



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ
ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ
ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗΣ**

Νικόλαος Ι. Κανελλόπουλος

διδακτορική διατριβή

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΪΟΣ 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ
ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ
ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗΣ

Νικόλαος Ι. Κανελλόπουλος

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ, MSc

Διδακτορική Διατριβή

Συμβουλευτική Επιτροπή : Γεώργιος Πανταζής, Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)
Ρωμύλος Κορακίτης, Καθηγητής ΕΜΠ
Ορθοδοξία Αραμπατζή, Επ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Ρωμύλος Κορακίτης
τ. Καθηγητής ΣΑΤΜ ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Πανταζής
Καθηγητής ΣΑΤΜ ΕΜΠ
(Επιβλέπων)

.....
Ορθοδοξία Αραμπατζή
Επικ. Καθηγήτρια ΣΑΤΜ ΕΜΠ

.....
Μαρία Τσακίρη
Καθηγήτρια ΣΑΤΜ ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Βέργος
Αν. Καθηγητής ΤΑΤΜ ΑΠΘ

.....
Βασίλειος Γρηγοριάδης
Επικ. Καθηγητής ΤΑΤΜ ΑΠΘ

.....
Αλέξανδρος Παπαγιάννης
Καθηγητής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΪΟΣ 2021

.....
ΝΙΚΟΛΑΟΣ Ι. ΚΑΝΕΛΛΟΠΟΥΛΟΣ

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π., MSc

Copyright © Νικόλαος Ι. Κανελλόπουλος, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All Rights Reserved.

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

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.»

(Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ.2)

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας – 2^{ος} Κύκλος» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)»



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών και επιβλέπων της παρούσας διδακτορικής διατριβής κύριο Γεώργιο Πανταζή. Αρχικά για τη συνεχή και αδιάκοπη προσφορά βοήθειας σε γεωδαιτικά θέματα, την άψογη συνεργασία και συνεννόηση σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και την ουσιαστική βοήθεια σε διάφορα ακαδημαϊκά και προσωπικά στάδια που υπερκαλύπτουν το τυπικό κομμάτι επίβλεψης μιας διδακτορικής διατριβής

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών κύριο Ρωμύλο Κορακίτη και την Επίκουρη Καθηγήτρια της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών κυρία Ορθοδοξία Αραμπατζή για τη βοήθεια και την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Και οι δύο καθηγητές με υποστήριξαν σε διάφορους ακαδημαϊκούς τομείς και πάντα με αντιμετώπιζαν με υπομονή και εμπιστοσύνη.

Η διδακτορική έρευνα δεν θα ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί χωρίς τις ακαδημαϊκές παρεμβάσεις, ιδέες και γνώσεις της εκλιπούσας καθηγήτριας Ευαγγελίας Λάμπρου. Η εκλιπούσα, ως αρχική επιβλέπουσα της έρευνας, με καθοδήγησε και με βοήθησε για την μετέπειτα ορθή ολοκλήρωση της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Πρόεδρο και το προσωπικό λειτουργίας του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ), για τη συνεργασία τους σε όλη την διάρκεια της διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που με στήριξε σε όλα τα στάδια των σπουδών μου, από την εισαγωγή στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, την αποφοίτησή μου τόσο σε προπτυχιακό όσο και σε μεταπτυχιακό επίπεδο, έως και την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής. Ευχαριστώ τον πατέρα μου Γιάννη, τη μητέρα μου Ντίνα και την αδερφή μου Έλενα για την αγάπη και την στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Νίκος Κανελλόπουλος

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Γεωδαισίας του Τομέα Τοπογραφίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών (ΣΑΤΜ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή δεν αποτελεί μέρος προσωπικής ή άλλου τύπου προγενέστερης έρευνας.

Άπτεται στο ευρύτερο επιστημονικό πεδίο της υψομετρίας και στη δυνατότητα εισαγωγής των αρχών της γενικής θεωρίας της Σχετικότητας σε συμβατικά αντικείμενα που εντάσσονται στο επιστημονικό ενδιαφέρον του Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού, συνδυάζοντας επομένως τις επιστημονικές περιοχές της κλασικής και σχετικιστικής Γεωδαισίας.

Η εξέλιξη της κβαντικής μετρολογίας (quantum metrology) επιτρέπει την ανάπτυξη νέων εφαρμογών στη Γεωδαισία. Η πρόσφατη πρόοδος στα οπτικά ατομικά ρολόγια (optical atomic clocks) και στη μεταφορά μετρήσεων συχνότητας σε μεγάλες αποστάσεις, προσφέρει τη δυνατότητα απομακρυσμένης σύγκρισης των συχνοτήτων που παράγονται από διακριβωμένα ρολόγια υψηλής ακρίβειας. Οι συγκρίσεις αυτές επιτρέπουν σχετικιστικό προσδιορισμό των διαφορών δυναμικού βαρύτητας και αντίστοιχα των υψομετρικών διαφορών μεταξύ οποιονδήποτε σημείων στην επιφάνεια της Γης.

Επομένως η παρούσα διδακτορική διατριβή σκοπεύει να απαντήσει τα ακόλουθα ερωτήματα:

- *Μπορεί η χρονομετρική χωροστάθμηση, ως μεθοδολογία, να αξιοποιηθεί για τον προσδιορισμό ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών;*
- *Μπορούν να αξιοποιηθούν σύγχρονες μετρητικές διατάξεις παρατήρησης χρόνου – συχνότητας (οπτικά ατομικά ρολόγια), για την υλοποίηση και σύγκριση μετρήσεων υψηλής ακρίβειας;*
- *Ποιες είναι οι κύριες πηγές σφαλμάτων (είτε συστηματικών είτε τυχαίων) που επηρεάζουν την τελική αβεβαιότητα προσδιορισμού χρόνου – συχνότητας;*
- *Μπορούν να προκύψουν αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα συνδυάζοντας τη μεθοδολογία με τον κατάλληλο μετρητικό εξοπλισμό;*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	I
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	II
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	IV
ΠΙΝΑΚΕΣ	VIII
ΕΙΚΟΝΕΣ	VIII
ΣΧΗΜΑΤΑ -- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	X
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ	XI
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΒΑΣΙΚΩΝ ΟΡΙΣΜΩΝ	XII
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	XV
ABSTRACT	XXIV
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1

ΜΕΡΟΣ Α

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΒΑΡΥΤΗΤΑ

1.1 Γενικά.....	5
1.2 Συστήματα και είδη υψομέτρων	5
1.3 Επιφάνειες αναφοράς υψομέτρων	7
1.3.1 Η αποχή του Γεωειδούς	9
1.4 Συμβατικές μέθοδοι προσδιορισμού γεωειδούς	10
1.5 Προσδιορισμός ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών	12
1.6 Βασικές έννοιες της βαρύτητας	15
1.6.1 Η έλξη της βαρύτητας.....	16
1.6.2 Η δύναμη και το δυναμικό της βαρύτητας	19
1.6.3 Η ένταση της βαρύτητας.....	21
1.7 Δημιουργία συστημάτων αναφοράς υψομέτρων.....	22
1.7.1 Ενοποίηση διαφορετικών συστημάτων υψομέτρων.....	23
1.7.2 Μεθοδολογίες προσδιορισμού και ενοποίησης υψομετρικών συστημάτων	24
1.7.3 Υφιστάμενες προσπάθειες ενοποίησης υψομετρικών συστημάτων	28
1.7.3.1 Παγκόσμιο Υψομετρικό Σύστημα Αναφοράς (IHRF).....	28
1.7.3.2 Ενοποίηση υψομετρικών συστημάτων στην Ελλάδα	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗΣ

2.1 Χρονομετρική Γεωδαισία	32
2.2 Βασικές έννοιες της σχετικιστικής Γεωδαισίας	33
2.3 Παρατήρηση χρόνου και συχνότητας.....	35
2.3.1 Σχέση μεταξύ ιδιοχρόνου και συντεταγμένου χρόνου	37
2.3.2 Χρονικές κλίμακες.....	39
2.3.3 Το φαινόμενο της βαρυτικής φασματικής μετατόπισης.....	40
2.4 Σχετικιστικά συστήματα αναφοράς.....	42
2.4.1 Είδη επιφανειών αξιοποιούμενων από τη Σχετικιστική Θεωρία	44
2.4.2 Παραδοχές σχετικιστικών συστημάτων	47
2.5 Χρονομετρική Χωροστάθμιση	48
2.5.1 Μαθηματικό μοντέλο	49
2.6 Παράμετροι μελέτης χρονομετρικής χωροστάθμισης.....	51
2.6.1 Μέτρηση – παρατήρηση φυσικών μεγεθών	52
2.6.2 Επικοινωνία μετρητικών συστημάτων	56
2.6.2.1 Μέσα μετάδοσης	58
2.6.2.2 Τεχνικές μεταφοράς οπτικού φάσματος.....	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΟΠΤΙΚΑ ΑΤΟΜΙΚΑ ΡΟΛΟΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

3.1 Αρχική αντίληψη του χρόνου	69
3.2 Εξέλιξη συστημάτων μέτρησης χρονικών διαφορών.....	70
3.2.1 Μηχανικά ρολόγια.....	71
3.2.1.1 Μηχανικά ρολόγια και εκκρεμή.....	71
3.2.2 Ρολόγια χαλαζία	72
3.2.3 Ατομικός χρόνος.....	73
3.2.4 Ατομικά ρολόγια.....	75
3.2.4.1 Ατομικά ρολόγια καισίου – μικροκυμάτων	77
3.2.4.2 Οπτικά ατομικά ρολόγια	78
3.2.4.3 Οπτικά ατομικά ρολόγια πλέγματος.....	79
3.3 Βασικές αρχές κβαντικής μηχανικής που διέπουν τα ατομικά ρολόγια.....	82
3.3.1 Ιδιότητες λειτουργείας ατομικών ρολογιών	85
3.3.2 Διαταραχές και σταθερότητα ατομικών ρολογιών.....	87

3.3.2.1 Το φαινόμενο Doppler.....	87
3.3.2.2 Το φαινόμενο Zeeman – Αλληλεπίδραση με μαγνητικά πεδία.....	89
3.3.2.3 Αλληλεπίδραση με ηλεκτρικά πεδία	90
3.3.2.4 Αλληλεπίδραση με ακτινοβολία μαύρου σώματος (blackbody radiation).....	91
3.3.2.5 Επιδράσεις λόγω συγκρούσεων και συνθηκών πίεσης	92
3.3.2.6 Το φαινόμενο της βαρυτικής επίδρασης (Gravitational Effect).....	92
3.4 Πρότυπα οπτικής ατομικής συχνότητας.....	93
3.5 Παράμετροι μελέτης οπτικών ατομικών ρολογιών	95
3.5.1 Κατηγορία και είδος ατομικού ρολογιού	95
3.5.2 Μεταφορά συστημάτων ατομικών ρολογιών.....	103
3.5.3 Κατασκευαστική δομή ατομικών ρολογιών.....	108

ΜΕΡΟΣ Β

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΡΟΛΟΓΙΩΝ

4.1 Γενικά.....	116
4.2 Στάδια εφαρμογής της μεθοδολογίας	116
4.3 Συγκριτική αξιολόγηση των παραμέτρων	118
4.3.1 Γενική συγκριτική κατάταξη των παραμέτρων.....	119
4.3.1.1 Ποιοτική αξιολόγηση παραμέτρων	120
4.3.2 Ειδική συγκριτική κατάταξη των παραμέτρων	123
4.3.2.1 Μοντέλο ποσοτικής αξιολόγησης των παραμέτρων ..	127
4.4 Προσδιορισμός της εξίσωσης συνεισφοράς αβεβαιότητας.....	131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

5.1 Γενικά.....	133
5.2 Δημιουργία σεναρίων εφαρμογής της μεθοδολογίας	134
5.3 Αξιολόγηση σεναρίων	140
5.4 Δημιουργία προτύπου εφαρμογής της μεθοδολογίας.....	149

ΜΕΡΟΣ Γ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Γενικά.....	154
6.2 Ερευνητικά ερωτήματα.....	156
6.3 Συμπεράσματα	158
6.4 Προτάσεις	166

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	168
---------------------------	------------

ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ.....	188
------------------------	------------

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 2.1 Ταυτότητα παραμέτρου, Μέτρηση – παρατήρηση φυσικών μεγεθών.....	54
Πίνακας 2.2 Ταυτότητα παραμέτρου, Επικοινωνία απομακρυσμένων μετρητικών διατάξεων.....	57
Πίνακας 3.1 Συντελεστές Zeeman για ορισμένα ρολόγια ατόμου / ιόντος.....	90
Πίνακας 3.2 Ταυτότητα παραμέτρου, Κατηγορία και είδος ατομικών ρολογιών.....	99
Πίνακας 3.3 Κλασματικές τιμές διόρθωσης και αβεβαιότητας για ένα τυπικό ρολόι υττερβίου.....	101
Πίνακας 3.4 Ταυτότητα παραμέτρου, Μεταφορά συστημάτων ατομικών ρολογιών.....	104
Πίνακας 3.5 Ταυτότητα παραμέτρου, Κατασκευή ατομικών ρολογιών	110
Πίνακας 4.1 Γενική αξιολόγηση παραμέτρων.....	122
Πίνακας 4.2 Ειδική συγκριτική κατάταξη παραμέτρων.....	127
Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτική αντιστοίχιση σεναρίων με τα κύρια χαρακτηριστικά εφαρμογής.....	140
Πίνακας 5.2 Συνδυασμός οδηγιών εφαρμογής με εύρος τιμών συντελεστή αξιολόγησης.....	152
Πίνακας 6.1 Αντιστοίχιση τιμών αβεβαιότητας προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών με την ακρίβεια προσδιορισμού διαφορών συχνότητας.....	157
Πίνακας 6.2 Συγκεντρωτικά βασικά στοιχεία των παραμέτρων.....	160

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση χρονομετρικής χωροστάθμησης.	50
Εικόνα 3.1 Εξέλιξη ακρίβειας ρολογιών ανά είδος κατά χρονολογία	75

Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση τυπικού ατομικού ρολογιού.....	76
Εικόνα 3.3 Διάγραμμα κατασκευαστικής δομής οπτικών ατομικών ρολογιών πλέγματος	80
Εικόνα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση του πυρήνα και των ιόντων ενός ατόμου.....	83
Εικόνα 3.5 Διάγραμμα πιθανοτήτων διέγερσης ηλεκτρονίων ατομικών ρολογιών	86
Εικόνα 3.6 Σχηματικό διάγραμμα κατανόησης διαφοροποίησης μεταξύ σταθερότητας και αβεβαιότητας.....	94
Εικόνα 3.7 Σχηματική γραφική διάταξη συγκρίσεων (frequency ratio measurements) μεταξύ ενός ρολογιού αναφοράς και ενός ρολογιού παρατηρήσεων	102
Εικόνα 3.8 ^α Τυπική ανάπτυξη ενός στατικού εργαστηριακού ατομικού ρολογιού.....	106
Εικόνα 3.8 ^β Τυπική ανάπτυξη ενός φορητού ατομικού ρολογιού, διαμορφωμένο σε τροχήλατο τρέιλερ	106
Εικόνα 3.9 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργικών μονάδων και διαστάσεων μεταφερόμενου ατομικού ρολογιού	107
Εικόνα 3.10 Συνολική κατασκευαστική δομή ατομικών ρολογιών, όπου γίνεται αναγραφή των διαφορετικών υπό-συστημάτων.....	111
Εικόνα 3.11 Εσωτερική γραφική κατασκευαστική δομή οπτικού ατομικού ρολογιού.....	114
Εικόνα 5.1 Ενδεικτική χωροθέτηση δύο διατάξεων οπτικών ατομικών ρολογιών που απέχουν λιγότερο από 100km	135
Εικόνα 5.2 Ενδεικτική τοποθέτηση διάταξης οπτικού ατομικού ρολογιού και απεικόνιση χωρικής ζώνης ακτίνας 10km.....	135
Εικόνα 5.3 Ενδεικτικές θέσεις συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών που καλύπτουν χωρικά τα όρια μιας χώρας	136
Εικόνα 5.4 Ενδεικτικές θέσεις συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών που καλύπτουν χωρικά τα όρια χωρών που ανήκουν στην ίδια ήπειρο	137

Εικόνα 5.5	Ενδεικτικές θέσεις συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών που καλύπτουν χωρικά τα όρια χωρών που ανήκουν σε διαφορετικές ηπείρους.....	137
Εικόνα 5.6	Ενδεικτικές θέσεις συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών που καλύπτουν χωρικά τα όρια περιοχής μεταξύ 100m-2km.....	138
Εικόνα 5.7	Ενδεικτικές θέσεις συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών που καλύπτουν χωρικά τα όρια γειτονικών χωρών.....	139

ΣΧΗΜΑΤΑ -- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Σχήμα 1.1	Το γεωειδές και το ελλειψοειδές εκ περιστροφής ως προσεγγίσεις της Γης.....	8
Σχήμα 1.2	Σχετική θέση επιφανειών αναφοράς και υψομέτρων	10
Σχήμα 1.3	Ελκτική δύναμη που ασκείται από μία μάζα m σε μάζα M....	18
Σχήμα 1.4 _{α,β,γ}	Βασικές αδυναμίες υψομετρικών συστημάτων	24
Σχήμα 1.5	Βασικές αδυναμίες υψομετρικών συστημάτων	29
Σχήμα 2.1	Τυπική τομή εδάφους – τελλουροειδούς – γεωειδούς – ελλειψοειδούς	46
Σχήμα 2.2	Προβολές ενός σημείου της ΦΓΕ στις επιφάνειες αναφοράς υψομέτρων	46
Διάγραμμα 4.1	Γενική αξιολόγηση παραμέτρων	123
Διάγραμμα 5.1	Τιμές συντελεστή G_{Total} κάθε σεναρίου ανά παράμετρο	148
Διάγραμμα 6.1	Συνδυασμός ειδικής και γενικής συγκριτικής κατάταξης για κάθε παράμετρο	162
Διάγραμμα 6.2	Αξιολόγηση σεναρίων με ταυτόχρονη εμφάνιση γραμμής τάσης της περιπλοκότητας.....	164
Διάγραμμα 6.3	Διάγραμμα ροής μελέτης βελτίωσης και προεκτίμησης της τιμής του συντελεστή αξιολόγησης	165

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

ACES	A tomic C lock E nsemble in S pace
BCRS	B arycentric C elestial R eference S ystem
DWDM	D ense W avelength D ivision M ultiplexing
EUVN	E uropean V ertical R eference N etwork
EVRF	E uropean V ertical R eference F rame
GCRS	G eocentric C elestial R eference S ystem
GNSS	G lobal N avigation S atellite S ystems)
GRT	G eneral R elativity T heory
IAU	I nternational A stronomical U nion
ICRS	I nternational C elestial R eference S ystem
IERS	I nternational E arth R otation S ervice
ITRS	I nternational T errestrial R eference S ystem
ITU	I nternational T elecommunication U nion
OADM	O ptical A dd/ D rop M ultiplexers
PPP	P recise P oint P ositioning
SNR	S ignal- T o- N oise- R atio
TAI	I nternational A tomic T ime
TGC	G eocentric C oordinate T ime
TWSTFT	T wo- W ay S atellite T ime and F requency T ransfer
UTC	C oordinate U niversal T ime
VLBI	V ery L ong B aseline I nterferometry
ΜΔΩΤ	Μ έση Δ υναμική Ω κεάνια Τ οπογραφία
ΜΣΘ	Μ έση Σ τάθμη της Θ άλασσας
ΦΓΕ	Φ υσική Γ ήινη Ε πιφάνεια

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΒΑΣΙΚΩΝ ΟΡΙΣΜΩΝ

❖ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ (GRAVITY POTENTIAL)

Είναι το αποτέλεσμα της προσθετικής επίδρασης του δυναμικού έλξης και του φυγόκεντρου δυναμικού. Η φυσική σημασία του γήινου δυναμικού, είναι ότι αντιστοιχεί στο έργο που εκτελείται από τη δύναμη της βαρύτητας, ώστε αυτή να εκτελέσει μια απειροστή μετατόπιση της μάζας, στην οποία εξασκείται.

❖ ΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ (UNIFICATION OF REFERENCE SYSTEMS)

Είναι το σύνολο των στατιστικών και ποιοτικών προσεγγίσεων και υπολογισμών που οφείλουν να πραγματοποιηθούν και να ελεγχθούν με σκοπό την ένωση ετερογενών συστημάτων (οριζοντιογραφικών, υψομετρικών, χρονικών) σε ένα ενιαίο.

❖ ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΗ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ (RELATIVISTIC GEODESY)

Είναι ο κλάδος της ευρύτερης επιστήμης της Γεωδαισίας που αναδεικνύει τη χρήση των αρχών της γενικής θεωρίας της σχετικότητας στη γεωδαιτική θεωρία, περιγράφοντας φυσικά βαθμωτά μεγέθη, και ασχολείται με την αξιόπιστη μέτρηση και μοντελοποίηση της σχετικιστικής μεταβολής των γεωμετρικών μεγεθών στο πεδίο βαρύτητας της Γης.

❖ ΧΩΡΟΧΡΟΝΟΣ (SPACETIME)

Ο χωροχρόνος είναι ένα τετραδιάστατο συνεχές, στο οποίο τα σημεία, που ονομάζονται συμβάντα, μπορούν να εντοπιστούν από τις συντεταγμένες τους. Οι τιμές των συντεταγμένων μπορεί να είναι τέσσερις πραγματικοί αριθμοί, αλλά συνήθως εξετάζονται τρεις χωρικές συντεταγμένες και μία αντίστοιχη χρονική.

❖ ΦΥΣΙΚΟ ΒΑΘΜΩΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ

Μια ορθή (proper) ποσότητα είναι το αποτέλεσμα μιας φυσικής μέτρησης σε ένα πραγματικό πείραμα, και περιγράφεται μαθηματικά από

ένα βαθμωτό μέγεθος που παραμένει αμετάβλητο κάτω από γενικούς μετασχηματισμούς συντεταγμένων.

❖ *ΒΑΡΥΤΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ*
(*GRAVITATIONAL REDSHIFT EFFECT*)

Αποτελεί μία από τις συνέπειες της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, και αναφέρει ότι η συχνότητα ενός ρολογιού εξαρτάται από το βαρυτικό δυναμικό διαφορά στη θέση του ρολογιού.

❖ *ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΟ ΓΕΩΕΙΔΕΣ*
(*RELATIVISTIC GEOID*)

Το σχετικιστικό γεωειδές είναι η επιφάνεια όπου τα ακριβή ρολόγια λειτουργούν με την ίδια συχνότητα και είναι πιο κοντά στη μέση στάθμη της θάλασσας. Το γεωειδές που προκύπτει από αυτές τις παρατηρήσεις αντιπροσωπεύει την πραγματική ισοδυναμική επιφάνεια λαμβάνοντας υπόψη και όλες τις παραμέτρους που αφορούν στη φυσική πραγματικότητα.

❖ *ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗ*
(*CHRONOMETRIC LEVELLING*)

Μεθοδολογία προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών μέσω της απομακρυσμένης σύγκρισης των μετρούμενων συχνοτήτων από δύο κατάλληλα διακριβωμένα ρολόγια ακριβείας.

❖ *ΙΔΙΟΠΟΣΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ*
(*PROPER AND COORDINATE QUANTITY*)

Οι ιδιοποσότητες είναι εκείνες που προκύπτουν ως το άμεσο αποτέλεσμα τοπικών μετρήσεων (ιδιομήκος, ιδιοχρόνος), ενώ οι συντεταγμένες ποσότητες βασίζονται σε συμβατικές επιλογές (συντεταγμένες χωροχρόνου, συμβάσεις χρονικού συγχρονισμού).

❖ *ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ*
(*SYNCHRONIZATION AND SYNTONIZATION*)

Η διαδικασία ορισμού πολλαπλών ρολογιών στην ίδια χρονική κλίμακα ονομάζεται συγχρονισμός (synchronization).

Η διαδικασία ορισμού πολλαπλών ταλαντωτών στην ίδια συχνότητα ονομάζεται συντονισμός (syntonization)

❖ *ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ*
(FREQUENCY OFFSET)

Είναι η διαφορά μεταξύ μιας μετρημένης συχνότητας και μιας ιδανικής συχνότητας με μηδενική αβεβαιότητα. Η ιδανική συχνότητα ονομάζεται ονομαστική συχνότητα (συχνότητα αναφοράς).

❖ *ΑΤΟΜΙΚΟ ΡΟΛΟΙ (ATOMIC CLOCK)*

Είναι μια συσκευή που παράγει ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα (στο μικροκυματικό ή οπτικό φάσμα) του οποίου η συχνότητα είναι κλειδωμένη στην μη διαταραγμένη συχνότητα μετάβασης μεταξύ δύο κβαντικών καταστάσεων ενός ατόμου ή ιόντος.

❖ *ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΡΟΛΟΓΙΩΝ*
(STABILITY OF AN ATOMIC CLOCK)

Η σταθερότητα είναι ένα μέτρο της ακρίβειας με την οποία μπορεί να μετρηθεί μια ποσότητα, και συνήθως εκφράζεται ως συνάρτηση του μέσου όρου του παρατηρούμενου χρόνου, καθώς για πολλές διαδικασίες ο θόρυβος μειώνεται όταν πραγματοποιούνται περισσότερες μετρήσεις.

❖ *ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΡΟΛΟΓΙΩΝ*
(UNCERTAINTY OF AN ATOMIC CLOCK)

Η αβεβαιότητα αναφέρεται στις φυσικές διεργασίες που μπορούν να μετατοπίσουν τη μετρούμενη συχνότητα από την αδιατάρακτη φυσική ατομική συχνότητα.

Σημείωση: Πρόκειται για ευρετήριο των βασικών ορισμών που χρησιμοποιούνται στη διδακτορική διατριβή, με την αντίστοιχη αγγλική τους μετάφραση. Η καταγραφή των όρων έγινε με σειρά που συμβαδίζει με την εμφάνιση των όρων σε κάθε ένα από τα κεφάλαια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διατριβή ασχολείται με τη μελέτη και ανάλυση των παραμέτρων που συμμετέχουν στην ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών με τη μεθοδολογία της χρονομετρικής χωροστάθμησης. Η μεθοδολογία αυτή, αφορά στην αξιοποίηση και υιοθέτηση των αρχών της γενικής θεωρίας της σχετικότητας στην αντίστοιχη θεωρία της υψομετρίας της κλασσικής γεωδαισίας.

Η μελέτη και ανάλυση των παραμέτρων επικεντρώνεται τόσο σε εκείνες που αφορούν το θεμελιώδες τμήμα εφαρμογής της μεθοδολογίας όσο και σε εκείνες που αναφέρονται στα οπτικά ατομικά ρολόγια που θα χρησιμοποιηθούν για τις παρατηρήσεις.

Κίνητρο αποτέλεσε ο συνδυασμός δύο σκέψεων-δεδομένων, πρώτον της εισαγωγής και υιοθέτησης των αρχών της γενικής θεωρίας της σχετικότητας στους περισσότερους επιστημονικούς κλάδους (Φυσική, Αστρονομία, Μετρολογία κ.ά.) και δεύτερον της επιθυμίας για καθιέρωση της χρήσης μιας μεθοδολογίας προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών που λαμβάνει υπόψη το γήινο βαρυτικό πεδίο αλλά ταυτόχρονα δεν είναι επηρεάζεται από τα συσσωρευτικά σφάλματα των συμβατικών μεθόδων της κλασσικής υψομετρίας.

Οι πρωτοτυπίες της διατριβής έγκεινται στο ότι:

- Χρησιμοποιούνται οι βασικές αρχές της γενικής θεωρίας της σχετικότητας στην επιστήμη της κλασσικής Γεωδαισίας και επιβεβαιώνεται η δυνατότητα προσδιορισμού ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών με βάση τη σχετικιστική Γεωδαισία.
- Αναλύονται και δομούνται παράμετροι με στοιχεία που αφορούν σε διαφορετικές επιστημονικές περιοχές.
- Πραγματοποιείται συνολική μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την τελική ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών με χρήση της χρονομετρικής χωροστάθμησης.
- Συγκρίνονται οι παράμετροι μεταξύ τους και κατατάσσονται σύμφωνα με τα ποιοτικά και τα ποσοτικά τους χαρακτηριστικά.
- Αναπτύσσεται μία ολοκληρωμένη διαδικασία αξιολόγησης διαφορετικών θεωρητικών σεναρίων χρησιμοποιώντας μια ενιαία κλίμακα βαθμολόγησης.
- Συντάσσονται γενικές οδηγίες εφαρμογής (guidelines) της μεθοδολογίας

Η διδακτορική διατριβή αναπτύσσεται σε τρία μέρη, που διαμορφώνονται αντίστοιχα σε κεφάλαια.

Πρώτο μέρος

Το μέρος αυτό της διατριβής, το οποίο αποτελείται από τρία κεφάλαια (1, 2 και 3) έχει ως αντικείμενο τη λεπτομερή καταγραφή και βιβλιογραφική ανασκόπηση, σε διεθνή κλίμακα, των επιστημονικών ζητημάτων που άπτονται σε αυτή. Συγκεκριμένα, η διατριβή βασίζεται στον συνδυασμό των αρχών της κλασσικής και σχετικιστικής γεωδαισίας για την επίτευξη του κοινού στόχου που αναφέρθηκε ήδη. Επομένως, κάθε κεφάλαιο του πρώτου μέρους αποτελεί μια σε βάθος αναφορά στις διαφορετικές αλλά συγγενικές επιστημονικές περιοχές.

Επίσης στα επιμέρους κεφάλαια 2, 3 περιλαμβάνεται η ανάλυση που έχει πραγματοποιηθεί και αναφέρεται στις παραμέτρους που επηρεάζουν την τελική ακρίβεια προσδιορισμού χρόνου – συχνότητας. Οι παράμετροι διαχωρίζονται, ανάλογα με το ρυθμό μεταβολής της επιρροής τους στην τελική αβεβαιότητα, σε σταθερές και μεταβλητές.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** αναλύονται τα στοιχεία της κλασσικής γεωδαισίας που αφορούν στην υψομετρική πληροφορία, καθώς τελικός στόχος αποτελεί ο προσδιορισμός υψομετρικών διαφορών. Γίνεται σαφής διαχωρισμός μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών υψομέτρων καθώς επίσης και των διαφόρων συστημάτων αναφοράς που έχουν δημιουργηθεί για την έκφραση, υλοποίηση και ποσοτικοποίηση της υψομετρικής πληροφορίας. Επιπρόσθετα καταγράφονται όλες οι συμβατικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με σκοπό να προκύψουν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης καθεμίας.

Επίσης γίνεται αναφορά στις βασικές έννοιες της θεωρίας του πεδίου βαρύτητας. Η μελέτη των υψομετρικών διαφορών σε συνδυασμό με το πεδίο βαρύτητας που δημιουργείται στην εγγύς περιοχή των παρατηρήσεων, αποτελούν το συνδυαστικό κρίκο των επιστημών της κλασσικής και σχετικιστικής γεωδαισίας. Επομένως, αναλύονται οι κύριες έννοιες που απασχολούν και θα χρησιμοποιηθούν από τη διδακτορική διατριβή.

Ωστόσο, το σημαντικότερο μέρος του κεφαλαίου αυτού είναι η καταγραφή όλων των υφιστάμενων και μελλοντικών προσπαθειών δημιουργίας ενοποιημένων υψομετρικών συστημάτων αναφοράς.

Συγκεκριμένα, αναλύονται οι διαφορετικές τεχνικές και μέθοδοι που έχουν δημιουργηθεί για τον προσδιορισμό των συντελεστών που χρησιμοποιούνται για την ενοποίηση των συστημάτων. Επίσης αναφέρονται οι δυσκολίες και περιορισμοί που δημιουργούνται σε τέτοιες πειραματικές διαδικασίες παγκοσμίου εμβέλειας. Στη συνέχεια περιγράφονται οι τρέχουσες προσπάθειες ενοποίησης των υψομετρικών συστημάτων, τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο (μέσω του Παγκόσμιου Υψομετρικού Συστήματος Αναφοράς (IHRF)), όσο και στο χωρικό επίπεδο της Ελλάδας.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** καταγράφεται και αναλύεται λεπτομερώς ό,τι αφορά στη μεθοδολογία της χρονομετρικής χωροστάθμησης. Αρχικά αναφέρονται οι βασικές έννοιες της σχετικιστικής γεωδαισίας και πιο συγκεκριμένα του κλάδου της χρονομετρικής γεωδαισίας. Αναλύονται τα συστήματα αναφοράς που αξιοποιούνται από τη γενική θεωρία της σχετικότητας καθώς επίσης και οι παραδοχές που οφείλουν να υιοθετηθούν για την χρήση τους.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στην παρατήρηση των βαθμωτών φυσικών μεγεθών, χρόνου και συχνότητας. Επίσης γίνεται διάκριση μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών χρόνου και αναλύεται το φαινόμενο της βαρυτικής φασματικής μετατόπισης σε ότι αφορά στη συχνότητα. Από το φαινόμενο αυτό εξαρτάται η δυνατότητα υλοποίησης της μεθοδολογίας, με τη σύνδεση των φυσικών βαθμωτών μεγεθών με το δυναμικό της βαρύτητας και το ορθομετρικό υψόμετρο.

Ωστόσο, το σημαντικότερο μέρος του κεφαλαίου αυτού είναι η μελέτη, καταγραφή και ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν την ακρίβεια προσδιορισμού χρόνου – συχνότητας και οφείλονται αποκλειστικά στα χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας.

Συγκεκριμένα αναλύεται η σταθερή παράμετρος "*μέτρηση*", που αναφέρεται στην επιλογή του χρόνου ή της συχνότητας ως παρατηρούμενο μέγεθος. Ουσιαστικά προτιμάται η παρατήρηση συχνότητας διότι είναι απλούστερη η διαδικασία καταγραφής, μεταφοράς και σύγκρισής της σε σχέση με το χρόνο.

Αντίστοιχα αναλύεται η μεταβλητή παράμετρος "*επικοινωνία*", που αναφέρεται αφενός στην επιλογή του μέσου μετάδοσης που θα χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση των μετρητικών διατάξεων και αφετέρου

στις τεχνικές μετάδοσης που θα χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά και σύγκριση του παρατηρούμενο μεγέθους.

Η επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας μέσου και τεχνικής διάδοσης εξαρτάται από τον σκοπό και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε μελέτης.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** καταγράφεται και αναλύεται λεπτομερώς ότι αφορά στα ατομικά ρολόγια. Αρχικά πραγματοποιείται μία ιστορική αναδρομή της χρήσης και εξέλιξης των συστημάτων διατήρησης και υλοποίησης του χρόνου. Η αναδρομή αυτή πραγματοποιείται με γνώμονα την ακρίβεια προσδιορισμού της αληθούς τιμής του χρόνου.

Η εξέλιξη των ρολογιών ξεκινά από τα μηχανικά ρολόγια έως και τα σύγχρονα ατομικά ρολόγια που λειτουργούν στο οπτικό μέρος του φάσματος. Για την κατηγορία αυτή, των σύγχρονων οπτικών ατομικών ρολογιών, καταγράφονται οι θεμελιώδεις αρχές λειτουργίας τους καθώς επίσης και οι συστηματικές πηγές διαταραχής της σταθερότητας και ακρίβειας τους.

Ωστόσο, το σημαντικότερο μέρος του κεφαλαίου αυτού είναι η μελέτη, καταγραφή και ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν την ακρίβεια προσδιορισμού χρόνου – συχνότητας και οφείλονται αποκλειστικά στα οπτικά ατομικά ρολόγια ακριβείας.

Συγκεκριμένα αναλύεται η μεταβλητή παράμετρος "*κατηγορία και είδος*", που αναφέρεται στην κύρια κατηγοριοποίηση των ρολογιών με βάση το είδος του ατόμου ή του ιόντος που θα χρησιμοποιηθεί.

Κάθε μία από τις διαφορετικές κατηγορίες χαρακτηρίζεται και από διαφορετική συμμόρφωση ως προς την ακρίβεια του οπτικού ατομικού ρολογιού. Η επιλογή βασίζεται στην υπάρχουσα υλικοτεχνική υποδομή καθώς επίσης και στη δυνατότητα μοντελοποίησης και απαλοιφής των συστηματικών πηγών σφαλμάτων, που έχουν διαφορετική επίδραση ανάλογα με την επιλογή του είδους του οπτικού ατομικού ρολογιού.

