτά, δευτερόλεπτα) δίνεται στην κλίμακα χρόνου του δορυφόρου (ιδιοχρόνος του δέκτη) και η μετατροπή στο χρόνο TAI προκύπτει από την πρόσθεση της απόκλισης του χρονομέτρου  $\tau_{\text{offset}}$ . Ανάλογα με την έκδοση του αρχείου RINEX αυτή η απόκλιση χρονομέτρου μπορεί είτε να υπολογιστεί επί του δορυφόρου από το DORIS DIODE, είτε από μια μεταγενέστερη επεξεργασία με το Software "PANDOR". Στην πρώτη περίπτωση, τα αρχεία έχουν κατάληξη ".001" με ένδειξη "STILO" στο header, ενώ στη δεύτερη, ".010" με ένδειξη "PANDOR" στο header. Η χρονοσήμανση επί του δορυφόρου με DIODE, αφορά στην εφαρμογή ενός φίλτρου Kalman στις διορθώσεις χρόνου που μετρά ο δορυφόρος κατά την διέλευσή του, από τους σταθμούς αναφοράς χρόνου (των οποίων τα χρονόμετρα συνδέονται με το χρόνο TAI). Η ακρίβεια του DIODE είναι της τάξης 1 microsecond. Στην περίπτωση του PANDOR, η χρονοσήμανση υλοποιείται με την εκτίμηση διακύμανσης συχνότητας του



USO, τόσο του επίγειου αλλά και επί του δορυφόρου χρονομέτρου, σε σύγκριση με έναν κοινό σταθμό αναφοράς χρόνου. Η ακρίβεια είναι αντίστοιχη του doris2.2 αρχείου, με εξαίρεση την παρουσία κάποιου θορύβου υψηλής συχνότητας. Το αποτέλεσμα είναι θεωρητικά στην κλίμακα χρόνου TAI.

Στο τμήμα του αρχείου, φαίνονται 4 καταγραφές παρατηρήσεων για μία χρονική στιγμή. Κάθε καταγραφή ξεκινά με τον εσωτερικό αριθμό σταθμού Dxx, και ακολουθούν 10 μετρήσεις (πλην των σημάνσεων), τα οποία αφορούν τις ποσότητες που αναφέρονται στο πεδίο SYS / # / OBS TYPES. Για τις φάσης, ψευδοαποστάσεις και λαμβανόμενα επίπεδα ισχύος, γίνονται 2 μετρήσεις, μία για κάθε συχνότητα με L1, L2, C1, C2, W1, W2 αντίστοιχα, όπως δηλώνονται στο header.

### 3.7 Υλοποίηση της Παραγόμενης Εξίσωσης Doppler - Διόρθωση Ιονόσφαιρας

Η διόρθωση της ιονόσφαιρας υπολογίζεται από τους χρήστες. Ένας πρώτος υπολογισμός της, διορθωμένης από την ιονόσφαιρα, ψευδοαπόστασης στην μέτρηση των 2 GHz ( $C_{1-iono-free}$ ) μπορεί να γίνει συνδυάζοντας τις μετρήσεις των δύο συχνοτήτων (Hofmann-Wellenhof et al., 2007) όπως φαίνεται στην (3.12):

$$C_{1-iono-free} = \frac{\gamma C_1 - C_2}{\gamma - 1} \quad (3.12)$$

Όπου  $C_1$  η μέτρηση της ψευδοαπόστασης στα 2 GHz και  $C_2$  στα 400 MHz, ενώ ο συντελεστής  $\gamma$  δίνεται από την εξίσωση :

$$\gamma = \left( \frac{f_{2\text{ GHz}}}{f_{400\text{ MHz}}} \right)^2 \quad (3.13)$$

όπου οι ονομαστικές συχνότητες είναι  $f_{2\text{ GHz}} = 2.036250\text{ GHz}$  και  $f_{400\text{ MHz}} = 401.250\text{ MHz}$ , άρα  $\gamma = 25.75325356$ .

Για τη μετατροπή της μέτρησης φάσης στα 2 GHz, ( $L_{1-iono-free}$ ) δίνεται η εξίσωση (3.14) :

$$L_{1-iono-free} = \frac{\gamma L_1 - \sqrt{\gamma} L_2}{\gamma - 1} \quad (3.14)$$

Τέλος, όσον αφορά το κέντρο φάσης, σε αντίθεση με τις μετρήσεις doris2.1 και doris2.2 στις οποίες χρησιμοποιείται ως τελικό σημείο πορείας της μέτρησης, το κέντρο φάσης των 2 GHz (Εικόνα 2.5), στην επεξεργασία των RINEX χρησιμοποιείται ένα κέντρο φάσης ελεύθερο ιονόσφαιρας, “iono-free”, δηλαδή η κατάληξη του σήματος υπό την ιονοσφαιρική διόρθωση. Το διάνυσμα θέσης από τα 2 GHz στο κέντρο φάσης “iono-free” συμβολίζεται με  $\vec{r}_1$  και το αντίστοιχο από τα 400 MHz  $\vec{r}_2$  για τα οποία ισχύει:

$$\vec{r}_1 = \frac{\vec{r}_2}{\gamma - 1} \quad (3.15)$$

## 4 Εφαρμογή εξισώσεων – Ανάλυση Πρώτου Επιπέδου

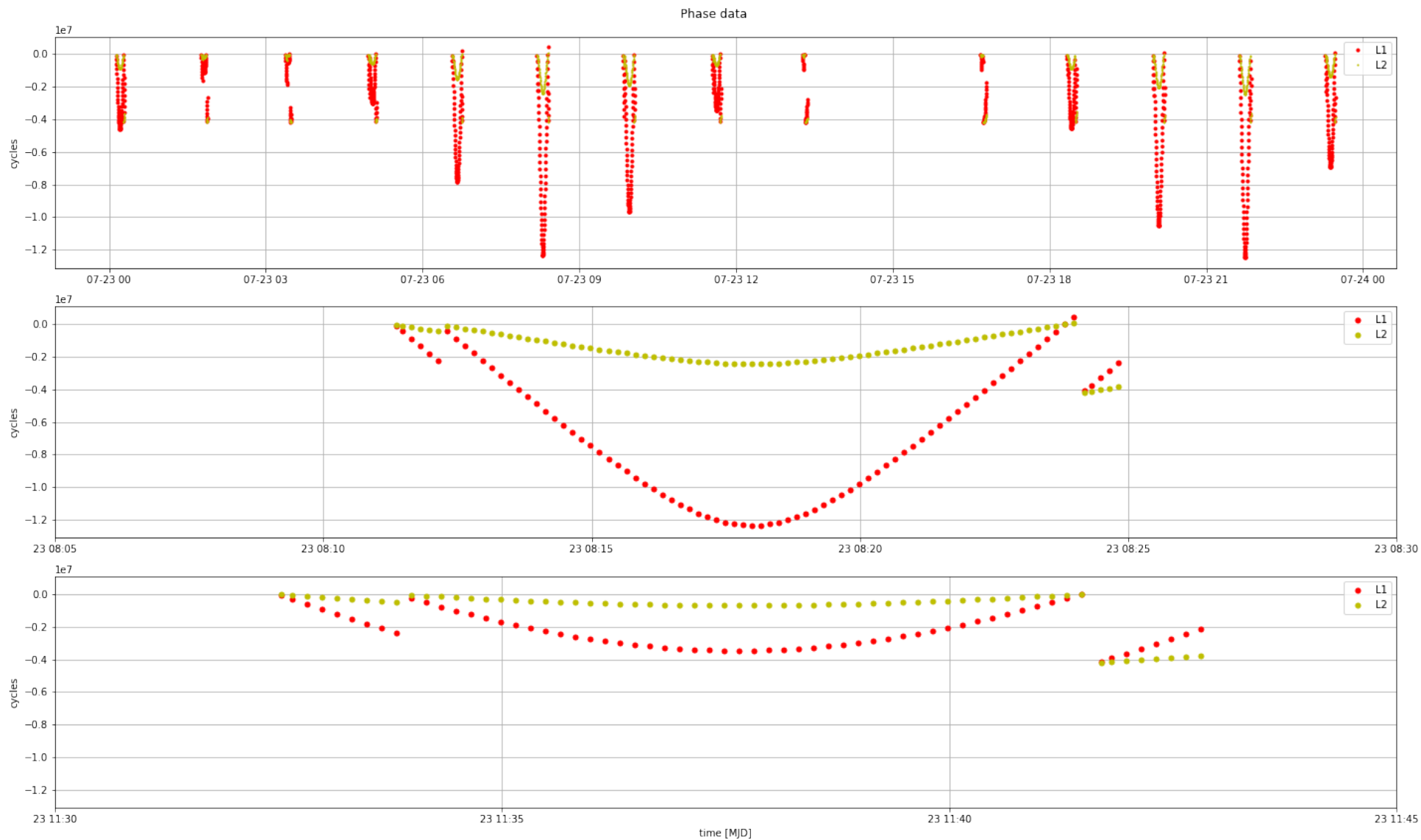
Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται σύνδεση μεταξύ δεδομένων του RINEX και των εξισώσεων, ώστε αυτές να μπορούν να εφαρμοστούν. Στη συνέχεια αναλύεται η μέθοδος με την οποία γίνεται ανάλυση πρώτου επιπέδου, οι απλοποιήσεις και οι παραδοχές που κρίνονται αναγκαίες καθώς και παρουσιάζονται τα διαγράμματα και τα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε.

### 4.1 Δεδομένα από το αρχείο RINEX

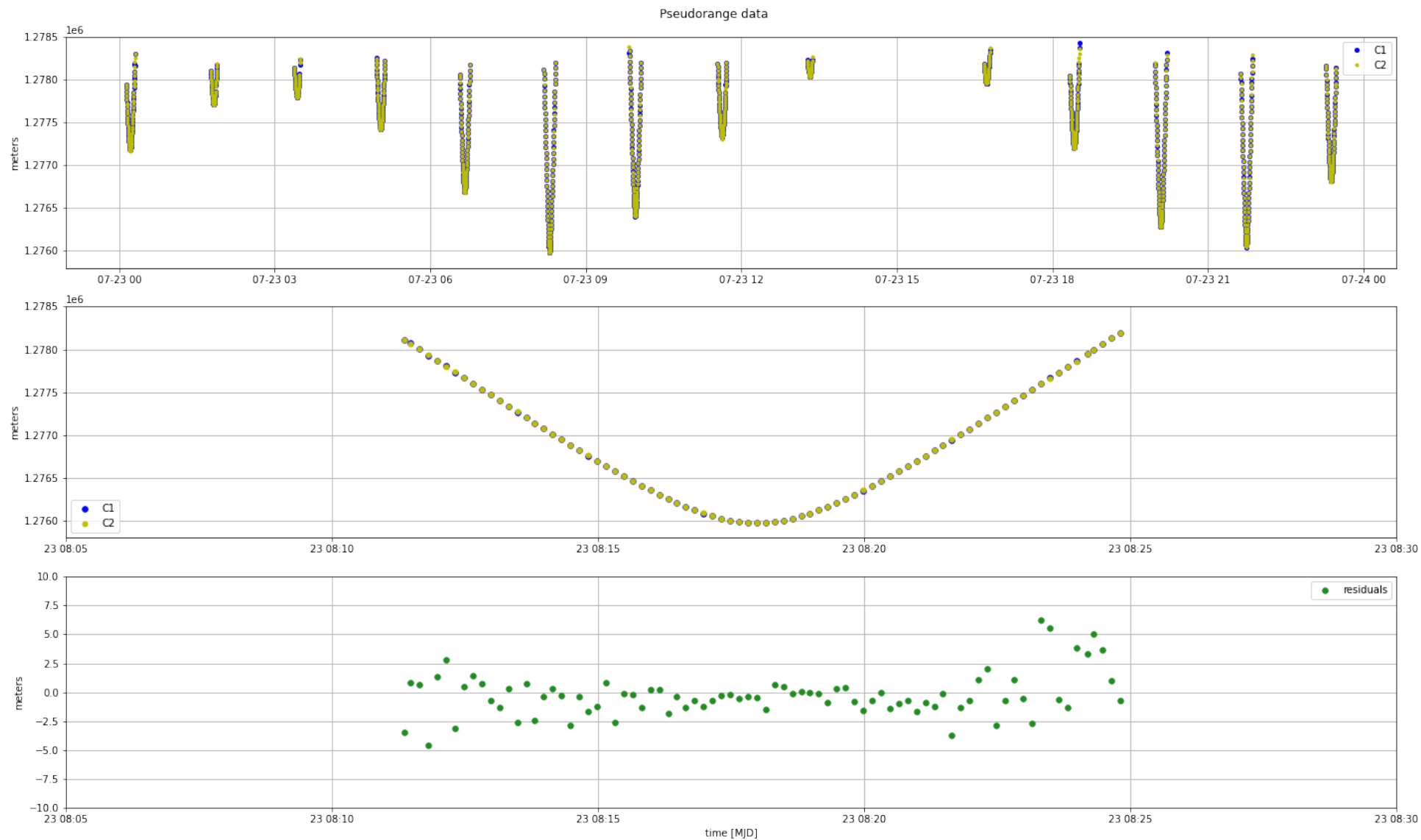
Τα αρχεία RINEX που επιλέχθηκαν για την ανάλυση, αφορούν τον δορυφόρο CryoSat2 και είναι τα:

- cs2rx17004.001 (STILO) και cs2rx17004.010 (PANDOR) για την 4 μέρα του 2017
- cs2rx15204.001 (STILO) και cs2rx15204.010 (PANDOR) για την 204 μέρα του 2015

Για να μπορούν να είναι τα δεδομένα από το RINEX σε μορφή που μπορούν να αναλυθούν, πρέπει να πραγματοποιηθεί μια διαδικασία (parsing) στο αρχείο, ώστε να αντληθούν τα δεδομένα και να αποθηκευτούν σε κατάλληλες μεταβλητές. Το τελικό αρχείο μετά από τη διαδικασία parsing περιέχει τις μετρημένες ποσότητες, όπως αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, (L1, L2, C1, C2, W1, W2, F, P, T, H) καθώς και τους χρόνους διορθωμένους ώστε να αναφέρονται στην κλίμακα χρόνου TAI. Αυτά παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα, όπως έχουν συγκεντρωθεί για όλα τα περάσματα του δορυφόρου πάνω από ένα σταθμό, αλλά και για κάποια απομονωμένα από αυτά.

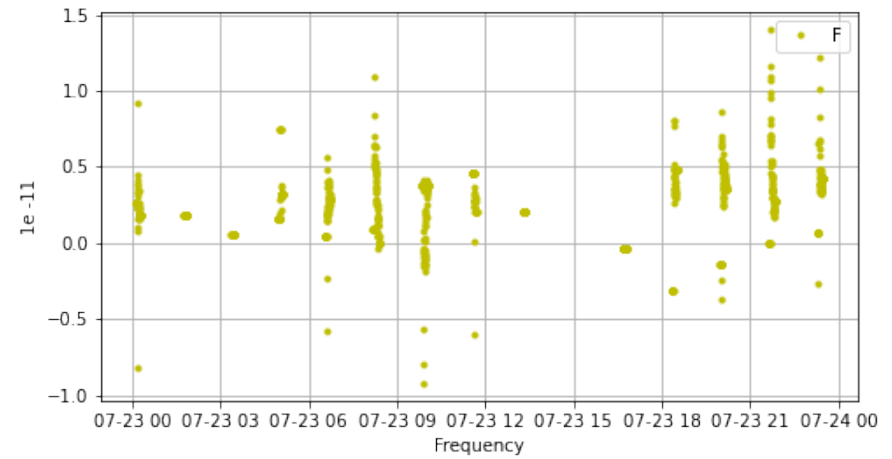
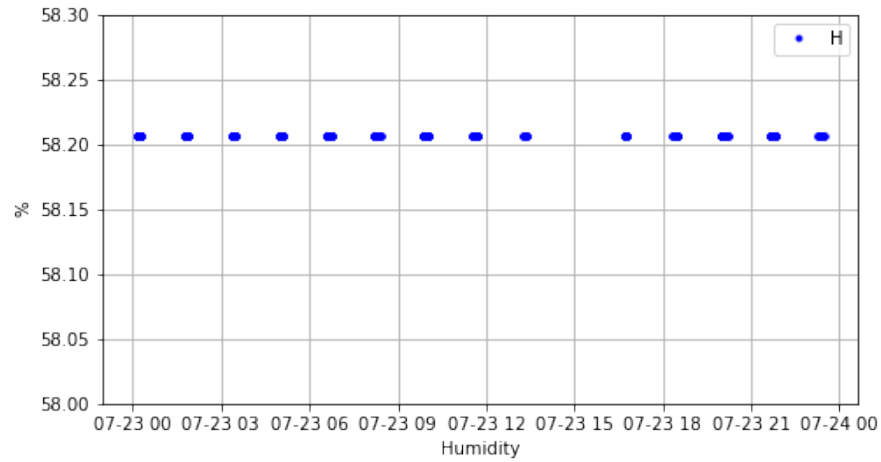
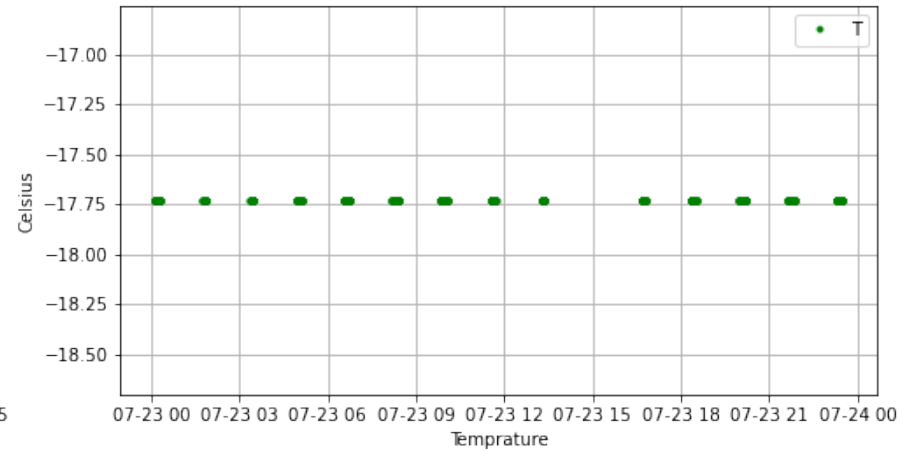
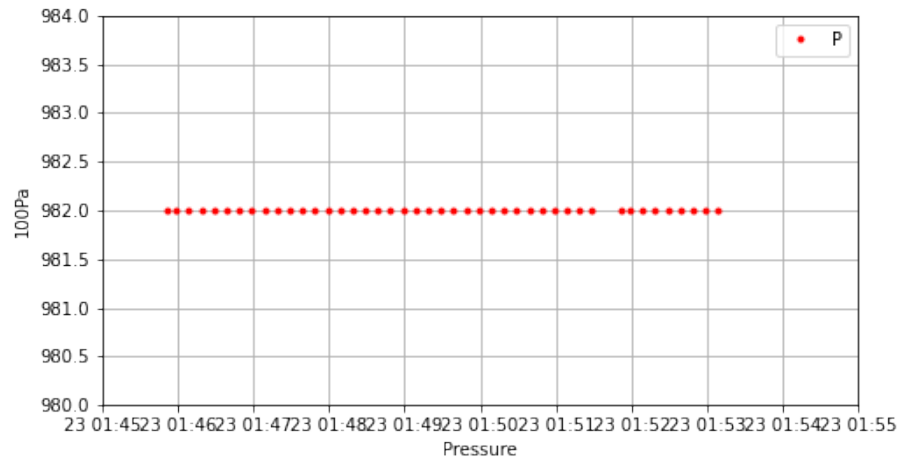


Διάγραμμα 4.1: Μετρήσεις φάσης L1 και L2, όλα τα περάσματα (πάνω), και εστίαση σε δύο περάσματα (μέση και κάτω), σταθμός ADHC - TERRE ADELIE 23 Jul 2015



Διάγραμμα 4.2: C1 και C2 μετρήσεις, όλα τα περάσματα του δορυφόρου (πάνω), απομονωμένο πέραςμα (μέση) και διαφορά C1-C2 για το πέραςμα αυτό (κάτω), σταθμός PAUB PAREETE 23 Jul 2015

Pressure, Temperature, Humidity and Frequency



Διάγραμμα 4.3: Πίεση εδάφους  $P$  (100Pa), θερμοκρασία  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), υγρασία εδάφους  $H$  (%) και συχνότητα  $F$  ( $10^{-11}$ ), όλα τα περάσματα για το σταθμό ADHC - TERRE ADELIE 23 Jul 2015

## 4.2 Δεδομένα από το Αρχείο sp3

Τα απαραίτητα στοιχεία για το δορυφόρο, δηλαδή X,Y,Z και ο ρυθμός μεταβολής τους, εξάγονται από το αρχείο sp3. Αυτό πραγματοποιείται μέσω παρεμβολής στις μετρήσεις του αρχείου, για αυθαίρετες στιγμές, χρησιμοποιώντας τμηματικά πολυώνυμα. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της βιβλιοθήκης SP3 της rpython (sp3).

Η βιβλιοθήκη έχει περιορισμό ως προς τους διαθέσιμους δορυφόρους, για αυτό επιλέχθηκε ο δορυφόρος Cryosat2, ο οποίος είναι αφενός συμβατός και αφετέρου εκτός από δεδομένα STILO διαθέτει και δεδομένα RINEX PANDOR, μεταξύ των οποίων μπορεί να υπάρξει σύγκριση όσον αφορά τη χρονική ακρίβεια. Οι κωδικοί sp3 και αριθμός porad του δορυφόρου είναι 'L12' και '36508' αντίστοιχα.

### TIME REFERENCE STATIONS

Η παρεμβολή στις μετρήσεις του αρχείου sp3, περιορίστηκε μόνο σε σταθμοί αναφοράς χρόνου, αφού έχουν καλύτερο συγχρονισμό στα χρονόμετρά τους, και επομένως δεν χρειάζεται κάποια σημαντική διόρθωση.