Αντίστοιχα αναλύεται η σταθερή παράμετρος "*μεταφορά*", που αναφέρεται στη στασιμότητα ή δυνατότητα μετακίνησης των οπτικών ατομικών ρολογιών. Η κύρια κατηγοριοποίηση της παραμέτρου αφορά αφενός στα στατικά ή μόνιμα και αφετέρου στα μεταφερόμενα οπτικά ατομικά ρολόγια.

Κάθε μία από τις κατηγορίες χαρακτηρίζεται από διαφορετική πολυπλοκότητα χρήσης και κατασκευής των οπτικών ατομικών ρολογιών καθώς επίσης και από διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Επίσης όσο μειώνονται οι διαστάσεις των οπτικών ατομικών ρολογιών και η μεταφορά τους γίνεται πιο εύκολη, αυξάνεται και το πλήθος των δυναμικών δεδομένων που μπορούν να συλλεχθούν παράλληλα με την παρατήρηση και μεταφορά συχνότητας.

Όλες οι διαφορετικές κατηγορίες οφείλουν να πραγματοποιούν παρατηρήσεις με την ίδια ακρίβεια, επομένως η τελική επιλογή καθορίζεται από το σκοπό, το κόστος και την υλικοτεχνική εξέλιξη.

Επίσης αναλύεται η μεταβλητή παράμετρος "*κατασκευαστική δομή*", που αναφέρεται στα πρόσθετα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά είτε της εσωτερικής είτε της εξωτερικής δομής των οπτικών ατομικών ρολογιών. Η κύρια κατηγοριοποίηση της παραμέτρου αφορά αφενός στην επέμβαση στην εσωτερική δομή των οπτικών ατομικών ρολογιών (όπου παρουσιάζεται εξειδικευμένη επέμβαση ανάλογα με τις επιλογές που έχουν γίνει στην παράμετρο κατηγορία και είδος) και αφετέρου στην εξωτερική τους δομή.

Όλες οι διαφορετικές κατηγορίες οφείλουν να συμβάλλουν περισσότερο ή λιγότερο στην ενίσχυση της σταθερότητας και ακρίβειας των οπτικών ατομικών ρολογιών, επομένως η τελική επιλογή καθορίζεται από το σκοπό και τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε μελέτης.

Δεύτερο μέρος

Στο μέρος αυτό της διατριβής, το οποίο αποτελείται από δύο κεφάλαια (4 και 5), αναλύεται και τεκμηριώνεται η συνεισφορά των παραμέτρων στην τελική ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών με χρήση της μεθόδου της χρονομετρικής χωροστάθμησης, όταν εκείνη πραγματοποιείται με σύγχρονα οπτικά ατομικά ρολόγια.

Συγκεκριμένα στο **τέταρτο κεφάλαιο**, αρχικά αναφέρονται τα ενδεικτικά στάδια εφαρμογής της μεθοδολογίας όταν αξιοποιούνται οπτικά ατομικά ρολόγια. Στη συνέχεια πραγματοποιείται συνολική μελέτη όλων των παραμέτρων, όπως προέκυψαν από τα στοιχεία του πρώτου μέρους της διατριβής.

Σκοπός είναι να προκύψει μία ενιαία κατάταξη των παραμέτρων σχετικά με την επιρροή τους στην εφαρμογή της μεθοδολογίας. Η επιρροή αυτή αποτελείται και αναλύεται με βάση δύο συνιστώσες. Οι συνιστώσες αυτές αφορούν στην ποιοτική ή στην ποσοτική επιρροή κάθε παραμέτρου.

Ο ποιοτικός διαχωρισμός αφορά στη γενική συγκριτική κατάταξη των παραμέτρων. Σκοπός της γενικής κατάταξης είναι η ανάλυση με κριτήρια που αφορούν στην πρακτικότητα και στη δυνατότητα τυπικής εφαρμογής της μεθοδολογίας.

Τα βασικά κριτήρια ως προς τα οποία αξιολογούνται οι παράμετροι, αναφέρονται ως *συνθήκες παραμέτρου* και είναι έξι (6) στο σύνολο:

- Κόστος
- Τεχνική υποδομή και εξοπλισμός
- Εμπορικότητα
- Πολυπλοκότητα
- Μαθηματική και στατιστική ανάλυση
- Επηρεασμός από άλλες παραμέτρους

Μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης προκύπτει η γενική κατάταξη των παραμέτρων. Κάθε παράμετρος αξιολογείται με τιμές βαρών που κυμαίνονται από 1 έως 3, για κάθε κριτήριο.

Γενική Συγκριτική Κατάταξη

<i>Αύξων αριθμός κατάταξης</i>	<i>Παράμετρος</i>	<i>Σύνολο κριτηρίων</i>
1	Μεταφορά	13
2	Επικοινωνία	12
3	Κατασκευαστική δομή	11
4	Κατηγορία και είδος	9
5	Μέτρηση	6

Όσο μεγαλύτερο είναι το άθροισμα των βαρών, τόσο μεγαλύτερη είναι η συνεισφορά της παραμέτρου στην πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας.

Αντίστοιχα, ο ποσοτικός διαχωρισμός αφορά στην ειδική συγκριτική κατάταξη των παραμέτρων. Σκοπός είναι να αξιοποιηθεί η ειδική κατάταξη ως ένα βοήθημα για τη μετέπειτα βαθμολόγηση κάθε παραμέτρου ώστε να διαμορφωθεί μία κατάσταση της θεωρητικής

συνεισφοράς κάθε παραμέτρου στη τελική επιδιωκόμενη ακρίβεια των παρατηρήσεων.

Ειδική Συγκριτική Κατάταξη

<i>Αύξων αριθμός κατάταξης</i>	<i>Παράμετρος</i>	<i>Ενδεικτικό πλήθος διαθέσιμων επιλογών</i>
1	<i>Κατηγορία και είδος</i>	>20
2	<i>Επικοινωνία</i>	12
3	<i>Κατασκευαστική δομή</i>	8-10
4	<i>Μεταφορά</i>	4-6
5	<i>Μέτρηση</i>	2

Για τη διεύρυνση της διαδικασίας ποσοτικής αξιολόγησης για οποιαδήποτε εφαρμογή, δημιουργήθηκε το μοντέλο αξιολόγησης της συνεισφοράς των παραμέτρων. Συγκεκριμένα ορίστηκε ένα μοντέλο μέσω μιας κλίμακας βαθμών (grades), που εκφράζει τη διαβάθμιση της επίδρασης των επιλογών κάθε μίας. Η κλίμακα των βαθμών ορίστηκε από το 1 έως το 5, για κάθε παράμετρο. Με τον ελάχιστο βαθμό της κλίμακας (1) βαθμολογείται η ελάχιστη συνεισφορά κάθε στοιχείου της παραμέτρου στην τελική αβεβαιότητα. Με το μέγιστο βαθμό της κλίμακας (5) αξιολογείται η μέγιστη επίδραση καθεμιάς παραμέτρου στην τελική ακρίβεια των παρατηρήσεων.

Οι βαθμοί καθορίζονται από τις εναλλακτικές επιλογές που μπορούν να γίνουν στο επίπεδο μελέτης των παραμέτρων, και αντιστοιχίζονται στις κατηγορίες και υπο-κατηγορίες που δημιουργούνται σε αυτές.

Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της συνολικής μελέτης των παραμέτρων δημιουργήθηκε η γραμμική εξίσωση συνεισφοράς αβεβαιότητας, που βασίζεται στον υπολογισμό του συντελεστή G_{Total} . Ο συντελεστής αυτός προκύπτει ως άθροισμα των βαθμών κάθε παραμέτρου.

Οι τιμές του συντελεστή κυμαίνονται από 5 (πέντε) έως 22 (εικοσιδύο) βαθμούς. Η βέλτιστη τιμή του συντελεστή ορίζεται εκείνη με τον μικρότερο αριθμό βαθμών και αντικατοπτρίζει τις ιδανικές συνθήκες και επιλογές για την εφαρμογή της μεθοδολογίας με χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** πραγματοποιείται θεωρητική προσομοίωση της χρονομετρικής χωροστάθμησης. Συγκεκριμένα δομούνται

διαφορετικά ιδεατά σενάρια εφαρμογής της μεθοδολογίας με χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών. Τα σενάρια αυτά είναι δέκα (10) σε πλήθος και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα των ενδεχόμενων πρακτικών εφαρμογών που μπορεί να αξιοποιηθεί η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών.

Τα σενάρια έχουν δομηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν όλο το εύρος της πολυπλοκότητας και της συνδυαστικής ανάλυσης που οφείλει να πραγματοποιηθεί για την αξιολόγησή τους. Στις απλές περιπτώσεις σεναρίων οι επιλογές των παραμέτρων είναι λιγότερο σύνθετες και αόριστες, ενώ αντίθετα στις πιο σύνθετες περιπτώσεις οι επιλογές αυτές είναι πιο συνδυαστικές και δεσμευτικές.

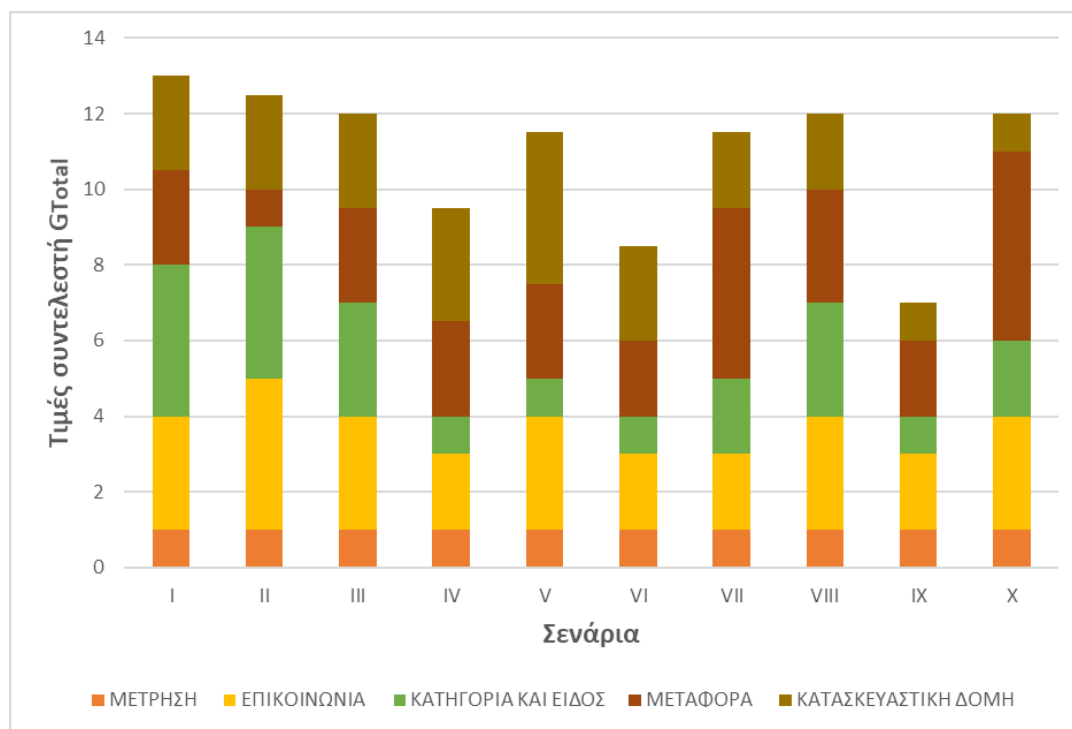
Επίσης τα σενάρια έχουν δομηθεί κυρίως με περιορισμούς που αφορούν στην ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών και στην απόσταση μεταξύ των συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών. Στις περιπτώσεις των πιο σύνθετων σεναρίων εισέρχονται και πρόσθετοι περιορισμοί στην εφαρμογή τους.

Συνοπτικά τα στοιχεία των σεναρίων είναι τα εξής:

<i>α/α</i>	<i>ΕΠΙΔΙΟΚΟΜΕΝΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑ</i>	<i>ΕΥΡΟΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ</i>	<i>α/α</i>	<i>ΕΠΙΔΙΟΚΟΜΕΝΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑ</i>	<i>ΕΥΡΟΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ</i>
<i>I</i>	$\pm 1\text{cm}$	$\leq 100\text{km}$	<i>VI</i>	$\pm 1\text{cm}$	$> 1000\text{ km}$
<i>II</i>	$\pm 2-3\text{cm}$	$\leq 10\text{km}$	<i>VII*</i>	$\pm 1\text{cm}$	$\geq 100\text{m}$ και $\leq 10\text{ km}$
<i>III</i>	$\pm 1\text{cm}$	$\leq 500\text{km}$	<i>VIII*</i>	$\geq \pm 1\text{cm}$	$\geq 300\text{m}$ και $\leq 1000\text{ km}$
<i>IV</i>	$\pm 1\text{cm}$	$\leq 1000\text{km}$	<i>IX*</i>	$\geq \pm 1\text{cm}$	$\geq 300\text{m}$ και $\leq 1000\text{ km}$
<i>V</i>	$\pm 2-3\text{cm}$	$\leq 1000\text{km}$	<i>X*</i>	$\geq \pm 1\text{cm}$	$\geq 1\text{m}$ και $\leq 1000\text{km}$

(Με το χαρακτήρα (*) επισημαίνονται τα σενάρια που έχουν πρόσθετους περιορισμούς)

Τη δόμηση των σεναρίων ακολουθεί η αξιολόγησή τους με βάση το δημιουργημένο μοντέλο αξιολόγησης. Κάθε σενάριο μελετάται ξεχωριστά και λαμβάνει είτε μία συγκεκριμένη τιμή συντελεστή G_{Total} είτε ένα εύρος τιμών αυτού, στις περιπτώσεις που παρουσιάζονται αοριστίες στην επίδραση των παραμέτρων. Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή G_{Total} ανάλογα με κάθε δημιουργούμενο σενάριο.



Από τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των σεναρίων και της συνολικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε για την υλοποίηση της χρονομετρικής χωροστάθμησης με αξιοποίηση οπτικών ατομικών ρολογιών, δημιουργήθηκαν γενικές οδηγίες εφαρμογής της μεθοδολογίας. Οι δομημένες αυτές οδηγίες περιλαμβάνουν τις κύριες κατευθυντήριες γραμμές και τα ερευνητικά ερωτήματα που οφείλει να απαντήσει ο κάθε μηχανικός προγενέστερα της πρακτικής εφαρμογής, ώστε να έχει μία πρώτη θεωρητική προεκτίμηση της τελικής ακρίβειας προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών.

Τρίτο μέρος

Το τελευταίο μέρος της διατριβής, αποτελείται από ένα κεφάλαιο (6), στο οποίο παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα και οι προτάσεις.

Τελικά αποδεικνύεται ότι η μεθοδολογία της χρονομετρικής χωροστάθμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια της τάξης του $\pm 1\text{cm}$, αρκεί να αξιοποιηθούν οι σύγχρονες διατάξεις οπτικών ατομικών ρολογιών ακριβείας τουλάχιστον της τάξης του 10^{-18} .

Στο **έκτο και τελευταίο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν και γίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω συνέχιση της έρευνας.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE PARAMETERS TO IMPROVE THE ACCURACY OF HEIGHT DIFFERENCES BY USING THE CHRONOMETRING LEVELLING METHODOLOGY

by

Nikolaos I. Kanellopoulos
Dipl. R.S. Eng. NTUA, MSc

The aim of the dissertation is to study, analyze and evaluate the parameters involved in the accuracy of determining height differences by using the methodology of chronometric levelling. This methodology refers to the utilization and adoption of the principles of the general relativity theory in the corresponding theory of classical geodesy.

The study and analysis of the parameters focuses on both the fundamental part of the application of the methodology as well as those referring to the optical atomic clocks that will be used for comments.

The motivation was the combination of two thoughts: the introduction and adoption of the general relativity theory in most disciplines (Physics, Astronomy, Metrology etc.) and the introduction of using an heights' differences determination methodology taking into account the Earth's gravitational field but at the same time it is not affected by the cumulative errors of conventional methods.

The originality of the dissertation lies in:

- The basic principles of the GRT are used in accordance to the classical Geodesy principles. Also, the possibility of determining orthometric height differences is confirmed, based on relativistic Geodesy.
- The analyzed parameters have resulted from the comprehensive study of different scientific areas.
- The utilization of an overall inclusive study of the parameters affecting the final accuracy of height differences, using chronometring levelling.
- The comparison of the parameters by means of their qualitative and quantitative characteristics.

- The development of an evaluation process, for different theoretical scenarios by using an overall rating scale.
- The creation of general guidelines regarding the implementation of the methodology.

The dissertation is developed in three parts, which are divided into chapters.

First part

This part of the dissertation, which consists of three chapters (1st, 2nd and 3rd) focuses on the detailed recording of international bibliography of scientific issues related to it. Specifically, the dissertation is based in the combination of the principles of classical and relativistic geodesy to achieve the best accuracy of height differences determination. Therefore, each chapter of the first part is an in-depth reference to different but related scientific areas.

Also, in sub-chapters 2, 3 the analysis refers to the parameters that affect the final accuracy of time-frequency determination. The parameters are separated into constants or variables, depending on the rate of influence on uncertainty.

The **first chapter** analyzes the elements of the classical geodesy relating to heights' information. A separation between different height categories as well as well as the various reference systems been created for the expression, implementation and quantification of altitude information. In addition, all conventional methodologies are recorded in order to derive the advantages and disadvantages of each one.

Reference is also made to the basic concepts of the gravitational field. The study of height differences in combination with the gravitational field, is the connecting link of the sciences of classical and relativistic geodesy.

However, the most important part of this chapter, is the analysis of all existing and future efforts, regarding the creation of unified height reference systems. Specifically, the different techniques and methods been created to determine the coefficients used to unify systems, are analyzed. Also, the difficulties and limitations created in such experimental processes, and the current efforts to unify the height systems, both globally and nationally, are reported.

The **second chapter** includes detailed analysis of the chronometric levelling methodology. At first the basic concepts of relativistic geodesy are mentioned and more specifically in the field of chronometric geodesy.

Extensive reference is made to the measurement of physical quantities, time and frequency. Also, a distinction between the different time categories, is made. The gravitational redshift effect and its influence to frequency, is examined. The gravitational redshift effect is responsible for the applicability of the methodology and it describes the connection between orthometric heights and gravity potential.

However, the most important part of this chapter is the study, recording and analysis of the parameters that affect the time-frequency accuracy, due to the characteristics of the methodology.

Specifically, the constant parameter "*measurement*" is analyzed, which refers to the choice of time or frequency as observed quantity. Frequency observation is essentially preferred because the process of recording, transferring and comparison is simpler and more convenient.

Respectively, the variable parameter "*communication*" is analyzed, which refers to the choice of medium that will be used to connect the measuring devices and the transmission techniques to be used for comparison. The selection of the appropriate medium and technique category depends on the purpose and specific characteristics of each different study.

The **third chapter** refers to the detailed recording of the characteristics of atomic clocks. Initially a historical review is carried out, regarding the use and development of different time keeping systems. The retrospective is formed by the accuracy of determining the nominal value of time.

The evolution of clocks, starting from mechanical clocks up to the modern atomic clocks that operate in the optical part of the spectrum, is analyzed. For the modern optical atomic clocks, the fundamental principles regarding their operation, are recorded. Also, their stability and accuracy, is examined.

However, the most important part of this chapter is the study, recording and analysis of the parameters that affect the time-frequency accuracy, due to the implementation of optical atomic clocks.

Specifically, the variable parameter "*category and type*" is analyzed, which refers to the main categorization of clocks based on the type of atom or ion to be used. Each of the different categories is also characterized by different compliance in terms of the clock accuracy. The choice is based on existing infrastructure as well as the possibility of modeling and eliminating of systematic sources of errors, which have different effect depending on the choice of the optical atomic clock.

Respectively the constant parameter "*transportation*" is analyzed, which refers to the possibility of transporting the optical atomic clocks. The main categorization of the parameter concerns on the one hand the static or permanent and on the other hand the transportable optical atomic clocks. Each of the categories is characterized by a different complexity of use and construction of optical atomic clocks. Also, as the dimensions of the optical atomic clocks decrease and their transportation becomes easier, their dynamic data collection capabilities are highlighted. All the different categories have to perform measurements with the same accuracy therefore the final choice is determined by purpose, cost and technical development.

The variable parameter "*construction*" is also analyzed, which refers to the additional construction features either to the internal or external structure of the optical atomic clocks. The main categorization of the parameter concerns, on the one hand the intervention in the internal structure of the optical atomic clocks, and on the other hand in their external structure. All the different categories have to contribute more or less in enhancing the stability and accuracy of optical atomic clocks, therefore the final choice is determined by the purpose and characteristics of each study.

Second part

This part of the dissertation consists of two chapters (4th and 5th). The parameters' contribution is analyzed and documented, regarding the final height difference determination accuracy by using the method of chronometric levelling, when it is performed with modern optical atomic clocks.

In the **fourth chapter**, the stages of application of the methodology when utilized optical atomic clocks, are indicated. Then an overall study of all parameters, is performed. The aim is to obtain a classification of the parameters, based on their influence on the application of the

methodology. This influence is composed and analyzed on the basis of two components. These components relate to the qualitative or quantitative influence of each parameter.

Qualitative segregation concerns the general comparative classification of the parameters. The purpose of the general ranking is to analyze which criteria influence the practicality and the possibility of proper implementation of the methodology. The basic criteria are six (6), as following:

- Cost
- Technical infrastructure and equipment
- Complexity
- Commercial potential
- Mathematical and statistical analysis
- Cross-influence between parameters

The general classification is obtained through multi-criteria analysis of the parameters. Each parameter is given a weight factor fluctuating from 1 to 3, for each criterion. The higher the ranking the higher the contribution of the parameter to the practical application of the methodology.

General Comparative Classification

<i>Ranking number</i>	<i>Parameter</i>	<i>Sum of criteria</i>
1	Transportation	13
2	Communication	12
3	Construction	11
4	Category and type	9
5	Measurement	6

Respectively, the quantitative separation concerns the special comparative classification of parameters. The purpose is to use the special classification as an aid for the grading of each parameter in order to form a state of the theoretical contribution of each parameter to the final desired accuracy of the observations.

To extend the quantitative process classification of parameters for any application, a parameter evaluation model was created. Specifically, a model was defined through a grades' scale, which expresses the gradation of the effect of each parameter. The scale of degrees was set from 1 to 5,

for each parameter. By minimum grade of scale (1), referring to the minimum contribution of the parameter to the final uncertainty. With the maximum degree of scale (5) evaluates the maximum effect of each parameter in the final accuracy of the observations.

Special Comparative Classification

<i>Ranking number</i>	<i>Parameter</i>	<i>Number of Available Options</i>
1	Category and type	>20
2	Communication	12
3	Construction	8-10
4	Transportation	4-6
5	Measurement	2

Grades are determined by the alternatives choices that can be made at the parameter study level, and correspond to the categories and sub-categories created by them. To display the results of the overall study of the parameters a linear contribution equation was created, based on the calculation of the G_{Total} factor. This factor is the sum of the grades' points of each parameter.

G_{Total} values range from 5 to 22. The optimum value of the factor is set to the lowest number of points and reflects the ideal conditions and options for the application of the methodology using optical atomic clocks.

In the **fifth chapter**, a theoretical measurements' simulation is performed. Specifically, different application scenarios of the methodology, are formed. These scenarios (10) cover a wide range of possible practical applications that the methodology can be used for the determination of orthometric height differences.

The scenarios are structured to fulfill the range of complexity and combinatorial analysis that must be carried out for their evaluation. In simple cases of scenarios, the parameter choices are less complex and indefinite, while in the most complex cases the options are more combined and binding. Also, the scenarios are formed mainly with constraints that relate to the accuracy of determining height differences and to the distance between optical atomic clock systems. At cases of more complex scenarios, additional restrictions on their application, are applied.

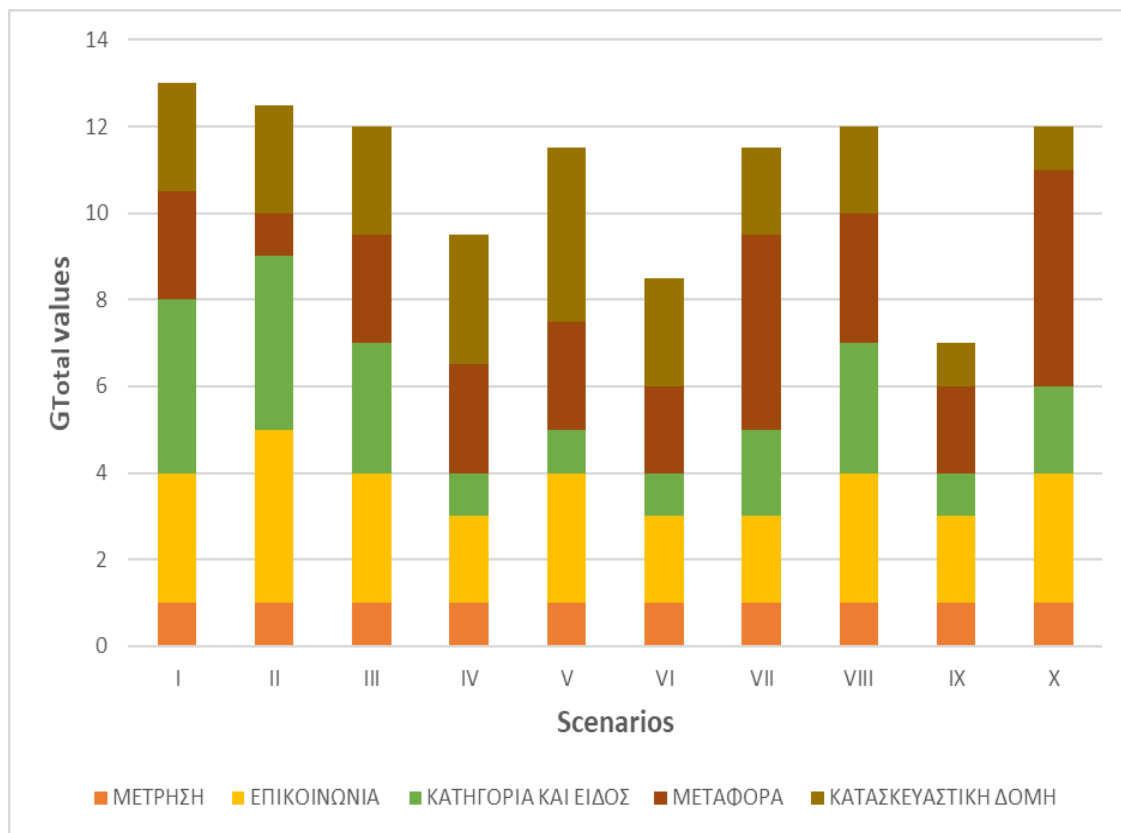
The summary of the scenarios is as follows:

<i>a/α</i>	ACCURACY	DISTANCE	<i>a/α</i>	ACCURACY	DISTANCE
<i>I</i>	±1cm	≤100km	<i>VI</i>	±1cm	>1000 km
<i>II</i>	±2-3cm	≤10km	<i>VII*</i>	±1cm	>>100m and ≤10 km
<i>III</i>	±1cm	≤500km	<i>VIII*</i>	≥±1cm	≥300m and ≤1000 km
<i>IV</i>	±1cm	≤1000km	<i>IX*</i>	≥±1cm	≥300m and ≤1000 km
<i>V</i>	±2-3cm	≤1000km	<i>X*</i>	≥±1cm	≥1m and ≤1000km

((*) Indicates scenarios that have add-ons restrictions)

The formation of the scenarios is followed by their evaluation based on the created evaluation model. Each scenario is studied separately and receives either a specific G_{Total} value or a range of its values, in the cases presented vagueness in the effect of the parameters.

The following diagram shows the change of the G_{Total} factor according to any scenario created.



Finally, general instructions (guidelines) for the implementation of chronometric levelling with utilization of optical atomic clocks, are

created. These structured instructions include the main guidelines and research questions each engineer opts to answer prior to the practical application, to have a first theoretical estimate of the final accuracy determination of height differences.

Third part

The last part of the dissertation consists of one chapter (6), which presents the overall conclusions and suggestions. Eventually it turns out that the methodology of chronometric levelling can be used for measurement of height differences with an accuracy of $\pm 1\text{cm}$, as long as modern devices, optical atomic clocks of accuracy of at least 10^{-18} , are used.

The **sixth and last chapter** summarizes the conclusions which have emerged and some suggestions are made for further investigation.

«This research is co-financed by Greece and the European Union (European Social Fund- ESF) through the Operational Programme «Human Resources Development, Education and Lifelong Learning» in the context of the project “Strengthening Human Resources Research Potential via Doctorate Research – 2nd cycle” (MIS-5000432), implemented by the State Scholarships Foundation (IKY)»



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο στόχος της κλασικής γεωδαισίας είναι η μέτρηση και αναπαράσταση της γεωμετρίας και του πεδίου βαρύτητάς της Γης. Όσο αφορά στη γεωμετρία, ο προσδιορισμός των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων (x,y) με μεγάλη ακρίβεια σε οποιοδήποτε σημείο της φυσικής γήινης επιφάνειας και σε κάθε σύστημα αναφοράς, είναι πλέον εφικτός με την αξιοποίηση ενός συνδυασμού τεχνικών μέτρησης και με τη χρήση δορυφορικών δεκτών GNSS. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται ενοποιημένα συστήματα αναφοράς (εθνικά, ηπειρωτικά, διεθνή), όπου ο κάθε χρήστης μπορεί οποιαδήποτε στιγμή να γνωρίζει, με μια δεδομένη ακρίβεια, την οριζοντιογραφική του θέση.

Η συνθήκη αυτή δεν ικανοποιείται πλήρως όσο αφορά στον προσδιορισμό των υψομέτρων. Αν και τα γεωμετρικά υψόμετρα δημιουργήθηκαν με σκοπό να επιλύσουν αυτό το πρόβλημα, δεν έχουν άμεση φυσική σημασία και ερμηνεία, επομένως η μελέτη των ορθομετρικών υψομέτρων κρίνεται αναγκαία. Κάθε κράτος δημιουργεί δικό του σύστημα υψομέτρων, χωρίς να υπάρχει μία ενιαία αρχή και διαδικασία μέτρησης ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο μελέτης. Επιπρόσθετα, οι αδυναμίες των δορυφορικών συστημάτων όσο αφορά στον προσδιορισμό ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών είναι γνωστές και αναφέρονται στην αναγκαιότητα ύπαρξης ενός λεπτομερούς μοντέλου γεωειδούς, με σκοπό την αναγωγή του γεωμετρικού υψομέτρου στο αντίστοιχο ορθομετρικό. Επομένως δημιουργείται η ανάγκη για τη γνώση σε κάθε στιγμή και σε οποιοδήποτε σημείο της αποχής του γεωειδούς.

Οι σύγχρονες εξελίξεις στον τομέα της υψομετρικής πληροφορίας αναφέρονται στην ενοποίηση τόσο των χωρικών όσο και των χρονικών δεδομένων. Για να πραγματοποιηθεί αυτό δημιουργείται η προϋπόθεση ύπαρξης ενός διεθνούς συστήματος αναφοράς με κοινή αρχή μετρήσεων και μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας που θα είναι επαρκής και αξιόπιστη, με σκοπό την παροχή δεδομένων που θα αναφέρονται σε διεθνές επίπεδο και θα έχουν προκύψει με τον ίδιο τρόπο σε όλο τον κόσμο.

Τόσο ο τομέας της κβαντικής μετρολογίας όσο και οι σύγχρονες μέθοδοι της χρονομετρικής γεωδαισίας (chronometric geodesy),

αποτελούν τμήματα της επιστήμης της σχετικιστικής γεωδαισίας. Η σχετικιστική γεωδαισία (relativistic geodesy) αποτελεί ένα αναδυόμενο πεδίο που αναδεικνύει τη χρήση των αρχών της γενικής θεωρίας της σχετικότητας στην αντίστοιχη κλασσική γεωδαιτική θεωρία.

Η γεωδαιτική γνώση των υψομέτρων και του πεδίου βαρύτητας της Γης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη αλλαγών συχνότητας μεταξύ τοπικών και απομακρυσμένων ρολογιών, και αντίστροφα τα πρότυπα συχνότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των δυναμικών διαφορών βαρύτητας. Ο όρος για την μεθοδολογία που ασχολείται με τους προσδιορισμούς αυτούς είναι η χρονομετρική χωροστάθμιση (chronometric levelling).

Σε συνδυασμό με τη μεθοδολογία, η πρόσφατη πρόοδος στα οπτικά ατομικά ρολόγια (optical atomic clocks) και στη μεταφορά μετρήσεων συχνότητας σε μεγάλες αποστάσεις, προσφέρει την δυνατότητα απομακρυσμένης σύγκρισης των συχνοτήτων που παράγονται από διακριβωμένα ρολόγια υψηλής ακρίβειας. Οι συγκρίσεις αυτές επιτρέπουν έναν σχετικιστικό προσδιορισμό των διαφορών δυναμικού βαρύτητας (gravitational potential) και των υψομετρικών διαφορών μεταξύ μόνιμων σταθμών αναφοράς (permanent stations) ή μεταφερόμενων διατάξεων στην επιφάνεια της Γης.

Συνοψίζοντας οι πρωτοτυπίες της παρούσας διδακτορικής έρευνας αφορούν στα ακόλουθα:

- **Χρησιμοποιούνται οι βασικές αρχές της γενικής θεωρίας της σχετικότητας στην επιστήμη της κλασσικής Γεωδαισίας και επιβεβαιώνεται η δυνατότητα προσδιορισμού ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών με βάση τη σχετικιστική Γεωδαισία.**
Το φαινόμενο της βαρυτικής φασματικής μετατόπισης (gravitational redshift effect) αξιοποιείται πλήρως για την αμφίδρομη σχέση μεταξύ της παρατηρούμενης διαφοράς συχνότητας, της διαφοράς δυναμικού και της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των διαφορετικών χωρικών θέσεων μελέτης.
- **Αναλύονται και δομούνται παράμετροι με στοιχεία που αφορούν σε διαφορετικές επιστημονικές περιοχές.** Οι παράμετροι που αφορούν στην διατριβή έχουν προκύψει από τη μελέτη χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων που άπτονται των επιστημών της φυσικής, της μεταφοράς-

μετάδοσης σήματος, της ψηφιακής σύνθεσης και αναπαραγωγής σήματος, της χρονικής και κατασκευαστικής μετρολογίας κ.ά.

- **Πραγματοποιείται συνολική μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την τελική ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών με χρήση της χρονομετρικής χωροστάθμησης.** Οι παράμετροι που αφορούν στη θεωρητική ανάλυση της διατριβής, προέκυψαν αρχικά από τη ξεχωριστή μελέτη των στοιχείων της μεθοδολογίας και των στοιχείων των οπτικών ατομικών ρολογιών. Στη συνέχεια για να πραγματοποιηθεί η ενιαία μελέτη σχετικά με την επιρροή όλων των παραμέτρων στην τελική ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών μελετήθηκαν συνολικά όλες μαζί. Με αυτό το τρόπο προέκυψαν οι περιορισμοί που δημιουργούν οι επιλογές μίας παραμέτρου στις αντίστοιχες επιλογές μίας άλλης.
- **Συγκρίνονται οι παράμετροι μεταξύ τους και κατατάσσονται σύμφωνα με τα ποιοτικά και τα ποσοτικά τους χαρακτηριστικά.** Εκτός από το βασικό χαρακτηρισμό των παραμέτρων ως σταθερές ή μεταβλητές, πραγματοποιείται γενική και ειδική συγκριτική κατάταξη αυτών. Σκοπός είναι να αξιολογηθεί η συνεισφορά των παραμέτρων τόσο στη τυπική πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας (ποιοτικός διαχωρισμός) όσο και στην συνολική επιβάρυνση της ακρίβειας προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών (ποσοτικός διαχωρισμός).
- **Αναπτύσσεται μία ολοκληρωμένη διαδικασία αξιολόγησης διαφορετικών θεωρητικών σεναρίων χρησιμοποιώντας μία ενιαία κλίμακα βαθμολόγησης.** Μέσω της ειδικής συγκριτικής κατάταξης και της ενιαίας βαθμολόγησης των διαφορετικών κατηγοριών κάθε παραμέτρου προκύπτει αναλυτική αξιολόγηση μέσω της δημιουργούμενης γραμμικής εξίσωσης και του συντελεστή G_{Total} .
- **Συντάσσονται γενικές οδηγίες εφαρμογής (guidelines) της μεθοδολογίας.** Η μελέτη και ανάλυση ικανού πλήθους αντιπροσωπευτικών περιπτώσεων θεωρητικής πειραματικής προσομοίωσης των παρατηρήσεων (σεναρίων) επιτρέπει τη δημιουργία τυπικών οδηγιών και κατευθυντήριων γραμμών εφαρμογής της χρονομετρικής χωροστάθμησης με χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών.