Αρχικά, εφόσον έχει προηγηθεί η ανάγνωση του RINEX, απομονώνεται το τμήμα του HEADER στο οποίο δηλώνονται οι σταθμοί αναφοράς χρόνου (με τα αντίστοιχα στοιχεία, διαφορά μεταξύ του χρόνου αναφοράς του σταθμού και του χρόνου TAI και την απόκλιση της κάθε κεραίας χρόνου από την TIME REF STAT DATE) που συμμετέχουν στις μετρήσεις του RINEX, και συγκεκριμένα για τα δεδομένα αρχεία είναι:

για το cs2rx15204:

D04	1.482	13.648				ADHC TERRE ADELIE
D30	3.658	23.559				PAUB PAPEETE
D31	0.153	-4.166				HBMB HARTEBEESTHOEK
D33	0.321	4.300				TLSB TOULOUSE
D47	3.572	65.429				KRWB KOUROU
2015	07	23	00	00	0.00000000	TIME REF STAT DATE

για το cs2rx17004:

D03	4.516	13.405				ADHC TERRE ADELIE
D21	4.301	9.361				PAUB PAPEETE
D23	-0.042	-3.003				HBMB HARTEBEESTHOEK
D26	0.600	1.760				TLSB TOULOUSE
D40	3.047	62.409				KRWB KOUROU
2017	01	04	00	00	0.00000000	TIME REF STAT DATE

Ακόμη, χρειάζεται να είναι γνωστές οι ακριβείς συντεταγμένες των σταθμών, τη χρονική στιγμή της μέτρησης. Για αυτό το λόγο συλλέγονται από το αρχείο dprod2014\_current.txt που παρέχεται από την IDS οι αντίστοιχες θέσεις και ταχύτητες των παραπάνω σταθμών και έτσι προκύπτει ένα σετ συντεταγμένων για κάθε σταθμό με X,Y,Z και Vx,Vy,Vz.

Μέσω της βιβλιοθήκης sp3 είναι διαθέσιμες και οι γωνίες ύψους (elevation angle) και τα αζιμούθια για κάθε ζητούμενη στιγμή (πεδία "altitude" και "azimuth" στα δεδομένα της τροχιάς).

## 4.3 Μοντελοποίηση Δεδομένων

Οι σταθερές που αναφέρονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, απαραίτητες για τη μοντελοποίηση είναι :

Πίνακας 4.1: Πίνακας σταθερών ποσοτήτων για τους υπολογισμούς στις εξισώσεις

Σταθερά	Τιμή	Μονάδες μέτρησης	Περιγραφή
c	299792456.2	m/s	Speed of light
f <sub>N1</sub>	2036.25 · 10 <sup>6</sup>	Hz	Nominal frequency L1
f <sub>N2</sub>	401.25 · 10 <sup>6</sup>	Hz	Nominal frequency L2
γ	(f <sub>eN1</sub> / f <sub>eN2</sub> ) <sup>2</sup>		square of frequency ratio
μ	3.986004418 10 <sup>14</sup>	m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup>	Γινόμενο G · M
a <sub>e</sub>	6378136.6	m	Μεγάλος ημιάξονας γης
J <sub>2</sub>	1.0826359 · 10 <sup>3</sup>		δυναμικός συντελεστής
U <sub>GEO</sub>	6.969290134 · 10 <sup>-10</sup> c <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	δυναμικό επιφάνειας γης

Θεωρείται πως το δυναμικό των σταθμών βρίσκεται στο επίπεδο του γεωειδούς, και αγνοείται η επίδραση του υψομέτρου στο δυναμικό στην επιφάνεια της γης στην τοποθεσία του σταθμού.

Έτσι για να προκύψει το Δu<sub>RELC</sub> :

$$\Delta u_{RELc} = \frac{1}{c} \left[ U_r - U_e + \frac{V_r^2 - V_e^2}{2} \right] \quad (4.1)$$

1. Προσδιορίζεται το φ (latitude) του δορυφόρου για κάθε δεδομένη στιγμή
2. Προσδιορίζεται το διάνυσμα θέσης ρ του δορυφόρου για κάθε δεδομένη στιγμή
3. Υπολογίζεται το V<sub>r</sub><sup>2</sup> από τις ταχύτητες V<sub>x</sub>, V<sub>y</sub>, V<sub>z</sub> που έχουν προκύψει από το interpolation του sp3 ως: V<sub>r</sub><sup>2</sup> = V<sub>x</sub><sup>2</sup> + V<sub>y</sub><sup>2</sup> + V<sub>z</sub><sup>2</sup>
4. Υπολογίζεται το U<sub>r</sub> από την εξίσωση (3.9) με c, a<sub>e</sub>, J<sub>2</sub> και μ από τον πίνακα σταθερών, τα φ και ρ όπως υπολογίστηκαν
5. Θεωρείται σταθερά και υπολογίζεται ο όρος U<sub>e</sub>+V<sub>e</sub><sup>2</sup>/2 = U<sub>GEO</sub> από τον πίνακα σταθερών

Για οποιαδήποτε κεραία, η μέτρηση κύκλων Doppler, N<sub>DOP</sub>, που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα και την εξίσωση (3.7), για τα 2 GHz είναι η διαφορά της L1 μέτρησης, σε 2 διαφορετικές εποχές, για τον ίδιο σταθμό, όπως αυτή επισημαίνεται με μπλε πλαίσιο στο παρακάτω απόσπασμα αρχείου RINEX. Με κόκκινο επισημαίνονται οι χρονικές στιγμές τ<sub>r</sub> στις οποίες προστίθεται το τ<sub>r\_offset</sub> (δεύτερο κόκκινο πλαίσιο), για να υπολογιστεί η διαφορά τους Δτ<sub>r</sub> σε δύο διαφορετικές εποχές, και με πράσινο η μέτρηση συχνότητας F (· 10<sup>-11</sup>), δηλαδή η εκτίμηση Δf<sub>r</sub>/f<sub>rN</sub>, ποσότητα που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της f<sub>rT</sub>, με  $f_{rT} = f_{rN} (1 + (\Delta f_r / f_{rN}))$ .

$$u_{measured} = \frac{c}{f_{eN}} \left( f_{eN} - f_{rT} - \frac{N_{DOP}}{\Delta \tau_r} \right) + \Delta u_{IONO} + \Delta u_{RELc} \quad (4.2)$$

```
> 2020 08 09 00 00 36.339947800 0 4 -4.486279061 0
D01 -2842170.917 -1386533.911 133572867.73011 133573070.08911 -120.450 7
-110.300 7 297.739 1008.304 1 -0.299 1 87.516 1
D02 -783668.621 -3522228.206 109421450.29712 109421787.56212 -126.400 7
-118.000 7 297.739 1008.304 1 -0.299 1 87.516 1
D03 -2476670.247 -2141012.193 -130358598.67913 -130358546.15313 -114.500 7
-103.300 7 297.739 1011.821 1 8.245 1 81.304 1
```

D04 -748274.330 -147441.500 125625038.88614 125625196.31914 -131.300 7  
-116.600 7 297.739 1006.212 1 10.489 1 74.027 1  
> 2020 08 09 00 00 43.339947800 0 4 -4.486279091 0  
D01 -2551747.062 0 -1329304.918 0 133577399.91111 133577467.36311 -121.150 7  
-111.000 7 297.739 1008.304 1 -0.299 1 87.516 1  
D02 -564984.864 0 -3479136.295 0 109424282.54212 0.00012 -128.150 7  
-116.600 7 297.739 1008.304 1 -0.299 1 87.516 1  
D03 -2655757.633 0 -2176300.891 0 -130361287.23413 -130361219.68813 -114.850 7  
-101.550 7 297.739 1011.821 1 8.245 1 81.304 1  
D04 -764370.67310 -150612.35110 125625052.53014 125624610.39614 -129.550 7  
-116.600 7 297.739 1006.212 1 10.489 1 74.027 1  
...

Η διόρθωση της Ιονόσφαιρας  $\Delta u_{\text{iono}}$  μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας την διορθωμένη για την ιονόσφαιρα μέτρηση φάσης,  $L_{1\text{-iono-free}}$  ή  $L_{2\text{-iono-free}}$  κατά τον υπολογισμό του  $N_{\text{DOP}}$ . Το  $\Delta u_{\text{REL}}$  υπολογίζεται όπως αναλύεται στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί η διορθωμένη για την ιονόσφαιρα μέτρηση  $L_{1\text{-iono-free}}$ , το  $N_{\text{DOP-iono-free}}$  προκύπτει αντίστοιχα από τη διαφορά δύο διαδοχικών μετρήσεων  $L_{1\text{-iono-free}}$ .

Αντίστοιχα, για τον προσδιορισμό της  $u_{\text{theo}}$  (εξίσωση 4.3) υπολογίζεται η διαφορά των γεωμετρικών αποστάσεων  $\rho_2 - \rho_1$ , τα  $N_{\text{DOP}}$ ,  $\Delta t_r$  και  $\Delta f_r / f_{rN}$  όπως αναφέρθηκαν πριν καθώς και οι  $f_{rN}$  που αντιστοιχούν στις θεωρητικές συχνότητες  $f_{N1}$ ,  $f_{N2}$  (Πίνακας 4.1).

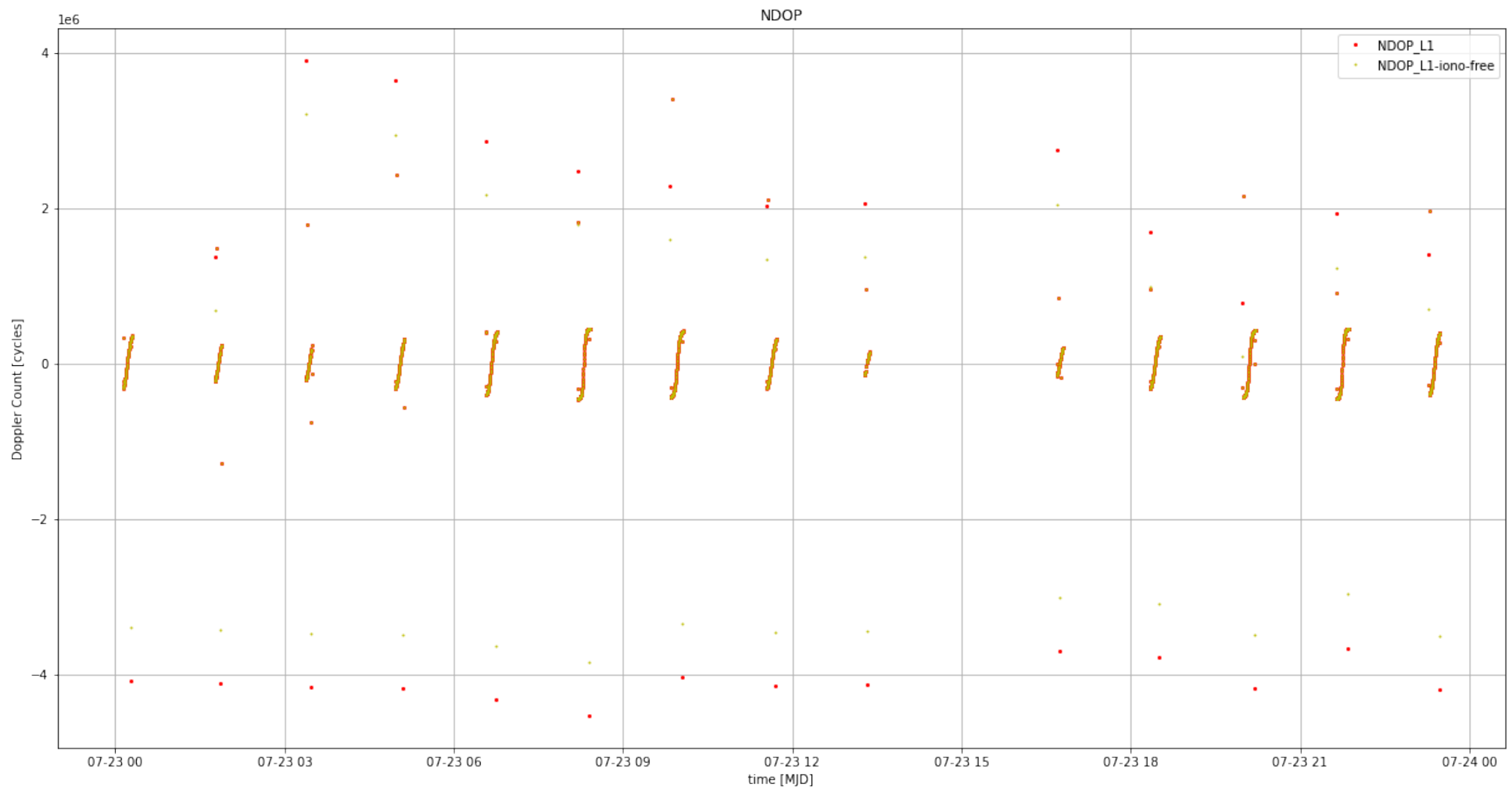
$$u_{\text{theo}} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\Delta t_r} + \Delta u_{\text{TROPO}} - \frac{c \left( \frac{N_{\text{DOP}}}{\Delta t_r} + f_{rT} \right)}{f_{eN}} \frac{\Delta f_e}{f_{eN}} \quad (4.3)$$

Τέλος, υπολογίζονται οι διαφορές  $u_{\text{theo}} - u_{\text{measured}}$  τόσο για PANDOR όσο για STILO αρχεία.

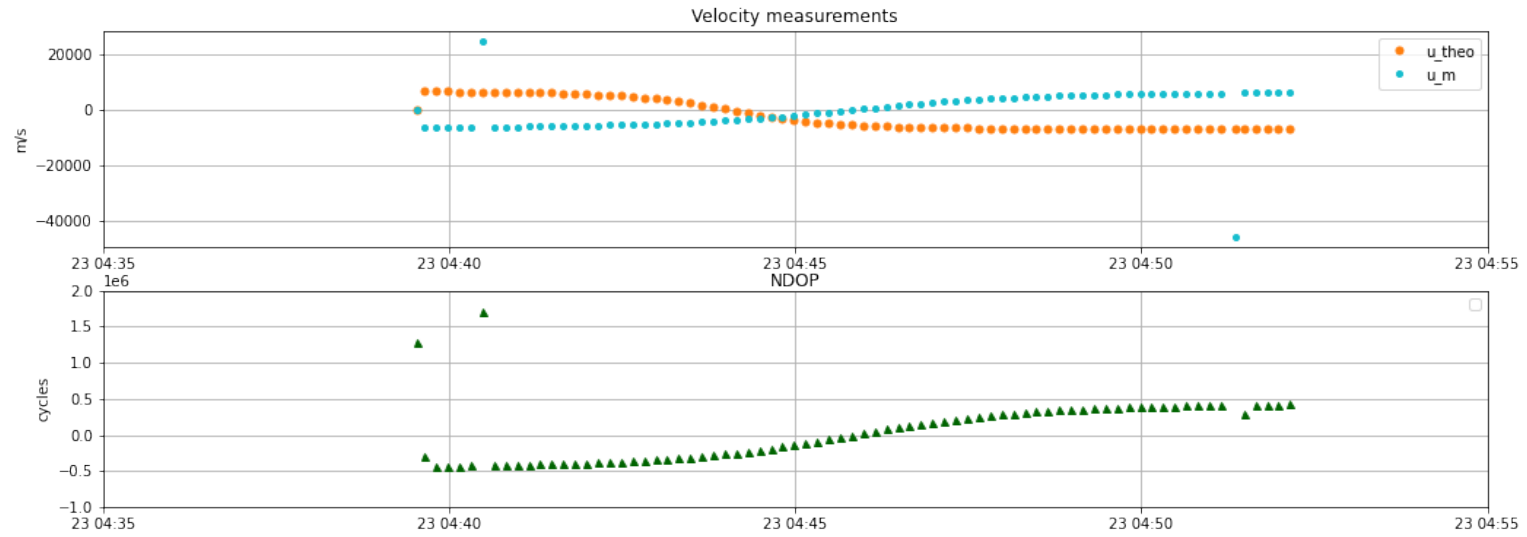
Η επίδραση της τροπόσφαιρας είναι ισοδύναμη με μια καθυστέρηση στην άφιξη του σήματος του δορυφόρου, η οποία εκλαμβάνεται ως αύξηση στην απόσταση μεταξύ δορυφόρου – δέκτη, ωστόσο δεν λαμβάνεται υπόψη στην παρακάτω ανάλυση, όσον αφορά τους υπολογισμούς της  $u_{\text{measured}}$  και  $u_{\text{theo}}$ , καθώς εκτιμάται σε τάξη μεγέθους από 2m στο ζενίθ έως 20m στον ορίζοντα (Penna et al., 2001), ενώ η επιθυμητή ακρίβεια είναι της τάξης 500m. Σημειώνεται πως το τροποσφαιρικό σφάλμα μεταβάλλεται με τη μεταβολή της γωνίας θέασης του δορυφόρου, και είναι μεγαλύτερο κοντά στον ορίζοντα, όπου το σήμα πρέπει να περάσει από μεγαλύτερο πάχος στρώματος της ατμόσφαιρας.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας πρώτου επιπέδου φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα :

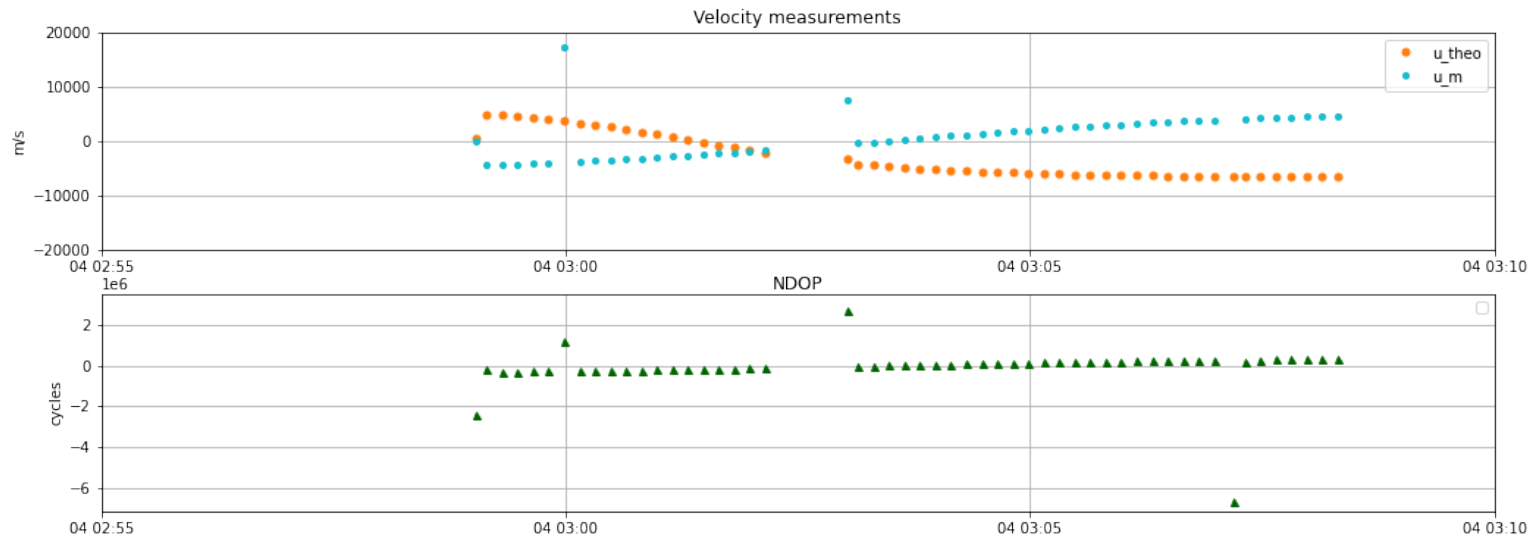




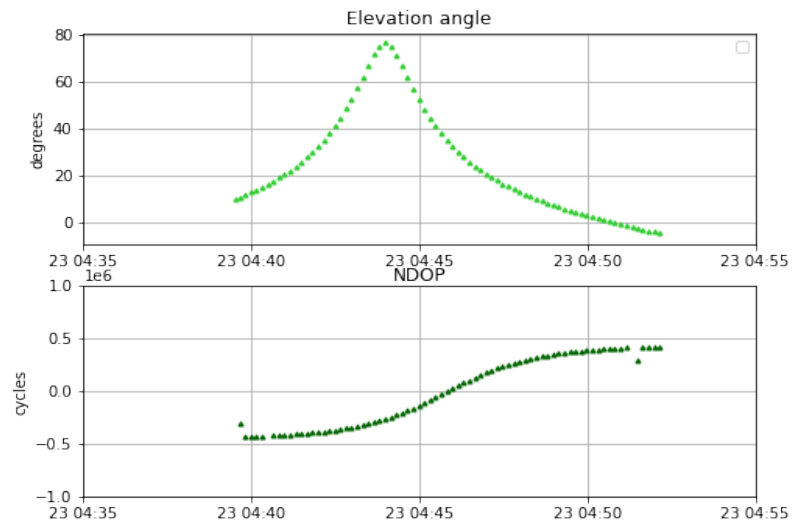
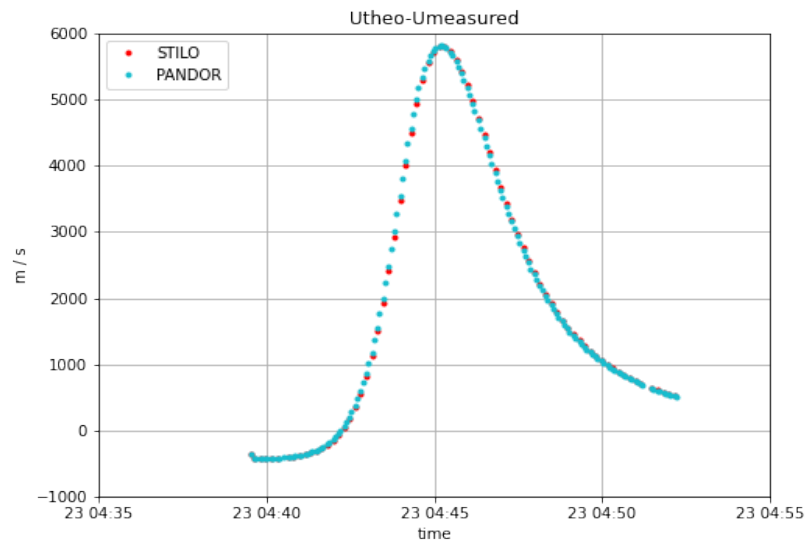
Διάγραμμα 4.4: Διαφορά  $NDOP_{L1}$  και  $NDOP_{L1-iono-free}$  διορθωμένο για την ιονόσφαιρα, σταθμός PAUB - PAREETE 23 Jul 2015