ΜΕΡΟΣ Α

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΒΑΡΥΤΗΤΑ

1.1 Γενικά

Ο στόχος της κλασικής γεωδαισίας είναι η μέτρηση και αναπαράσταση της γεωμετρίας και του πεδίου βαρύτητας της Γης. Όσον αφορά στη γεωμετρία, ο προσδιορισμός των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων (x,y) με μεγάλη ακρίβεια σε οποιοδήποτε σημείο της φυσικής γήινης επιφάνειας και σε κάθε σύστημα αναφοράς, είναι πλέον εφικτός με την αξιοποίηση ενός συνδυασμού τεχνικών μέτρησης και με τη χρήση δεκτών GNSS. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται ενοποιημένα συστήματα αναφοράς (εθνικά, ηπειρωτικά, διεθνή), όπου ο κάθε χρήστης μπορεί οποιαδήποτε στιγμή να γνωρίζει, με μια συγκεκριμένη ακρίβεια, την οριζοντιογραφική του θέση. [Wieser κ.α., 2005]

Η συνθήκη αυτή δεν ικανοποιείται όσο αφορά στον προσδιορισμό των υψομέτρων. Κάθε κράτος δημιουργεί δικό του σύστημα υψομέτρων, χωρίς να ορίζεται μία ενιαία αρχή και αντίστοιχη διαδικασία μέτρησης υψομετρικών διαφορών, τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο μελέτης [Ihde κ.α.,2017]. Υπενθυμίζεται ότι η υψομετρική πληροφορία είναι απαραίτητη για τη λεπτομερή απεικόνιση και περιγραφή της συνέχειας του αναγλύφου της φυσικής γήινης επιφάνειας.

Η γνώση με ακρίβεια του υψομέτρου, του αναγλύφου και των επιμέρους κλίσεων της επιφάνειας της Γης είναι άκρως σημαντική διότι η υψομετρική πληροφορία συνοδεύει πάντοτε τη μελέτη, επίβλεψη, κατασκευή και παρακολούθηση της συμπεριφοράς τόσο των φυσικών όσο και των τεχνητών κατασκευών και σχηματισμών.

1.2 Συστήματα και είδη υψομέτρων

Ένα σύστημα υψομέτρων είναι ένα μονοδιάστατο σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη μετρική απόσταση (ύψος) ενός σημείου από κάποια συγκεκριμένη επιφάνεια αναφοράς. Ενώ ο καθορισμός του υψομέτρου ενός σημείου είναι φαινομενικά απλός, το ύψος ενός σημείου μπορεί να καθοριστεί με σημαντικά διαφορετικούς

τρόπους, κάθε ένας από τους οποίους δίνει μια διαφορετική συντεταγμένη ύψους για το ίδιο σημείο.

Στη γεωδαιτική δυναμική θεωρία της υψομετρίας τα συστήματα υψομέτρων κατατάσσονται κυρίως σε δύο κατηγορίες. [Featherstone κ.α., 2010]

Σύμφωνα με το γεωμετρικό μοντέλο υπάρχουν συστήματα υψομέτρων που αγνοούν το πεδίο βαρύτητας της Γης και την επίδρασή του στα καθορισμένα υψόμετρα και χρησιμοποιούν ευθείες γεωμετρικές πορείες για τον καθορισμό της απόστασης του εκάστοτε σημείου ενδιαφέροντος από την επιφάνεια αναφοράς.

Σύμφωνα με το δυναμικό μοντέλο, υπάρχουν εκείνα που συνδέουν τον ορισμό των υψομέτρων με τις ισοδυναμικές επιφάνειες του γήινου πεδίου βαρύτητας και τη διεύθυνση της κατακόρυφου στα διάφορα σημεία της γήινης επιφάνειας και συνεπώς χρησιμοποιούν κυρτές πορείες για τον καθορισμό της απόστασης του εκάστοτε σημείου από την επιφάνεια αναφοράς. Οι υψομετρικές διαφορές που συνδέονται με τις ισοδυναμικές επιφάνειες του γήινου πεδίου βαρύτητας έχουν πρακτικότερη χρήση και φυσική σημασία-ερμηνεία. [Tenzer, κ.α., 2005] [Δεληκαράογλου, 2007]

Για να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός της υψομετρικής πληροφορίας θα πρέπει να καθοριστούν παράγοντες που αναφέρονται στην ποσότητα που εκφράζουν τα υψόμετρα που χρησιμοποιούνται, καθώς επίσης και σε ποιο σύστημα υψομέτρων αναφέρονται. Ουσιαστικά είναι αναγκαίο να ορισθούν η επιφάνεια αναφοράς και η διεύθυνση στην οποία προσδιορίζονται τα υψόμετρα. [Sanso., κ.α., 2019]

Τα κύρια είδη υψομέτρων που συναντώνται στη γεωδαισία είναι τα ορθομετρικά και τα γεωμετρικά υψόμετρα. Πιο συγκεκριμένα, τα ορθομετρικά υψόμετρα μετρούνται κατά μήκος της κατακόρυφου, θεωρώντας ως επιφάνεια αναφοράς το γεωειδές. Αντίστοιχα τα γεωμετρικά υψόμετρα μετρούνται κατά μήκος της καθέτου στο ελλειψοειδές και ως επιφάνεια αναφοράς θεωρούν το γεωκεντρικό ελλειψοειδές. [Vanicek, κ.α., 1986] [Λάμπρου., Πανταζής, 2010]

Άλλες κατηγορίες υψομέτρων περιλαμβάνουν: τα απόλυτα υψόμετρα (αναφέρονται στην υψομετρική επιφάνεια αναφοράς που είναι επίσημα καθιερωμένη από Εθνικούς ή Διεθνείς Οργανισμούς), τα σχετικά υψόμετρα (αναφέρονται σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς, το

οποίο ορίζεται αυθαίρετα, και οι επιμέρους υψομετρικές διαφορές προσδιορίζονται από συμβατικές μεθόδους υψομετρίας, με μέτρηση της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ γειτονικών σημείων) καθώς και τα υψόμετρα που βασίζονται σε γεωδυναμικούς αριθμούς (δυναμικά, κανονικά και υψόμετρα Helmert). Στην περίπτωση των συμβατικών μεθόδων, επιφάνεια αναφοράς είναι ο τοπικός ορίζοντας που καθορίζεται από την οριζοντίωση του χωροβάτη. [Yilmaz, 2012]

1.3 Επιφάνειες αναφοράς υψομέτρων

Η Φυσική Γήινη Επιφάνεια (Φ.Γ.Ε) είναι το όριο της συμπαγούς Γης και της υδάτινης επιφάνειας της με την ατμόσφαιρα. Πρόκειται για μία πολύ ανώμαλη φυσική επιφάνεια, όπου για να περιγραφεί χρειάζεται αρκετά πολύπλοκες συναρτήσεις με πολλούς όρους και συντελεστές που προκύπτουν από διάφορες παρατηρήσεις. Για αυτό το λόγο στις περισσότερες εφαρμογές επιλέγεται ένα «μοντέλο» που χρησιμεύει ως μια βοηθητική επιφάνεια αναφοράς αντικαθιστώντας την πραγματική Γη. Όμως, το «μοντέλο» αυτό πρέπει να έχει γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες ίδιες με την πραγματική Γη, πλησιάζοντάς την κατά το δυνατόν περισσότερο, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να περιγράφεται από σχετικά απλές μαθηματικές εκφράσεις για να γίνεται εύκολη η χρήση του. [Λάμπρου., Πανταζής, 2010],[Lu, κ.α, 2014]

Για πολύ μικρές εκτάσεις ή απλές εφαρμογές τοπογραφίας, δεν είναι σημαντική η επίδραση της καμπυλότητας της Γης και οι κατακόρυφοι στην περιοχή αυτή μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επιφάνεια αναφοράς ένα οριζόντιο επίπεδο. Το επίπεδο αυτό εφάπτεται σε συγκεκριμένο σημείο της Φ.Γ.Ε και πάνω του προβάλλονται τα σημεία που την ορίζουν. [Tapley, κ.α, 2001],[Βέης Γ., κ.α, 2007]

Εάν η έκταση είναι αρκετά μεγάλη, οπότε η καμπυλότητα της Γης είναι σημαντική, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μοντέλο, η επιφάνεια μίας σφαίρας ακτίνας περίπου 6371km. Λόγω όμως της περιστροφής της γύρω από τον άξονα της, μια τρίτη πιο ακριβής προσέγγιση θεωρείται αυτή του πεπλατυσμένου στους πόλους ελλειψοειδούς εκ περιστροφής.

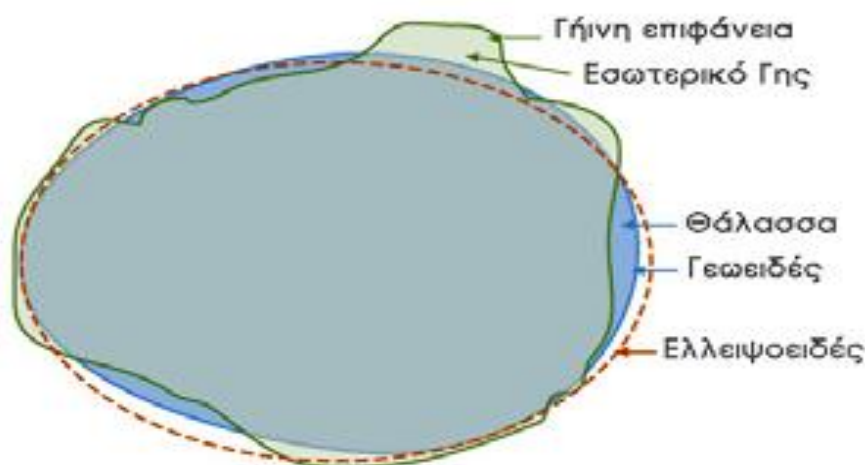
Για να τελειοποιηθεί το μοντέλο, έτσι ώστε να περιλαμβάνει τις δυναμικές ιδιότητες της Γης αλλά πολύ λιγότερες επιφανειακές ανωμαλίες, θα πρέπει η περιβάλλουσα επιφάνεια του «μοντέλου» να είναι

μια ισοδυναμική (χωροσταθμική) επιφάνεια του πεδίου βαρύτητας της Γης.

Το γεωειδές είναι αυτή η ισοδυναμική επιφάνεια έλξης και περιστροφής της Γης, που πλησιάζει περισσότερο τη φυσική πραγματικότητα. Η επιφάνεια αυτή είναι εξ ορισμού κάθετη προς την διεύθυνση της κατακόρυφου (διεύθυνση του διανύσματος της βαρύτητας), προσεγγίζοντας περισσότερο τη μέση στάθμη της θάλασσας (μ.σ.θ.) με ακρίβεια, διορθωμένη από τις επιδράσεις των μεταβολών της πυκνότητας του νερού, των κυμάτων, των παλιρροιών, των ρευμάτων και των ατμοσφαιρικών συνθηκών. [Heiskanen., κ.α., 1967]

Στη γεωδαισία τα όργανα μέτρησης πραγματοποιούν ορθές παρατηρήσεις όταν ικανοποιούνται όλες οι γεωμετρικές συνθήκες των αξόνων τους. Μέσω της διαδικασίας της οριζοντίωσης (πρωτεύοντας άξονας οργάνου παράλληλος με την κατακόρυφο), επιτυγχάνεται τα όργανα να αναφέρονται στην επιφάνεια του γεωειδούς. Επειδή όμως το γεωειδές είναι μία σύνθετη επιφάνεια, είναι δύσκολο να χρησιμοποιείται ως γενική επιφάνεια αναφοράς και ουσιαστικά χρησιμοποιείται ως επιφάνεια αναφοράς μόνο των υψομέτρων. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα στους συνήθεις γεωδαιτικούς υπολογισμούς να χρησιμοποιείται ως επιφάνεια αναφοράς ένα απλούστερο μοντέλο, αυτό ενός διαξονικού ελλειψοειδούς, που προκύπτει με περιστροφή της έλλειψης γύρω από τον μικρό της ημιάξονα. [Hoffman – Wellenhof., κ.α., 2006]

Η χωρική σχέση μεταξύ των διαφορετικών επιφανειών που αξιοποιούνται στις γεωδαιτικές εφαρμογές απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Το γεωειδές και το ελλειψοειδές εκ περιστροφής ως προσεγγίσεις της Γης

Το μαθηματικό μοντέλο του ελλειψοειδούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της μορφής του γεωειδούς. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με τον υπολογισμό των υψομέτρων του γεωειδούς ή αλλιώς των αποχών του γεωειδούς. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των αποχών του γεωειδούς ως προς το ελλειψοειδές. Όμως η χρήση ενός παγκόσμιου γήινου ελλειψοειδούς έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν περιοχές της Γης στις οποίες να μην υπάρχει επαρκής συμβατότητα και άρα να παρουσιάζονται μεγάλες αποχές. Το γεγονός αυτό προκαλείται από την ανώμαλη κατανομή των μαζών, με διαφορετικές πυκνότητες στο στερεό φλοιό της Γης. Αυτό οδήγησε, διαχρονικά, στη χρήση ενός μεγάλου αριθμού ελλειψοειδών με τελικό σκοπό την ελαχιστοποίηση των αποχών τους από το γεωειδές. [Βέης Γ., κ.α., 2007]

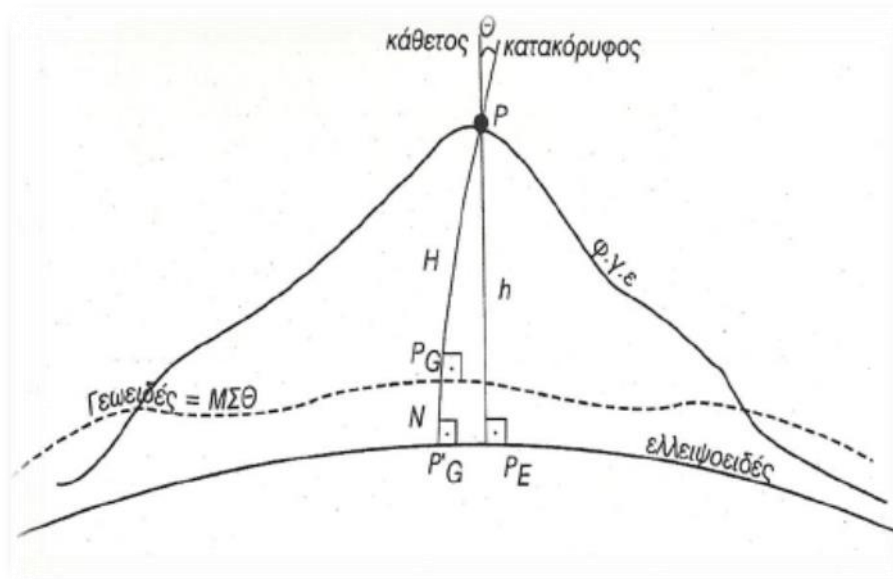
1.3.1 Η αποχή του Γεωειδούς

Ως υψόμετρο ορίζεται η απόσταση ενός σημείου από κάποια επιφάνεια αναφοράς και αποτελεί την τρίτη διάσταση για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου πάνω στην Φ.Γ.Ε.

Η πιο συνηθισμένη ισοδυναμική επιφάνεια αναφοράς, με μηδενικό υψόμετρο, θεωρείται η μέση στάθμη της θάλασσας (μ.σ.θ.) η οποία πλησιάζει περισσότερο την μορφή του γεωειδούς.

Κάθε σημείο P της Φ.Γ.Ε. αντιστοιχεί αμφιμονοσήμαντα σε ένα σημείο του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής P_E , που υλοποιείται με το ίχνος της καθέτου στο ελλειψοειδές που περνά από το σημείο P (ορισμός κατά Helmert) και η απόσταση P_E-P ονομάζεται γεωμετρικό υψόμετρο h (σχήμα 1.2). Αντίστοιχα ορίζεται ως ορθομετρικό υψόμετρο H η απόσταση P_G-P , όπου P_G το σημείο που υλοποιείται με το ίχνος της κατακόρυφου στο γεωειδές που περνά από το σημείο P.

Ως υψόμετρο N του γεωειδούς, ορίζεται η απόσταση που δίνει τη διαφορά αυτής της θέσης γεωειδούς-ελλειψοειδούς σε κάθε σημείο της Φ.Γ.Ε. Οι τιμές που μπορεί να πάρει σε όλη τη Γη είναι από -100m στον Ινδικό ωκεανό έως +80m στον βόρειο Ατλαντικό ωκεανό. [Ricard., κ.α., 1984],[Αλεβιζάκου., κ.α., 2010]



Σχήμα 1.2 Σχετική θέση επιφανειών αναφοράς και υψομέτρων

Συνεπώς η σχέση που συνδέει τα υψόμετρα, δεδομένου ότι η γωνία που σχηματίζει η κάθετος στο ελλειψοειδές αναφοράς και η κατακόρυφος στο σημείο είναι πολύ μικρή, είναι:

$$h=H+N \quad (1.1)$$

Η παραπάνω σχέση είναι πολύ σημαντική καθώς συνδέει τρεις επιφάνειες αναφοράς τη Φ.Υ.ε., το ελλειψοειδές και το γεωειδές.

1.4 Συμβατικές μέθοδοι προσδιορισμού γεωειδούς

Η γνώση της αποχής του γεωειδούς N , και συνεπώς του ίδιου του γεωειδούς, είναι πολύ σημαντική για τη μετατροπή των γεωμετρικών υψομέτρων (τα οποία προσδιορίζονται κυρίως με δορυφορικές μετρήσεις GNSS) σε ορθομετρικά υψόμετρα (τα οποία έχουν φυσική σημασία).

Οι μέθοδοι προσδιορισμού του γεωειδούς μπορούν να ταξινομηθούν με βάση δύο κύρια χαρακτηριστικά. Από τη μια, κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το είδος των παρατηρήσεων που συμμετέχουν στη λύση και από την άλλη κατηγοριοποιούνται σε ολοκληρωματικές ή στοχαστικές μεθόδους, ανάλογα με τη μεθοδολογία επίλυσης.

Πιο συγκεκριμένα, ολοκληρωματικές μέθοδοι (integral methods), χαρακτηρίζονται όσες χρησιμοποιούν ολοκληρωματικούς τύπους που είναι άμεσα συνδεδεμένοι με την επίλυση κάποιου από τα Γεωδαιτικά

Προβλήματα Συνοριακών Τιμών (ΓΠΣΤ) χρησιμοποιώντας διαφόρους τύπους παρατηρήσεων (Δg , ξ , η , N , T , κ.ά.) του πεδίου βαρύτητας, οι οποίες κατά κανόνα διεξάγονται στη φυσική γήινη επιφάνεια.

Οι ολοκληρωματικές μέθοδοι μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω σε τεχνικές που χρησιμοποιούν κλασσικές ή τροποποιημένες διαδικασίες αριθμητικής ολοκλήρωσης, και σε φασματικές τεχνικές ολοκλήρωσης (spectral techniques) και υπολογισμού των συγκεκριμένων ολοκληρωματικών τύπων. Το πλεονέκτημα των φασματικών μεθόδων είναι ότι επιτρέπουν τη δυνατότητα ταχύτερου υπολογισμού των παραμέτρων του πεδίου βαρύτητας χρησιμοποιώντας κατάλληλους μετασχηματισμούς με τους οποίους οι σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων του πεδίου βαρύτητας, που τυπικά εξαρτώνται από την απόσταση, μετασχηματίζονται από συναρτήσεις του τρισδιάστατου πεδίου του χώρου (spatial domain) σε συναρτήσεις στο χώρο των φασματικών συχνοτήτων (spectral ή frequency domain).

Αντίστοιχα, στοχαστικές μέθοδοι (stochastic methods) χαρακτηρίζονται όσες βασίζονται στις διάφορες μαθηματικές προσεγγίσεις του διαταρακτικού δυναμικού και σε διαδικασίες παρεμβολής και πρόγνωσης των παραμέτρων του πεδίου βαρύτητας που σχετίζονται με αυτό, βάσει ειδικών εμπειρικών συναρτήσεων συμμεταβλητότητας που υπολογίζονται μέσω δειγματοληψίας των τιμών των παρατηρήσεων του πεδίου βαρύτητας. Τυπικό παράδειγμα στοχαστικής μεθόδου αποτελεί η λεγόμενη μέθοδος της σημειακής προσαρμογής (collocation). [Κατσάμπαλος, κ.α., 1991]

Οι βασικότερες κατηγορίες μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό του γεωειδούς, διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος των χρησιμοποιούμενων δεδομένων, και είναι τρείς:

- Πρώτη κατηγορία είναι αυτή που βασίζεται σε αστρογεωδαιτικά δεδομένα (αστρονομική/αστροβαρυτημετρική χωροστάθμηση), εφόσον είναι γνωστές οι συνιστώσες της απόκλισης της κατακορύφου (ξ) και (η) ενός σημείου της Φ.Γ.Ε. από αστρονομικές παρατηρήσεις, και εφόσον υπάρχουν για μεγάλες αποστάσεις στοιχεία από αστρονομικές παρατηρήσεις και συμπληρωματικά μετρήσεις ανωμαλιών βαρύτητας (Δg), αντίστοιχα.
- Η δεύτερη κατηγορία βασίζεται ολοκληρωτικά σε βαρυτημετρικά δεδομένα, τα οποία περιλαμβάνουν εκτός από τυπικές μετρήσεις

βαρύτητας, σύνθετα γεωδυναμικά μοντέλα καθώς επίσης και μοντέλα εδάφους και επιφανειών.

- Η τρίτη κατηγορία αφορά στην αξιοποίηση δεδομένων δορυφορικής αλτιμετρίας που αποσκοπούν στον ακριβή προσδιορισμό της Μ.Σ.Θ

[Λάμπρου Ε., 2003]

Χρησιμοποιώντας τέτοια στοιχεία έχουν δημιουργηθεί μοντέλα γεωειδούς για όλη τη Γη καθώς και παγκόσμια γεωδυναμικά μοντέλα. Οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να συνδυαστούν για να οδηγήσουν σε πιο ακριβή αποτελέσματα. Ωστόσο σε κάθε περίπτωση η αβεβαιότητα προσδιορισμού του γεωειδούς επηρεάζεται κυρίως από την ποιότητα των δεδομένων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην επίλυση καθώς επίσης και από τον τρόπο με τον οποίον τα δεδομένα αυτά θα συνδυαστούν.

Όμως η πιο σύγχρονη και συνηθέστερη διαδικασία έμμεσου προσδιορισμού ενός τοπικού γεωειδούς μιας περιορισμένης χωρικά περιοχής μελέτης γίνεται με τη χρήση γεωμετρικών υψομέτρων που έχουν προκύψει από την εφαρμογή μετρήσεων με δέκτες δορυφορικού εντοπισμού GNSS και το συνδυασμό τους με τα αντίστοιχα ορθομετρικά. [Khazraei., κ.α., 2017]

Σε αυτή την περίπτωση βέβαια, πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι σημαντικοί παράγοντες που αναφέρονται στο ανάγλυφο και στην έκταση της περιοχής μελέτης. Στη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιούνται τα γεωμετρικά υψόμετρα, τα οποία προσδιορίζονται με παρατηρήσεις GNSS, με σκοπό να μελετηθεί τοπικά η κλίση του γεωειδούς θεωρώντας το είτε ως επίπεδο είτε ως επιφάνεια 2ου βαθμού. [Georgopoulos., κ.α., 2014]

1.5 Προσδιορισμός ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τα ορθομετρικά υψόμετρα μπορούν να υπολογιστούν έμμεσα από τη σχέση που τα συνδέει με τις αντίστοιχες τιμές των γεωμετρικών υψομέτρων και των τιμών της αποχής του γεωειδούς. [Soycan., 2006]

Ωστόσο υπάρχουν και οι συμβατικές μεθοδολογίες προσδιορισμού ορθομετρικών υψομέτρων με μεγάλη ακρίβεια. Όλες οι μεθοδολογίες βασίζονται στη χρήση κατάλληλου γεωδαιτικού εξοπλισμού. Για τον προσδιορισμό του υψομέτρου ενός σημείου είναι απαραίτητη η γνώση

του υψομέτρου ενός σταθερού σημείου στην περιοχή των μετρήσεων και ο προσδιορισμός της μεταξύ τους υψομετρικής διαφοράς.

Πιο συγκεκριμένα, οι πιο διαδεδομένες μεθοδολογίες προσδιορισμού ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών ΔH μεταξύ σημείων της Φ.Γ.Ε και οι αντίστοιχες κύριες πηγές σφαλμάτων σε αυτές, είναι: [Λάμπρου., Πανταζής, 2010]

- Η *Γεωμετρική χωροστάθμιση*. Είναι άμεση μέθοδος προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, ο οποίος γίνεται χρησιμοποιώντας χωροβάτη και σταδίες, με αβεβαιότητα που κυμαίνεται από $\pm 0.2\text{mm/km}$ έως $\pm 1\text{cm/km}$. Τα σφάλματα ενδέχεται να οφείλονται στο χωροβάτη, στις σταδίες, στις συνθήκες της ατμόσφαιρας και στον παρατηρητή.

Τα σφάλματα που οφείλονται στο χωροβάτη αφορούν:

- Στη μη πλήρωση των συνθηκών ορθής λειτουργίας του
- Στη μη οριζοντίωση του σκοπευτικού του άξονα
- Στη μη τοποθέτησης της σφαιρικής αεροστάθμης στο κανονικό της σημείο

Τα σφάλματα που οφείλονται στις σταδίες αναφέρονται:

- Στη μη κατακόρυφη τοποθέτησής τους
- Στη μεταβολή του μήκους τους
- Στα λάθη των υποδιαιρέσεων τους

Όλα τα παραπάνω σφάλματα υπολογίζονται, διορθώνονται ή ελαχιστοποιούνται με κατάλληλους ελέγχους στο εργαστήριο ή στο πεδίο, ή εξαλείφονται με κατάλληλη διαδικασία υλοποίησης της μέτρησης.

Τα σφάλματα που οφείλονται στον παρατηρητή αφορούν στην ενδεχόμενη έλλειψη εμπειρίας στην εκτέλεση των μετρήσεων. Ωστόσο, εάν οι μετρήσεις γίνονται με ψηφιακό χωροβάτη τα σφάλματα αυτά εξαλείφονται, αφού ο παρατηρητής δεν συμμετέχει ούτε στη λήψη ούτε στην καταγραφή της μέτρησης.

Τα σφάλματα που οφείλονται στις συνθήκες της ατμόσφαιρας μπορούν να εξαλειφθούν, επιλέγοντας οι αποστάσεις μεταξύ χωροβάτη – σταδίων στις θέσεις όπισθεν και εμπροσθεν να είναι περίπου ίσες. Δηλαδή ο χωροβάτης να τοποθετείται πάντοτε σε σημείο της μεσοκαθέτου της ευθυγραμμίας που ορίζουν οι θέσεις των δύο σταδίων.

- Η *Τριγωνομετρική υψομετρία*. Είναι έμμεση μέθοδος προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, ο οποίος γίνεται συνδυάζοντας μετρήσεις ζενίθιων γωνιών, μηκών, ύψους οργάνου και ύψους σκόπευσης. Χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί και ανακλαστήρες. Το σφάλμα προσδιορισμού της υψομετρικής διαφοράς κυμαίνεται από $\pm 2\text{cm}$ έως $\pm 10\text{cm}$.

Τα σφάλματα ενδέχεται να οφείλονται στις μετρήσεις (ζενίθιας γωνίας, μήκους, ύψους οργάνου και ύψους στόχου) και στις εξωτερικές ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά την διάρκεια των παρατηρήσεων.

Τα σφάλματα γωνιών και μηκών μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με ειδική διαδικασία μετρήσεων (σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου) και με προληπτικούς εργαστηριακούς ελέγχους των οργάνων. Τα σφάλματα μέτρησης του ύψους οργάνου και στόχου ελαχιστοποιούνται με την προσοχή του παρατηρητή ή εφαρμόζοντας ειδική διαδικασία μέτρησης. Τα σφάλματα σκόπευσης του στόχου ελαχιστοποιούνται με την αύξηση της εμπειρίας του παρατηρητή. Όσο αφορά στην επίδραση των εξωτερικών συνθηκών, αυτές που επηρεάζουν τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με αυτή τη μέθοδο, είναι η καμπυλότητα της Γης και η ατμοσφαιρική διάθλαση.

- Η *Ειδική Τριγωνομετρική Υψομετρία (ETY)*. Είναι έμμεση μέθοδος προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών. Χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί, ανακλαστήρες και σταδία. Μετρούνται μήκη, ζενίθιας γωνίες και αναγνώσεις πάνω στη σταδία. Το σφάλμα προσδιορισμού της υψομετρικής διαφοράς είναι της τάξης των $\pm 5\text{mm}$.

Η αβεβαιότητα προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών με τη μέθοδο της ETY, εξαρτάται κυρίως από:

- την αβεβαιότητα μέτρησης των αναγνώσεων όπισθεν και εμπροσθεν πάνω στη σταδία, στο αρχικό και τελικό σημείο
- την αβεβαιότητα μέτρησης του μήκους και της ζενίθιας γωνίας
- τη μεταβολή της τιμής του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης

- Η *Τριγωνομετρική Υψομετρία Ακριβείας (TPYA)*. Είναι έμμεση μέθοδος προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, μεταξύ προσιτών

ή απρόσιτων σημείων. Χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί που μετρούν μήκη χωρίς ανακλαστήρα και στόχοι ή ανακλαστήρες. Μετρούνται μήκη και ζενίθιες γωνίες. Το σφάλμα προσδιορισμού της υψομετρικής διαφοράς είναι της τάξης των $\pm 5\text{mm}$.

Η αβεβαιότητα με την οποία μπορεί να προσδιοριστεί η ορθομετρική υψομετρική διαφορά μεταξύ δύο σημείων με την ΤΡΥΑ, εξαρτάται από:

- την αβεβαιότητα μέτρησης του μήκους και της ζενίθιας γωνίας
 - τη μεταβολή της τιμής του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης
- *Η βαρομετρική υψομετρία.* Είναι έμμεση μέθοδος προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών. Βασίζεται στον προσδιορισμό της διαφοράς της ατμοσφαιρικής πίεσης μεταξύ των σημείων, η οποία είναι ανάλογη της μεταβολής του υψομέτρου. Χρησιμοποιούνται βαρόμετρα ή αλτίμετρα και το σφάλμα προσδιορισμού των υψομετρικών διαφορών είναι περίπου $\pm 30\text{cm}$.
 - *Η υδραυλική χωροστάθμηση.* Είναι άμεση μέθοδος προσδιορισμού ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών, ο οποίος γίνεται χρησιμοποιώντας την αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων με αβεβαιότητα λίγων χιλιοστών. Μπορεί να εφαρμοστεί σε μικρής έκτασης περιοχές ή χώρους με μικρές υψομετρικές διαφορές.

1.6 Βασικές έννοιες της βαρύτητας

Ως βαρύτητα μπορεί να οριστεί η ιδιότητα των υλικών σωμάτων να έλκουν άλλα σώματα. Η βαρύτητα είναι η ασθενέστερη από τις τρεις άλλες θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις, την ηλεκτρομαγνητική, την ασθενή πυρηνική και την ισχυρή πυρηνική, που κυριαρχούν στο φυσικό μας κόσμο. Παράλληλα, αν και η βαρύτητα αποτέλεσε την πρώτη παρατηρούμενη από τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις, η προέλευσή της αποτελεί ακόμα και σήμερα ένα μυστήριο. Παρά το γεγονός αυτό, η βαρύτητα εμφανίζεται παντού στο φυσικό κόσμο, από την ελεύθερη πτώση ενός αντικειμένου, τη ροή του νερού, τη δημιουργία των παλιρροιών, την κίνηση των τεχνητών δορυφόρων κ.α. Το γεγονός αυτό καθιστά τη γνώση της απαραίτητη για ένα πλήθος επιστημών όπως της Κοσμολογίας, της Αστρονομίας και ειδικά των εφαρμοσμένων

Γεωεπιστημών της Γεωδαισίας, της Ωκεανογραφίας και της Γεωφυσικής.
[Δεληκαράογλου, 2007]

Όσο αφορά στη Γεωδαισία, η οποία ασχολείται με τον προσδιορισμό του μεγέθους, του σχήματος της Γης και τον προσδιορισμό σημείων ενδιαφέροντος στις τέσσερις διαστάσεις (στο χώρο και διαχρονικές μεταβολές), η γνώση της βαρύτητας, είναι απαραίτητη για ένα πλήθος απλών έως και ιδιαίτερα εξειδικευμένων εργασιών. Η επίλυση των εξισώσεων Laplace και Poisson αποτελεί ένα από τα πλέον σημαντικά προβλήματα της Γεωδαισίας, όπου επιδιώκεται ο προσδιορισμός του δυναμικού της Γης από δεδομένα που παρέχουν διάφορες μετρήσεις (π.χ. βαρύτητας) στην επιφάνεια ή κάτω από την επιφάνεια της Γης, αν είναι γνωστή η κατανομή των μαζών στο εσωτερικό της Γης.

Επίσης η βαρύτητα, επιδρά έμμεσα σε πολλές περιπτώσεις, όπως στην ορθή διαδικασία τοποθέτησης ενός γεωδαιτικού σταθμού μέσω του προσδιορισμού της κατακορύφου, στην υψομετρική μελέτη και στην εκτέλεση κατασκευαστικών έργων αλλά και άμεσα, σε πιο εξειδικευμένες εργασίες όπως την υψομετρική σύνδεση ηπειρωτικών και νησιωτικών τμημάτων, στον προσδιορισμό του γεωειδούς και στην υλοποίηση ενός γεωδαιτικού datum. Επομένως συμπεραίνεται ότι υπάρχει άμεση σύνδεση των υψομέτρων και της κατακορύφου με το γήινο πεδίο βαρύτητας και με το διάνυσμα της έντασης της βαρύτητας.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του γήινου πεδίου βαρύτητας είναι είτε άμεσες μετρήσεις της τιμής της βαρύτητας ή των παραγώγων της, είτε έμμεσα-γεωμετρικά, όπως η απόκλιση της κατακορύφου, τροχιακές ανωμαλίες τεχνητών δορυφόρων, ύψη στάθμης θάλασσας από RADAR ή LASER αλτίμετρα και αποχές του γεωειδούς από σύγκριση ορθομετρικών και γεωμετρικών υψομέτρων (GPS/Levelling). Γενικά, οι άμεσες και έμμεσες τεχνικές παρατήρησης του γήινου πεδίου βαρύτητας μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις υποκατηγορίες ανάλογα με το εάν η διάταξη παρατήρησης βρίσκεται σε επίγεια, θαλάσσια, εναέρια ή δορυφορική πλατφόρμα.