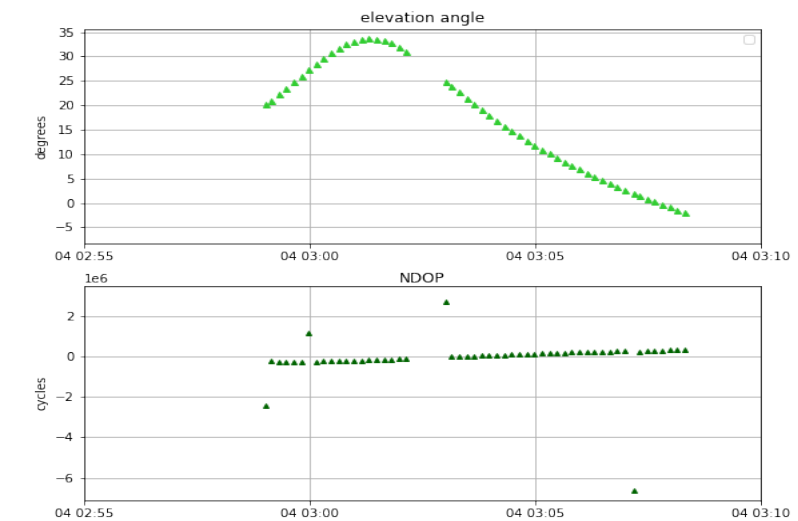
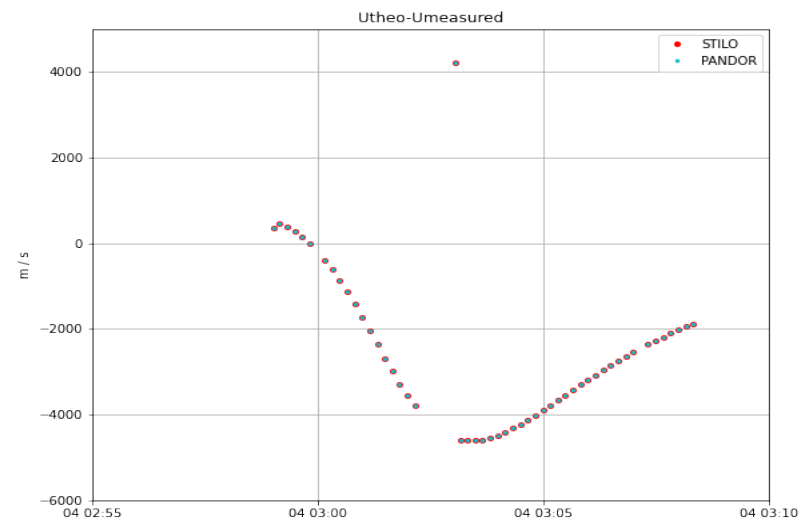
Διάγραμμα 4.5: Σύγκριση  $u_{measured}$  και θεωρητική ταχύτητα  $u_{theo}$  (πάνω) και Doppler Count (κάτω), ένα πέρασμα δορυφόρου για το σταθμό PAUB – PAREETE 23 Jul 2015



Διάγραμμα 4.6: Σύγκριση  $u_{measured}$  και θεωρητική ταχύτητα  $u_{theo}$  (πάνω) και Doppler Count  $N_{DOP}$  (κάτω), ένα πέρασμα δορυφόρου για το σταθμό PAUB - PAREETE 04 Jan 2017



Διάγραμμα 4.7: Διαφορά στα υπόλοιπα  $u_{theo}-u_{measured}$  μεταξύ STILO και PANDOR (αριστερά), γωνία ύψους δορυφόρου (πάνω δεξιά) και NDOP<sub>L1</sub>(κάτω αριστερά), ένα πέρασμα δορυφόρου για το σταθμό ADHC - TERRE ADELIE 23 Jul 2015



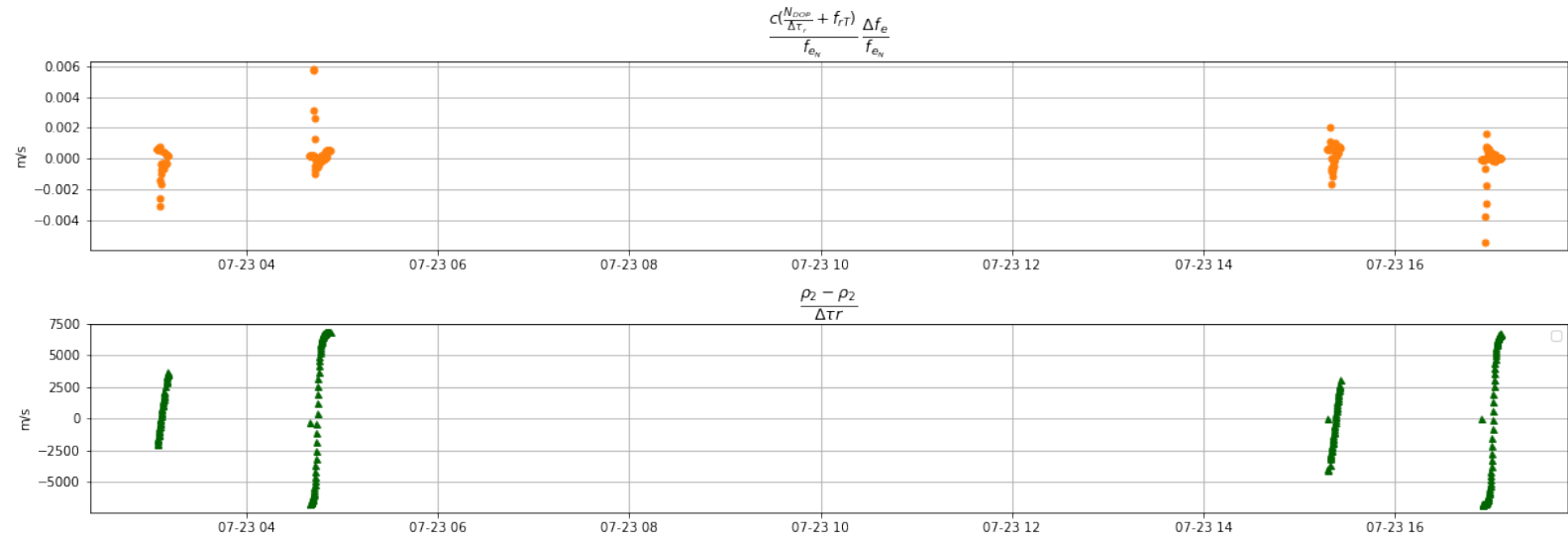
Διάγραμμα 4.8: Διαφορά στα υπόλοιπα  $u_{theo}-u_{measured}$  μεταξύ STILO και PANDOR (αριστερά), γωνία ύψους δορυφόρου (πάνω δεξιά) και NDOP<sub>L1</sub>(κάτω αριστερά), ένα πέρασμα δορυφόρου για το σταθμό PAUB-PAPEETE 04 Jan 2017

Η διορθωμένη για την ιονόσφαιρα μέτρηση Doppler,  $N_{\text{DOPL1-iono-free}}$ , φαίνεται να διαφέρει από τη μη διορθωμένη μέτρηση  $N_{\text{DOPL1}}$ , στο Διάγραμμα 4.4, και άρα κρίνεται απαραίτητη για τους υπολογισμούς της ταχύτητας του δορυφόρου για αναλύσεις υψηλής αλλά και χαμηλής ακρίβειας. Σημειώνεται πως στο διάγραμμα αυτό, αλλά και τα επόμενα, υπάρχουν κάποια outliers, τιμές δηλαδή που αποκλίνουν κατά πολύ από την γενική κατανομή, οι οποίες παρατηρούνται τις ίδιες χρονικές στιγμές για όλες τις ποσότητες, επομένως δεν έχει γίνει κάποιο συστηματικό σφάλμα στην επεξεργασία και προέρχονται από τις μετρήσεις.

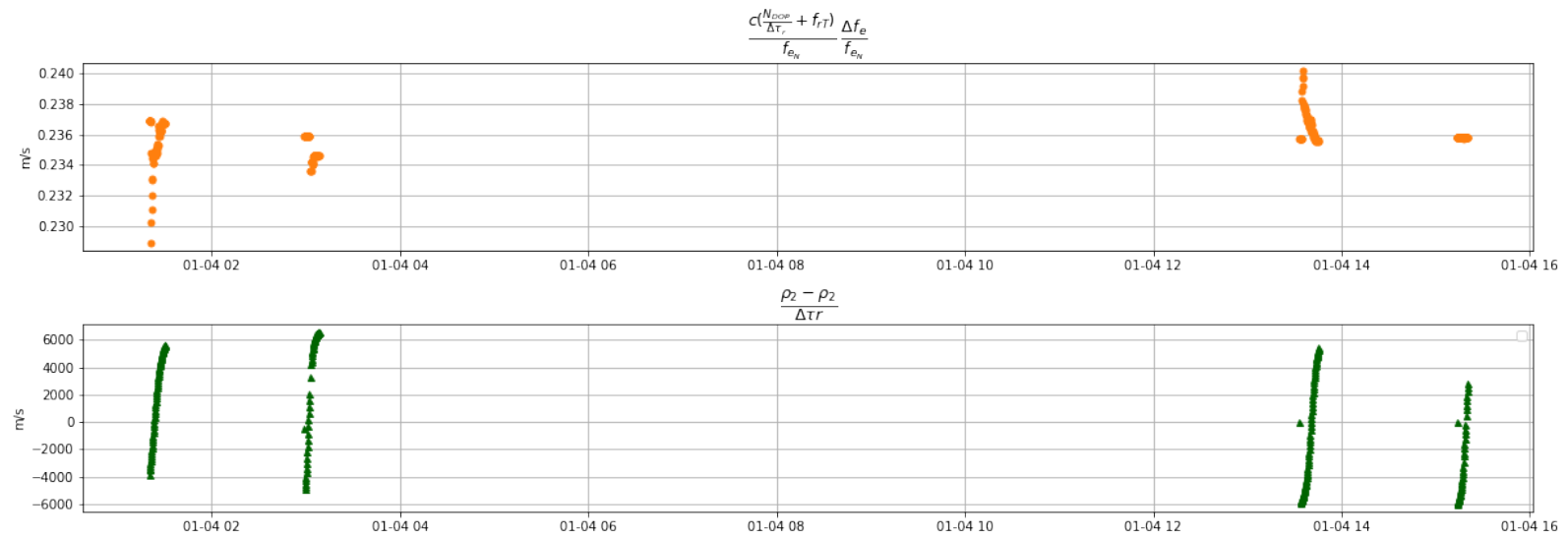
Όσον αφορά τη σύγκριση των ταχυτήτων  $u_{\text{theo}}$  και  $u_{\text{measured}}$ , όπως φαίνεται στα διαγράμματα, φαίνεται να υπάρχει συμφωνία μεταξύ ελαχιστοποίησης της διαφοράς τους με τη μέτρηση Doppler  $N_{\text{DOP}}$ , καθώς η διαφορά των ταχυτήτων είναι μέγιστη στο σημείο που μηδενίζει η μέτρηση  $N_{\text{DOP}}$  όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.5 και το Διάγραμμα 4.6. Αντίστοιχα, όσο μεγαλώνει η μέτρηση  $N_{\text{DOP}}$  αυξάνεται και η διαφορά των δύο ταχυτήτων, θεωρητικής και υπολογισμένης από τις μετρήσεις.

Στο Διάγραμμα 4.7 φαίνονται τα υπόλοιπα της διαφοράς  $u_{\text{theo}} - u_{\text{measured}}$  υπολογισμένα με PANDOR (μπλε) και με STILO (κόκκινο), η διακύμανση της γωνίας ύψους και η μέτρηση Doppler ( $N_{\text{DOPH}}$ ). Παρατηρείται μία συσχέτιση μεταξύ της διαφοράς  $u_{\text{theo}}$  και  $u_{\text{measured}}$  με την γωνία ύψους του δορυφόρου, αφού η διακύμανσή τους είναι όμοια, με μικρή χρονική απόκλιση. Στη θέση που ο δορυφόρος μεσουρανεύει, παρατηρείται η ταύτιση των δύο ταχυτήτων, ενώ στις μικρές γωνίες ύψους  $<10^\circ$  φαίνεται να υπάρχουν αρκετά outliers τόσο στο  $N_{\text{DOP}}$  όσο και στη διαφορά των ταχυτήτων.

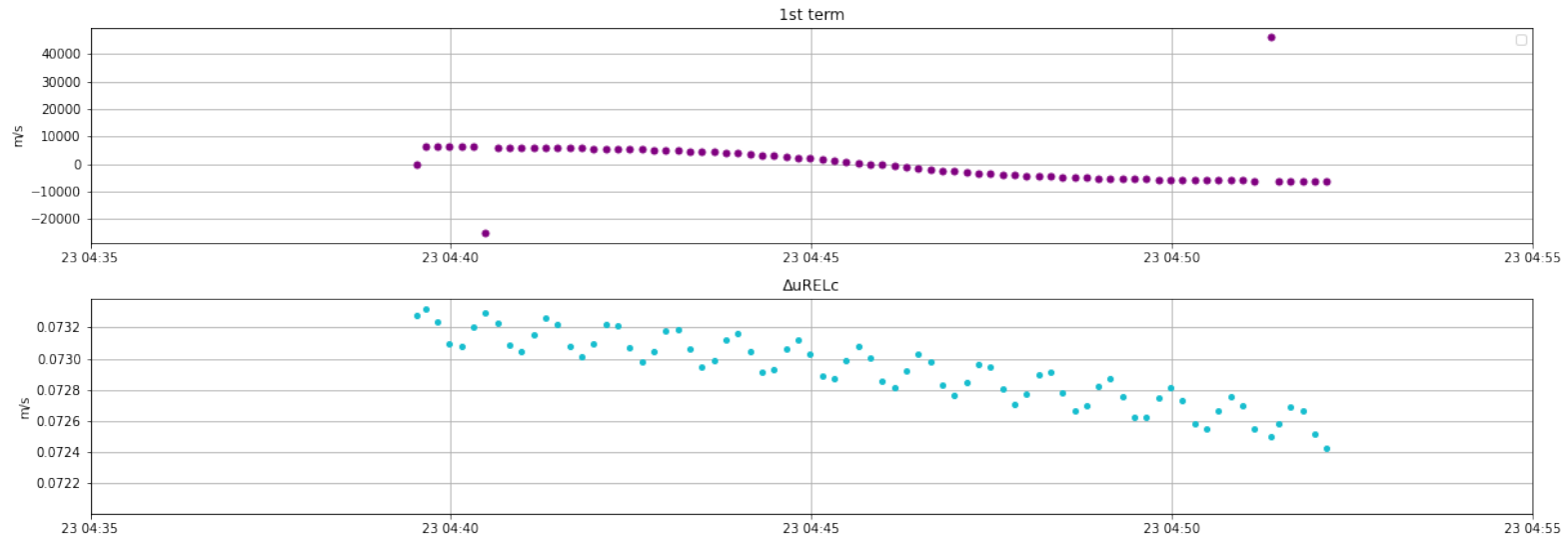
Στο Διάγραμμα 4.8 οι διαφορές των ταχυτήτων, η γωνία ύψους και η μέτρηση Doppler αφορούν τον σταθμό PAUB - PAPEETE, και παρατηρήσεις άλλης ημέρας και έτους (004/2017). Οι γωνίες ύψους δορυφόρου είναι μικρότερες για το συγκεκριμένο πέρασμα από αυτές στο Διάγραμμα 4.7 και παρατηρούνται και αρκετές συγκεντρωμένες αποκλίνουσες τιμές. Είναι αναμενόμενο να συμβαίνει αυτό, όταν η γωνία ύψους είναι κοντά στο  $0^\circ$ , ωστόσο υπάρχουν και κάποια outliers τα οποία εμφανίζονται σε μεγαλύτερες γωνίες.



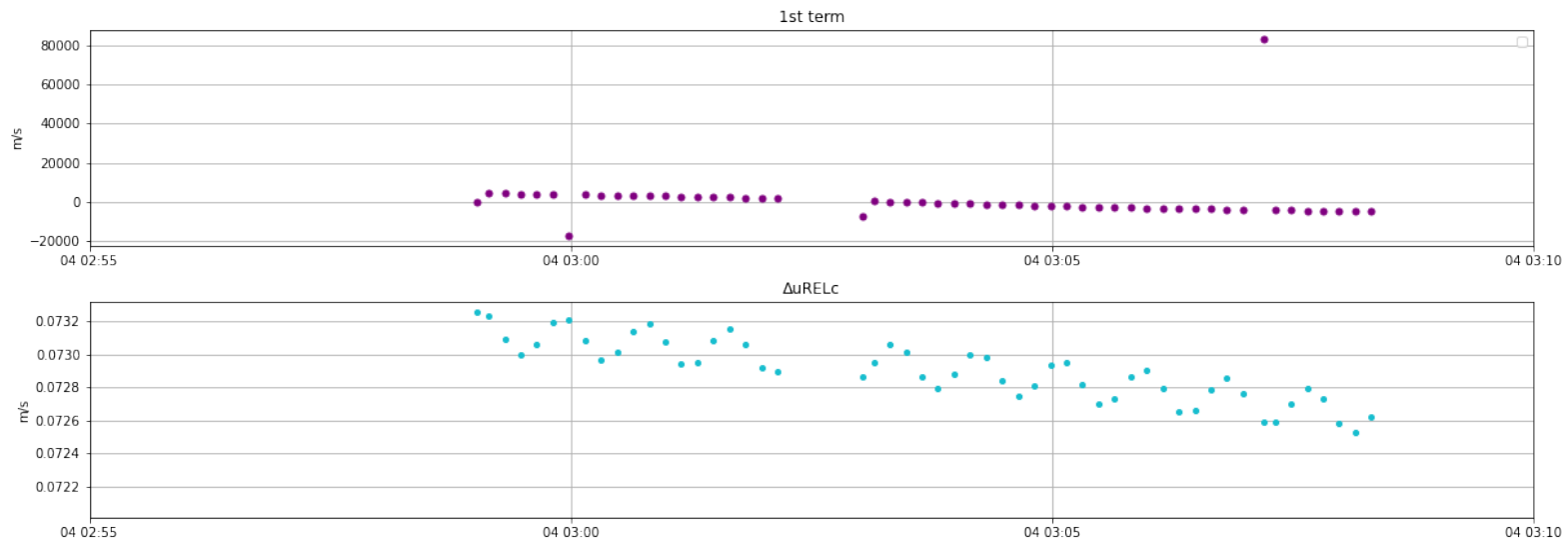
Διάγραμμα 4.9: Διάγραμμα μεγάλων όρων εξίσωσης  $u_{theo}$ , πρώτος όρος (πάνω) και δεύτερος (κάτω), όλα τα περάσματα για το σταθμό PAUB - PAPEETE 23 Jul 2015



Διάγραμμα 4.10: Διάγραμμα μεγάλων όρων εξίσωσης  $u_{theo}$ , πρώτος όρος (πάνω) και δεύτερος (κάτω), όλα τα περάσματα για το σταθμό PAUB - PAPEETE 04 Jan 2017



Διάγραμμα 4.11: Διάγραμμα μεγάλων όρων εξίσωσης  $u_{measured}$ , πρώτος όρος (πάνω) και  $\Delta u_{RELC}$  (κάτω), ένα πέρασμα για το σταθμό PAUB - PAPEETE 23 Jul 2015



Διάγραμμα 4.12: Διάγραμμα μεγάλων όρων εξίσωσης  $u_{measured}$ , πρώτος όρος (πάνω) και  $\Delta u_{RELC}$  (κάτω), ένα πέρασμα για το σταθμό PAUB - PAPEETE 04 Jan 2017

Στο Διάγραμμα 4.9 και το Διάγραμμα 4.10 παρουσιάζονται οι μεγάλοι όροι που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του  $u_{theo}$ . Προφανώς η τάξη μεγέθους του  $(\rho_2 - \rho_1)\Delta t$ , είναι κατά πολύ μεγαλύτερη επομένως παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια υπολογισμού της  $u_{theo}$  της οποίας η αρχική εξίσωση είναι η (3.10)

Αντίστοιχα, στα Διάγραμμα 4.11 και Διάγραμμα 4.12, φαίνονται οι μεγάλοι όροι που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του  $u_{measured}$ . Και εδώ, ο πρώτος όρος έχει κατά πολύ μεγαλύτερη τάξη μεγέθους από το  $\Delta u_{RELc}$  αποτελώντας σημαντικό παράγοντα ακρίβειας για την εκτίμηση της ταχύτητας  $u_{measured}$  από την εξίσωση (3.10).

Φυσικά, ακόμα και αν η τάξη μεγέθους τους είναι μικρή, αυτό δεν σημαίνει πως δεν είναι σημαντικοί όροι για τον υπολογισμό των 2 ταχυτήτων, καθώς για εκτίμηση τροχιάς υψηλής ακρίβειας, δεν απαλείφεται κανένας όρος που μπορεί να διαμορφώσει το τελικό αποτέλεσμα.

## 5 Συμπεράσματα και Προτάσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση πρώτου επιπέδου στα πρωτογενή δεδομένα DORIS, η οποία πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ακόμη, εισάγονται ορισμένες προτάσεις ως μελλοντικό αντικείμενο έρευνας.