1.6.1 Η έλξη της βαρύτητας

Σύμφωνα με το Νόμο της Παγκόσμιας Έλξης της Βαρύτητας, όπως διατυπώθηκε αρχικά το 1686 από το Νεύτωνα (Newton), το φαινόμενο της βαρύτητας βασίζεται στην αμοιβαία έλξη που ασκείται μεταξύ δύο

μαζών. Γνωστός ως πρώτος νόμος του Νεύτωνα, ο νόμος της έλξης της βαρύτητας δηλώνει ότι η αμοιβαία ελκτική δύναμη F μεταξύ δύο μαζών m_1 και m_2 , που θεωρούνται συγκεντρωμένες σε δύο σημεία P_1 και P_2 , είναι ανάλογη με το γινόμενο των μαζών και αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης D μεταξύ των δύο σημείων. Η σχέση 1.2, εκφράζει το νόμο της Παγκόσμιας Έλξης της Βαρύτητας, είναι τελείως συμμετρική, δηλαδή δεν θεωρείται πρωταρχική η μια ή η άλλη μάζα. Ωστόσο, για ευκολία η μια μάζα θεωρείται ως έλκουσα και η άλλη ως ελκυόμενη.

$$F=G \frac{m_1 \cdot m_2}{D^2} \quad (1.2)$$

$$D=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2} \quad (1.3)$$

$$G=6.674 \ 30 \ (15) \cdot 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2} \quad (1.4)$$

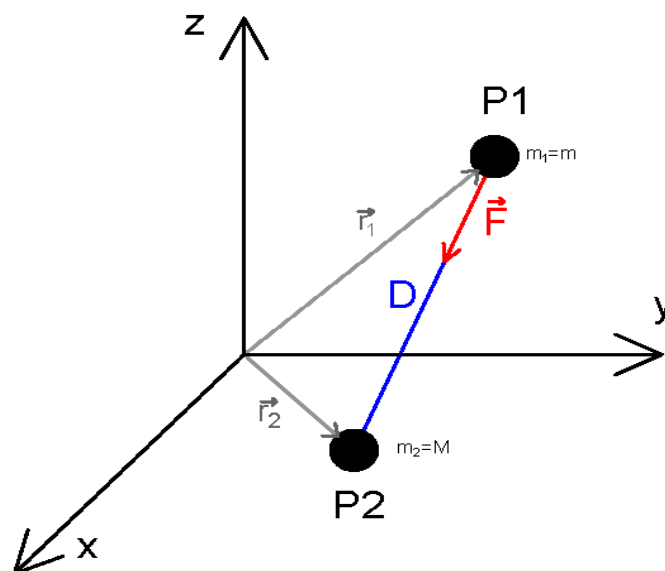
Όπου, D : είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο μαζών, η οποία σε ένα καρτεσιανό σύστημα μπορεί να εκφραστεί, ως συνάρτηση των διανυσμάτων θέσης $\vec{r}_1(x_1,y_1,z_1)$ και $\vec{r}_2(x_2,y_2,z_2)$ δύο σημείων. (σχήμα 1.3)

G : παγκόσμια σταθερά έλξης ή απλά σταθερά της βαρύτητας

Ο συντελεστής G είναι μια εμπειρική φυσική σταθερά εμφανιζόμενη για πρώτη φορά στο Νόμο της βαρύτητας του Νεύτωνα αλλά και στη σύγχρονη αντίληψη της ύλης και του χωροχρόνου όπως εκφράστηκε μέσα από τη γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν (Einstein). [Luther, κ.α., 1982]

Ο πειραματικός προσδιορισμός της τιμής του G έγινε με ακρίβεια της τάξης $\pm 1\%$ περί το 1798 από τον Άγγλο φυσικό Henry Cavendish που χρησιμοποίησε για πρώτη φορά μετρητικές διατάξεις γνωστές ως ελατήρια ή ζυγοί στρέψης. Μέχρι σήμερα συνεχίζεται η προσπάθεια του ακριβέστερου προσδιορισμού της τιμής του G χρησιμοποιώντας παρόμοιες σύγχρονες μετρητικές διατάξεις που βασίζονται στις ίδιες φυσικές αρχές που χρησιμοποίησε ο Cavendish. Ο ακριβής προσδιορισμός του G είναι καίριας σημασίας για τις Φυσικές Επιστήμες και ιδιαίτερα για τις Γεωεπιστήμες της Γεωδαισίας, της Γεωφυσικής και της Ωκεανογραφίας καθώς είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον προσδιορισμό της Γήινης δομής, της μάζας και της πυκνότητάς της.

Παρόλα αυτά η Σταθερά της Παγκόσμιας Έλξης είναι πιθανώς η φυσική σταθερά με τη μεγαλύτερη δυσκολία στον ακριβή προσδιορισμό της τιμής της [Gillies, 1997], λαμβάνοντας συνεχείς αναθεωρήσεις ως προς την τιμή της, ενώ έχουν εκφραστεί και επιχειρήματα όσο αφορά στη μεταβολή της στο χρόνο [Van Flandern, 1981].



Σχήμα 1.3 Ελκτική δύναμη που ασκείται από μία μάζα m στο σημείο $P1(x_1, y_1, z_1)$ σε μάζα M στο σημείο $P2(x_2, y_2, z_2)$

Θεωρώντας ότι η ελκνόμενη μάζα είναι ίση με μια μονάδα μέτρησης ($m_2=1$) και η έλκουσα μάζα συμβολίζεται με m ($m_1=m$), η δύναμη έλξης εκφράζεται από τη σχέση 1.5α.

$$F_{\text{ελκτική}} = \frac{G \cdot m}{D^2} \quad (1.5\alpha)$$

Ο διανυσματικός χαρακτήρας της σχέσης 1.5α αναδεικνύεται μέσω της μορφής της σχέσης 1.5β και για κάθε μία από τις τρεις συνιστώσες x, y, z σύμφωνα με τη σχέση 1.6.

$$F_{\text{ελκτική}} = \left(-\frac{G \cdot m}{D^2}\right) \frac{\Delta D}{D} \quad (1.5\beta)$$

$$F_{x_{\text{ελκτική}}} = -\frac{G \cdot m \cdot (x_2 - x_1)}{D^3}, \quad F_{y_{\text{ελκτική}}} = -\frac{G \cdot m \cdot (y_2 - y_1)}{D^3}, \quad (1.6)$$

$$F_{z_{\text{ελκτική}}} = -\frac{G \cdot m \cdot (z_2 - z_1)}{D^3}$$

Όπου το αρνητικό πρόσημο (-) υποδηλώνει ότι το διάνυσμα της ελκτικής δύναμης που εξασκείται από την έλκουσα μάζα m επί της μοναδιαίας μάζας και το αντίστοιχο σχετικό διάνυσμα θέσης (x_2-x_1) μεταξύ της έλκουσας μάζας m και της μοναδιαίας μάζας έχουν αντίθετη φορά.

Στην πράξη, ένα σώμα πεπερασμένων διαστάσεων όπως η Γη, που αποτελείται από αναρίθμητα στοιχεία μάζας, εξασκεί μια ελκτική δύναμη σε ένα σώμα μοναδιαίας μάζας (μέσα στη Γη, στη γήινη επιφάνεια ή στο χώρο της γήινης ατμόσφαιρας), η οποία είναι αποτέλεσμα του διανυσματικού αθροίσματος των επιμέρους ελκτικών δυνάμεων που προκαλούνται από τα στοιχεία της γήινης μάζας στη μοναδιαία μάζα. Η συγκεκριμένη περιγραφή της έλξης της Γης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, δεδομένου ότι απαιτείται η γνώση των τριών διανυσματικών συνιστωσών της δύναμης έλξης για κάθε σημείο στο χώρο. Για το λόγο αυτό, συνήθως υιοθετείται ένας απλούστερος τρόπος με την εισαγωγή μιας βαθμωτής συνάρτησης V , το λεγόμενο δυναμικό έλξης, που ορίζεται από τη σχέση 1.7.

$$F_{\text{ελκτική}} = (F_x, F_y, F_z) = \text{grad}V \quad (1.7)$$

Πιο συγκεκριμένα οι παράγωγοι του δυναμικού έλξης στις διευθύνσεις x , y , z του συστήματος αναφοράς αντιστοιχούν στις συνιστώσες F_x , F_y , F_z της δύναμης έλξης στις αντίστοιχες διευθύνσεις και συνεπώς το διανυσματικό πεδίο των ελκτικών δυνάμεων που ασκεί ένα σώμα σε μια μοναδιαία μάζα προσδιορίζεται ακριβώς από το βαθμωτό πεδίο του δυναμικού του. Από αυτό προκύπτει και η πρακτική σημασία του δυναμικού, ότι δηλαδή υποκαθιστά την αναγκαία χρήση των τριών συνιστωσών της δύναμης έλξης $F_{\text{ελκτική}}$ σε κάθε σημείο στο χώρο από ένα βαθμωτό μέγεθος, το δυναμικό V .

1.6.2 Η δύναμη και το δυναμικό της βαρύτητας

Εκτός από τον καθορισμό του νόμου της αμοιβαίας έλξης μεταξύ των μαζών, ο Νεύτωνας καθόρισε επίσης τη σχέση μεταξύ μιας δύναμης και της επιτάχυνσης που προκαλεί στο σώμα στο οποίο ασκείται. Συγκεκριμένα, ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα δηλώνει ότι η δύναμη F που ασκείται σε ένα σώμα μάζας (m) και η επιτάχυνση (a) στην οποία

υποβάλλεται το σώμα εξ αιτίας της ασκούμενης δύναμης συνδέονται, όπως περιγράφεται στην σχέση 1.8.

$$F=m \cdot a \quad (1.8)$$

Συνδυάζοντας το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα με το νόμο της βαρύτητας, το μέτρο της επιτάχυνσης (a) ενός σώματος με μοναδιαία μάζα, εξαιτίας της ελκτικής δύναμης F που ασκεί σε αυτό ένα σώμα μάζας m , διατυπώνεται ως εξής.

$$a=G \frac{m}{D^2} \quad (1.9)$$

Όπου, D : είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο μαζών.

Για παράδειγμα, θεωρώντας τη μάζα της Γης ως $5.976 \cdot 10^{24}$ kg και την ακτίνα της Γης ίση με $R=6371$ km, η τιμή του δυναμικού έλξης στην επιφάνεια της Γης ($D=R$) υπολογίζεται ως $V = 6.256 \cdot 10^7$ m² sec⁻² και η επιτάχυνση που προκαλεί η αντίστοιχη έλξη έχει τη τιμή $a= 9.81$ m sec⁻².

Όταν η περιγραφή των φαινομένων που συνδέονται με την βαρύτητα γίνεται ως προς την περιστρεφόμενη Γη (δηλαδή ένα μη αδρανειακό σύστημα), τότε πρέπει να συμπεριληφθεί και μια ιδεατή (virtual) δύναμη, η φυγόκεντρος. Από αυτή τη σκοπιά, η συνολική δύναμη της βαρύτητας που εξασκείται στην ελκόμενη μάζα περιγράφεται από το άθροισμα της ελκτικής δύναμης $F_{ελκτική}$ και της φυγόκεντρου $F_{φυγόκεντρη}$.

$$F=F_{ελκτική}+F_{φυγόκεντρη} \quad (1.10)$$

Επομένως, το δυναμικό της βαρύτητας, που συμβολίζεται με W , είναι αποτέλεσμα της προσθετικής επίδρασης του δυναμικού έλξης V και του φυγόκεντρου δυναμικού Φ . (εξίσωση 1.11)

$$W = W(W_x, W_y, W_z) = V + \Phi \quad (1.11)$$

Η φυσική σημασία του γήινου δυναμικού W είναι ότι αντιστοιχεί στο έργο ΔW που παράγεται από τη δύναμη της βαρύτητας F , όταν αυτή εκτελεί μια απειροστή μετατόπιση dL της μάζας στην οποία εξασκείται.

$$\Delta W= \Delta V+\Delta \Phi=-4\pi G\rho(M)+2\omega^2 \quad (1.12)$$

Όπου: $\rho(M)$: είναι η πυκνότητα της μάζας του σημείου M .

ω : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της Γης, η οποία θεωρείται σταθερή κατά τη μετατόπιση.

Οι συνεχείς, κλειστές, μη τεμνόμενες και επάλληλες επιφάνειες όπου το δυναμικό της βαρύτητας είναι σταθερό, ονομάζονται ισοδυναμικές επιφάνειες. Κατά μήκος μίας ισοδυναμικής επιφάνειας δεν παράγεται έργο από τη δύναμη της βαρύτητας, δηλαδή ισχύει:

$$\Delta W = \text{grad}W \cdot dL = 0 \quad (1.13)$$

Όπου, $dL = (dx, dy, dz)$

Η εξίσωση 1.13 εκφράζει το γεγονός ότι το διάνυσμα της βαρύτητας σε κάθε σημείο του χώρου είναι κάθετο στην ισοδυναμική επιφάνεια που διέρχεται από το εν λόγω σημείο.

Κάθε γεωειδές χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη τιμή W_0 , που μπορεί να υπολογιστεί από τις ιδιότητές του, και αντιστοιχεί σε οποιοδήποτε σημείο υψομετρικής αφετηρίας για το οποίο ισχύει $H=0$.

Ως διάνυσμα, η δύναμη της βαρύτητας F σε κάθε σημείο έχει ως διεύθυνση τη διεύθυνση της κατακορύφου στο εκάστοτε σημείο, δηλαδή τη διεύθυνση κατά την οποία οριζοντιώνονται τα γεωδαιτικά όργανα και κατά μήκος της οποίας, εξ ορισμού, μετρούνται τα ορθομετρικά υψόμετρα, στα οποία βασίζονται τα περισσότερα υψομετρικά συστήματα αναφοράς. [Δεληκαράογλου, 2010]

1.6.3 Η ένταση της βαρύτητας

Κατά την εκτέλεση μετρήσεων της γήινης βαρύτητας, συνήθως δεν παρατηρείται η δύναμη της βαρύτητας F , αλλά μετράται η επιτάχυνσή της, η οποία προκαλείται σε μια μοναδιαία μάζα και συμβολίζεται ως g .

$$g = a_{\text{ελκτική}} + a_{\text{φυγόκεντρος}} = \text{grad}W = \left(\frac{\partial W}{\partial x}, \frac{\partial W}{\partial y}, \frac{\partial W}{\partial z} \right) \quad (1.14)$$

Η επιτάχυνση της βαρύτητας μπορεί να θεωρηθεί ως το ποσοστό αλλαγής της ταχύτητας ενός σώματος υπό την επίδραση της δύναμης της βαρύτητας. Η διεύθυνση του διανύσματος g της βαρύτητας είναι η διεύθυνση της κατακορύφου και το μέγεθος g συχνά αποκαλείται ένταση της βαρύτητας ή απλά βαρύτητα. Επειδή η Γ δεν είναι μια ομογενής (σε πυκνότητα) σφαίρα και επιπλέον περιστρέφεται, η ένταση της βαρύτητας

στην επιφάνεια της Γης μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος. [Δεληκαράογλου, 2007]

Οι γραμμές που είναι κάθετες σε κάθε ισοδυναμική επιφάνεια δεν είναι τελείως ευθείες, αλλά ελαφρά κυρτές καμπύλες που είναι γνωστές στη γεωδαισία ως δυναμικές γραμμές ή απλούστερα ως κατακόρυφοι. Είναι προφανές ότι το διάνυσμα της βαρύτητας g σε κάθε σημείο είναι εφαπτόμενο στην κατακόρυφο που διέρχεται από το εκάστοτε συγκεκριμένο σημείο. Κατά συνέπεια, αν το παραπάνω διάνυσμα dL (εξίσωση 1.13) ληφθεί κατά μήκος μιας κατακόρυφου, το μήκος του εκφράζει την υψομετρική διαφορά ΔH από τη στάθμη της θάλασσας (δηλαδή την ορθομετρική υψομετρική διαφορά).

$$g \cdot dL = -g \cdot \Delta H = \Delta W \Rightarrow g = -\frac{\partial W}{\partial H} \quad (1.15)$$

Από την παραπάνω σχέση συμπεραίνεται ότι η ένταση της βαρύτητας εκφράζει τη μεταβολή του γήινου δυναμικού ως συνάρτηση του ύψους.

1.7 Δημιουργία συστημάτων αναφοράς υψομέτρων

Η μελέτη, κατανόηση και μοντελοποίηση των παγκόσμιων αλλαγών απαιτεί γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς που χαρακτηρίζονται από ακρίβεια τουλάχιστον μίας τάξης μεγέθους καλύτερη από το μέγεθος των φαινομένων που μελετώνται [Ardanal. κ.α., 2005], συνέπεια και αξιοπιστία όσον αφορά στην ακρίβεια παγκοσμίως [Balasubramania., 1994], και δυνατότητα μακροπρόθεσμης σταθερότητας [Sanchez., 2012].

Ο ορισμός, η συντήρηση και η ευρεία χρήση του Διεθνούς Γήινου Συστήματος Αναφοράς (ITRS) εγγυώνται ένα γεωμετρικά ορθό και ενιαίο σύστημα αναφοράς με αξιοπιστία σε επίπεδα ακρίβειας της τάξης των μερικών χιλιοστών. Ωστόσο, ένα αντίστοιχα ισοδύναμο σύστημα αναφοράς υψομέτρων δεν υπάρχει. Τα υπάρχοντα φυσικά συστήματα υψομέτρων και όλα τα γεωδαιτικά δεδομένα που εκφράζονται και παρουσιάζονται μέσω αυτών (ανωμαλίες βαρύτητας, γεωλογικές εκτιμήσεις, ψηφιακό μοντέλα εδάφους) μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε περιορισμένες γεωγραφικές περιοχές και ο συνδυασμός τους σε τοπικό ή παγκόσμιο επίπεδο παρουσιάζει αποκλίσεις, με τάξη μεγέθους πολύ μεγαλύτερη από την τελική επιδιωκόμενη απαιτούμενη ακρίβεια.

Επομένως δεν παρέχεται ένα αξιόπιστο πλαίσιο για συνεπή ανάλυση και μοντελοποίηση παγκόσμιων φαινομένων που σχετίζονται με τη βαρύτητα της Γης (διακυμάνσεις της στάθμης της θάλασσας από τοπικές σε παγκόσμιες κλίμακες, αναδιανομή των μαζών στους ωκεανούς τις ηπείρους και το εσωτερικό της Γης).

1.7.1 Ενοποίηση διαφορετικών συστημάτων υψομέτρων

Η ενοποίηση των διαφορετικών υψομετρικών συστημάτων τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο, αποτελεί ένα καίριο ερευνητικό τομέα μελέτης. Η τεχνολογική και τεχνογνωσιακή εξέλιξη των τελευταίων ετών επιτρέπουν την έρευνα σχετικά με τη δημιουργία ηπειρωτικών και διεθνών κοινών συστημάτων αναφοράς υψομέτρων.

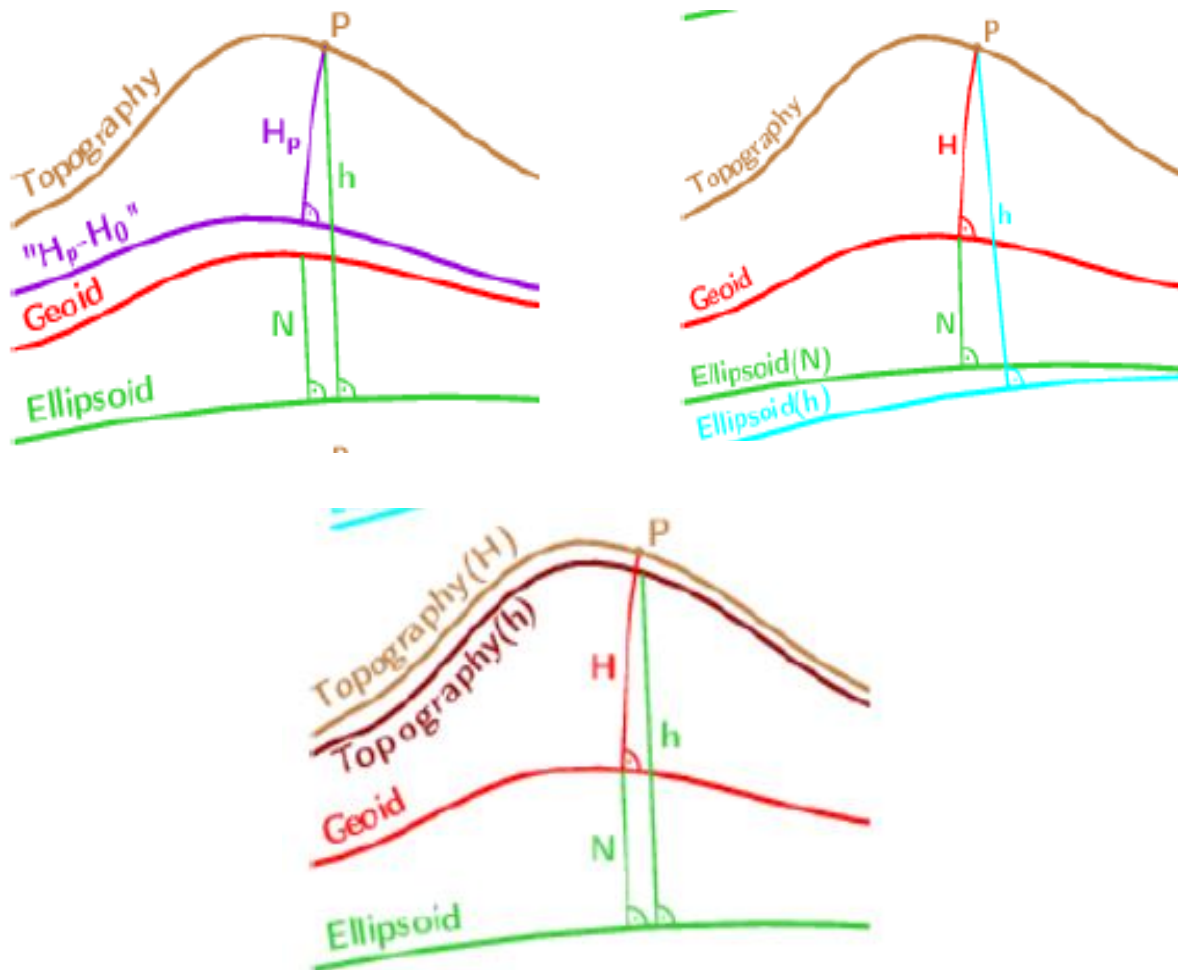
Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα συστήματα υψομέτρων αναφέρονται σε τοπικά επίπεδα επιφάνειας της θάλασσας, είναι χρονικά σταθερά (δεν λαμβάνουν υπόψη τις διακυμάνσεις του χρόνου) και ουσιαστικά ενδεχομένως να αναφέρονται σε διαφορετικές φυσικές κατηγορίες υψομέτρων (ορθομετρικά, κανονικά, γεωμετρικά). Γενικά, η ακρίβεια αυτών των συστημάτων είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από την αντίστοιχη των οριζοντιογραφικών γεωμετρικών συστημάτων αναφοράς (επίπεδο κάτω του χιλιοστού).

Επομένως οι κύριες πηγές αδυναμιών προκύπτουν ακόμα και από την απλή εφαρμογή της σχέσης 1.1, η οποία συνδέει την τιμή του γεωμετρικού υψομέτρου με την αντίστοιχη του ορθομετρικού και την αποχή του γεωειδούς.

Πιο συγκεκριμένα, οι βασικές αδυναμίες που διαχρονικά υφίστανται και οφείλουν να επιλυθούν αφορούν στο γεγονός πως:

- όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τα ορθομετρικά υψόμετρα συνήθως έχουν διαφορετική υψομετρική αφετηρία μέτρησης (σχήμα 1.4α)
- χρησιμοποιούνται ενδεχομένως διαφορετικοί συντελεστές του ελλειψοειδούς στις υψομετρικές μελέτες και στη μοντελοποίηση της αποχής του γεωειδούς (σχήμα 1.4β)
- τα ομόλογα ζεύγη ορθομετρικών και γεωμετρικών υψομέτρων παρέχονται σε διαφορετικές εποχές μετρήσεων (σχήμα 1.4γ)

- χρησιμοποιούνται διαφορετικά συστήματα γήινων παλιρροιών και πραγματοποιούνται διαφορετικές αναγωγές στα ορθομετρικά και γεωμετρικά υψόμετρα λόγω ατμοσφαιρικών, υδρολογικών και ωκεανολογικών παραγόντων.



Σχήμα 1.4α,β,γ Βασικές αδυναμίες υψομετρικών συστημάτων
 [Πηγή : Sanchez., 2016]

1.7.2 Μεθοδολογίες προσδιορισμού και ενοποίησης υψομετρικών συστημάτων

Για τη δημιουργία ενός σύγχρονου κατακόρυφου συστήματος αναφοράς υψομέτρων, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες σε ακρίβεια που φτάνουν πλέον στο επίπεδο του ± 1 cm, οι επιλογές διαμορφώνονται από την αξιοποίηση τόσο της επίγειας όσο και της ωκεάνιας τοπογραφίας.
 [Kearsley., 1993]

Οι παρακάτω θεωρήσεις γίνονται με βάση την παραδοχή ότι η μέση στάθμη της θάλασσας και το γεωειδές δεν είναι ακριβώς ίδιες επιφάνειες. Πιο συγκεκριμένα, το γεωειδές είναι η ισοδυναμική επιφάνεια που προσομοιάζει καλύτερα τη μέση στάθμη της θάλασσας με βάση ελαχιστοτετραγωνικές επιλύσεις. Ωστόσο, λόγω μεταβολών στην επιφάνεια της θάλασσας που δεν οφείλονται στη βαρύτητα (όπως αλλαγές στη θερμοκρασία και πίεση, στην αλατότητα καθώς και στα ρεύματα), η μέση στάθμη της θάλασσας ενδεχομένως να αποκλίνει από το γεωειδές έως και δύο μέτρα. Η απόκλιση αυτή μελετάται από την τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας και από την ωκεανογραφία. [Vanicek, κ.α., 1986]

Οι παρακάτω μεθοδολογίες αφορούν στην εξ' αρχής δημιουργία νέων υψομετρικών συστημάτων αναφοράς:

- 1) Εξάρτηση από ένα δίκτυο παλιρροιογράφων κατάλληλα διατεταγμένων στην ακτογραμμή μίας χώρας, στους οποίους έχει υπολογιστεί με υψηλή ακρίβεια η μέση στάθμη της θάλασσας και σε αυτούς ορίζεται η αφετηρία (τιμή μηδέν) του υψομετρικού συστήματος. Χαρακτηριστικό της μεθοδολογίας αυτής είναι ότι, με την προϋπόθεση ότι όλες οι άλλες παρατηρήσεις είναι απαλλαγμένες από σφάλματα και επιδράσεις, η σύνδεση των παλιρροιογράφων θα επηρεάζεται ουσιαστικά από τις κατά τόπους διαφορές της μέσης δυναμικής ωκεάνιας τοπογραφίας.
- 2) Εξάρτηση όλου του υψομετρικού συστήματος από ένα ελεγμένο παλιρροιογραφικό σταθμό, στον οποίο αποδίδεται το μηδενικό υψόμετρο, έπειτα από τη συνόρθωση όλου του δικτύου ως ελεύθερο.
- 3) Εξάρτηση όλου του υψομετρικού συστήματος από ένα ελεγμένο παλιρροιογραφικό σταθμό με ταυτόχρονο προσδιορισμό της μέσης δυναμικής ωκεάνιας τοπογραφίας σε αυτόν, ώστε να είναι γνωστή η τιμή της αποχής N μεταξύ της υπολογισμένης τιμής της μέσης στάθμης της θάλασσας από το γεωειδές. Χαρακτηριστικό της μεθοδολογίας αυτής είναι ότι στη συνόρθωση ελαχιστοποιούνται σφάλματα παρατηρήσεων αλλά και πιθανές γεωλογικές επιδράσεις. Επίσης η μεθοδολογία αυτή προσφέρει τη δυνατότητα ενοποίησης του υψομετρικού συστήματος μιας χώρας σε ένα παγκόσμιο σύστημα, αλλά και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης των επιμέρους

νησιωτικών συστημάτων ενός κατακερματισμένου δικτύου ανεξάρτητων υψομετρικών συστημάτων σε μια χώρα με πολλά νησιωτικά συμπλέγματα. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της απόδοσης απόλυτων τιμών ως προς κάποιο ελλειψοειδές αναφοράς, πέρα από τις παρατηρούμενες σχετικές τιμές υψομέτρων (υψομετρικές διαφορές ως προς το γεωειδές). Μπορεί δηλαδή, να γίνει είτε με παρατηρήσεις GNSS στους παλιρροιογράφους, είτε με τον προσδιορισμό ενός μοντέλου μέσης στάθμης της θάλασσας υψηλής ακρίβειας με τη χρήση της αλτιμετρίας, είτε με τη χρήση ενός μοντέλου γεωειδούς υψηλής ακρίβειας. [Vergos., κ.α., 2008]

- 4) Ορισμός ενός παγκόσμιου υψομετρικού συστήματος αναφοράς αξιοποιώντας τεχνικές της δορυφορικής αλτιμετρίας. Χαρακτηριστικό της μεθοδολογίας είναι ο υπολογισμός και μοντελοποίηση της τιμής του δυναμικού της βαρύτητας με χρήση της δορυφορικής αλτιμετρίας και η σύγκρισή του με τις τιμές των γεωδυναμικών μοντέλων.
- 5) Η ανάπτυξη της επιστήμης της κβαντικής μετρολογίας (quantum metrology) και η επαναφορά των αρχών της σχετικιστικής γεωδαισίας, προσφέρουν πλέον τη δυνατότητα προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών σημείων που η απόσταση μεταξύ τους ενδέχεται να κυμαίνεται από εθνικά έως και δι-ηπειρωτικά πλαίσια, μέσω της αξιοποίησης της μεθοδολογίας της χρονομετρικής χωροστάθμησης. Χαρακτηριστικό της μεθοδολογίας είναι ότι προσδιορίζονται υψομετρικές διαφορές σε ένα κοινό ενιαίο σύστημα αναφοράς μέσω της παρατήρησης του χρόνου/συχνότητας, χωρίς να εισάγονται στις μετρήσεις οι εγγενείς παράγοντες σφαλμάτων. [Flurry, 2015]

Σε περίπτωση που στόχος είναι να ενοποιηθούν ήδη υλοποιημένα και λειτουργικά υψομετρικά συστήματα αναφοράς, τότε υπάρχουν τρεις εναλλακτικές μεθοδολογίες. [Russel., 2002]

- Η μέθοδος της σύνδεσης των διαφορετικών θαλάσσιων γεωειδών μέσω χωροστάθμησης. Πολλά κράτη δεν έχουν δημιουργήσει κατάλληλα υπόβαθρα που αφορούν στη θαλάσσια Γεωδαισία, επομένως είναι η μέθοδος που χρειάζεται να προηγηθεί πρώτα η

υλοποίηση εθνικών συστημάτων, ώστε να ενοποιηθούν στη συνέχεια.

- Η κλασική μέθοδος της γεωμετρικής χωροστάθμησης, συνδυάζει παρατηρήσεις επίγειας υψομετρίας και βαρύτητας με σκοπό να προσδιοριστούν οι πιθανές διαφορές δυναμικού. Ένα ενοποιημένο υψομετρικό σύστημα αναφοράς δημιουργείται ύστερα από τη σύγκριση των υφιστάμενων υψομετρικών διαφορών σε κάθε διαφορετικό σύστημα με εκείνες που προσδιορίζονται από τις παρατηρήσεις, στα διασυνοριακά σημεία, μέσω μαθηματικής προσαρμογής. Εφόσον προσδιοριστούν οι τιμές των υψομέτρων σε αυτό το ενοποιημένο σύστημα, υπολογίζονται οι διαφορές ανά ζεύγη, μεταξύ αυτού και των αρχικών συστημάτων. Χαρακτηριστικό της μεθοδολογίας είναι ότι οι παρατηρήσεις (μετρήσεις υψομετρικών διαφορών) σε ανοίγματα με υδροφόρο ορίζοντα μπορούν να πραγματοποιούνται μόνο όταν η απόσταση είναι μικρή. Επομένως η συγκεκριμένη μεθοδολογία δεν ενδείκνυται για παγκόσμιες προσεγγίσεις. Επίσης σε σχέση με άλλα γεωδαιτικά δίκτυα, τα κλασσικά υψομετρικά έχουν μικρό αριθμό πλεονασμού παρατηρήσεων, επομένως είναι πιο επιρρεπή σε συστηματικά σφάλματα. Έχει δημιουργηθεί Ευρωπαϊκό Υψομετρικό Σύστημα Αναφοράς με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία (European Vertical Reference Frame EVRF2007) [Sacher. κ.α., 2009]
- Η μεθοδολογία που λαμβάνει υπόψη το βαρυτικό πεδίο. Απαραίτητα δεδομένα για την εφαρμογή της μεθοδολογίας είναι αφενός τα γεωμετρικά υψόμετρα που προσδιορίζονται από συστήματα δορυφορικών παρατηρήσεων, αφετέρου τα ορθομετρικά υψόμετρα σε κάθε ένα από τα διαφορετικά συστήματα υψομέτρων που πρόκειται να ενοποιηθούν, καθώς επίσης και ένα ακριβές μοντέλο βαρύτητας. Με βάση αυτά τα δεδομένα προσδιορίζονται οι διαφορές μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων. [Rulke. κ.α., 2012]
Σε αντίθεση με την μεθοδολογία της κλασσικής χωροστάθμησης, στη συγκεκριμένη μεθοδολογία δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθούν σχετικές μετρήσεις υψομετρικών διαφορών μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων. Επομένως η μεθοδολογία είναι κατάλληλη για τη σύνδεση υψομετρικών συστημάτων, τα οποία δεν είναι κοντά μεταξύ τους, όπως εκείνα σε νησιά ή σε

διαφορετικές ηπείρους. [Adam., κ.α., 2000] Η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιείται σε όλα τα σύγχρονα ευρωπαϊκά υψομετρικά συστήματα αναφοράς, όπως το European Vertical Reference Network (EUVN). [Ihde, κ.α., 2000]

1.7.3 Υφιστάμενες προσπάθειες ενοποίησης υψομετρικών συστημάτων

Η ενοποίηση αυτοτελών ανεξάρτητων υψομετρικών συστημάτων αναφοράς έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για πολλά χρόνια. [Rummel. κ.α.,1988][Xu., 1992][Ardanal. κ.α., 2005][Gatti. κ.α., 2012].

Με βάση αυτές τις μελέτες δημιουργήθηκαν με το πέρασμα των χρόνων περιφερειακές εφαρμογές στην Ευρώπη [Pan. κ.α., 1998][Sacher. κ.α., 2009], στην Αυστραλία [Featherstone., 2000], στη Βόρεια Αμερική [Zilkoski. κ.α., 1992] και στη Νότια Αμερική [Sanchez. κ.α., 2017].

Επίσης δημιουργήθηκαν και μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές που στοχεύουν στην υλοποίηση ενός παγκόσμιου υψομετρικού συστήματος αναφοράς.[Rapp., 1995][Bursa. κ.α., 2001,2004][Sanchez., 2009][Ihde. κ.α., 2005].

1.7.3.1 Παγκόσμιο Υψομετρικό Σύστημα Αναφοράς (IHRF)

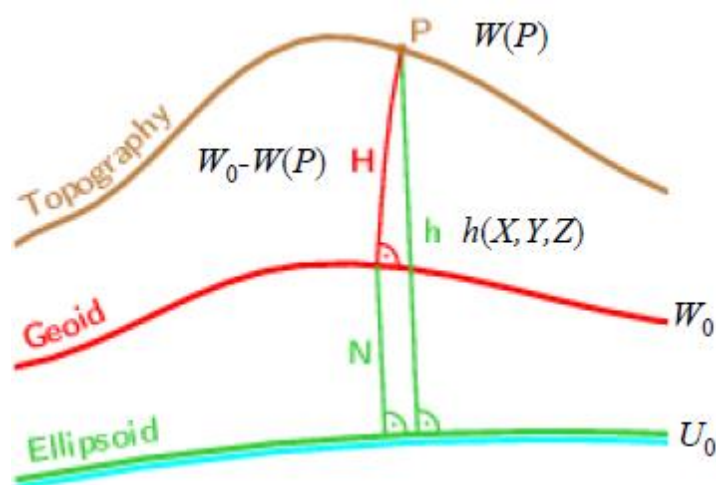
Πιο συγκεκριμένα, το Παγκόσμιο Σύστημα Γεωδαιτικών Παρατηρήσεων (GGOS) της Διεθνούς Ένωσης Γεωδαισίας (IAG), φροντίζοντας να παρέχει μια ακριβή γεωδαιτική υποδομή για την παρακολούθηση της Γης, προωθεί την τυποποίηση και ενοποίηση των υψομετρικών συστημάτων παγκοσμίως.

Κύριοι στόχοι είναι αφενός η παροχή ενός αξιόπιστου πλαισίου για συνεπή ανάλυση και μοντελοποίηση παγκόσμιων φαινομένων και διαδικασιών που επηρεάζουν τη βαρύτητα και τη γεωμετρία της επιφάνειας της Γης, και αφετέρου τον ακριβή συνδυασμό φυσικών και γεωμετρικών υψομέτρων προκειμένου να αξιοποιηθούν στο μέγιστο τα πλεονεκτήματα της δορυφορικής γεωδαισίας (συνδυασμός δορυφορικών μοντέλων εντοπισμού και βαρύτητας για τον ακριβή προσδιορισμό ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών παγκοσμίως).