### 5.1 Συμπεράσματα

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής ανέδειξε τη δυνατότητα χρήσης του συστήματος DORIS στον ακριβή προσδιορισμό τροχιάς δορυφόρου. Αποτελεί διαχρονικά ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, και η ύπαρξή του στην έρευνα είναι κρίσιμη για τις επιστήμες της Γεωδαισίας, της Γεωφυσικής και της Ωκεανογραφίας. Η μέθοδος παρατηρήσεων με μέτρηση Doppler είναι απλή, αξιόπιστη και όχι υπερβολικά σύνθετη για μετέπειτα επεξεργασία. Το δίκτυο επίγειων σταθμών μεγαλώνει συνεχώς, ενώ η γεωγραφική κατανομή τους καλύπτει ικανοποιητικά τις όποιες ανάγκες του συστήματος. Ακόμη, τα υψηλής ακρίβειας διαθέσιμα δεδομένα, εκτός από τις μετρήσεις επί του δορυφόρου, που αφορούν τροχιές και ατμοσφαιρικές παραμέτρους επιτρέπουν την ανάλυση υψηλού επιπέδου στα πρωτογενή δεδομένα μετρήσεων, τέτοια που φτάνει την ακρίβεια προσδιορισμού τροχιάς στο 1cm.

Η μορφή στην οποία παρέχονται τα δεδομένα DORIS RINEX 3.0 και έπειτα τα καθιστά εύκολα σε χρήση αφού είναι επέκταση του format RINEX, το οποίο είναι διαδεδομένο για δεδομένα GNSS και επιτρέπει την άντληση δεδομένων χωρίς ιδιαίτερη επεξεργασία. Οι μετρούμενες ποσότητες που δεν περιορίζονται σε μετρήσεις φάσης και ψευδοαπόστασης, αλλά περιέχουν και ατμοσφαιρικά δεδομένα, δίνουν τη δυνατότητα για περαιτέρω έρευνα, ενώ η πολυετής βάση δεδομένων επιτρέπει την ανάπτυξη μακροχρόνιων μοντέλων ιδιαίτερα στον τομέα της ωκεανογραφίας. Χρησιμοποιώντας ως εργαλείο οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού, μπορούν να αξιοποιηθούν έτοιμες βιβλιοθήκες επεξεργασίας ή εξαγωγής δεδομένων από τα αρχεία RINEX ή ακόμη και να αναπτυχθούν νέοι κώδικες ανοιχτής πρόσβασης.

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης πρώτου επιπέδου που πραγματοποιήθηκε, για την εκτίμηση της ταχύτητας του δορυφόρου, είναι ικανοποιητική δεδομένης της επιθυμητής ακρίβειας, μερικών χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο. Η διαφορά της θεωρητικής ταχύτητας  $u_{theo}$  και αυτής που υπολογίζεται από μετρήσεις  $u_{measured}$  είναι λογική λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς στην εκτίμηση των παραμέτρων, ενώ συμφωνεί και με τη διακύμανση των υπόλοιπων ποσοτήτων όπως η γωνία ύψους και η μέτρηση Doppler.

Όσον αφορά τις αξιολογήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα STILO και PANDOR, το δεύτερο φαίνεται να έχει καλύτερη διόρθωση στα χρονόμετρα των δορυφόρων, ωστόσο ο θόρυβος που εισάγει σε δεδομένα μικρού μήκους, στη μέτρηση Doppler δεν το καθιστά την καλύτερη επιλογή για ανάλυση υψηλής ακρίβειας, καθώς εισάγει αβεβαιότητα στην εκτίμηση της ταχύτητας. Τα δεδομένα του DIODE – STILO στα αρχεία RINEX 3.0 με την fixed διόρθωση για τα χρονόμετρα, δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και όπως φαίνεται και στα διαγράμματα, είναι πολλές φορές σχεδόν ταυτόσημα χρονικά με αυτά του PANDOR, για την ανάλυση τέτοιου επιπέδου.

Τέλος, περισσότερη διερεύνηση για τη συστηματική ή μη, ύπαρξη των τιμών που αποκλίνουν στα διαγράμματα μπορεί να πραγματοποιηθεί συγκρίνοντας πολλαπλά δεδομένα άλλων ημερών, ίδιας ώρας ή/και αζιμουθίου του δορυφόρου, για να εξεταστεί αν υπάρχει κάποιο ενδεχόμενο εμπόδιο στη μετάδοση σήματος, κάτι αρκετά πιθανό μιας και φαίνεται να υπάρχει κάποιο κενό μεταξύ των συνεχόμενων μετρήσεων.



## 5.2 Προτάσεις – Ανάλυση Υψηλότερης Ακρίβειας

Αρχικά, προτείνεται η περαιτέρω χρήση των διαθέσιμων προϊόντων από το DORIS, στον τομέα της έρευνας. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα SINEX με εβδομαδιαίες θέσεις σταθμών και χρονοσειρές μπορούν να συνδυαστούν με τις καταγραφές σεισμών των σταθμών, σε εφαρμογές που αφορούν στην παρακολούθηση σεισμών και την ανάπτυξη περισσότερων τοπικών και μη γεωλογικών μοντέλων, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα.

Όσον αφορά τον προσδιορισμό τροχιάς, το τελικό αποτέλεσμα της μελέτης των δεδομένων και της ανάλυσης αυτού του επιπέδου είναι ο προσδιορισμός της ταχύτητας του δορυφόρου με τάξη μερικών χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο. Για να παραχθούν προϊόντα υψηλότερης ακρίβειας, χρειάζεται να ληφθούν υπόψιν παραδοχές που έγιναν σε αυτό το επίπεδο ανάλυσης όπως ότι:

- το δυναμικό των σταθμών θεωρείται στο επίπεδο του γεωειδούς, ανεξαρτήτως υψόμετρου
- οι εξισώσεις που επιλέχθηκαν είναι απλουστευμένες και χαμηλής ακρίβειας
- αγνοείται η επίδραση της τροπόσφαιρας

Τέλος, προτείνεται, η ξεχωριστή ανάλυση κάθε όρου που περιλαμβάνεται στις εξισώσεις υπολογισμού των ταχυτήτων αλλά και η σωστή παραμετροποίησή τους. Τα ατμοσφαιρικά δεδομένα και μοντέλα μπορούν να συνδυαστούν έτσι ώστε στο τελικό αποτέλεσμα να επιδρούν όσο το δυνατόν λιγότερο η ιονόσφαιρα και η τροπόσφαιρα και να λαμβάνονται υπόψιν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες όπως θερμοκρασία, υγρασία και πίεση και ό,τι μπορεί να συνεπάγονται αυτές στην επίδραση των μετρήσεων. Ταυτόχρονα, με ακριβείς διορθώσεις χρονομέτρων, θα είναι εφικτή η χρήση μετρήσεων που αφορούν όλους τους σταθμούς όχι μόνο αυτούς που είναι σταθμοί αναφοράς χρόνου.

## Παράρτημα Α – Κώδικας Modelling

##Myrto Tsihlaiki - written for thesis Σύστημα DORIS: Πρωτογενή δεδομένα και ανάλυση πρώτου επιπέδου

```
#!/usr/bin/env python
# coding: utf-8

# # Prepare the environment

# standard modules
import datetime as dt
import pickle

# project specific
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import geodetic
import astropy.coordinates
import astropy.time
import sp3

pd.set_option("display.precision", 9)

# constant parameters
SOL = 299792456.2
FREQUENCY1 = 2036.25e+06
FREQUENCY2 = 401.25e+06
GAMMA = FREQUENCY1 / FREQUENCY2 * FREQUENCY1 / FREQUENCY2
GM = 3.986004418e+14
AE = 6378136.6
J2 = 1.0826359e-3
UGEO = 6.969290134e-10 * SOL * SOL

# speed of light c (m/s)
# nominal frequency of L1 (Hz)
# nominal frequency of L2 (Hz)
# squared frequency ratio
#  $\mu = GM$  ( $m^3/s^2$ )
# μεγάλος ημιάξονας (m)
# δυναμικός συντελεστής zero tide model
# δυναμικό επιφάνειας γης ( $m^2/s^2$ )

# station position and velocity
# EPOCH0 = 2000.
EPOCH0 = np.datetime64('2000-01-01')
ADHC0 = [ -1940878.5639, 1628473.1101, -5833723.3562, 4.48, -13.94, -6.28]
HBMB0 = [ 5084653.4453, 2670347.3199, -2768470.9722, -0.62, 18.58, 16.29]
KRWB0 = [ 3855260.4608, -5049735.5619, 563056.5024, -3.74, 0.81, 13.67]
PAUB0 = [-5246414.2238, -3077266.6535, -1913840.0357, -41.32, 53.02, 33.39]
TLSB0 = [4628693.8126, 119984.8010, 4372104.5096, -11.04, 18.21, 14.05]
οι συντεταγμένες πρέπει να αναφέρονται στην εποχή μετρήσεων, βλ. dprod2014_current.txt

# satellite codes
SATELLITES = {'CRYOSAT-2': ['L12', '36508'],
              'JASON-2': ['L27', '33105'],
              'JASON-3': ['L39', '41240'],
              'SARAL': ['L46', '39086'],
              'HY-2A': ['L45', '37781'],
              'HY-2C': ['L69', '46469'],
              'HY-2D': ['L78', '48621'],
              'SENTINEL-3A': ['L74', '41335'],
              'SENTINEL-3B': ['L98', '43437']}

# data
path = 'data/new_data/'
RINEX = "cs2rx15204.010"
STATION = 'D30'
```

```

# useful functions go here
# def mjd_to_datetime(mjd):
#     '''Convert MJD to datetime.datetime object.'''
#     return J2000 + dt.timedelta(days=mjd-MJD_J2000)
def station_pos(station, delta_time):
    '''Compute station position at epoch using ITRF2014 velocity model
station: list of station position and velocity at 2000.0 (reference epoch)
delta_time: fractional years'''
    return [station[0] + delta_time * station[3] * 1000.,
            station[1] + delta_time * station[4] * 1000.,
            station[2] + delta_time * station[5] * 1000.]

def geometrical_distance(x, y, z, station):
    '''Compute distance from station to satellite.

station: list of station coordinates.'''
    return np.sqrt((x - station[0]) * (x - station[0]) +
                  (y - station[1]) * (y - station[1]) +
                  (z - station[2]) * (z - station[2]))

def potential(lat, x, y, z):
    '''Compute Gravity Potential of the satellite Ur'''
    distance = np.sqrt(x * x + y * y + z * z)
    u = GM / distance * (1 - (AE / distance)**2 * J2 * ((3. * (np.sin(lat))**2
-1.)/2.))
    return u

def relativistic_clock_correction(vx, vy, vz, ur):
    '''Compute ΔuRELc'''
    vr2 = vx * vx + vy * vy + vz * vz
    return (ur + vr2 / 2 - UGEO) / SOL

## Read the RINEX file
# read pickled data (from notebook 1_parse_doris_rinex)
df = pd.read_pickle(f"{path:s}{STATION:s}_{RINEX:s}.pkl.xz")

# Filter per 10s measurement

#Filters measurements by 3 and 10s and drops 3s measurements
df['delta_sec'] = df['seconds'].diff()
df.drop(df[df['delta_sec'] < 4.].index, inplace=True)
df.drop('delta_sec', axis=1, inplace=True)

# relativistic correction# Compute extra columns and new index
# compute station coordinates
# get epochs from the DataFrame
epochs = df.index.to_numpy()
epoch = epochs[0] + (epochs[-1] - epochs[0]) / 2
# divide by np.timedelta(1, 'ns') to get float
delta_epoch = (epoch - EPOCH0) / np.timedelta64(1, 'ns') * 1e-9 / 86400 / 365.25

station_cor = station_pos(PAUB0, delta_epoch)

with open(f"{path:s}{RINEX:s}.meta.pkl", 'rb') as fh:
    rnx_metadata = pickle.load(fh)
print(rnx_metadata)

# scale 'tai' is not working with 'itrs'; 'utc' is ok
times = astropy.time.Time(epochs, format='datetime64', scale='utc')
sv_id = sp3.Sp3Id(SATELLITES[rnx_metadata['SV name']][0])

```

```

location = astropy.coordinates.EarthLocation.from_geocentric(x=station_cor[0], y=station_cor[1],
z=station_cor[2], unit='m')
altaz = sp3.altaz_standard_atmosphere(sv_id, times, location,
download_directory=b'sp3')

altaz.az.value.tolist()

sv_altaz = pd.DataFrame({'TAI': epochs,
                        'altitude': altaz.alt.value.tolist(),
                        'azimuth': altaz.az.value.tolist()})

sv_altaz.set_index('TAI', inplace=True)
print(sv_altaz) # altitude = elevation

df['geometrical_distance'] = df.apply(lambda x: geometrical_distance(x['X'], x['Y'],
x['Z'], station_cor), axis=1)

# Computes L iono free
df['L_iono'] = (GAMMA * df['L1'] - np.sqrt(GAMMA) * df['L2']) / (GAMMA - 1.)
df['delta_t_r'] = df['seconds'].diff()
df['ρ2 - ρ1'] = df['geometrical_distance'].diff()
df['NDOP_L1'] = df['L1'].diff()
df['3rd term'] = ( df['NDOP_L1'] / df['delta_t_r'] + FREQUENCY1 ) / FREQUENCY1 * df['F'] * SOL * 1e-
11
df['NDOP_L2'] = df['L2'].diff()
df['NDOP_Liono'] = df['L_iono'].diff()
df['1st term'] = df['ρ2 - ρ1'] / df['delta_t_r']

# # set new index (TAI) and drop columns we don't need
# df.drop(['station'], axis=1, inplace=True)
# print(df)

cdf = df[['seconds', 'delta_t_r', 'geometrical_distance', 'L1', 'L2', 'C1', 'C2', 'ρ2 - ρ1',
'NDOP_L1', 'NDOP_L2', 'NDOP_Liono', 'F', 'X', 'Y', 'Z', 'vX', 'vY', 'vZ', '3rd term']]
# computes latitude (φ) of the satellite in radians
cdf['lat'] = cdf.apply(lambda x: geodetic.latitude(x['X'], x['Y'], x['Z']), axis=1)

cdf['frT'] = FREQUENCY1 * (1 + df['F'] * 1e-11)
cdf['Ur'] = cdf.apply(lambda x: potential(x['lat'], x['X'], x['Y'], x['Z']), axis=1)
cdf['Durelc'] = cdf.apply(lambda x: relativistic_clock_correction(x['vX'], x['vY'], x['vZ'],
x['Ur']), axis=1)
print(cdf)

# # Compute Velocities
#u_measured-iono = c/feN * [ feN - frT - NDOP/Δtr ] + ΔuIONO + ΔuRELC
cdf['u_m'] = SOL / FREQUENCY1 * (FREQUENCY1 - cdf['frT'] - cdf['NDOP_L1'] / cdf['delta_t_r']) +
cdf['Durelc']

#u_theo = ρ2-ρ1 / Δtr - 3rd term
cdf['u_theo'] = cdf['ρ2 - ρ1'] / cdf['delta_t_r'] + cdf['3rd term']

cdf['residual'] = cdf['u_m'] + cdf['u_theo']

cdf = cdf.join(sv_altaz)

# save the DataFrame to pickle format (w/ compression)
cdf.to_pickle(f"{path:s}final_{STATION:s}_{RINEX:s}.pkl.xz")

```

## Παράρτημα Β – Βιβλιοθήκες Python

Astropy  
Geodetic  
Datetime  
Matplotlib  
Numpy  
Pandas  
Pickle  
Sp3

### CODE SOURCES

Parsing - <https://github.com/xanthospap/doris>

Interpolation - <https://github.com/neuromorphicsystems/sp3>

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Afraimovich, E.L., Astafyeva, E.I., 2008. TEC anomalies—Local TEC changes prior to earthquakes or TEC response to solar and geomagnetic activity changes? *Earth, Planets and Space* 60, 961–966. <https://doi.org/10.1186/BF03352851>
- Auriol, A., 2010. DORIS system: The new age. <https://doi.org/doi:10.1016/j.asr.2010.05.015>
- Carvalho, H., Del Moral, P., Monin, A., et al., 1997. Optimal nonlinear filtering in GPS/INS integration. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 33 (3), 835–850.
- Choi, K.-R., Ries, J.C., Tapley, B.D., 2004. Jason-1 Precision Orbit Determination by Combining SLR and DORIS with GPS Tracking Data. *Journal of Geodesy* 78, 319–331. <https://doi.org/10.1080/01490410490465652>
- Couhert, A., Mercier, F., Moyard, J., Biancale, R., 2018. Systematic Error Mitigation in DORIS-Derived Geocenter Motion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123, 10,142-10,161. <https://doi.org/10.1029/2018JB015453>
- Dix-Matthews, B.P., Schediwy, S.W., Gozzard, D.R., Driver, S., Schreibe, K.U., Carman, R., Tobar, M., 2020. Methods for coherent optical Doppler orbitography. *J Geod* 94, 55. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01380-w>
- Feissel-Vernier, M., Le Bail, K., Berio, P., Coulot, D., Ramillien, G., Valette, J., 2006. Geocentre motion measured with DORIS and SLR, and predicted by geophysical models. *Journal of Geodesy* 80, 637–648. <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0079-z>
- Harkins, M.D., 1979. The relativistic Doppler shift in satellite tracking <https://doi.org/10.1029/RS014i004p00671>.
- Haug, M., Moffit, F.H., Anderson, J.M., 1980. A simplified Explanation of Doppler Positioning.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Waskle, E., 2007. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science & Business Media. Ebook ISBN:978-3-211-73017-1
- Jalabert, E., Mercier, F., 2018. Analysis of South Atlantic Anomaly perturbations on Sentinel-3A Ultra Stable Oscillator. Impact on DORIS phase measurement and DORIS station positioning. *Advances in Space Research* 62, 174–190. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.04.005>
- Jayles, C., Costes, M., 2004. Ten centimeter orbits in real-time on-board of a satellite: DORIS-DIODE current status. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(03\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(03)00048-1)
- Jayles, C., Nhun-Fat, B., Tourain, C., 2006. DORIS: System Description and Control of the Signal Integrity. *J Geodesy* 80, 457–472. <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0046-8>
- Kramer, H., 2002. Observation of the Earth and Its Environment – Survey of Missions and Sensors. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-97678-0>
- Lemoine, J.-M., Capdeville, H., Soudarin, L., 2016. Precise orbit determination and station position estimation using DORIS RINEX data. *Advances in Space Research* 58, 2677–2690. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.06.024>
- Lian, L., Wang, J., Huang, C., 2018. Analysis and combination of four technique-individual EOP time series. *Geodesy and Geodynamics* 10. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.04.005>
- Meng, X.-B., Gao, X.Z., Liu, Y., Zhang, H., 2015. A novel bat algorithm with habitat selection and Doppler Effect in echoes for optimization. *Expert Systems with Applications* 42. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.04.026>

- Moreaux, G., Lemoine, F.G., Argus, D.F., Santamaría-Gómez, A., Willis, P., Soudarin, L., Gravelle, M., Ferrage, P., 2016. Horizontal and vertical velocities derived from the IDS contribution to ITRF2014, and comparisons with geophysical models. *Geophysical Journal International* 207, 209–227. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw265>
- Moreaux, G., Willis, P., Lemoine, F.G., Zelensky, N.P., Couhert, A., Lakbir, H.A., Ferrage, P., 2019. DPOD2014: A new DORIS extension of ITRF2014 for precise orbit determination. *Advances in Space Research* 63, 118–138. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.043>
- Nieto YII, D., Caus Lopez, M., 2018. Doppler shift compensation strategies for LEO satellite communication systems. <http://hdl.handle.net/11375/5713>
- Noll, C., Dube, M., 2004. The IGS global data center at the CDDIS - an update. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy* 26, 603–604. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00108-9)
- Nouël, F., Berthias, J.P., Deleuze, M., Guitart, A., Laudet, P., Piuze, A., Pradines, D., Valorge, C., Dejoie, C., Susini, M.F., Taburiau, D., 1994. Precise Centre National d’Etudes Spatiales orbits for TOPEX/POSEIDON: Is reaching 2 cm still a challenge? *Journal of Geophysical Research: Oceans* 99, 24405–24419. <https://doi.org/10.1029/94JC01039>
- Penna, N., Dodson, A., Chen, W., 2001. Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model. *The Journal of Navigation* 54, 37–55. <https://doi.org/10.1017/S0373463300001107>
- Petit, G., Luzum, B., 2010. IERS Conventions. IERS Technical Note, 36. ISBN 3-89888-989-6
- Seitz, M., Bloßfeld, M., Angermann, D., Seitz, F., 2021. DTRF2014: DGFI-TUM’s ITRS realization 2014. *Advances in Space Research*. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.12.037>
- sp3, n.d. sp3. International Centre for Neuromorphic Systems. <https://github.com/neuromorphicsystems/sp3>
- Tavernier, G., Fagard, H., Feissel-Vernier, M., Lemoine, F., Noll, C., Ries, J.C., Soudarin, L., Willis, P., 2005. The International DORIS Service. *Advances in Space Research* 36, 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.102>
- Tavernier, G., Granier, J.P., Jayles, C., Sengenès, P., Rozo, F., 2003. The current evolutions of the DORIS system. *Advances in Space Research* 31, 1947–1952. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00155-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00155-8)
- Zandbergen, R., Otten, M., Righetti, P.L., Kuijper, D., Dow, J.M., 2003. Routine operational and high-precision orbit determination of Envisat. *Advances in Space Research* 31, 1953–1958. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00154-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00154-6)
- Zeitlhöfler, J., 2019. Thesis: Nominal and observation-based attitude realization for precise orbit determination of the Jason satellites.
- Zelensky, N.P., Lemoine, F.G., Ziebart, M., Sibthorpe, A., Willis, P., Beckley, B.D., Klosko, S.M., Chinn, D.S., Rowlands, D.D., Luthcke, S.B., Pavlis, D.E., Luceri, V., 2010. DORIS/SLR POD modeling improvements for Jason-1 and Jason-2. *Advances in Space Research* 46, 1541–1558. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.008>