Με βάση αυτές τις προσδοκίες δημιουργήθηκε το ερευνητικό έργο, GGOS Theme 1 "Unified Height System", το Φεβρουάριο του 2010, με αρχικό σκοπό τη συγκέντρωση των απαιτούμενων εργασιών και στη συνέχεια την ανάδειξη των ενεργειών που πρέπει να υλοποιηθούν. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνονται στα παραδοτέα από το IAG Inter-Commission Project 1.2 "Vertical Reference Systems" κατά την περίοδο 2003-2011. [Sanchez., 2012]

Με σκοπό να επιλυθούν οι αδυναμίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, και αφορούσαν κυρίως στη συμπερίληψη του χρόνου και της βαρύτητας, τα αποτελέσματα αφορούν στη δημιουργία ενός παγκόσμιου υψομετρικού συστήματος αναφοράς (International Height Reference System (IHR)). Σύμφωνα με τη μελέτη για τη δημιουργία του συστήματος αναφοράς, το πρόβλημα μετατίθεται στον ακριβή προσδιορισμό του δυναμικού της βαρύτητας σε κάθε σημείο της επιφάνειας της Γης.

Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιείται η σύνδεση των φυσικών (ορθομετρικών) υψομέτρων με το δυναμικό της βαρύτητας και η δυνατότητα προσδιορισμού του γεωμετρικού υψομέτρου με ακρίβεια, χρησιμοποιώντας δορυφορικές μεθόδους. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5, κάθε τυχαίο σημείο P στην επιφάνεια της Γης, θα έχει μια τιμή δυναμικού της βαρύτητας. Για αυτό το σημείο και για συγκεκριμένο ελλειψοειδές (κανονικού δυναμικού U_0) και γεωειδές (δυναμικού βαρύτητας W_0) μπορούν να υπολογιστούν το ορθομετρικό και το γεωμετρικό υψόμετρο μέσω των φυσικών και δορυφορικών μεθοδολογιών αντίστοιχα.



Σχήμα 1.5 Βασικές αδυναμίες υψομετρικών συστημάτων
[Πηγή : Sanchez., 2016]

Η διαδικασία ορθής δημιουργίας και υλοποίησης του συστήματος αναφοράς IHRF βρίσκεται ακόμα σε διαβούλευση με συμμετοχή των περισσότερων κρατών και εθνών παγκοσμίως.

1.7.3.2 Ενοποίηση υψομετρικών συστημάτων στην Ελλάδα

Στον Ελλαδικό χώρο η κύρια πρόκληση είναι η ενοποίηση του κυρίως ηπειρωτικού με τα ανεξάρτητα νησιωτικά υψομετρικά συστήματα. Τα κύρια προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν για να πραγματοποιηθεί η ενοποίηση αφορούν στο ότι:

- Το χωροσταθμικό δίκτυο της Ελλάδας δεν έχει επικαιροποιηθεί με κάποια νέα επαναμέτρηση και επίλυση από την εποχή της ολοκλήρωσης των μετρήσεων το 1986. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αδυναμία ελέγχου των διαφορών που προκύπτουν στα υψόμετρα μεταξύ των χωροσταθμικών αφετηριών των παλιρροιογράφων λόγω σχετικών μετακινήσεων των τεκτονικών πλακών, στις οποίες εδράζονται. Ελάχιστοι παλιρροιογράφοι παρακολουθούνται συνεχώς για κατακόρυφες μετακινήσεις, με τη χρήση μόνιμα εγκατεστημένου δέκτη GNSS.
- Η εφαρμογή της δορυφορικής αλτιμετρίας είναι εξαιρετικά απαιτητική στο παράκτιο περιβάλλον, και ειδικά του Αιγαίου Πελάγους, στο οποίο βρίσκονται διάσπαρτα εκατοντάδες νησιά και βραχονησίδες, καθώς τα δορυφορικά αλτίμετρα με RADAR παρουσιάζουν μεγάλο θόρυβο στις παρατηρήσεις τους.
- Ο υπολογισμός ενός θαλάσσιου βαρυτημετρικού γεωειδούς είναι αδύνατος βορειότερα του 37^{ου} παραλλήλου λόγω έλλειψης παρατηρήσεων θαλάσσιας βαρύτητας. [Μιντουράκης, 2020]

Ωστόσο, έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό την ενοποίηση των επιμέρους υψομετρικών συστημάτων των νησιών με εκείνο της ηπειρωτικής χώρας. [Andritsanos VD. κ.α, 2015] Σύμφωνα με αυτές, αναφορά γίνεται στη χρήση συστημάτων GNSS σε συνδυασμό με ένα λεπτομερές μοντέλο βαρύτητας, με σκοπό μέσω μετασχηματισμών και συνεχούς παρακολούθησης θέσεων σημείων ελέγχου, να δημιουργούνται

συγκεκριμένα χωρικά τεμάχια (blocks), τα οποία στην συνέχεια θα μπορούν να συνενώνονται μεταξύ τους. [Antonopoulos., κ.α., 2001]

Άλλη έρευνα αφορά στην αξιοποίηση και κοινή επίλυση των δεδομένων που προέρχονται από παλιρροιογράφους και παλιρροιόμετρα, από στοιχεία που αφορούν στο θαλάσσιο γεωειδές και από παρατηρήσεις που αφορούν στον προσδιορισμό των θαλάσσιων επιφανειών. [Vergos., κ.α., 2008]

Σε ότι αφορά στον Ελλαδικό χώρο, παρατηρείται ότι μια ολοκληρωμένη εφαρμογή της μεθόδου της χρονομετρικής χωροστάθμησης που λαμβάνει υπόψη εξ' ολοκλήρου το βαρυτικό πεδίο και τη γενική θεωρία της σχετικότητας, θα μπορούσε να δώσει λύση στην αρχική ενοποίηση του ηπειρωτικού συστήματος με τα νησιωτικά και στη συνέχεια του ενοποιημένου Ελληνικού με τα υπόλοιπα Ευρωπαϊκά και Διεθνή. [Κανελλόπουλος, 2021]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗΣ

2.1 Χρονομετρική Γεωδαισία

Οι σύγχρονες τεχνικές μέτρησης στη διαστημική Γεωδαισία, τη Μετρολογία και την Αστρονομία έχουν φτάσει σε ακρίβεια τέτοιας τάξης, που πλέον απαιτούν μοντελοποίηση και ανάλυση ακολουθώντας τις αρχές της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, αντί για τη μελέτη στο πλαίσιο της Νευτώνειας μηχανικής όπως γίνεται μέχρι στιγμής. Η γενική θεωρία της σχετικότητας βασίζεται στις ιδιότητες του τετραδιάστατου χωροχρόνου, στην αρχή της ισοδυναμίας, στις εξισώσεις πεδίου του Αϊνστάιν (Einstein) καθώς επίσης και στο αξίωμα της πεπερασμένης και αμετάβλητης τιμής της ταχύτητας του φωτός.

Η Σχετικιστική Γεωδαισία αποτελεί ένα αναδυόμενο πεδίο που αναδεικνύει το συνδυασμό των αρχών της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, με τη κλασική γεωδαιτική θεωρία. [Bjerhammar, 1985] Πιο συγκεκριμένα, αναδεικνύει τη σχετικιστική περιγραφή του χρόνου και της συχνότητας και ασχολείται με την αξιόπιστη μέτρηση και μοντελοποίηση της σχετικιστικής μεταβολής τους στο πεδίο βαρύτητας της Γης.

Η Χρονομετρική Γεωδαισία, που αποτελεί μέρος της ευρύτερης επιστημονικής κατηγορίας της σχετικιστικής Γεωδαισίας, αναφέρεται στη χρήση κατάλληλων σύγχρονων διατάξεων παρατήρησης είτε χρόνου είτε συχνότητας, για τον προσδιορισμό του μετρητικού χωροχρόνου. Ολόκληρη η επιστήμη βασίζεται στη σύγκριση των μετρούμενων συχνοτήτων τουλάχιστον δυο απομακρυσμένων μετρητικών διατάξεων, αξιοποιώντας το φαινόμενο της φασματικής βαρυτικής μετατόπισης (gravitational redshift) που ανακάλυψε ο Αϊνστάιν. Αν χρησιμοποιώντας γνώσεις για το πεδίο βαρύτητας της Γης μπορούν να προβλεφθούν αλλαγές συχνότητας μεταξύ κατάλληλων μετρητικών διατάξεων, μπορεί κανείς να αντιστρέψει το πρόβλημα και να αναρωτηθεί αν η μέτρηση της διαφοράς των συχνοτήτων μεταξύ μετρητικών διατάξεων μπορεί να βελτιώσει τις γνώσεις μας για το πεδίο βαρύτητας.

Αυτοί οι κλάδοι της Γεωδαισίας περιλαμβάνουν εκτός των προηγουμένων, την έρευνα σχετικά με την ανάλυση και περιγραφή του χωροχρόνου μέσω τετραδιάστατων συντεταγμένων, τη μελέτη και μοντελοποίηση των τροχιών, της ενέργειας και της δυναμικής κατάστασης τεχνητών κατασκευών στο διάστημα (δορυφόροι), καθώς και την περιγραφή και συνεισφορά της κοσμικής ακτινοβολίας (cosmic rays) σε γεωδαιτικές εφαρμογές. [Flurry, 2015]

2.2 Βασικές έννοιες της σχετικιστικής Γεωδαισίας

Το θεωρητικό υπόβαθρο της χρονομετρικής γεωδαισίας είναι η γενική θεωρία της σχετικότητας. Σε αυτήν, ο χώρος και ο χρόνος συνδέονται μαζί σε μια συνεχή οντότητα που ονομάζεται χωροχρόνος. Η γεωμετρία του χωροχρόνου καθορίζει πώς συμπεριφέρονται η ύλη και η ενέργεια, ενώ η ύλη και η κατανομή ενέργειας δείχνει πώς η γεωμετρία του χωροχρόνου μεταβάλλεται. Αυτή είναι μια μη γραμμική αλληλοεξάρτηση και η σχέση μεταξύ γεωμετρίας και ύλης / ενέργειας δίνεται από τις εξισώσεις του Αϊνστάιν. Η βαρύτητα δεν είναι πλέον δύναμη όπως στη Νευτώνεια θεωρία, αλλά η εκδήλωση της μεταβολής της γεωμετρίας του χωροχρόνου. Οι μεταβολές του χωροχρόνου προκαλούνται από συμβάντα, όπου η παρουσία ενέργειας / ύλης προκαλεί την καμπυλότητα της γεωμετρίας που περιγράφεται ως βαρύτητα. [Delva. κ.α., 2019]

Πιο συγκεκριμένα, η γενική θεωρία της σχετικότητας σχετίζεται με ένα μετρικό τανυστή, ο οποίος εξηγεί τη βαρύτητα μέσω της καμπυλότητας του τετραδιάστατου χωροχρόνου. Η καμπυλότητα του χωροχρόνου επηρεάζει την κίνηση της ύλης και αντίστοιχα η ύλη επηρεάζει την καμπυλότητα. Σύμφωνα με την αρχή της ισοδυναμίας, δεν υπάρχουν γενικά συστήματα αναφοράς στην περιγραφή της θεωρίας της σχετικότητας παρά μόνο τοπικά αδρανειακά συστήματα, τα οποία μπορούν να οριστούν σε οποιαδήποτε μικρή περιοχή του χωροχρόνου. Σε αντίθεση, η βαρύτητα στη Νευτώνεια μηχανική περιγράφεται ως η δύναμη που προκαλείται από την ύλη και σχετίζεται με το δυναμικό. [Minsler, κ.α., 1973]

Ο χωροχρόνος είναι το μαθηματικό μοντέλο που συνδυάζει τον χώρο και τον χρόνο σε μία συνέχεια. Ο χωροχρόνος συνήθως ερμηνεύεται ως συνδυασμός του ευκλείδειου χώρου τριών διαστάσεων με τον χρόνο ως μια επιπρόσθετη διάσταση. Στην κλασική μηχανική σε χαμηλές ταχύτητες, η χρήση της ευκλείδειας γεωμετρίας είναι κατάλληλη

καθώς ο χρόνος μπορεί να παραλείπεται από τη μαθηματική περιγραφή των υπό εξέταση συστημάτων, αφού είναι ο ίδιος παντού για τα αντικείμενα και τον παρατηρητή. Όταν όμως μελετώνται σχετικιστικές κινήσεις των σωμάτων, δηλαδή αναπτύσσονται ταχύτητες που προσεγγίζουν την ταχύτητα του φωτός, τότε ο χρόνος δεν μπορεί να παραλειφθεί από τη μαθηματική περιγραφή και το σημείο στο χώρο ανάγεται σε γεγονός στο χωροχρόνο. [Sklar., 1977]

Επομένως ο χωροχρόνος είναι ένα τετραδιάστατο συνεχές, στο οποίο τα σημεία, που ονομάζονται συμβάντα, μπορούν να εντοπιστούν από τις συντεταγμένες τους. Οι τιμές των συντεταγμένων μπορεί να είναι τέσσερις πραγματικοί αριθμοί, αλλά συνήθως εξετάζονται τρεις χωρικές συντεταγμένες και μία αντίστοιχη χρονική. Μια παγκόσμια γραμμή είναι η μοναδική διαδρομή που ταξιδεύει ένα αντικείμενο μέσω του χωροχρόνου. Οι παγκόσμιες γραμμές των ελεύθερα κινούμενων σωματιδίων είναι οι γραμμές με το ελάχιστο δυνατό μέτρο στον καμπύλο χωροχρόνο. Οι συντεταγμένες στο χωροχρόνο δεν έχουν καμία άμεση φυσική σημασία, όπου σύμφωνα με την αρχή της συμμεταβλητότητας, διαφορετικά μοντέλα αναφοράς μπορούν να επιλεγούν για τη μοντελοποίηση των παρατηρήσεων και για να περιγράψουν το αποτέλεσμα των πειραμάτων. Αυτή η ελευθερία επιλογής του συστήματος αναφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να απλοποιήσει τα μοντέλα ή να καταστήσει τις παραμέτρους που προκύπτουν πιο κατανοητές και επιστημονικά διαχειρίσιμες. [Soffel, κ.α., 2013]

Όσο αφορά στην ορολογία, είναι σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ των συστημάτων αναφοράς (reference system), τα οποία βασίζονται σε θεωρητικές εκτιμήσεις ή συμβάσεις, και στην ουσιαστική υλοποίηση τους που είναι το πλαίσιο αναφοράς (reference frame) [Wolf, 2001]. Επομένως οφείλει να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός μεταξύ των ιδίο- (proper) και των συντεταγμένων (coordinate) ποσοτήτων. Οι ιδιοποσότητες είναι εκείνες που προκύπτουν ως το άμεσο αποτέλεσμα τοπικών μετρήσεων (ιδιομήκος, ιδιοχρόνος), ενώ οι συντεταγμένες ποσότητες βασίζονται σε συμβατικές επιλογές (συντεταγμένες χωροχρόνου, συμβάσεις χρονικού συγχρονισμού). Επιπλέον, λόγω της καμπυλότητας του χωροχρόνου, η σχέση μεταξύ ιδιοποσοτήτων και συντεταγμένων ποσοτήτων δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από τη θέση τους στο χωροχρόνο. [Petit, κ.α., 2005]

Για να μελετηθούν επαρκώς οι σύγχρονες παρατηρήσεις στην Αστρονομία, Γεωδαισία και Μετρολογία, απαιτούνται σχετικιστικά

συστήματα αναφοράς. Η δημιουργία αυτών των συστημάτων πραγματοποιήθηκε αρχικά το 1991 από την Παγκόσμια Ένωση Αστρονομίας (IAU) σύμφωνα με την απόφαση Resolution A4. Στη συνέχεια η ίδια Ένωση, το 2000 σύμφωνα με το Resolution B1, επέκτεινε και ενίσχυσε το υπόβαθρο του προτύπου ώστε να περιλαμβάνει τις βασικές αρχές της σχετικιστικής θεωρίας. [Brumberg, κ.α., 2000][Soffel, κ.α., 2003]

2.3 Παρατήρηση χρόνου και συχνότητας

Αν και στη θεωρία της κλασσικής Γεωδαισίας οι συντεταγμένες αποτελούν το κύριο και σημαντικότερο παράγωγο, σύμφωνα με τη σχετικιστική αντίληψη οι συντεταγμένες δεν έχουν άμεση φυσική ερμηνεία. Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας θα πρέπει να αναλυθούν οι ορθές μετρητικές ποσότητες αντί για τις συντεταγμένες. Μια ορθή ποσότητα είναι το αποτέλεσμα μιας φυσικής μέτρησης σε ένα πραγματικό πείραμα, και περιγράφεται μαθηματικά από ένα βαθμωτό μέγεθος που παραμένει αμετάβλητο κάτω από γενικούς μετασχηματισμούς συντεταγμένων. Ωστόσο, ένα βαθμωτό μέγεθος δεν είναι αναγκαστικά φυσική μέτρηση. Για αυτό τα βαθμωτά μεγέθη οφείλουν να προσδιορίζονται σε ένα συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς που θεωρεί ο παρατηρητής. [Delva. κ.α., 2019]

Ως βαθμωτά μεγέθη στη γενική θεωρία της σχετικότητας νοούνται ο χρόνος και η συχνότητα. Η ακριβής μέτρηση του χρόνου και της συχνότητας είναι θεμελιώδους σημασίας για τη σύγχρονη επιστήμη και την τεχνολογία, με εφαρμογές που περιλαμβάνουν προσδιορισμούς φυσικών σταθερών, παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης και γεωδαιτικό προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών. Ο χρόνος είναι επίσης μία από τις επτά βασικές φυσικές ποσότητες στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων SI. [Denker, κ.α., 2017]

Για λόγους ευκολίας, σε αυτό το σημείο αναφέρονται δύο βασικές ιδιότητες που αφορούν στις διαφορετικές κατηγορίες χρόνου, οι οποίες παραμένουν ίδιες για όλη την έρευνα. [Landau, κ.α., 1974]

- Ο συντεταγμένος χρόνος (universe/coordinate time) είναι συμβατικός, ανεξάρτητος από το πεδίο βαρύτητας.
- Ο ιδιοχρόνος (proper time) έχει φυσική σημασία και εξαρτάται από το πραγματικό πεδίο βαρύτητας.

Στο πλαίσιο της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, είναι σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ των ποσοτήτων που είναι μετρήσιμες τοπικά και ποσοτήτων που βασίζονται σε κοινά αποδεκτές συμβάσεις. Πιο συγκεκριμένα, ένα ρολόι μπορεί να μετρήσει μόνο την τοπική ώρα, και ως εκ τούτου, ορίζει τη δική του χρονική κλίμακα που ισχύει μόνο κοντά σε αυτό, δηλαδή κάθε ρολόι μπορεί να προσδιορίσει τον ιδιοχρόνο (proper time). Από την άλλη, ο συντεταγμένος χρόνος (coordinate time) είναι εκείνος που ορίζεται για μια μεγαλύτερη περιοχή χώρου και συσχετίζεται άμεσα με τις συμβατικές συντεταγμένες του χωροχρονικού πλαισίου αναφοράς.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, ο χρόνος που προσδιορίζεται από ένα ρολόι που βρίσκεται στην ίδια δυναμική και κινητική κατάσταση με τον παρατηρητή, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως βαθμωτό μέγεθος και ονομάζεται ιδιοχρόνος. Αυτό οφείλεται στο ότι ο ιδιοχρόνος ενός ρολογιού καθορίζεται ουσιαστικά από την ταχύτητα του φωτός που παραμένει σταθερή. [Levy-Leblond, 1976] Επομένως ο ιδιοχρόνος είναι αμετάβλητος κάτω από γενικούς μετασχηματισμούς συντεταγμένων. Οι ιδιοχρόνοι για δύο διαφορετικά ρολόγια μπορούν να συγκριθούν μέσω τεχνικών μεταφοράς του χρόνου, ενώ οι ιδιοσυχνότητες μπορούν να συγκριθούν μέσω τεχνικών μεταφοράς συχνότητας.

Ο τομέας της επιστήμης που ασχολείται με τον προσδιορισμό, τη διατήρηση και τις ενδεχόμενες διορθώσεις των χρονικών πλαισίων είναι ο τομέας της Χρονικής Μετρολογίας. Η επιστήμη της χρονικής μετρολογίας παρέχει τις κατάλληλες προδιαγραφές για την περιγραφή της μονάδας του ιδιοχρόνου καθώς και τα σχετικά μοντέλα για την χρονική κλίμακα του συντεταγμένου χρόνου.

Η έννοια του ταυτοχρονισμού δεν αποτελεί βασική συνθήκη της θεωρίας της σχετικότητας, επομένως θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια παραδοχή που ορίζει ότι δύο φαινόμενα θα θεωρείται ότι πραγματοποιούνται την ίδια χρονική στιγμή, σε ένα συγκεκριμένο χωροχρονικό πλαίσιο αναφοράς, μόνο εάν έχουν ίδιες τιμές συντεταγμένου χρόνου σε αυτό. [Klioner, 1992]

Ο όρος συγχρονισμός αφορά στη μελέτη του χρόνου και είναι εννοιολογικά ταυτόσημη έννοια με τον όρο συντονισμός δύο ρολογιών που αφορά στην μελέτη της συχνότητας. Οι συγκρίσεις χρόνου και συχνότητας συνδέονται, αλλά κάθε μία από τις δύο προσεγγίσεις οδηγούν σε διαφορετικές πειραματικές τεχνικές. Συνήθως η μεταφορά του χρόνου είναι πιο δύσκολη, διότι είναι απαραίτητη η γνώση πολλών μηχανισμών

που συμμετέχουν στον υπολογισμό της ακρίβειας προσδιορισμού του. Αυτοί οι μηχανισμοί συχνά μπορούν να παρακαμφθούν και να μην αναλυθούν στη μεταφορά συχνοτήτων.

2.3.1 Σχέση μεταξύ ιδιοχρόνου και συντεταγμένου χρόνου

Για τη δημιουργία και υλοποίηση μίας παγκόσμιας χρονικής αφηρητής και κλίμακας, καθοριστικό ρόλο κατέχουν ένα γεωκεντρικό ουράνιο σύστημα αναφοράς καθώς και το αντίστοιχα ορισμένο σύστημα γεωκεντρικού χρόνου (Geocentric Coordinate Time -TGC).

Η σχέση μεταξύ του ιδιοχρόνου και του συντεταγμένου χρόνου μπορεί να προκύψει στη γενικότητα, μέσω του γραμμικού σχετικιστικού μεγέθους ds και από τον αντίστοιχο μετρικό τανυστή g_{ij} . Οι τιμές και των δύο αυτών μεγεθών δεν παραμένουν σταθερές παγκοσμίως. Επομένως οι παρατηρήσεις του ιδιοχρόνου μεταξύ δύο συμβάντων εξαρτώνται καταρχήν από τη διαδρομή που ακολουθεί η μετρητική διάταξη μεταξύ της χωρικής θέσης των δύο αυτών συμβάντων.

Για τη σχετικιστική θεωρία, στα αδρανειακά συστήματα αναφοράς και για ένα αμετάβλητο απειροελάχιστο χρονικό διάστημα, η διαδρομή μεταξύ δυο συμβάντων (i,j) ορίζεται σε ένα τετραδιάστατο σύστημα συντεταγμένων και προσδιορίζεται από την εξίσωση 2.1. [Minser., κ.α., 1973]

$$ds_{ij}^2 = c^2 dt^2 - dx_{ij}^2 - dy_{ij}^2 - dz_{ij}^2 \quad (2.1)$$

Όπου, c : η ταχύτητα του φωτός
 t : η τιμή του συντεταγμένου χρόνου
 x,y,z : οι συντεταγμένες θέσης

Εκφράζοντας την εξίσωση 2.1, χρησιμοποιώντας χωροχρονικές συντεταγμένες και αξιοποιώντας τις ιδιότητες του μετρικού τανυστή, προκύπτει η εξίσωση 2.2, που εισάγει την τιμή του ιδιοχρόνου.

$$ds_{ij}^2 = g_{ij} \cdot dx_i \cdot dx_j = -c^2 dt^2 \quad (2.2)$$

Όπου, τ : η τιμή του ιδιοχρόνου κατά μήκος της κοσμικής γραμμής (world line).

g_{ij} : ο μετρικός τανυστής όπως παρουσιάζεται με την μορφή συμμετρικού πίνακα.

Λαμβάνοντας υπόψη, τις βασικές συμβάσεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, η εξίσωση 2.2 λαμβάνει την μορφή.

$$\left(\frac{d\tau}{dt}\right)^2 = -g_{00} - 2g_{0i} \frac{1}{c} \frac{dx_i}{dt} - g_{ij} \frac{dx_i}{dt} \frac{dx_j}{dt} = -g_{00} - 2g_{0i} \frac{u^i}{c} - g_{ij} \frac{u^i u^j}{c^2} \quad (2.3)$$

Όπου: $u^i(t)$: είναι η συντεταγμένη ταχύτητα κατά τη χωρική μετάβαση μεταξύ των δύο συμβάντων (i,j).

Επομένως για να πραγματοποιηθεί συσχέτιση μεταξύ του ιδιοχρόνου και του γεωκεντρικού συντεταγμένου χρόνου, αρκεί να χρησιμοποιηθεί ο τανυστής εκφρασμένος στο κατάλληλο σχετικιστικό σύστημα αναφοράς. Έτσι, σύμφωνα με το πρότυπο B1 της Παγκόσμιας Ένωσης Αστρονομίας, η σχέση 2.3 διαμορφώνεται τελικά ως εξής.

$$\frac{d\tau}{dT_{(TGC)}} = 1 - \frac{1}{c^2} \left(W + \frac{u^2}{2} \right) + O(c^{-4}) \quad (2.4)$$

Όπου, W : η τιμή του δυναμικού της βαρύτητας

u : η τιμή της συντεταγμένης ταχύτητας στο σχετικιστικό σύστημα αναφοράς

Ο τελικός όρος της εξίσωσης 2.4 υποδηλώνει ότι όλοι οι εναπομείναντες όροι της τάξης του c^{-4} , μπορούν να παραλειφθούν.

Από την εξίσωση 2.4 συμπεραίνεται ότι το χρονικό διάστημα ιδιοχρόνου $d\tau$ που χωρίζει δύο συμβάντα είναι μικρότερο από το αντίστοιχο συντεταγμένο διάστημα dT κατά ένα ποσό, που εξαρτάται από το δυναμικό της βαρύτητας (W) (μηδέν στο άπειρο και αυξανόμενο όσο προσελκύονται οι μάζες) και την ταχύτητα (u) σε σχέση με το επιλεγμένο σύστημα αναφοράς. Κατά συνέπεια, σε σύγκριση με το συντεταγμένο χρόνο, οι μετρητικές διατάξεις (ρολόγια) λειτουργούν πιο αργά (χτυπούν πιο αργά, αναγράφουν λιγότερο χρόνο) όταν κινούνται ή επηρεάζονται από τη βαρύτητα. Η επιβράδυνση αυτή του χρόνου ονομάζεται χρονική διαστολή (time dilation) και μπορεί να διαχωριστεί σε δύο συνιστώσες. [Zych, 2017] Σε μια (σχετική) ταχύτητα και σε μια διαστολή του βαρυτικού χρόνου. Μερικές φορές ονομάζονται επίσης ειδική και γενική σχετικιστική διαστολή του χρόνου (gravitational time dilation) αντίστοιχα, [Austin, 2017] όπου η ειδική σχετικιστική χρονική

διαστολή είναι μετρήσιμη, αξιοποιώντας τη δεύτερης τάξης μετατόπιση του Doppler. [Pikovski, κ.α., 2017]

Αντίστοιχα, για μία μετρητική διάταξη που βρίσκεται στο άπειρο (επομένως θα ισχύει ότι η ταχύτητα και το δυναμικό της βαρύτητας θα ισούται με μηδέν) και για μία άλλη απομακρυσμένη διάταξη που βρίσκεται σε ηρεμία, η διαφορά των ενδείξεων του ιδιοχρόνου θα ταυτίζεται σχεδόν με την τιμή του συντεταγμένου χρόνου ($dt_{\infty}=dT$). Θεωρητικά αυτός είναι και ένα τρόπος παρατήρησης του συντεταγμένου χρόνου. [Burns, κ.α., 2017]

2.3.2 Χρονικές κλίμακες

Όπως περιγράφεται στην εξίσωση 2.4, για μία σύγχρονη διάταξη μέτρησης χρόνου τοποθετημένη στη φυσική γήινη επιφάνεια σε ηρεμία, ο προσδιορισμός του ιδιοχρόνου εξαρτάται από το δυναμικό της βαρύτητας (άθροισμα του δυναμικού της έλξης και της φυγόκεντρου), το οποίο προκαλεί σχετικιστική αλλαγή της συχνότητας της τάξης του $7 \cdot 10^{-10}$. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε 22ms χρονικής μετατόπισης ανά έτος εκφραζόμενη στο σύστημα γεωκεντρικού συντεταγμένου χρόνου (TGC).

Για να αποφευχθεί αυτή η μαθηματική αδυναμία έκφρασης χρονικών διαφορών κοντά ή πάνω στην επιφάνεια της Γης, θεσπίστηκε ο Γήινος χρόνος (Terrestrial Time – TT). Ο γήινος χρόνος διαφέρει από το γεωκεντρικό συντεταγμένο χρόνο κατά μία συγκεκριμένη σταθερή τιμή, η οποία προσδιορίστηκε από την Παγκόσμια Ένωση Αστρονομίας (IAU) το 1991. Σύμφωνα με την ανάλυση, η σταθερή τιμή είναι άμεσα συνδεδεμένη με το δυναμικό της βαρύτητας αναφοράς W_0 , επομένως είναι μία σταθερά που ο προσδιορισμός της δεν εμπεριέχει αβεβαιότητα. [Guinot, κ.α., 2005]

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι ο γήινος χρόνος είναι μία θεωρητική συμβατική χρονική κλίμακα, η οποία μπορεί να έχει διαφορετικές λειτουργικές υλοποιήσεις, όπως η χρονική κλίμακα του ατομικού χρόνου (TAI), η χρονική κλίμακα του παγκόσμιου συστήματος δορυφορικού εντοπισμού (GPS Time) και ο παγκόσμιος συντονισμένος χρόνος (UTC). Κάθε μία από αυτές τις υλοποιήσεις διαφέρουν από τον γήινο χρόνο κατά συγκεκριμένα και ξεχωριστά χρονικά διαστήματα (time offsets). Πιο συγκεκριμένα, ο συντονισμένος παγκόσμιος χρόνος (UTC) έχει την ίδια συχνότητα με τον ατομικό (TAI). Ωστόσο, διαφέρουν μεταξύ τους κατά

έναν ακέραιο αριθμό δευτερολέπτων. Αυτή η διαφορά αυξάνεται όταν συμβαίνουν προσθήκες δευτερολέπτων (leap seconds). Όταν είναι απαραίτητο, προστίθεται ένα δευτερόλεπτο στον χρόνο (UTC) είτε στις 30 Ιουνίου είτε στις 31 Δεκεμβρίου. [Guinot, 2011][Arias, 2005]

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, έστω και εάν μερικές τοπικές υλοποιήσεις του παγκόσμιου συντονισμένου χρόνου UTC ανανεώνονται και αναλύονται σε πραγματικό χρόνο, δεν συμβαίνει το ίδιο και με τον ατομικό χρόνο. [Petit, κ.α., 2014]

Ο ατομικός χρόνος δεν έχει προσδιοριστεί ποτέ μεμονωμένα, αλλά προκύπτει ως σταθμισμένος μέσος όρος που υπολογίζεται από τις μετρήσεις τουλάχιστον 450 ρολογιών που τοποθετούνται χωρικά σε όλη την Γη. Η χρονική κλίμακα που προκύπτει στη συνέχεια μεταφράζεται σε ένα συνδυασμό προτύπων συχνότητας, ύστερα από το σχετικιστικό μετασχηματισμό από τον ιδιοχρόνο σε συντεταγμένο χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται διόρθωση λόγω της σχετικιστικής μετατόπισης της τάξης του 10^{-13} ανά χιλιόμετρο υψομέτρου, ώστε ο ατομικός χρόνος να αποτελεί μια ολοκληρωμένη πρακτική βάση του γήινου χρόνου, συσχετισμένη με ένα ιδεατό ρολόι τοποθετημένο στην επιφάνεια που έχει τιμή δυναμικού βαρύτητας W_0 . Βέβαια, η υλοποίηση του ατομικού χρόνου εξαρτάται κάθε φορά από την τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα του προσδιορισμού του φαινομένου της σχετικιστικής μετατόπισης και των προτύπων συχνότητας. [Pavlis, κ.α., 2003][Weiss, κ.α., 2017]

Με σκοπό να επιλυθεί η συνθήκη της υλοποίησης του ατομικού χρόνου πλέον δημιουργούνται σύγχρονα παγκόσμια συστήματα δικτύων ρολογιών, που θα είναι σε θέση να υπολογίζουν αυτόνομα και να ενημερώνουν τον ατομικό χρόνο. [Wu, κ.α., 2019]

2.3.3 Το φαινόμενο της βαρυτικής φασματικής μετατόπισης

Η διαστολή του χρόνου σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τη βαρυτική φασματική μετατόπιση (gravitational redshift effect). Σύμφωνα με αυτή, ο ιδιοχρόνος μπορεί να προσδιοριστεί, από το συνδυασμό ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος (φως), που ταξιδεύει από έναν πομπό (σημείο A) σε έναν δέκτη (σημείο B), και δύο ιδανικά (μηδενικής αβεβαιότητας) πρότυπα συχνότητας (ρολόγια) στα A και B αντίστοιχα. [Schutz, 2003]

Τα ιδανικά πρότυπα συχνότητας (ρολόγια) οφείλουν να εμφανίζουν την ίδια ώρα υπό τις ίδιες συνθήκες. Οι σύγχρονες διατάξεις ρολογιών αφορούν σε ατομικά ή πυρηνικά ρολόγια, τα οποία βασίζονται στην εκπομπή ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε μια συγκεκριμένη (φυσική) συχνότητα. [Cheng, 2005] [Lambourne, 2010]

Γενικότερα, η γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν προβλέπει ότι το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας θα επιμηκυνθεί καθώς απομακρύνεται από ένα βαρυτικό πεδίο. Τα φωτόνια πρέπει να καταναλώνουν ενέργεια για να διαφύγουν, αλλά ταυτόχρονα πρέπει πάντα να ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, επομένως αυτή η απώλεια ενέργειας οφείλεται στην αλλαγή συχνότητας (εάν η ενέργεια του φωτονίου μειωθεί, η συχνότητα μειώνεται επίσης). Αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση του μήκους κύματος του φωτονίου, ή αλλιώς σε φασματική μετατόπιση στο κόκκινο άκρο του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτό το αποτέλεσμα επιβεβαιώθηκε σε εργαστηριακά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1960. [Pound, κ.α, 1959] [Will, 1993]

Το φαινόμενο της φασματικής μετατόπισης μπορεί να επεξηγηθεί θεωρώντας ένα στατικό βαρυτικό πεδίο (όπου ο χρόνος δεν έχει επιρροή στις μετρήσεις) καθώς και ένα στατικό σύστημα πομπού και δέκτη. Για την εννοιολογικά καλύτερη μοντελοποίηση της επεξήγησης θεωρείται επίσης ότι ο πομπός και ο δέκτης έχουν τοποθετηθεί ό ένας ψηλότερα από τον άλλο κατά μήκος της ίδιας κατακορύφου. Υπό αυτές τις συνθήκες (σταθερό βαρυτικό πεδίο, στατικό σενάριο), οι τροχιές διαδοχικών κυμάτων του εκπεμπόμενου σήματος είναι πανομοιότυπες (το διάστημα μεταξύ εκπομπής και λήψης (παρατήρησης) διαδοχικών κορυφών κυμάτων είναι το ίδιο), και ως εκ τούτου μπορούν εκφραστούν σε ενιαίο χρόνο. [Moritz, κ.α., 1993]

Ωστόσο, τα ιδανικά πρότυπα συχνότητας στα σημεία των εκπομπών (A) και της λήψης (B) των κορυφών του κύματος προσδιορίζουν τους αντίστοιχους ιδιοχρόνους. Επομένως αξιοποιώντας την εξίσωση 2.4, σε ό,τι αφορά στη σχέση μεταξύ ιδιοχρόνου και συντεταγμένου χρόνου, καθώς επίσης και ότι το πρότυπο συχνότητας που βρίσκεται χαμηλότερα λειτουργεί πιο αργά από το αντίστοιχο πρότυπο που βρίσκεται υψηλότερα δημιουργείται η σχέση 2.5.

$$\frac{\frac{d\tau_{\text{ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ}}}{dt_{\text{ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ}}}}{\frac{d\tau_{\text{ΕΚΜΠΟΜΠΗΣ}}}{dt_{\text{ΕΚΜΠΟΜΠΗΣ}}}} = \frac{d\tau_{\text{ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ}}}{d\tau_{\text{ΕΚΜΠΟΜΠΗΣ}}} = \frac{f_{\text{ΕΚΜΠΟΜΠΗΣ}}}{f_{\text{ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ}}} \quad (2.5)$$

Όπου, $f_{\text{ΕΚΜΠΟΜΠΗΣ}}$, $f_{\text{ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ}}$ ($1/dt$): οι μετρούμενες συχνότητες του φωτός όπως παρατηρείται κατά την μετάβαση από το σημείο Α στο σημείο Β από τα διακριβωμένα πρότυπα συχνότητας.

Μελετώντας ταυτόχρονα τα συμπεράσματα των εξισώσεων 2.4 και 2.5, προκύπτει η σχέση που συνδέει την υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο προτύπων συχνότητας στα σημεία Α,Β με την αντίστοιχη διαφορά της συχνότητας.

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ}}} = 1 - \frac{f_{\text{ΕΚΜΠΟΜΠΗΣ}}}{f_{\text{ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ}}} = \frac{W_{\text{ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ}} - W_{\text{ΕΚΜΠΟΜΠΗΣ}}}{c^2} + O(c^{-4}) \approx -g \frac{H}{c^2} \quad (2.6)$$

Όπου, g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

H : η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των σημείων Α,Β μετρούμενη από το χαμηλότερο προς το ψηλότερο σημείο.

Εδώ αξίζει να αναφερθεί, ότι η παραπάνω εξίσωση ισχύει για δύο αυθαίρετα σημεία με αντίστοιχες τιμές δυναμικού της βαρύτητας, και εξαρτάται (σε ορισμένη έκταση) με την υπόθεση ότι και τα δύο σημεία ανήκουν στην ίδια κατακόρυφο. Επομένως, τα συμπεράσματα μπορούν να επεκταθούν και για δύο αυθαίρετα σημεία που βρίσκονται σε δύο αντίστοιχες διαφορετικές ισοδυναμικές επιφάνειες. [Schutz, 2009]

2.4 Σχετικιστικά συστήματα αναφοράς

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η επιλογή ενός συστήματος αναφοράς αποτελεί σημαντικό μέρος της ανάλυσης. Έχουν εξεταστεί διάφορες προσεγγίσεις για τον ορισμό των σχετικιστικών συστημάτων αναφοράς. Ουσιαστικά, ένα σχετικιστικό σύστημα αναφοράς ορίζεται από τον προσδιορισμό των συντελεστών ενός μετρικού τανυστή σε αυτό, σε συνδυασμό με τον προσδιορισμό της συμβατικής χωρικής μετάθεσης και στροφής καθώς και της συμβατικής μετάθεσης του χρόνου (η συνιστώσα του προσανατολισμού του χρόνου είναι ασήμαντη). Ο

μετρικός τανυστής αποτελεί μια λύση των εξισώσεων του Αϊνστάιν στην προσέγγιση χαμηλής ταχύτητας και ασθενούς βαρυτικής περιοχής, για ένα σύνολο N σωμάτων. [Schwarzschild, 1916]

Μέχρι στιγμής δύο είναι τα σχετικιστικά συστήματα αναφοράς που έχουν αναπτυχθεί, το Solar System Barycentric Celestial Reference System (BCRS) και το Geocentric Celestial Reference System (GCRS). [Kopeikin, 1988]

Το BCRS χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της διάδοσης του φωτός από τα μακρινά ουράνια αντικείμενα και της κίνησης των σωμάτων μέσα στο Ηλιακό Σύστημα. Το GCRS χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των φαινομένων που διαδραματίζονται κοντά στη Γη, όπως το πεδίο βαρύτητας, η κίνηση των τεχνητών δορυφόρων που περιστρέφονται γύρω από τη Γη ή ακόμα και αυτοτελώς η περιστροφή της Γης. [Damour κ.α., 1991-2]

Η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ αυτών των συστημάτων αναφοράς με τα αντίστοιχα συστήματα που χρησιμοποιούνται στην κλασική Γεωδαισία, και βασίζονται στις αρχές του Νεύτωνα, διαμορφώνεται από τη θεωρία της σχετικότητας. Η θεωρία της γενικής σχετικότητας προβλέπει και συμπεριλαμβάνει τις επιπτώσεις της σχετικιστικής συστολής στις χωρικές διαστάσεις και στη διαστολή του χρόνου που προκαλούνται από τη σχετική τροχιακή κίνηση του GCRS σε σχέση με το BCRS και την παρουσία του βαρυτικού πεδίου του Ήλιου, της Σελήνης και των άλλων πλανητών. Εξαιτίας αυτού, επηρεάζονται οι χωρικές συντεταγμένες μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς, οι οποίες εμφανίζουν περιοδικές σχετικές μεταβολές λόγω των συνθηκών του Λόρεντζ (Lorentz) και του Αϊνστάιν, της τάξης του 10^{-18} . [Kopeikin κ.α., 2011]

Επομένως, το BCRS μπορεί να θεωρηθεί ως ένα παγκόσμιο σχεδόν αδρανειακό σύστημα, ενώ το GCRS μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τοπικό σύστημα. Ενώ τα BCRS και GCRS παρέχουν το γενικό εννοιολογικό (σχετικιστικό) πλαίσιο για ένα βαρυκεντρικό και ένα γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, ο απόλυτος (χωρικός) προσανατολισμός από οποιοδήποτε από τα δύο συστήματα δεν ήταν δυνατόν να οριστεί και να υλοποιηθεί με πλήρη σαφήνεια. Η συνθήκη αυτή διορθώθηκε δημιουργώντας και εφαρμόζοντας το Διεθνές Ουράνιο Σύστημα Αναφοράς (ICRS), όπως συνιστάται στις αποφάσεις IAU B2 1997 και B2 2006. Το ICRS δημιουργήθηκε από την Διεθνή Υπηρεσία Περιστροφής της Γης (IERS) και υλοποιείται από το International Celestial Reference

Frame (ICRF) ως ένας κατάλογος των θέσεων έξω-γαλαξιακών πηγών ραδιοσημάτων (quasars) που παρατηρήθηκαν από συμβολομετρία πολύ μεγάλων αποστάσεων (VLBI). [Muller, κ.α., 2008]

Το GCRS παρέχει επίσης τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά και ιδιότητες για το Παγκόσμιο Επίγειο Σύστημα Αναφοράς (ITRS) καθώς τα δύο συστήματα διαφέρουν μόνο από μια (εξαρτώμενη από το χρόνο) χωρική περιστροφή. Αντίστοιχα ο χρόνος του συστήματος ITRS συμπίπτει με το γεωκεντρικό χρόνο TCG (Geocentric Coordinate Time).[Kaplan, 2005]

Το ITRS είναι ένα σύστημα που ακολουθεί την περιστροφή της Γης στην ημερήσια κίνησή της στο διάστημα, και οι συντεταγμένες σημείων στην επιφάνεια της Γης υφίστανται μόνο μικρές αλλαγές με το χρόνο (λόγω γεωφυσικών επιδράσεων που σχετίζονται με τις κινήσεις των τεκτονικών πλακών). Εξαιτίας των παραπάνω συνθηκών, το ITRS είναι μια βολική επιλογή για όλους τους κλάδους που απαιτούν επίγειες θέσεις, όπως η γεωδαισία, υπηρεσίες πλοήγησης και τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών. [Boucher, κ.α., 2001]

2.4.1 Είδη επιφανειών αξιοποιούμενων από τη Σχετικιστική Θεωρία

Ο γεωμετρικός τύπος των σημείων όπου το δυναμικό της βαρύτητας είναι σταθερό, αποκαλείται ισοδυναμική επιφάνεια του γήινου δυναμικού W (equipotential surface). Για διαφορετικές τιμές της σταθεράς προκύπτουν διαφορετικές ισοδυναμικές επιφάνειες, κάτι ανάλογο με τις ισοϋψείς ενός τοπογραφικού χάρτη, οι οποίες έχουν ορισμένες γενικές ιδιότητες:

- Δεν τέμνονται μεταξύ τους (δηλαδή, ένα σημείο δεν μπορεί να είναι σε δύο επιφάνειες με διαφορετικές τιμές δυναμικού) και διατάσσονται σε επαλληλία γύρω από τη Γη.
- Είναι κλειστές, συνεχείς, αλλά μαθηματικά πολύπλοκες επιφάνειες.
- Είναι ομαλές καμπύλες επιφάνειες, δηλαδή η κυρτότητα τους μεταβάλλεται ομαλά, εκτός στα σημεία όπου η πυκνότητα του υπεδάφους αλλάζει απότομα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φυγόκεντρο δυναμικό είναι αναλυτική συνάρτηση και συνεπώς οι ασυνέχειες του βαρυτικού δυναμικού ταυτίζονται με εκείνες του ελκτικού δυναμικού.

Το τελλουροειδές είναι η επιφάνεια της οποίας το κανονικό δυναμικό (U) είναι ίσο με το πραγματικό δυναμικό της βαρύτητας (W) στην επιφάνεια της Γης. Το τελλουροειδές δεν είναι ισοδυναμική επιφάνεια. Το τελλουροειδές καθιερώθηκε για να αποφευχθεί ο περίπλοκος προσδιορισμός της τοπογραφικής πυκνότητας και της κατακόρυφης συνιστώσας της βαρύτητας, τα οποία είναι απαραίτητα συστατικά στη μοντελοποίηση του κλασσικού γεωειδούς. [Grafarend., 1978]

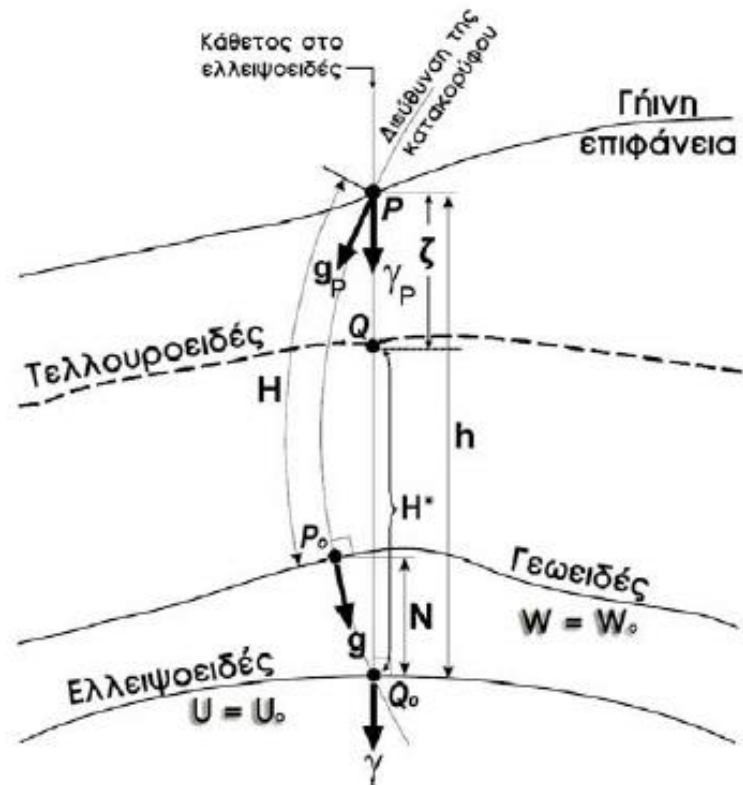
Το σχεδόν-γεωειδές (quasi-geoid) είναι επιφάνεια παράλληλη με το τελλουροειδές λαμβάνοντας υπόψη τη μέση στάθμη της θάλασσας. Το σχεδόν-γεωειδές ταυτίζεται στο μεγαλύτερο ποσοστό του με το γεωειδές πάνω από τους ωκεανούς. Ωστόσο, οι σχετικές διαφορές μεταξύ των δύο αυτών γεωειδών ενδέχεται να φτάσουν σε τιμές έως και ενός μέτρου σε ορεινές περιοχές. [Xiao-ping, 2006]

Το τελλουροειδές και το σχεδόν-γεωειδές αποτελούν δύο επιφάνειες αναφοράς που εξυπηρετούν καλύτερα τις μοντέρνες γεωδαιτικές θεωρίες (όπως τη επίλυση των γεωδαιτικών συνωριακών προβλημάτων) υπολογισμού του σχήματος της Γης. (σχήμα 2.2)

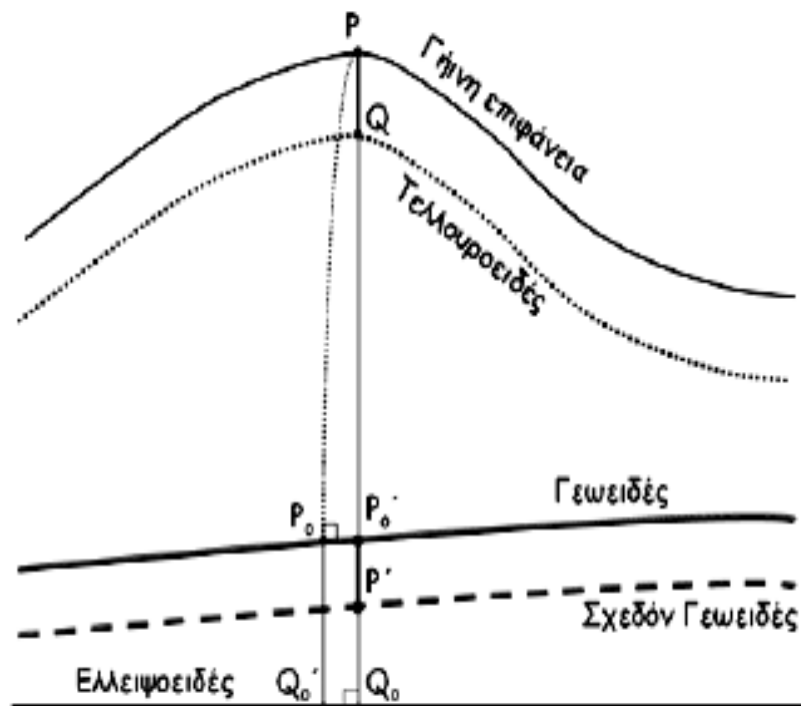
Το κανονικό ελλειψοειδές είναι εκείνο το συγκεκριμένο ελλειψοειδές για το οποίο θεωρείται ότι $U_0=W_0$, ότι δηλαδή εξ ορισμού είναι μια από τις ισοδυναμικές επιφάνειες του κανονικού πεδίου, στην οποία το κανονικό δυναμικό είναι ίσο με το δυναμικό του πραγματικού πεδίου βαρύτητας στο γεωειδές. [Δεληκαράογλου., 2007]

Το σχετικιστικό γεωειδές είναι η επιφάνεια όπου τα ακριβή ρολόγια λειτουργούν με την ίδια συχνότητα και είναι πιο κοντά στη μέση στάθμη της θάλασσας. [Bjerhammar, 1985] Αυτός ο ορισμός του σχετικιστικού γεωειδούς ισχύει τόσο στους ωκεανούς όσο και στις ηπείρους. Το γεωειδές μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα οπουδήποτε είναι προσβάσιμο. Το γεωειδές που προκύπτει από τις παρατηρήσεις χρόνου – συχνότητας αντιπροσωπεύει την πραγματική ισοδυναμική επιφάνεια λαμβάνοντας υπόψη και όλες τις παραμέτρους που αφορούν στην φυσική πραγματικότητα.

Το χρονομετρικό γεωειδές είναι η ισοχρονομετρική επιφάνεια που προκύπτει αποκλειστικά από μετρήσεις χρόνου και βαρύτητας, και είναι πιο κοντά στη μέση στάθμη της θάλασσας. [Soffel., κ.α., 1988]



Σχήμα 2.1 Τυπική τομή εδάφους – τελλουροειδούς – γεωειδούς – ελλειψοειδούς



Σχήμα 2.2 Προβολές ενός σημείου της ΦΓΕ στις επιφάνειες αναφοράς υψομέτρων

2.4.2 Παραδοχές σχετικιστικών συστημάτων

Συμβατικά, η πιθανή διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων A και B που βρίσκονται στην επιφάνεια της Γης καθορίζεται από τη βαρυτημετρία και την υψομετρία [Heiskanen, κ.α., 1967]. Το μειονέκτημα είναι ότι είναι σχεδόν αδύνατο να συνδεθούν αυτά τα δύο σημεία στην περίπτωση που βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση, επειδή είναι γνωστό ότι η δυναμική επιφάνεια της μέσης στάθμης της θάλασσας δεν είναι ισοδυναμική επιφάνεια. Σε μια άλλη ανάλυση, εάν δοθούν δεδομένα βαρύτητας στην επιφάνεια της Γης, μπορεί να προσδιοριστεί η πιθανή διαφορά μεταξύ δύο σημείων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Stokes [Bhattacharyya, κ.α., 2009] ή τη μέθοδο Molodensky [Trojanowicz κ.α., 2017].

Σε αυτές τις περιπτώσεις προσδιορίζεται πλήρως το πεδίο βαρύτητας και κατά συνέπεια θα μπορούσε να προσδιοριστεί η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο αυθαίρετων σημείων. Ωστόσο, η μέθοδος Stokes είναι προσεγγιστική λόγω της απαίτησης ότι τα μετρούμενα δεδομένα βαρύτητας πρέπει να αναχθούν στο γεωειδές, ενώ η μέθοδος Molodensky είναι περίπλοκη διότι ο προσδιορισμός πραγματοποιείται στο σχεδόν-γεωειδές. Ο μετασχηματισμός από σχεδόν-γεωειδές σε γεωειδές επιβάλλει και πάλι μετρήσεις συμβατικής υψομετρίας, οι οποίες αντιμετωπίζουν δυσκολίες στη σύνδεση δύο σημείων που βρίσκονται σε διαφορετικές ηπείρους.

Επομένως, εφαρμόζοντας τη συμβατική προσέγγιση, είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθεί ένα ενοποιημένο παγκόσμιο σύστημα δεδομένων (με επαρκή ακρίβεια). Για να αποφευχθεί αυτή η δυσκολία, μέσω της σχετικιστικής θεωρίας, διατυπώθηκε ότι η γεωδυναμική διαφορά μεταξύ δύο αυθαίρετων σημείων A και B μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας δύο ακριβή ρολόγια τοποθετημένα στα A και B αντίστοιχα, με βάση τη θεωρία της γενικής σχετικότητας.

Πιο συγκεκριμένα δεχόμενοι τη γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν, διαπιστώνεται ότι η σχέση που δημιουργείται μεταξύ του δυναμικού (W) και των συχνοτήτων των ρολογιών (f) μεταξύ δύο τυχαίων σημείων A και B, περιγράφεται από την εξίσωση 2.7.

$$\frac{f_A^2}{f_B^2} = (1 - 2\frac{W_A}{c^2}) / (1 - 2\frac{W_B}{c^2}) \quad (2.7)$$

Η εξίσωση 2.7 μπορεί να απλοποιηθεί σε περίπτωση που το βαρυτικό πεδίο είναι ασθενές και να χρησιμοποιηθεί η προσεγγιστική σχέση όπως περιγράφεται από την εξίσωση 2.8.

$$W_A - W_B = (f_A - f_B)c^2 f^{-1} \quad (2.8)$$

Όπου, c : Η ταχύτητα του φωτός

$f = (f_A + f_B)/2$ Η μέση τιμή της μετρούμενης συχνότητας

Με αυτήν την προσέγγιση μπορούν να προσδιοριστούν οι γεωδυναμικές διαφορές μετά τη μέτρηση των διαφορών συχνότητας στα δύο σημεία A,B.

2.5 Χρονομετρική Χωροστάθμιση

Μέθοδοι όπως η συμβολομετρία VLBI (Very Large Baseline Interferometry) και το σύστημα δορυφορικού εντοπισμού (GNSS) δίνουν εξαιρετικές γεωμετρικές συντεταγμένες αλλά δεν παρέχουν δυναμικές πληροφορίες. Οι διαφορές δυναμικού μπορούν να ληφθούν με σχετικιστική προσέγγιση. [Bjerhammar, 1985]. Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται σε τεχνικές που κάνουν χρήση σημάτων που μεταδίδονται μέσω της ατμόσφαιρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μέθοδοι να είναι εξαιρετικά απαιτητικές σε ότι αφορά στις διορθώσεις για μη σχετικιστικές πηγές σφαλμάτων. Τυπικά αναφέρεται ότι η συνολική καθυστέρηση στην ιονόσφαιρα είναι περίπου 30m κατά τη διάρκεια της ημέρας μέσω της χρήσης μιας μέτρησης συχνότητας 400 MHz. [Campbell, κ.α., 1982]

Μια σχετικιστική προσέγγιση ωστόσο είναι πολύ περισσότερο απαιτητική σε σχέση με οποιαδήποτε μετάδοση σημάτων. Η καθυστέρηση μειώνεται όσο αυξάνεται η τιμή της συχνότητας, όπου οι αντίστοιχες συχνότητες φορέα άνω των 50 GHz οφείλουν να χρησιμοποιούνται για να αποφευχθούν οι περισσότερες πηγές αβεβαιότητας που οφείλονται στην ιονόσφαιρα. Ωστόσο, τέτοιες συχνότητες δεν είναι διαθέσιμες για γεωδαιτικές εργασίες, και επιπλέον ένα σύστημα που απαιτεί δορυφορική υποστήριξη χρειάζεται πολύ χρόνο να σχεδιαστεί, να αναπτυχθεί και να τεθεί σε λειτουργία.

Θεωρήθηκε επομένως αναγκαία η ανάπτυξη μιας αυτόνομης μεθοδολογίας που θα μπορούσε να προσδιορίσει δυναμικές πληροφορίες χρησιμοποιώντας μόνο δύο ρολόγια. Η μεθοδολογία αυτή ονομάστηκε χρονομετρική χωροστάθμιση λόγω της ουσιαστικής μέτρησης των βαθμωτών μεγεθών του χρόνου (και αντίστοιχα της συχνότητας)

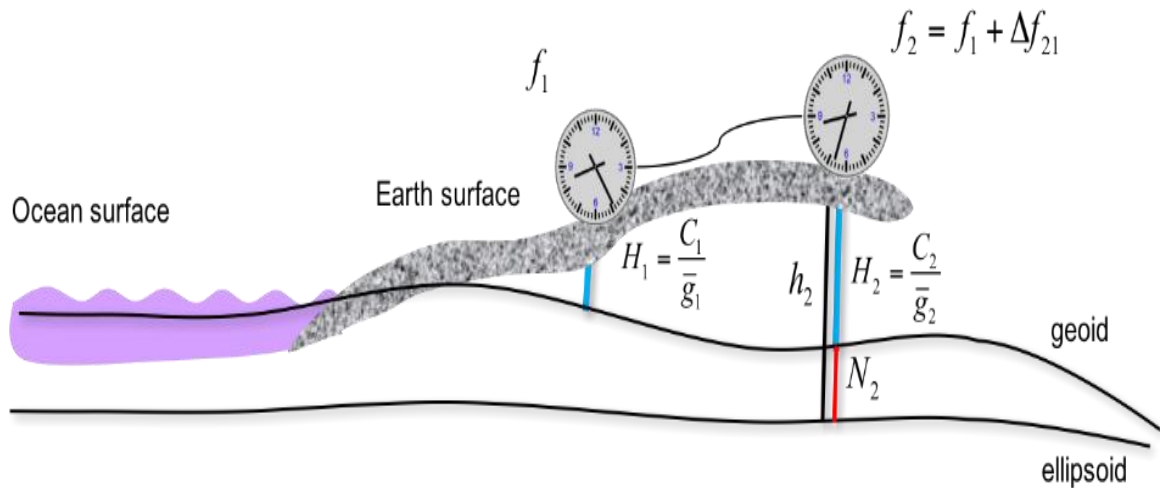
Η χρονομετρική χωροστάθμιση (chronometric levelling) είναι μία μεθοδολογία προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών μέσω της απομακρυσμένης σύγκρισης των μετρούμενων συχνοτήτων από δύο κατάλληλα διακριβωμένα ρολόγια ακριβείας. [Vermeer, 1983] Η μεθοδολογία αξιοποιεί τις γενικότερες αρχές της επιστήμης της Σχετικιστικής Γεωδαισίας (*relativistic geodesy*). Θεμελιώδη προτερήματα της μεθοδολογίας είναι ότι αφενός μπορεί να προσδιορίσει υψομετρικές διαφορές σε σημεία τα οποία είναι πολύ απομακρυσμένα μεταξύ τους, και αφετέρου είναι απαλλαγμένη από τις κύριες πηγές σφαλμάτων της συμβατικής υψομετρίας. Έτσι, δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί εξομάλυνση όταν χρησιμοποιούνται συνδυασμένα μοντέλα πεδίου βαρύτητας

Το δυναμικό της βαρύτητας (W) σχετίζεται άμεσα με την υψομετρική πληροφορία καθώς επίσης και με τις ισοδυναμικές επιφάνειες και το γεωειδές. Ουσιαστικά το γεωειδές ορίζεται ως η επιφάνεια αναφοράς ορθομετρικών υψομέτρων η οποία διαθέτει σταθερό δυναμικό βαρύτητας (W_0), και προσομοιάζει με μεγάλη ακρίβεια τη μέση στάθμη της θάλασσας.

Τα δύο κύρια στοιχεία της μεθοδολογίας της χρονομετρικής χωροστάθμισης είναι ο τύπος των ρολογιών ακριβείας καθώς και ο μονοσήμαντος τρόπος που αυτά θα επικοινωνούν μεταξύ τους.

2.5.1 Μαθηματικό μοντέλο

Σύμφωνα με τη γενική θεωρία της σχετικότητας δύο ρολόγια θα λειτουργούν σε διαφορετικού ρυθμούς εάν κινούνται με σχετική ταχύτητα μεταξύ τους ή εάν βρίσκονται υπό την επίδραση ενός βαρυτικού πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που το σύστημα μέτρησης αποτελείται από δύο ρολόγια ακριβείας στην επιφάνεια της Γης (και τα δύο σε ηρεμία), η διαφορά της παρατηρούμενης συχνότητας μεταξύ τους (Δf) είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού (ΔW) στα δύο σημεία. [Bjerhammar, 1985]



Εικόνα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση χρονομετρικής χωροστάθμησης
 [Πηγή : Mueller., κ.α., 2018]

Πιο συγκεκριμένα η σχέση που συνδέει παρατηρούμενες συχνότητες με τη διαφορά δυναμικού (σχέση 2.9) και επακόλουθα τη διαφορά δυναμικού με την υψομετρική διαφορά (σχέση 2.10), παρουσιάζονται παρακάτω: [Muller., 2018]

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta W}{c^2} + O(c^{-4}) \quad (2.9)$$

$$\Delta H \approx -\frac{\Delta C}{g} = \frac{\Delta W}{g} \quad (2.10)$$

Όπου: C: ο γεωδυναμικός αριθμός
 g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

Επομένως η σχέση που συνδέει άμεσα την υψομετρική διαφορά μεταξύ δύο διακριτών σημείων A και B, περιγράφεται από τη σχέση 2.11.

$$\Delta H_{A-B} = H_B - H_A = \left(\frac{f_B - f_A}{f} \right) \frac{c^2}{g} \quad (2.11)$$

Όπου: c: η ταχύτητα του φωτός
 g: η μέση τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας
 f_A, f_B : η μετρημένη τιμή της συχνότητας στα σημεία A,B
 f: η μέση τιμή της συχνότητας
 H_A, H_B : τα ορθομετρικά υψόμετρα των σημείων A,B

Ανάλογα με τον τύπο της επιτάχυνσης της βαρύτητας που θα χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση 2.11, μπορούν να προσδιοριστούν είτε ορθομετρικά, είτε κανονικά είτε δυναμικά υψόμετρα και υψομετρικές διαφορές.

Όσον αφορά στην ανάλυση σφαλμάτων των παραπάνω σχέσεων, θεωρώντας ότι υπάρχουν κατάλληλες διατάξεις ρολογιών που προσφέρουν τη δυνατότητα προσδιορισμού διαφοράς συχνοτήτων με πολύ μεγάλη ακρίβεια, οι αβεβαιότητες προσδιορισμού των άλλων σχετιζόμενων μεγεθών μπορούν να διαμορφωθούν ως εξής:

- Η αβεβαιότητα μέτρησης διαφοράς συχνότητας της τάξης του 10^{-18} αντιστοιχεί σε προσδιορισμό διαφοράς δυναμικού βαρύτητας της τάξης του $0,1 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$.

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)1 \cdot 10^{-18} \Leftrightarrow (\Delta W)0,1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

- Αντίστοιχα αβεβαιότητα μέτρησης διαφοράς συχνότητας της τάξης του 10^{-18} αντιστοιχεί σε προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια της τάξης του ενός εκατοστού.

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)1 \cdot 10^{-18} \Leftrightarrow (\Delta H)1 \text{ cm}$$

2.6 Παράμετροι μελέτης χρονομετρικής χωροστάθμησης

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν όλες εκείνες οι παράμετροι που οφείλουν να μελετηθούν, ώστε να προκύπτει αποτέλεσμα σχετικά με την επιρροή της κάθε μίας στην τελική ακρίβεια προσδιορισμού χρόνου ή συχνότητας.

Κάθε παράμετρος μπορεί να χαρακτηρίζεται ως μεταβλητή ή ως σταθερά. Ο διαχωρισμός αυτός αναφέρεται στο ρυθμό μεταβολής της επιρροής της κάθε παραμέτρου στην τελική ακρίβεια. Πιο συγκεκριμένα και οι μεταβλητές και οι σταθερές επηρεάζουν ποσοστιαία την ακρίβεια αλλά οι σταθερές με συγκεκριμένο και αμετάβλητο ρυθμό ενώ οι μεταβλητές με πιο σύνθετο ρυθμό.

Οι παράμετροι δομούνται αρχικά σε μεγάλες κατηγορίες, οι οποίες έχουν προκύψει από τη μελέτη των θεωρητικών στοιχείων και στη συνέχεια αναλύονται περισσότερο, με σκοπό να αναδειχθεί πόσο περίπλοκες είναι και πως μπορούν να περιγραφούν.

Για κάθε παράμετρο που μελετάται έχουν δημιουργηθεί πίνακες με τα βασικά χαρακτηριστικά της (ταυτότητα), με σκοπό να γίνει πιο εύκολη η κατανόηση και η μελέτη τους.

Οι παράμετροι που αφορούν στην εφαρμογή της χρονομετρικής χωροστάθμησης είναι η επιλογή του μετρούμενου και μεταφερόμενου φυσικού μεγέθους, καθώς επίσης και η διαδικασία και ο τρόπος επικοινωνίας μεταξύ των σχετικιστικών μετρητικών διατάξεων.

2.6.1 Μέτρηση – Παρατήρηση φυσικών μεγεθών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο χρόνος και η συχνότητα είναι τα δύο βαθμωτά μεγέθη που μπορούν να προσδιοριστούν με τη μεγαλύτερη ακρίβεια στη φύση. Η παράμετρος της μέτρησης – παρατήρησης φυσικών μεγεθών αναφέρεται στη βασική επιλογή μεταξύ των δύο διακριτών αυτών κατηγοριών, του χρόνου και της συχνότητας. Η συγκεκριμένη παράμετρος χαρακτηρίζεται ως σταθερά, διότι η επιλογή οποιασδήποτε από τις δύο δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην τελική αβεβαιότητα προσδιορισμού χρόνου – συχνότητας. Το κύριο κριτήριο για την επιλογή αφορά στην ευκολία καταγραφής και ερμηνείας του μετρούμενου μεγέθους.

Τα πρότυπα χρόνου και συχνότητας παρέχουν τρεις βασικούς τύπους πληροφοριών, την ώρα της ημέρας, το χρονικό διάστημα, και τη συχνότητα. Οι πληροφορίες για την ώρα παρέχονται σε ώρες, λεπτά και δευτερόλεπτα, αλλά συχνά περιλαμβάνουν και την ημερομηνία (μήνας, ημέρα και έτος).

Το χρονικό διάστημα είναι η διάρκεια ή ο χρόνος που έχει παρέλθει μεταξύ δύο συμβάντων. Η τυπική μονάδα χρονικού διαστήματος είναι το δευτερόλεπτο. Ωστόσο, πολλές εφαρμογές απαιτούν τη μέτρηση μικρότερου χρονικού διαστήματος, όπως χιλιοστά του δευτερολέπτου ($1\text{ms}=10^{-3}\text{s}$), μικρο-δευτερόλεπτα ($1\mu\text{s}=10^{-6}\text{s}$), νανο-δευτερόλεπτα ($1\text{ns}=10^{-9}\text{s}$), και picoseconds ($1\text{ps}=10^{-12}\text{s}$). Το δευτερόλεπτο είναι μία από επτά βασικές μονάδες που ορίζονται στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI). Οι ορισμοί πολλών άλλων φυσικών ποσοτήτων βασίζονται στον ορισμό του δευτερολέπτου. Το δευτερόλεπτο ορίστηκε αρχικά με βάση το ρυθμό περιστροφής της Γης ή ως κλάσμα του τροπικού έτους. Αυτό άλλαξε το 1967 και ο τρέχων ορισμός του δευτερολέπτου SI αναφέρεται στη διάρκεια των 9.192.631.770 περιόδων

της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στη μετάβαση μεταξύ δύο επιπέδων υπέρλεπτης υφής της κατάστασης ηρεμίας (βασικής στάθμης) του ατόμου καισίου-133.

Μία συσκευή που μετράει συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ονομάζεται ρολόι. Η διαδικασία ορισμού πολλαπλών ρολογιών στην ίδια χρονική κλίμακα ονομάζεται συγχρονισμός (synchronization).

Η συχνότητα είναι ο ρυθμός ενός επαναλαμβανόμενου συμβάντος. Αν T είναι η περίοδος ενός επαναλαμβανόμενου συμβάντος, τότε η συχνότητα f είναι $1/T$. Η τυπική μονάδα συχνότητας είναι τα hertz (Hz), που ορίζεται ως συμβάντα ή κύκλοι ανά δευτερόλεπτο.

Η συχνότητα των ηλεκτρικών σημάτων μετράται συχνά σε πολλαπλάσια hertz, συμπεριλαμβανομένων των kilohertz (kHz), megahertz (MHz) ή gigahertz (GHz), όπου 1 kHz ισούται με χίλια (10^3) συμβάντα ανά δευτερόλεπτο, 1 MHz ισούται με ένα εκατομμύριο (10^6) συμβάντα ανά δευτερόλεπτο και 1 GHz ισούται με ένα δισεκατομμύριο (10^9) συμβάντα ανά δευτερόλεπτο. Μια συσκευή που παράγει συχνότητα ονομάζεται ταλαντωτής. Η διαδικασία ορισμού πολλαπλών ταλαντωτών στην ίδια συχνότητα ονομάζεται συντονισμός (syntonization). [Lombardi, 2002]

Η ορθότητα μίας μέτρησης είναι ο βαθμός συμμόρφωσης μιας μετρούμενης ή υπολογιζόμενης τιμής προς την αληθή τιμή της. Για παράδειγμα, απόκλιση χρόνου είναι η διαφορά μεταξύ ενός μετρημένου παλμού και ενός ιδανικού παλμού που συμπίπτει ακριβώς με τον ενιαίο χρόνο UTC.

Η σταθερότητα μίας μέτρησης δείχνει πόσο καλά ένας ταλαντωτής μπορεί να παράγει τον ίδιο χρόνο ή συχνότητα για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Δεν υποδεικνύει εάν ο χρόνος ή η συχνότητα είναι ορθή ή λανθασμένη, αλλά μόνο αν παραμένουν ίδια. Η σταθερότητα ορίζεται ως η στατιστική εκτίμηση της διακύμανσης της συχνότητας ή του χρόνου ενός σήματος για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αυτές οι διακυμάνσεις μετρούνται σε σχέση με τη μέση συχνότητα ή την αντιστάθμιση χρόνου. Η βραχυπρόθεσμη σταθερότητα αναφέρεται συνήθως σε διακυμάνσεις σε διαστήματα μικρότερα των 100 sec. Η μακροπρόθεσμη σταθερότητα αναφέρεται σε περιόδους μεγαλύτερες από 1 ημέρα. Οι εκτιμήσεις σταθερότητας μπορούν να γίνουν είτε στον τομέα της συχνότητας είτε στον τομέα του χρόνου και μπορούν να

υπολογιστούν από ένα σύνολο μετρήσεων μετατόπισης συχνότητας ή χρονικού διαστήματος.

ΤΙΤΛΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<i>Μέτρηση - παρατήρηση φυσικών μεγεθών</i>
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<i>Σταθερά</i>
ΚΥΡΙΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	<i>Είδος φυσικού μεγέθους</i>
 <pre> graph LR A[ΜΕΤΡΗΣΗ] --- B[Χρόνου] A --- C[Συχνότητας] B --- D[Χρονική διαστολή] C --- E[Μετατόπιση συχνότητας] </pre>	
ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Ο χρόνος και η συχνότητα είναι δύο αλληλένδετες έννοιες.</i> • <i>Είναι και τα δύο φυσικά βαθμωτά μεγέθη.</i> • <i>Τα δύο μεγέθη που μπορούν να προσδιοριστούν με την μεγαλύτερη ακρίβεια στη φύση</i> • <i>Η καταγραφή και μεταφορά συχνότητας υπερτερεί σε σχέση με την αντίστοιχη του χρόνου.</i>
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> <i>Κόστος</i> <input checked="" type="checkbox"/> <i>Τεχνική υποδομή και εξοπλισμός</i> <input type="checkbox"/> <i>Εμπορικότητα</i> <input type="checkbox"/> <i>Πολυπλοκότητα</i> <input checked="" type="checkbox"/> <i>Μαθηματική και στατιστική ανάλυση</i> <input type="checkbox"/> <i>Επηρεασμός από άλλες παραμέτρους</i>
ΛΕΞΕΙΣ -- ΚΛΕΙΔΙΑ	<i>Accuracy, Stability, time and frequency offset, Allan deviation</i>

Πίνακας 2.1 Ταυτότητα παραμέτρου, Μέτρηση – παρατήρηση φυσικών μεγεθών

Μετατόπιση συχνότητας (frequency offset) είναι η διαφορά μεταξύ μιας μετρημένης συχνότητας και μιας ιδανικής συχνότητας με μηδενική αβεβαιότητα. Αυτή η ιδανική συχνότητα ονομάζεται ονομαστική συχνότητα (συχνότητα αναφοράς).

Σε ορισμένα πεδία μέτρησης, η σταθερότητα εκτιμάται λαμβάνοντας την τυπική απόκλιση του συνόλου δεδομένων. Ωστόσο, η τυπική απόκλιση λειτουργεί μόνο με στατικά δεδομένα, όπου τα αποτελέσματα είναι χρονικά ανεξάρτητα και ο θόρυβος κατανέμεται ομοιόμορφα στη ζώνη συχνοτήτων της μέτρησης. Τα δεδομένα ενός ταλαντωτή είναι συνήθως μη στατικά, δεδομένου ότι περιέχουν θόρυβο που εξαρτάται από το χρόνο που συνεισφέρει η μετατόπιση συχνότητας. Με σταθερά δεδομένα, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση συγκλίνουν σε συγκεκριμένες τιμές, καθώς γίνονται περισσότερες μετρήσεις. Με μη στατικά δεδομένα, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση δεν συγκλίνουν ποτέ σε συγκεκριμένες τιμές. Αντί για αυτό, υπάρχει ένας κινούμενος μέσος που αλλάζει κάθε φορά που προστίθεται μια μέτρηση. Πιο συγκεκριμένα, μια μη κλασική στατιστική σχέση χρησιμοποιείται συχνά για την εκτίμηση της σταθερότητας στον τομέα της συχνότητας. Αυτή η στατιστική ονομάζεται μερικές φορές διακύμανση Allan, αλλά επειδή είναι η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης, έχει καθιερωθεί ως απόκλιση Allan. Ενώ η σχέση της τυπικής απόκλισης αφαιρεί το μέσο όρο των μετρήσεων από κάθε μέτρηση, πριν υψωθεί το άθροισμά τους στο τετράγωνο, η απόκλιση Allan αφαιρεί το προηγούμενο σημείο δεδομένων από την κάθε επόμενη μέτρηση. Αυτή η διαφορά των διαδοχικών σημείων δεδομένων καταργεί τον εξαρτώμενο, από το χρόνο θόρυβο, που προκύπτει από τη μετατόπιση συχνότητας. Από την ανάλυση ενός διαγράμματος Allan, μπορούν άμεσα να προκύψουν αποτελέσματα σχετικά με τη σταθερότητα αλλά και τη συμπεριφορά μιας μετρητικής διάταξης, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Επομένως, η απόκλιση Allan είναι ένας δείκτης που συνοδεύει τις μετρήσεις και συγκρίσεις συχνότητας.

Εκτός από το μονομερή προσδιορισμό του χρόνου και της συχνότητας, σημασία έχει και η μεταβολή και σύγκριση των τιμών για δύο διαφορετικά διακριτά σημεία. Σε απομακρυσμένες παρατηρήσεις και συγκρίσεις μετρήσεων συχνότητας, δημιουργείται το πρόβλημα της καμπυλότητας του χώρου και της σχετικής κίνησης των μετρητικών διατάξεων. Αυτά τα δύο φαινόμενα αλλάζουν τοπικά τη ροή του ιδιοχρόνου σε σχέση με έναν παγκόσμιο συντεταγμένο χρόνο.

Τα σήματα που χρησιμοποιούνται για μεταφορά χρόνου και συχνότητας αναφέρονται γενικά σε ατομικούς ταλαντωτές που οφείλουν να συμφωνούν όσο το δυνατόν περισσότερο με τον χρόνο UTC. Οι πληροφορίες αποστέλλονται από έναν πομπό (A) σε ένα δέκτη (B) και καθυστερούν κατά τ_{AB} , που συνήθως ονομάζεται καθυστέρηση διαδρομής (path delay).

Η καθυστέρηση διαδρομής δεν είναι σημαντική για τα συστήματα μεταφοράς συχνότητας, δεδομένου ότι δεν απαιτούνται παλμοί σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Η μεταφορά συχνότητας απαιτεί μόνο μια σταθερή διαδρομή όπου οι καθυστερήσεις παραμένουν σχετικά σταθερές. Όσον αφορά στα συστήματα μεταφοράς χρόνου, πρέπει να υπολογιστεί η συνεισφορά της καθυστέρησης διαδρομής και αυτό γίνεται δυνατόν εάν ο πομπός, εκτός από την πληροφορία του χρόνου εκπέμπει και πληροφορίες σχετικά με τη θέση του στο χώρο.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η καταγραφή και μεταφορά συχνότητας υπερτερεί καθώς χρειάζεται να είναι γνωστά λιγότερα στοιχεία με σκοπό να μπορούν να εξαχθούν αποτελέσματα ακριβείας.

2.6.2 Επικοινωνία μετρητικών συστημάτων

Η παράμετρος της επικοινωνίας μεταξύ δύο ή και περισσότερων σχετικιστικών μετρητικών διατάξεων περιλαμβάνει την κύρια κατηγοριοποίηση των λειτουργιών της αρχικής σύνδεσης, σύζευξης, συγχρονισμού και ανταλλαγής - σύγκρισης παρατηρήσεων. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής, και σε ότι αφορά στην συγκεκριμένη παράμετρο, μελετώνται όλες οι παγιωμένες αλλά και οι πιο σύγχρονες τεχνικές μεταφοράς συχνότητας και χρόνου.

Η κύρια κατηγοριοποίηση αφορά αφενός στο μέσο που θα αξιοποιηθεί για τη σύνδεση των απομακρυσμένων διατάξεων και αφετέρου στις τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν για την ορθή πραγματοποίηση και διόρθωση των παρατηρήσεων. Το μέσο περιλαμβάνει επιμέρους κατηγορίες όπως το ελεύθερο περιβάλλον, τα συμβατικά καλώδια, τα δορυφορικά συστήματα και τις οπτικές ίνες, ενώ οι τεχνικές περιλαμβάνουν τις επεμβάσεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε μέσο κάθε φορά ώστε να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία των μετρήσεων χωρίς εισαγωγή θορύβου ή απώλεια παρατηρήσεων.

ΤΙΤΛΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<i>Επικοινωνία απομακρυσμένων μετρητικών διατάξεων</i>
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<i>Μεταβλητή</i>
ΚΥΡΙΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	<i>Μέσο μετάδοσης</i>
ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	<i>Τεχνική διάδοσης</i>
ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	<ul style="list-style-type: none"> • Για περιορισμένο εύρος αποστάσεων μπορεί να αξιοποιηθεί η μεταφορά μέσω του ελεύθερου αέρα, αρκεί να είναι γνωστές και μοντελοποιημένες οι ατμοσφαιρικές συνθήκες • Για μικρές αποστάσεις (<100km) μεταξύ δύο ή περισσότερων θέσεων, μπορεί να αξιοποιηθεί η χρήση συμβατικών καλωδίων • Τα δορυφορικά συστήματα αποτελούσαν και συνεχίζουν να αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες επιλογές μεταφοράς χρόνου -συχρότητας. • Τα σύγχρονα συστήματα οπτικών ινών είναι εκείνα με την μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα.
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<input checked="" type="checkbox"/> Κόστος <input checked="" type="checkbox"/> Τεχνική υποδομή και εξοπλισμός <input checked="" type="checkbox"/> Εμπορικότητα <input type="checkbox"/> Πολυπλοκότητα <input checked="" type="checkbox"/> Μαθηματική και στατιστική ανάλυση <input checked="" type="checkbox"/> Επηρεασμός από άλλες παραμέτρους
ΛΕΞΕΙΣ -- ΚΛΕΙΔΙΑ	<i>Optical fiber, free air, two-way time frequency transfer, clock networks, geostatistical satellites</i>

Πίνακας 2.2 Ταυτότητα παραμέτρων, Επικοινωνία απομακρυσμένων μετρητικών διατάξεων

Κάθε διαφορετική κατηγορία επικοινωνίας έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, και η επιλογή της κατάλληλης εξαρτάται από τις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες της κάθε μελέτης, αλλά και από παράγοντες που αφορούν στο κόστος, στη χωρική κατανομή των διατάξεων και στην πολυπλοκότητα.

Η παράμετρος της επικοινωνίας είναι βασικής σημασίας και ανήκει στην κατηγορία των μεταβλητών παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή του μέσου και της τεχνικής επικοινωνίας επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό, και με μη σταθερό ρυθμό ανά διαφορετική τεχνική, την τελική επιδιωκόμενη ακρίβεια προσδιορισμού χρόνου - συχνότητας. Η βέλτιστη επιλογή μπορεί να πραγματοποιηθεί ύστερα από μεμονωμένη εφαρμογή ή συνδυασμό διαφορετικών τεχνικών, με απώτερο σκοπό τη σταθερότητα και την ακρίβεια της μεταφοράς.

2.6.2.1 Μέσα μετάδοσης

Τα σύγχρονα μέσα μετάδοσης είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε η τελική ακρίβεια να μην επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από τις ιδιότητες του μέσου, αλλά μόνο από τις κύριες διατάξεις που πραγματοποιούν τις παρατηρήσεις. Ανάλογα με την επιλογή του μέσου και της τεχνικής μεταφοράς, η εισαγωγή θορύβου στη μεταφερόμενη πληροφορία μεταβάλλεται, επομένως αναπτύσσονται διαφορετικές διεργασίες για την αντιστάθμιση ή ακύρωση του φαινομένου αυτού. Σε κάθε περίπτωση, δεν είναι ορθό να αξιοποιούνται μέσα μεταφοράς που εισάγουν μεγέθη θορύβου μεγαλύτερα από την τιμή της μέτρησης που μεταφέρεται, και είναι της τάξης του 10^{-18} (εάν αξιοποιηθεί η συχνότητα) ή 1 pico second (εάν αξιοποιηθεί ο χρόνος).

Κατά τη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος μέσω ενός μέσου μετάδοσης, οποιαδήποτε διακύμανση της διαδρομής μεταξύ δύο μετρητικών απομακρυσμένων διατάξεων οδηγεί σε μετατόπιση Doppler, και επηρεάζει τη συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί μέσω της ανάπτυξης μιας κατάλληλης τεχνικής που θα αντισταθμίζει την πρόσθετη συνεισφορά θορύβου που εισάγεται από το μέσο διάδοσης. Κατά τη διάρκεια των ετών και ανάλογα με την επιδιωκόμενη ακρίβεια, μια ποικιλία τεχνικών έχει αποδειχθεί κάθε φορά κατάλληλη.

❖ Απομακρυσμένη σύγκριση μετρητικών διατάξεων

Η απομακρυσμένη σύγκριση περιορίζεται μόνο από την αστάθεια και την αβεβαιότητα των σύγχρονων διατάξεων μέτρησης χρόνου και συχνότητας, με αμελητέες συνεισφορές να προκύπτουν από τη μεταφορά των παρατηρήσεων όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικά μέσα μετάδοσης. [Lisdar., κ.α., 2016] Σκοπός είναι να πραγματοποιηθεί μία ανεπηρέαστη μεταφορά συχνότητας, μέσω των μέσων μεταφοράς, μεταξύ των απομακρυσμένων διατάξεων. Η μεταφορά της συχνότητας οφείλει να πραγματοποιείται με τρόπο που να προλαμβάνει ή να απαλοΐφει ενδεχόμενη διαμόρφωση θορύβου φάσης. [Ma., κ.α., 1994] [Predehl., 2012]

Μια πρώτη προσέγγιση είναι η μεταφορά της επιθυμητής συχνότητας στο φάσμα των μικροκυμάτων κάνοντας χρήση δορυφόρων, ενώ τα τελευταία χρόνια η προσοχή έχει στραφεί στον οπτικό τομέα του φάσματος που αξιοποιεί τις οπτικές ίνες. [Tampellini., 2019]

Οι πρώτες τεχνικές που αναπτύχθηκαν βασίζονται στη διάδοση συχνότητας στην περιοχή του φάσματος των μικροκυμάτων μέσω του αέρα, κάνοντας χρήση τόσο του παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος (GNSS) όσο και άλλου είδους γεωστατικών δορυφόρων [Bauch., κ.α., 2015]. Αν και η συνεισφορά θορύβου που προκαλείται από αυτές τις τεχνικές υπερβαίνει κατά τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους την εγγενή ακρίβεια των καλύτερων οπτικών ρολογιών της γενιάς, αυτές εξακολουθούν να παραμένουν οι μόνες μέθοδοι όπου σύγχρονα δίκτυα οπτικών ινών δεν είναι διαθέσιμα. Η ανάπτυξη τέτοιων δικτύων είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο και είναι οικονομικά ασύμφορη σε περιπτώσεις δι-ηπειρωτικών συνδέσεων, για αυτό το λόγο επιλέγεται το δορυφορικό σύστημα. Μέχρι πρότινος, οι δορυφόροι ήταν τα πιο αξιόπιστα συστήματα για το συγχρονισμό απομακρυσμένων διατάξεων και οι συγκρίσεις μεταξύ αυτών μπορούσαν να πραγματοποιηθούν είτε μέσω της τεχνικής που αξιοποιεί συμβατικούς - εμπορικούς δέκτες GNSS είτε μέσω της τεχνικής διπλής διαδρομής (Two-Way Satellite time and Frequency Transfer). [Lewandowski., κ.α., 1999]

Η τεχνική που βασίζεται στους δορυφορικούς δέκτες GNSS αξιοποιεί τουλάχιστον 20-30 δορυφόρους που ανήκουν είτε στο παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS), είτε στο GLONASS της Ρωσίας, είτε στο BEIDOU της Κίνας, είτε στο πρόσφατα πλήρους λειτουργίας Ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO. Κάθε δορυφόρος μεταδίδει

δύο σήματα στο κανάλι L στα περίπου 1.2GHz ή 1.5GHz, διαμορφωμένα με τον παλμό ανά δευτερόλεπτο που παράγεται από τα ατομικά ρολόγια που περιλαμβάνει και κωδικοποιείται με ψευδο-τυχαίο κώδικα. Στο δέκτη το σήμα αποδιαμορφώνεται και διορθώνεται για καθυστέρηση που εισήχθη από τη διαδρομή μετάδοσης του σήματος. Η διόρθωση αυτή περιλαμβάνει επιμέρους αναγωγές λόγω της ιονόσφαιρας, της τροπόσφαιρας και της δημιουργούμενης γεωμετρίας μεταξύ του δορυφορικού σχηματισμού και του συστήματος μέτρησης.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 η τεχνική κοινής θέασης (Common-View) αναπτύχθηκε για συγκρίσεις επίγειων διατάξεων. Το σύστημα των μετρήσεων περιλαμβάνει δύο ή περισσότερες επίγειες διατάξεις μέτρησης σημάτων χρόνου από τον ίδιο δορυφόρο. Μέσω αυτής της διαδικασίας και της μετέπειτα σύγκρισης των αποτελεσμάτων αφαιρούνταν οποιεσδήποτε διαφορές μεταξύ των επίγειων ρολογιών και εκείνων που περιλάμβανε ο δορυφόρος. Η τεχνική είναι κατάλληλη για αποστάσεις έως και 10.000 χιλιόμετρα. Σε περίπτωση που οι αποστάσεις μεταξύ των μετρητικών διατάξεων είναι μεγαλύτερες, οι διαφορές στις καθυστερήσεις καθίστανται αμελητέες καθώς επίσης οι διατάξεις δεν μπορούν να συνδεθούν στον ίδιο δορυφορικό δέκτη. [Allan., κ.α., 1980]

Με τη μέθοδο ολικής θέασης (All-in-View), τα σήματα από όλους τους δορυφόρους ανάγονται και μοντελοποιούνται σε μια κοινή ώρα αναφοράς, επιτρέποντας εφαρμογή της τεχνικής κοινής θέασης, που δημιουργείται σε σχέση με αυτό το χρονοδιάγραμμα, ακόμη και μεταξύ των διατάξεων που έλαβαν σήματα χρόνου από διαφορετικούς δορυφόρους. [Defraigne., κ.α., 2019]

Μια περαιτέρω βελτίωση δημιουργήθηκε με τη μέθοδο του απόλυτου προσδιορισμού θέσης ακριβείας (Precise Point Positioning), ο οποίος εκμεταλλεύεται και την παρατήρηση της συχνότητας - ώρας και τη φάση του φορέα που μεταδίδεται από το δορυφορικό ταλαντωτή, ως παρατηρήσιμα μεγέθη. [Ge., κ.α., 2021] Επειδή η περίοδος της φάσης του φορέα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της παρατήρησης χρόνου, η ακρίβεια βελτιώνεται. Η τελευταία ανάπτυξη στο συγκεκριμένο τομέα οδήγησε στη δημιουργία του αλγόριθμου IntegerPPP (IPPP), ο οποίος επιτυγχάνει επίπεδο ακρίβειας 10^{-16} μετά από παρατηρήσεις πέντε ημερών. [Petit., κ.α., 2015]

Αντίστοιχα η τεχνική διπλής διαδρομής δορυφορικού χρόνου και μεταφοράς συχνότητας (TWSTFT), βασίζεται σε γεωστατικούς δορυφόρους, και συμπεριλαμβάνει σήματα στο κανάλι Ku, διαμορφωμένα με παλμό ανά δευτερόλεπτο που δημιουργείται από την εκάστοτε τοπική χρονική κλίμακα. Σε αυτήν την περίπτωση, τα σήματα ταξιδεύουν αμφίδρομα, χρησιμοποιώντας το δορυφόρο μεταξύ των δύο επίγειων διατάξεων, ως επαναλήπτη (repeater). [Piester., κ.α., 2009] Υποθέτοντας ότι η διαδρομή προς τις δύο κατευθύνσεις είναι όμοια, η καθυστέρηση εκτιμάται από τη διαφορά μεταξύ των τοπικών και των ληφθέντων σημάτων και εφαρμόζεται ως διόρθωση. Μετά την επεξεργασία των δεδομένων, η ακρίβεια του χρόνου είναι καλύτερη από 10^{-15} και επιτυγχάνεται μετά από μέτρηση μιας ημέρας. [Hachisu., 2014] Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη τεχνική δύο μετρητικές διατάξεις (ατομικά ρολόγια) σε απόσταση 9000 χιλιομέτρων, συγκρίθηκαν με τις συχνότητες τους να συμφωνούν με ακρίβεια της τάξης του 10^{-15} , η οποία διαμορφώνεται κυρίως από τη συνεισφορά του μέσου. Περαιτέρω βελτιώσεις μπορούν να επιτευχθούν με πιο συνεχή χρόνο μέτρησης και πιο προσεκτικό έλεγχο της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. [Hachisu, κ.α., 2014]

Σε αντιπαράθεση με τις τεχνικές που βασίζονται σε συμβατικούς δορυφορικούς δέκτες GNSS, αυτή η τεχνική δεν υποστηρίζει περιστασιακές ή μη προγραμματισμένες ανταλλαγές μηνυμάτων και οι δύο τερματικοί σταθμοί πρέπει να συμφωνήσουν εκ των προτέρων σχετικά με τη μορφή της μετάδοσης δεδομένων.

Η πιο σύγχρονη εξέλιξη που αφορά στη μεταφορά συχνότητας στο φάσμα των μικροκυμάτων, αναφέρεται στην αξιοποίηση κατάλληλων διατάξεων στη διαστημική αποστολή (ACES), η οποία είναι μια διεθνής μετρολογική αποστολή με επικεφαλής τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) σε συνεργασία με το Γαλλικό Οργανισμό Διαστήματος. Το πρόγραμμα της αποστολής περιλαμβάνει την υλοποίηση αρκετών συγκρίσεων χρόνου και συχνότητας. Συγκρίσεις χρόνου και συχνότητας μεταξύ της εποχούμενης κλίμακας χρόνου και των χρονικών κλιμάκων στο έδαφος θα εκτελούνται με διπλή συχνότητα, μέσω τεσσάρων καναλιών συνδέσεων μικροκυμάτων.

Επιπλέον, πειραματικές εφαρμογές εκτελούνται αξιοποιώντας τα ατομικά ρολόγια που έχουν τοποθετηθεί στο εσωτερικό και στην εξωτερική επιφάνεια του διαστημικού σκάφους. Η ακύρωση θορύβου βασίζεται σε αμφίδρομη μετάδοση μεταξύ της αποστολής και των εννέα

σταθμών ελέγχου στη Γη, οι οποίοι είναι ειδικά σχεδιασμένοι για τη μείωση της αβεβαιότητας που προκαλείται από τις μετρητικές διατάξεις, που είναι συνήθως ο περιοριστικός παράγοντας. Η καθυστέρηση διάδοσης αντισταθμίζεται αρχικά όταν συνδυάζονται μετρήσεις up-link και down-link. Περαιτέρω διορθώσεις εφαρμόζονται λαμβάνοντας υπόψη ένα μοντέλο διάδοσης σήματος, το οποίο περιλαμβάνει ατμοσφαιρικές και περιβαλλοντικές καθυστερήσεις. Με βάση όλες αυτές τις δυνατότητες, αναμένεται οι συγκρίσεις απομακρυσμένων μετρητικών διατάξεων εδάφους να πραγματοποιούνται σε επίπεδο ακρίβειας 10^{-17} . [Laurent., 2015]

Επίσης, σε ότι αφορά στη μεταφορά συχνότητας στο μικροκυματικό φάσμα, μπορούν να αξιοποιηθούν και συμβατικά καλώδια (wire transfer). Αυτά χρησιμοποιούνται για αποστάσεις λιγότερες των 100 χιλιομέτρων και συνήθως αξιοποιούνται σε ένδο-εργαστηριακές συνθήκες και πειράματα. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι η μοντελοποίηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών και των παρεμβολών πραγματοποιείται πιο εύκολα όταν χρησιμοποιούνται στερεά υλικά.

❖ Επικοινωνία στο οπτικό φάσμα

Η εξέλιξη της μετάδοσης και επικοινωνίας μετρητικών διατάξεων, αφορά στη χρήση του οπτικού τμήματος του φάσματος. Σε αυτή τη περίπτωση, η πρώτη τεχνική μεταφοράς συχνότητας βασίζεται στη μετάδοση μίας απόλυτα σταθερής πηγής laser στον ελεύθερο αέρα. Ο θόρυβος που συσσωρεύεται κατά μήκος της διαδρομής ακυρώνεται μέσω της συμβολομετρίας. Σύμφωνα με αυτή την ιδιότητα, μέρος του φωτός πραγματοποιεί τη διαδρομή μετάδοσης σε μετάβαση και επιστροφή. Αυτό επιτρέπει την ανίχνευση του θορύβου της διαδρομής και επακόλουθα την ακυρώνει. [Ma., 1994]

Κύρια μέσα διάδοσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συγκεκριμένη τεχνική είναι εκτός από τον ελεύθερο αέρα, οι σύγχρονες οπτικές ίνες.

Πιο συγκεκριμένα, η μετάδοση της συχνότητας, χρησιμοποιώντας ένα "κλειδωμένο" laser, μέσω του ελεύθερου αέρα επιτρέπει πιο εύλικτες συνδέσεις, που δεν περιορίζονται από τη διαθεσιμότητα ινών μεταξύ σταθερών τοποθεσιών. Από την άλλη, η μετάδοση σε ελεύθερο

αέρα θέτει πολλά ζητήματα λόγω της ατμοσφαιρικής μεταβαλλόμενης επίδρασης που οδηγεί σε ισχυρό θόρυβο φάσης και διακοπτόμενο σήμα, περιορίζοντας τη χρονική διάρκεια των μετρήσεων. Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις οδηγούν επίσης σε απώλειες σήματος σε τυχαίους χρόνους και με τυχαίες χρονικές περιόδους. Μέσω σύγκρισης οπτικών ταλαντωτών σε μια διαδρομή ελεύθερου αέρα, συνολικής απόστασης 4 χιλιομέτρων, παρατηρείται ίδια απόδοση ακρίβειας, μεταξύ των διατάξεων κλειδωμένων laser και της δορυφορικής τεχνικής διπλής διαδρομής. [Sinclair., 2018]

Επίσης λόγω της ευκολίας και ανάγκης χρήσης του ελεύθερου αέρα για τη μετάδοση χρόνου και συχνότητας, έχει αναπτυχθεί μία τεχνική που αποτελεί την αντιστοιχία της διπλής διαδρομής δορυφορικού χρόνου και μεταφοράς συχνότητας αλλά με χρήση οπτικού ορατού φάσματος αντί για μικροκυματικού. Η οπτική διπλή διαδρομή μεταφοράς χρόνου και συχνότητας (optical two way time frequency transfer) συγκρίνει τα χρονικά διαστήματα που διανύθηκαν μεταξύ δύο απομακρυσμένων θέσεων αντί να συγκρίνει τις συχνότητές τους. Κατά συνέπεια, αντί για ένα συνεχή σύνδεσμο επικοινωνίας, απαιτεί μόνο μια ανταλλαγή παλμών για το συγχρονισμό των τοποθεσιών στις αντίστοιχες ώρες έναρξης και διακοπής του χρονικού διαστήματος, με αποτέλεσμα η συνεχής παρατήρηση να είναι περιττή. [Giorgetta, κ.α., 2013]

Αντίθετα οι οπτικές ίνες αποτελούν το πιο σύγχρονο μέσο διάδοσης. Η ακρίβεια μετάδοσης και σύγκρισης συχνότητας μέσω οπτικών ινών, εξαρτάται από την αξιοποίηση της τεχνικής ενεργής αντιστάθμισης σε πραγματικό χρόνο (active cancellation) του θορύβου, που προκύπτει από τη διάδοση του σήματος στο εσωτερικό της οπτικής ίνας και εξαρτάται κυρίως από το δείκτη ανακλαστικότητας, ο οποίος μεταβάλλεται εξαιτίας περιβαλλοντικών διακυμάνσεων. [Jiang., 2008]

Η οπτική δομή της ίνας εξαναγκάζει το σήμα να περιοριστεί στη διαδρομή των ινών. Επιπλέον, εγγυάται μια καλύτερη απομόνωση από εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και χαμηλότερες απώλειες σε σύγκριση με τα συμβατικά ηλεκτρικά καλώδια. Οι τεχνικές με χρήση οπτικών ινών, έχουν διερευνηθεί ευρέως και σήμερα θεωρούνται μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για τη διάδοση προτύπων οπτικής συχνότητας. Οι τεχνικές βασίζονται στο δίκτυο ινών τηλεπικοινωνιών που χρησιμοποιούνται συνήθως για το δίκτυο ίντερνετ (internet), των οποίων τα σήματα βρίσκονται στη ζώνη C (1530-1565 nm) και στη ζώνη L (1565-1610 nm), που αντιστοιχεί στο παράθυρο χαμηλής απώλειας της

ίνας. Επίσης οι τεχνικές είναι συμβατές με την τεχνολογία πυκνής διαίρεσης μήκους κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing). Σύμφωνα με αυτήν τη τεχνολογία, ένα μόνο κανάλι μήκους κύματος της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union) απαιτείται για τη διάδοση της συχνότητας, ενώ τα υπόλοιπα κανάλια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση δεδομένων χωρίς καμία παρέμβαση. Σε μια αρχιτεκτονική DWDM, χρησιμοποιούνται πολυπλέκτες οπτικής προσθήκης - απόθεσης (optical add/drop multiplexers), οι οποίοι επιτρέπουν την εισαγωγή ή εξαγωγή ενός μόνο καναλιού από τη ροή, με χαμηλή απώλεια εισαγωγής. Πιο συγκεκριμένα το κανάλι ITU 44, με κέντρο 1542,14 nm, υιοθετείται συμβατικά στην Ευρώπη για μετρολογικούς σκοπούς. Αυτή η προσέγγιση αναφέρεται επίσης ως αρχιτεκτονική «σκοτεινού καναλιού», λαμβάνοντας υπόψη ότι, εάν η ίνα είναι πλήρως αφιερωμένη στη μετρολογική διάδοση, ονομάζεται αρχιτεκτονική «σκοτεινών ινών». [Kéfélian., 2009]

Οι χρήστες αυτής της υποδομής είναι διαφορετικοί, επομένως διαφορετικές τεχνικές διάδοσης έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν τις ανάγκες κάθε χρήστη. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές είναι η τεχνική μεταφοράς μέσω οπτικού φορέα (optical carrier transfer), η μεταφορά με ραδιοσυχνότητες (RF frequency transfer) και η τεχνική της φιλτραρισμένης συχνότητας (frequency comb transfer).

2.6.2.2 Τεχνικές μεταφοράς οπτικού φάσματος

Η τεχνική μεταφοράς μέσω του οπτικού φορέα (optical carrier transfer), αποσκοπεί στην παροχή της απόλυτης τιμής συχνότητας σε απομακρυσμένες μετρητικές διατάξεις, εκφρασμένες στο οπτικό φάσμα. Βασίζεται στη μετάδοση laser συνεχούς μήκους κύματος μέσω οπτικών ινών. Το σήμα του laser χρησιμοποιείται ως απόλυτη αναφορά συχνότητας, όπου αυτή μετριέται ή ταυτίζεται με την έξοδο του αξιοποιημένου προτύπου συχνότητας (ατομικό ρολόι). Για να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ των δύο φασματικών τομέων (σήμα laser και έξοδος προτύπου συχνότητας), χρησιμοποιείται ένα οπτικό φίλτρο [Diddams., 2000]

Το μέσο μεταφοράς (οπτική ίνα) εκτίθεται σε περιβαλλοντικές πηγές θορύβου που επηρεάζουν τη μεταφορά του οπτικού φορέα εισάγοντας ανεπιθύμητες διακυμάνσεις φάσης, επηρεάζοντας τη σταθερότητα του σήματος. Αυτός ο θόρυβος μπορεί να αντισταθμιστεί

μέσω του συμβολομετρικού σχήματος, όπου μέρος του παραδιδόμενου σήματος αποστέλλεται πάλι πίσω στην αρχική απομακρυσμένη πλευρά. Το μέρος του σήματος που επιστρέφει πίσω συγκρίνεται με το πρότυπο σήμα (εκείνο που μεταδόθηκε την πρώτη φορά), επιτρέποντας την ανίχνευση του συσσωρευμένου θορύβου ινών, αξιοποιώντας την αμοιβαιότητα της διαταραχής της φάσης στα σήματα μετάδοσης. [Calonico., κ.α., 2014] Η εξάλειψη του θορύβου μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε αξιοποιώντας τη συχνότητα ενός ακουστικού-οπτικού διαμορφωτή ή μεταβάλλοντας τη διάμετρο και το μήκος της οπτικής ίνας. Η ενεργή αντιστάθμιση θορύβου επιτρέπει τη μεταφορά της συχνότητας αναφοράς σε πάνω από 1000 χιλιόμετρα με συνεισφορά θορύβου της τάξης του 10^{-19} μετά από μερικές ώρες μετρήσεων. [Fujieda, κ.α., 2011]

Μια εναλλακτική τεχνική, που βασίζεται στην παθητική απόρριψη του θορύβου των ινών, εκμεταλλεύεται ένα αμφίδρομο σχέδιο. Απαιτεί δύο ακριβή laser τοποθετημένα ένα σε κάθε άκρο της οπτικής ίνας. Σήματα αποστέλλονται κατά μήκος της ίνας σε αντίθετες κατευθύνσεις και σε κάθε άκρο της ίνας το τοπικό laser συγκρίνεται με το απομακρυσμένο. Με την επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν από τα δύο άκρα, ο θόρυβος που εισάγεται εξαιτίας των οπτικών ινών μπορεί να απορριφθεί ανακτώντας τη διαφορά μεταξύ των προτύπων συχνότητας που χρησιμοποιήθηκαν προς σύγκριση. [Tampellini, κ.α., 2017] Η τεχνική αυτή υλοποιήθηκε σε δοκιμαστικούς χώρους λίγων εκατοντάδων χιλιομέτρων, επιτυγχάνοντας ένα υπόλοιπο θορύβου φάσης της τάξης του 10^{-19} μετά από λίγες ώρες. [Bercy, κ.α., 2014]

Η τεχνική μεταφοράς με ραδιοσυχνότητες (RF frequency transfer), πραγματοποιείται συνήθως διαμορφώνοντας το πλάτος του οπτικού σήματος, χρησιμοποιώντας είτε ημιτονοειδείς είτε δευτέρου βαθμού αλγοριθμικές κυματομορφές, με αναφορά ραδιοσυχνότητες ή μικροκύματα. Στο απομακρυσμένο άκρο το διαμορφωμένο σήμα ανιχνεύεται από μια φωτοδίοδο. Διάφορα συστήματα διάδοσης ραδιοσυχνοτήτων λειτουργούν περίπου στα 100MHz. Ωστόσο, δεδομένου ότι ο θόρυβος που συσσωρεύεται από το σήμα ενώ ταξιδεύει στην οπτική ίνα είναι ανάλογος με τη συχνότητα του ίδιου του σήματος, η διάδοση μικροκυμάτων επιτρέπει καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο κατά την ανίχνευση, και ως εκ τούτου καλύτερη αντιστάθμιση. Από την άλλη, οι ανώτατες και κατώτερες τιμές των ζωνών διαμόρφωσης επηρεάζονται περισσότερο από τη χρωματική διασπορά της ίνας, η οποία

με τη σειρά της προκαλεί μεταβολές στο εύρος των διαμορφωμένων συχνοτήτων μικροκυμάτων. Επομένως πρέπει να εφαρμοστεί μια παραμετροποίηση και ιεράρχηση στατιστικής προτεραιότητας μεταξύ της μέγιστης συχνότητας λειτουργίας και της μείωσης της αστάθειας που προκαλείται από διασπορά. Ο θόρυβος που εισάγεται, στη συγκεκριμένη περίπτωση, από την ίνα μπορεί να αντισταθμιστεί ενεργά, διαφορετικά από την προηγούμενη τεχνική, με ένα μηχανικό σύστημα που διορθώνει το φυσικό μήκος της ίνας μέσω μιας κατάλληλης μετρολογικής συσκευής (piezo stretcher). [Schediwy, κ.α., 2017] Η μετάδοση μιας συχνότητας των 10 GHz σε αστικό βρόχο 86km, μπορεί να πραγματοποιηθεί με απόλυτη σταθερότητα, κάτω από 10^{-18} , μετά από μία ημέρα λειτουργίας. [Lopez, κ.α., 2009]

Μια διαφορετική προσέγγιση, για την αντιστάθμιση του θορύβου που προκύπτει από τη μεταφορά της συχνότητας μέσω ιών με τη συγκεκριμένη τεχνική, χρησιμοποιεί ηλεκτρονικές γραμμές καθυστέρησης ως εκκινητές της διαδικασίας των διορθώσεων. [Sliwczynski, κ.α., 2015] Μια εφαρμογή αυτής της προσέγγισης έχει πραγματοποιηθεί σε έναν δίκτυο 615km, μεταφέροντας 10MHz και 100MHz, φτάνοντας σε επίπεδο 10^{-17} μετά από λειτουργία 105 δευτερολέπτων. [Krehlik, κ.α., 2013]

Ακόμη μια διαφορετική προσέγγιση, βασίζεται σε συζευκτικές φάσης (phase conjugators). Η προσέγγιση εκμεταλλεύεται ένα σήμα ανιχνευτή, που εξάγεται από το κύριο σήμα, για να αναδείξει τις διακυμάνσεις φάσης που εισήχθησαν από την ίνα. Οι εξαγόμενες διακυμάνσεις τροφοδοτούνται κατόπιν με αντίθετη φορά σε σχέση με τις ραδιοσυχνότητες, με σκοπό να προ-παραμορφωθεί το κύριο σήμα (από το πρότυπο οπτικής συχνότητας). [He, κ.α., 2013] Αν και βασίζεται σε ένα μάλλον απλό σχήμα, παρουσιάζει επιπλοκές όπως είναι η διαρροή σήματος και μακροπρόθεσμες παραμορφώσεις των ηλεκτρονικών συστημάτων. Αυτή η προσέγγιση έχει εφαρμοστεί πειραματικά σε ένα σύνδεσμο 150 χιλιομέτρων διανέμοντας ένα σήμα ραδιοσυχνοτήτων στα 80MHz, φτάνοντας επίπεδο 10^{-17} μετά από λειτουργία 104 δευτερολέπτων. [Wang, κ.α., 2012]

Η τεχνική της φιλτραρισμένης συχνότητας (frequency comb transfer), δημιουργήθηκε με σκοπό να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα των δυο προηγούμενων τεχνικών. Βασίζεται στη διάδοση laser «κλειδωμένου» σε συγκεκριμένη συχνότητα, την οποία «διασπά» σε πολλές γειτονικές συχνότητες με χρήση ειδικής ηλεκτρο-οπτικής

διάταξης. Η διάδοση του οπτικού φορέα επιτυγχάνεται με τη μεταφορά ενός φίλτρου, ενώ η διάδοση ραδιοσυχνοτήτων μπορεί να εκτελεστεί, ανιχνεύοντας το ρυθμό επανάληψης του μεταδιδόμενου φίλτρου. Επομένως ανιχνεύεται η επαναληψιμότητα του διαστήματος εμφάνισης του φίλτρου συχνότητας μεταξύ διαδοχικών περιόδων, το οποίο είναι συνήθως στο εύρος εκατοντάδων megahertz. [Marra, 2011] Η ακύρωση του θορύβου πραγματοποιείται από τις συγκρίσεις του τοπικού και του απομακρυσμένου ποσοστού επανάληψης μετά την επιστροφή, όπως πραγματοποιούνταν και στις προηγούμενες τεχνικές. Ειδικές μετρολογικές κατασκευές και ειδικά ελεγχόμενα από τη θερμοκρασία πηνία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εκκινητές. Αυτή η τεχνική έχει εφαρμοστεί πειραματικά σε ένα σύνδεσμο 7.7 χιλιομέτρων φτάνοντας σε επίπεδο 10^{-18} . [Marra, κ.α., 2012]

Η χρήση των οπτικών ινών πλέον αρχίζει να γίνεται πιο ευρεία και πραγματοποιούνται πειράματα που αξιοποιούν ήδη υπάρχοντα δίκτυα οπτικών ινών μεγάλων αποστάσεων, τα οποία χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα για τη μετάδοση δεδομένων internet. Σε αυτές τις περιπτώσεις εφαρμόζονται οι παραπάνω τεχνικές και προσεγγίσεις αλλά υπάρχει μέριμνα για πρόσθετους κόμβους και κέντρα επεξεργασίας κατά μήκος της χιλιομετρικής απόστασης των οπτικών ινών. Για παράδειγμα έχει πραγματοποιηθεί μεταφορά συχνότητας στο οπτικό φάσμα σε απόσταση μεγαλύτερη από 540 χιλιόμετρα μέσω οπτικών ινών. Για να εφαρμοστεί αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο κεντρικές εγκαταστάσεις διαχείρισης δεδομένων και τρεις ενισχυτές τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιώντας δεκαέξι πολυπλέκτες και έξι ενισχυτές. Η κύρια δυσκολία λειτουργίας τέτοιων πολυπλεξικών οπτικών μέσων μεταφοράς προκύπτει από τις αντανάκλασεις που περιορίζουν το εύρος λειτουργίας των ενισχυτών και αποτρέπουν την αντιστάθμιση των απωλειών. Με τέτοια συστήματα μπορεί να επιτευχθεί αστάθεια $4 \cdot 10^{-15}$ σε 1 δευτερόλεπτο, με μέσο όρο έως περίπου $3 \cdot 10^{-19}$ μετά από περίπου 30000 δευτερόλεπτα. [Lopez, κ.α., 2012]

Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι οι μη αποκλειστικής χρήσης σύνδεσμοι ινών είναι προσοδοφόρα εναλλακτική λύση σε σχέση με τις συνδέσεις "σκοτεινών ινών". Με τέτοιες συνδέσεις στο διαδίκτυο, ο ρυθμός μετάδοσης συχνότητας θα μπορούσε να προβλεφθεί για ένα μεγάλο σύνολο επιστημονικών χρηστών που χρησιμοποιούν πυκνές εγκαταστάσεις δικτύου ινών. Επίσης πρόσφατες έρευνες αναφέρουν την αξιοποίηση τόσο υπέργειων, υπόγειων αλλά ακόμα και υποβρύχιων και

υποθαλάσσιων τμημάτων δικτύων οπτικών ινών. [Calonico, κ.α., 2018] Σε συνδυασμό με τεχνικές πολλαπλών σημείων που μπορούν να εξυπηρετήσουν πολλούς χρήστες με ένα μόνο οπτικό σύνδεσμο, αυτοί είναι πλέον ελκυστικοί για τη διάδοση συχνότητας ηπειρωτικής κλίμακας. Αυτό θα επιτρέψει ένα ευρύ φάσμα μετρήσεων υψηλής ευαισθησίας, συμπεριλαμβανομένης της αναζήτησης παραλλαγών θεμελιωδών σταθερών και βαρυτική χαρτογράφηση της Γης.

Επομένως, οι διαφορετικές προσεγγίσεις για τη μεταφορά χρόνου και συχνότητας στο μικροκυματικό και οπτικό φάσμα, μέσω δορυφόρων, συνδέσεων ελεύθερου αέρα, συνδέσμων οπτικών ινών ή μεταφερόμενων μετρητικών διατάξεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουν ένα υβριδικό δίκτυο που μπορεί να επιτρέψει έναν μελλοντικό επαναπροσδιορισμό της μονάδας του χρόνου βάσει μίας κοινής οπτικής μετάβασης αναφοράς. [Riehle, 2017]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΟΠΤΙΚΑ ΑΤΟΜΙΚΑ ΡΟΛΟΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

3.1 Αρχική αντίληψη του χρόνου

Η περιοδικότητα της φαινομενικής κίνησης των ουράνιων σωμάτων και των σχετικών παραλλαγών στο φως της ημέρας, οι εποχές ή οι παλίρροιες στην ακτή διέπουν όλη τη ζωή στη Γη. Επομένως η ανθρωπότητα θέλησε να ομαδοποιήσει τα σχετικά γεγονότα και ημερομηνίες με χρονολογική σειρά χρησιμοποιώντας τα χρονικά διαστήματα που βρέθηκαν σε αυτές τις περιοδικότητες ως φυσικά μέτρα του χρόνου. Ως εκ τούτου, τα αντίστοιχα αρχικά ημερολόγια βασίστηκαν σε ημέρες, μήνες και χρόνια που σχετίζονται με τις τυπικές συχνότητες της περιστροφής της Γης γύρω από τον πολικό άξονα της (μία φορά την ημέρα), γύρω από τον Ήλιο (μία φορά το χρόνο) και τη μηνιαία περιστροφή της Σελήνης γύρω από τη Γη (μία φορά το μήνα), αντίστοιχα. Η σύγκριση και η κοινή αναφορά ενός χρονικού διαστήματος μεταξύ δύο ή και παραπάνω συμβαλλόμενων μερών μπορούσε να ήταν δυνατή εφόσον όλα τα μέλη αναφερόταν στην ίδια μονάδα χρόνου, π.χ. την ημέρα, η οποία στη συνέχεια χρησίμευσε ως φυσικό πρότυπο χρόνου. [\[Riehle., 2006\]](#)

Ομοίως, ένα φυσικό πρότυπο συχνότητας μπορεί να προέρχεται από ένα τέτοιο φυσικό ρολόι. Επομένως, το ημερολόγιο επέτρεψε τη ρύθμιση μιας χρονική κλίμακας, βασισμένης σε ένα κοινά συμφωνημένο σημείο εκκίνησης και στη μονάδα κλίμακας.

Η χρήση των ρολογιών της Φύσης ακολουθώντας την κίνηση των ουράνιων σωμάτων έχει δύο μειονεκτήματα. Πρώτον, μια καλή κλίμακα χρόνου απαιτεί ότι η μονάδα κλίμακας δεν πρέπει να διαφέρει ανάλογα με το χρόνο. Δεύτερον, ως αποτέλεσμα της χαμηλής συχνότητας περιστροφής των μακροσκοπικών ουράνιων σωμάτων, η συγκεκριμένη χρονική κλίμακα είναι γενικά πολύ μεγάλη για τεχνικές εφαρμογές.

Κατά συνέπεια, κατά την εποχή των πρώτων μεγάλων πολιτισμών, η ώρα της ημέρας είχε ήδη χωριστεί σε μικρότερα τμήματα και τα ημερολόγια συμπληρώθηκαν από τεχνητά ρολόγια. Ένα τεχνητό ρολόι είναι μια συσκευή που παρουσιάζει συνεχώς ίσες αυξήσεις του χρόνου που έχει παρέλθει. Την εποχή εκείνη οι πρόδρομοι των σημερινών

ρολογιών περιλάμβαναν ηλιακά ρολόγια, ρολόγια νερού ή γυαλιά άμμου σε διάφορες τροποποιήσεις. [Riehle., 2006]

Η πρόοδος στην παραγωγή τεχνητών ρολογιών προέκυψε όταν χρησιμοποιήθηκαν συστήματα ταλάντωσης που λειτουργούν με συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού που ορίζεται από τις ιδιότητές τους. Εάν η συχνότητα ταλάντωσης αυτού του συστήματος είναι γνωστή, η περίοδος πλήρους ολοκλήρωσης του φαινομένου της ταλάντωσης του, ορίζει μια χρονική αύξηση. Επομένως, οποιοδήποτε χρονικό διάστημα μπορεί να μετρηθεί μετρώντας τον αριθμό των παρελθόντων κύκλων και πολλαπλασιάζοντας αυτόν τον αριθμό με το χρονικό διάστημα της περιόδου του φαινομένου.

Κάθε συσκευή που παράγει συγκεκριμένη γνωστή συχνότητα ονομάζεται πρότυπο συχνότητας και, ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση ενός ρολογιού. Για να δημιουργηθεί ένα ορθά λειτουργικό ρολόι απαιτείται ο σχεδιασμός ενός συστήματος όπου η συχνότητα ταλάντωσης του δεν επηρεάζεται ούτε από αλλαγές στο περιβάλλον, ούτε από τις συνθήκες λειτουργίας ή από το μηχανισμό του. [Ludlow., 2015]

3.2 Εξέλιξη συστημάτων μέτρησης χρονικών διαφορών

Η αναγκαιότητα για την ύπαρξη και τη διατήρηση μιας ενιαίας κλίμακας χρόνου οδήγησε στην εξέλιξη των διατάξεων των τεχνητών ρολογιών (ρολογιών κατασκευασμένων από τον άνθρωπο). Η εξέλιξη των τεχνητών ρολογιών ακολουθούσε πάντα τις σύγχρονες τεχνολογικές ανακαλύψεις και πολύ συχνά τις επικουρούσε. Σημαντικό είναι ότι η ακρίβεια των τεχνητών ρολογιών αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό ακόμα και στη σημερινή εποχή, με αποτέλεσμα η παρατήρηση χρόνου και συχνότητας να γίνεται με τόσο μικρή αβεβαιότητα, ώστε να μπορούν πλέον να μελετηθούν φαινόμενα που παλαιότερα δεν ήταν δυνατό να ερευνηθούν. [Poli, κ.α., 2014]

Οι κύριες κατηγορίες τεχνητών ρολογιών από την αρχική τους εφεύρεση μέχρι και σήμερα είναι με χρονολογική σειρά, τα μηχανικά, τα ηλεκτρονικά και τα ατομικά ρολόγια. Ουσιαστική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών είναι ότι τα μηχανικά χρησιμοποιούν ένα μηχανικό εκκρεμές, τα ηλεκτρονικά χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τον ηλεκτρισμό, ενώ τα ατομικά ρολόγια χρησιμοποιούν ένα κβαντικό

σύστημα όπου η συχνότητα ταλάντωσης σχετίζεται με τη διαφορά ενέργειας μεταξύ δύο κβαντικών καταστάσεων.

Ωστόσο οι κατηγορίες αυτές χαρακτηρίζονται γενικές και παρακάτω περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους καθώς και οι σημαντικότερες υποκατηγορίες τους.

3.2.1 Μηχανικά ρολόγια

Στα μηχανικά ρολόγια, απαιτούνται δύο διαφορετικές λειτουργίες. Η πρώτη είναι η μέτρηση και η παρουσίαση του χρόνου που έχει παρέλθει. Η δεύτερη αναφέρεται στην τροφοδοσία του ταλαντωτή με την απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται για τη διατήρηση της ταλάντωσης. Αυτή η ενέργεια από μία εξωτερική πηγή είναι απαραίτητη, δεδομένου ότι οποιοδήποτε ελεύθερα ταλαντούμενο σύστημα επηρεάζεται από το περιβάλλον, επομένως θα αρχίσει η διαδικασία της απώλειας ενέργειας, που θα αναγκάσει τελικά το σύστημα ταλαντώσεων να σταματήσει.

Από τις αρχές του 14ου αιώνα μεγάλα μηχανικά ρολόγια, που βασίζονταν σε ταλαντευόμενα συστήματα χρησιμοποιήθηκαν σε πύργους Ιταλικών καθεδρικών ναών. Η ενέργεια για το ρολόι παρεχόταν από βάρη, που ελευθερώνουν ενέργεια εξαιτίας του βαρυτικού δυναμικού της Γης.

Παρόλο που αυτά τα ρολόγια στηρίζονταν ουσιαστικά στις ίδιες φυσικές αρχές, που αργότερα υιοθετήθηκαν με επιτυχία, η λειτουργική υλοποίηση τους τα έκανε πολύ ευαίσθητα στην τριβή και πλήρως επηρεαζόμενα από την κινητήρια δύναμη. Πιστεύεται ότι τα αρχικά μηχανικά ρολόγια είχαν σχετική ακρίβεια της τάξης του ενός τετάρτου της ώρας την ημέρα. [Loomis., 1931]

3.2.1.1 Μηχανικά ρολόγια και εκκρεμή

Για την αποκατάσταση και βελτιστοποίηση της ακρίβειας των αρχικών μηχανικών ρολογιών, ξεκίνησε η αξιοποίηση ρολογιών εκκρεμών υψηλής ποιότητας. Πιο συγκεκριμένα, ο Γαλιλαίος διαπίστωσε ότι η περίοδος ταλάντωσης ενός εκκρεμούς δεν εξαρτάται από το πλάτος ταλάντωσης του αλλά μάλλον είναι συνάρτηση του μήκους του εκκρεμούς. Το πρώτο λειτουργικό εκκρεμές ρολόι, εφευρέθηκε από τον Ολλανδό φυσικό Huygens (1656). Αυτό το ρολόι αναφέρεται πως είχε

ακρίβεια ένα λεπτό την ημέρα (ουσιαστικά ενδεχομένως να έχανε έως ένα λεπτό ανά ημέρα) και αργότερα βελτιώθηκε σε δέκα δευτερόλεπτα ανά ημέρα. [Bennet κ.α., 2002]

Το ρολόι του εκκρεμούς βελτιώθηκε περαιτέρω από τον Graham (1721) που χρησιμοποίησε μια τεχνική αντιστάθμισης της θερμοκρασίας του εκκρεμούς, με αποτέλεσμα η αβεβαιότητα να είναι της τάξης του ενός δευτερολέπτου ανά ημέρα. [Denny, 2002]

Η συμβολή των ρολογιών ακριβείας ήταν από τότε σημαντικής σημασίας, με αρχικό παράδειγμα τη συμβολή στη πρόοδο της κυκλοφορίας και της ασφάλειας της θαλάσσιας κυκλοφορίας, μέσω της ανάπτυξης ενός θαλάσσιου χρονομέτρου από τον Harrison (1761). Το συγκεκριμένο χρονόμετρο ήταν ακριβές στα 0,2 δευτερόλεπτα ανά ημέρα, ακόμη και σε συνεχώς μετακινούμενο θαλάσσιο σκάφος. [Smiles., 1982]

Οι βελτιώσεις συνεχίστηκαν με πολύ σταθερά ρολόγια εκκρεμών όπως αυτά που κατασκευάστηκαν από τον Riefler στη Γερμανία στα τέλη του 19ου αιώνα. [Smith., 1911] Τα ρολόγια Riefler ήταν σταθερά έως το ένα εκατοστό του δευτερολέπτου την ημέρα και χρησίμευσαν ως πρότυπα χρονικών διαστημάτων στα νεοσυσταθέντα Εθνικά Ινστιτούτα Προτύπων πριν αντικατασταθούν από το ρολόι Shortt.

Ο Shortt (1920) ανέπτυξε ένα ρολόι με δύο συγχρονισμένα εκκρεμή. Τα ρολόγια Shortt διατηρούσαν χρόνο καλύτερα από 2 χιλιοστά του δευτερολέπτου την ημέρα και καλύτερα από ένα δευτερόλεπτο ανά έτος. [Matthys., 2004]

3.2.2 Ρολόγια χαλαζία

Περίπου το 1930 εφευρέθηκαν τα ρολόγια που βασίζονται σε ταλαντωτές χαλαζία. Τα ρολόγια αυτά ταλαντώνονταν σε συχνότητες περίπου 100 kHz, και διέθεταν βοηθητικά κυκλώματα και εξοπλισμό ελέγχου θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να καταφέρουν να χρησιμοποιηθούν ως πρότυπα ραδιοσυχνοτήτων και αργότερα να αντικαταστήσουν πλήρως τα μηχανικά ρολόγια για τη μέτρηση του χρόνου. Η συχνότητα των ρολογιών χαλαζία εξαρτάται από την περίοδο κατάλληλης ελαστικής ταλάντωσης, ενός προσεκτικά κομμένου και κατασκευασμένου κρυστάλλου χαλαζία. Η μηχανική ταλάντωση συνδέεται με ηλεκτρονικά παραγόμενη ηλεκτρική ταλάντωση μέσω του

πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Οι ταλαντωτές χαλαζία ολισθαίνουν σε συχνότητα (που αθροίζεται σε περίπου 1ms την ημέρα), επομένως οφείλουν να βαθμονομηθούν πρώτα ώστε να αξιοποιηθούν ως πρότυπα συχνότητας. Η βαθμονόμηση της συχνότητας προέκυπτε από τη διαφορά στις ακριβείς μετρήσεις του μέσου ηλιακού χρόνου που καθορίζεται από αστρονομικές παρατηρήσεις. [Lombardi., 2011]

Σήμερα, οι ταλαντωτές χαλαζία χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές και σχεδόν όλα τα ρολόγια που λειτουργούν με μπαταρία βασίζονται σε ταλαντωτές χαλαζία.

3.2.3 Ατομικός χρόνος

Ο ατομικός χρόνος με το αντίστοιχο πρότυπο της συχνότητας που δημιουργήθηκε, αναλύθηκαν και υιοθετήθηκαν μετά το 1959, όπου η βαρυτική αλληλεπίδραση επιβεβαιώθηκε σε εργαστηριακό πείραμα. Δύο πυρήνες σιδήρου που εκπέμπουν ακτίνες γ σε διαφορετικά ύψη συγκρίθηκαν, επιβεβαιώνοντας την αλληλεπίδραση με ακρίβειες της τάξης του 10% του συνολικού μετρούμενου μεγέθους .

Από τότε, η ακρίβεια και η σταθερότητα των ατομικών ρολογιών άρχισαν να βελτιώνονται συνεχώς, με μια τάξη μεγέθους ακρίβειας αυξανόμενη κάθε δέκα χρόνια. Σε αυτό το πλαίσιο, η μονάδα χρόνου του Διεθνούς Συστήματος Μονάδων (SI), το δευτερόλεπτο, ήταν τυπικά προσδιορισμένη σε σχέση με μια συγκεκριμένη ενεργειακή μετάπτωση του ατόμου του καυσίου. Πιο συγκεκριμένα το 1967, το δευτερόλεπτο ορίστηκε ως η διάρκεια 9192631770 περιόδων της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην μετάπτωση μεταξύ των δύο επιπέδων υπέρλεπτης υφής της βασικής στάθμης του ατόμου του καυσίου-133 στο γεωειδές.

Αυτή η αλλαγή υιοθετήθηκε επίσημα στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων, και οδήγησε σε ένα τεχνολογικό άλμα. Από τη δεκαετία του 1910 έως τα μέσα της δεκαετίας του 1950, ο ακριβέστερος τρόπος για να διατηρηθεί ο χρόνος ήταν ο συγχρονισμός των καλύτερων ρολογιών χαλαζία, με την κίνηση της Γης γύρω από τον ήλιο. Αυτό έγινε χρησιμοποιώντας τηλεσκόπια και άλλα όργανα για την περιοδική μέτρηση της κίνησης των αστεριών στον ουρανό. Αλλά το 1955, η ακρίβεια αυτής της μεθόδου υπερκαλύφθηκε από το πρώτο ατομικό ρολόι του καυσίου, το οποίο παρουσιάστηκε στο Εθνικό Φυσικό Εργαστήριο του Ηνωμένου Βασιλείου. Ακολούθησε η ανάπτυξη τοπικών

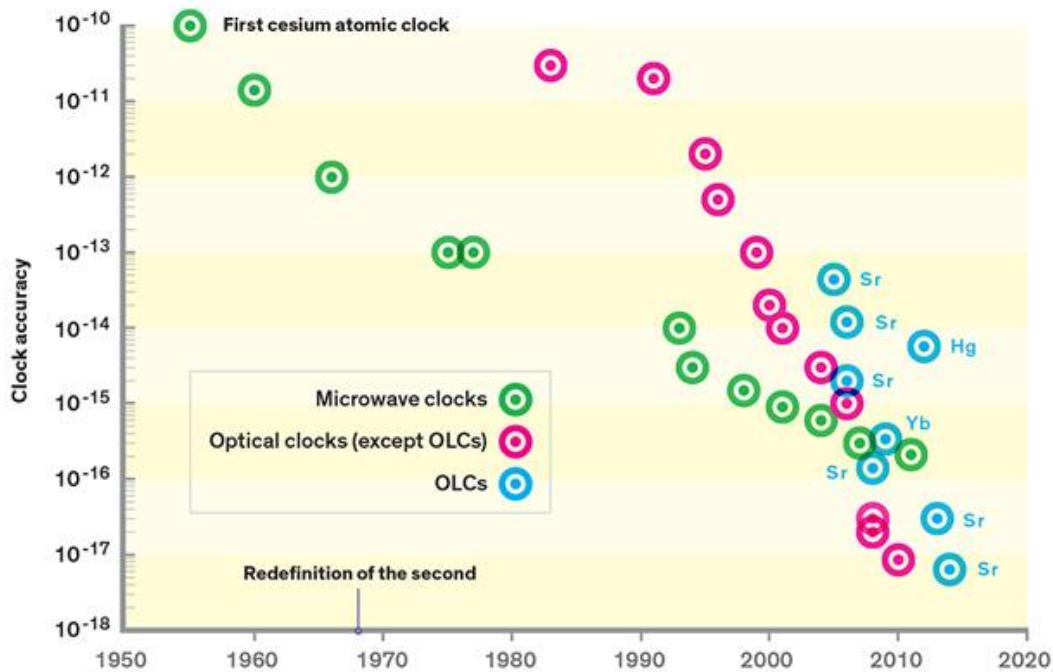
ατομικών συστημάτων αναφοράς χρόνου που αναπτύχθηκαν λόγω της ανάπτυξης των εμπορικών ρολογιών καισίου [Audoin., κ.α., 2001].

Στη συνέχεια καθώς δημιουργήθηκαν τα αρχικά εργαστηριακά πρότυπα καισίου, προέκυψε η ανάγκη να συγκριθούν οι επιμέρους τεχνικές μέτρησης και διατήρησης του χρόνου, προκειμένου να υλοποιηθεί μια μέση διεθνής ατομική ώρα, η οποία θα μπορούσε να υιοθετηθεί από όλους.

Αυτό έγινε αρχικά με χρήση ραδιοφωνικών σημάτων, τα οποία επέτρεψαν τη σύγκριση χρόνου με ακρίβεια της τάξης του 1 ms. Μία σημαντική βελτίωση της ακρίβειας πραγματοποιήθηκε μέσω της δυνατότητας χρήσης μεταφορικών αεροπορικών πτήσεων για τη μεταφορά των ρολογιών του καισίου, επιτρέποντας μεταφορά χρόνου με αβεβαιότητα περίπου 1 μs. Αυτό οδήγησε το 1971 στη χρήση τεσσάρων ρολογιών καισίου σε όλο τον κόσμο στις εμπορικές αεροπορικές πτήσεις, τα οποία προέβλεπαν και μέτρησαν τον αποσυγχρονισμό των διατάξεων των ρολογιών αυτών σε σχέση με την ατομική κλίμακα που υφίστανται τότε, επιβεβαιώνοντας τη βαρυτική αλληλεπίδραση σε ποσοστό 12%. [Forman., 1985]

Στη συνέχεια ακολούθησαν πειράματα που αφορούσαν στην ανίχνευση της βαρυτικής αλληλεπίδρασης σε ποσοστό 20%, μέσω της άμεσης σύγκρισης της μεταβολής των προδιαγραφών δύο επίγειων ατομικών ρολογιών καισίου που είχαν τοποθετηθεί σε διαφορετικό υψόμετρο.

Η ακρίβεια του ρολογιού του καισίου έχει βελτιωθεί σημαντικά από το 1955 (εικόνα 3.1), αυξανόμενη κατά 10 περίπου φορές κάθε δεκαετία. Σύμφωνα όμως με τη σύγχρονη εξέλιξη της τεχνολογίας και της τεχνολογίας, ακόμα και η αβεβαιότητα αυτής της τάξης μπορεί να μειωθεί. Μια νέα γενιά ατομικών ρολογιών που χρησιμοποιούν laser αντί της ακτινοβολίας μικροκυμάτων μπορεί να διαιρέσει το χρόνο σε μικρότερες υποδιαιρέσεις. Ερευνητές έχουν ολοκληρώσει τις διαδικασίες δημιουργίας οπτικών ατομικών ρολογιών, με βάση μεμονωμένα ιόντα είτε αλουμινίου είτε υδραργύρου. Αυτά ξεπερνούν την ακρίβεια των ρολογιών του καισίου κατά μία πλήρη τάξη μεγέθους.



Εικόνα 3.1 Εξέλιξη ακρίβειας ρολογιών ανά είδος κατά χρονολογία
 [Πηγή : spectrum.ieee.org, 2019]

Πλέον η ακρίβεια προσδιορισμού συχνοτήτων αντιστοιχεί σε 10^{-18} και αυτό οφείλεται στα οπτικά ατομικά ρολόγια και η σύγκριση είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και μεταξύ διαφορετικών ηπειρών μέσω της χρήσης δικτύων οπτικών ινών. Επίσης τα εξελιγμένα οπτικά ατομικά ρολόγια προσφέρουν μεγαλύτερη σταθερότητα και αξιοπιστία στις σύγχρονες ανάγκες ακρίβειας.

3.2.4 Ατομικά ρολόγια

Ένα ατομικό ρολόι είναι μια συσκευή που παράγει ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα (στο μικροκυματικό ή οπτικό φάσμα) του οποίου η συχνότητα είναι «κλειδωμένη» στη μη διαταραγμένη συχνότητα μετάβασης μεταξύ δύο ενεργειακών καταστάσεων ενός ατόμου ή ιόντος. Πιο συγκεκριμένα, ένα τυπικό ατομικό ρολόι αποτελείται από έναν ταλαντωτή, είτε μικροκυμάτων είτε laser (οπτικό), του οποίου η συχνότητα ταλάντωσης είναι τεχνικά περιορισμένη ώστε να ταυτίζεται με τη συχνότητα συντονισμού ενός ή περισσότερων ατόμων. Επειδή όλα τα άτομα / ιόντα ενός δεδομένου ισότοπου είναι πανομοιότυπα, ένα ατομικό ρολόι είναι μια παγκόσμια χρονική συσκευή, η οποία παρέχει τον ίδιο χρόνο με δεδομένες και μη μεταβλητές τεχνικές ατέλειες.

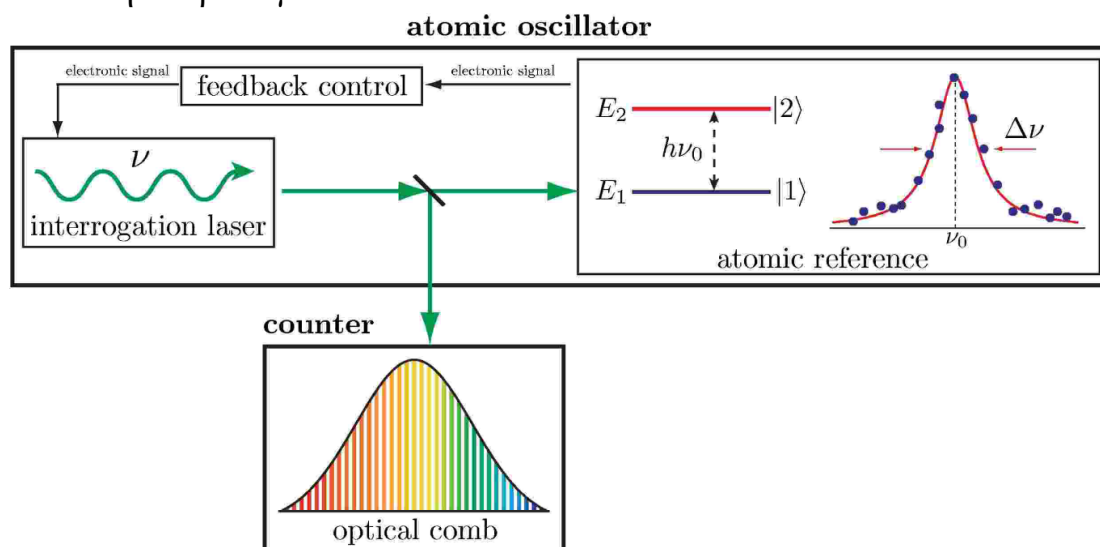
Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση ενός οπτικού ατομικού ρολογιού. Αρχικά ο ταλαντωτής (interrogation laser) συντονίζεται με την ατομική μετάβαση. Στη συνέχεια, ένα διορθωτικό σήμα, το οποίο προέρχεται από μελέτη φασματοσκοπίας (feedback control) τροφοδοτείται πίσω στο laser. Ένας συνθέτης συχνότητας που λειτουργεί στο οπτικό φάσμα (optical comb) χρησιμοποιείται για τη διαίρεση της συχνότητας μετάβασης σε μετρήσιμα σήματα μικροκυμάτων ή ραδιοσυχνοτήτων.

Υπάρχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση ατομικών ρολογιών, η σταθερότητα και η αβεβαιότητα.

Η σταθερότητα είναι ένα μέτρο της ακρίβειας με την οποία μπορεί να μετρηθεί μια ποσότητα, και συνήθως εκφέρεται ως συνάρτηση του μέσου όρου του παρατηρούμενου χρόνου, καθώς για πολλές διαδικασίες ο θόρυβος μειώνεται κατά μέσο όρο όταν πραγματοποιούνται περισσότερες μετρήσεις.

Η αβεβαιότητα ενός ατομικού ρολογιού αναφέρεται στις φυσικές διεργασίες που μπορούν να μετατοπίσουν τη μετρούμενη συχνότητα από την αδιατάρακτη φυσική ατομική συχνότητα.

Ο συνδυασμός της σταθερότητας και της αβεβαιότητας ενός ατομικού ρολογιού αναφέρεται ως ακρίβεια του ρολογιού και είναι το πρωταρχικό στοιχείο που παρουσιάζεται σχετικά με την επιλογή του κατάλληλου ρολογιού.



Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση τυπικού ατομικού ρολογιού
[Πηγή : Poli, κ.α., 2014]

Για τη σύγκριση ρολογιών διαφορετικών συχνοτήτων ταλάντωσης εκφράζονται οι δύο κύριες συνιστώσες ποσοτικής αξιολόγησης του ρολογιού, δηλαδή η σταθερότητα (ή αντίστροφα, αστάθεια, όπως συνήθως χρησιμοποιείται σε συγκρίσεις ρολογιού) και η απόλυτη αβεβαιότητα, σε κλασματικές μονάδες.

Τα καλύτερα ατομικά ρολόγια πλησιάζουν αβεβαιότητες της τάξης του 10^{-18} , με κλασματική συχνότητα που δημιουργούν μερικές από τις πιο ακριβείς συσκευές μέτρησης που έχουν κατασκευαστεί ποτέ. Μπορούν να συγκριθούν μέσα στο ίδιο εργαστήριο ή σε μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιώντας την ανταλλαγή ηλεκτρομαγνητικών σημάτων σε ελεύθερο χώρο και δορυφόρους ή μέσω καλωδίων ή οπτικών ινών.

Όσο λιγότερος χρόνος απαιτείται για τη συλλογή των δεδομένων, για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η συχνότητα ενός ατομικού ρολογιού, τόσο πιο γρήγορα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ρολόι για να εκτελεστούν πειράματα.

Η αξιολόγηση ενός ρολογιού απαιτεί ένα άλλο, συγκρίσιμο ρολόι, για να χρησιμεύσει ως αναφορά. Όταν τα οπτικά ατομικά ρολόγια αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά πριν από μια δεκαετία, οι αρχικές συγκρίσεις έγιναν μεταξύ οπτικών ατομικών ρολογιών στροντίου και ρολογιών καισίου. Αυτές οι μετρήσεις ήταν αρκετές για να επιβεβαιώσουν την υπεροχή των οπτικών ατομικών ρολογιών όσον αφορά στην ακρίβεια. Ωστόσο για να διαπιστωθεί πραγματικά η ακρίβεια ενός ατομικού ρολογιού, είναι σημαντικό να συγκριθούν απευθείας δύο ρολόγια του ίδιου τύπου. [Ramsey., 2005]

3.2.4.1 Ατομικά ρολόγια καισίου – μικροκυμάτων

Τα ατομικά ρολόγια του καισίου, τα οποία είναι ουσιαστικά ταλαντωτές ακριβείας, χρησιμοποιούν ακτινοβολία μικροκυμάτων για να διεγείρουν τα ηλεκτρόνια και να λάβουν μια σταθερή τιμή σε μια συχνότητα που είναι εγγενής στο άτομο του καισίου. Όταν πρωτοεμφανίστηκαν τα ρολόγια καισίου, οι ερευνητές μπορούσαν πλέον να επιλύσουν, να μοντελοποιήσουν και να αναλύσουν τις μικρές, ακανόνιστες επιταχύνσεις και την επιβράδυνση της περιστροφής της Γης.

Η ανάπτυξη των ατομικών ρολογιών αποτέλεσε την απαρχή για την ίδρυση και τη διατήρηση των ορθών χρονικών διαφορών του

Παγκόσμιου Συστήματος Δορυφορικού Εντοπισμού (GNSS), καθώς επίσης βοηθούν στο συγχρονισμό των επικοινωνιών μέσω Διαδικτύου και κινητών τηλεφώνων, στη σύνδεση των συστοιχιών τηλεσκοπίων και σε πειράματα θεμελιώδους φυσικής.

Η ακρίβεια του ρολογιού του καισίου έχει βελτιωθεί σημαντικά από το 1955, αυξάνοντας κατά 10 περίπου φορές κάθε δεκαετία. Σήμερα, η χρονομέτρηση που βασίζεται σε ρολόγια καισίου ενδεχομένως να συγκεντρώνει σφάλματα με ρυθμό μόλις 0,02ns/ημέρα. [Delva κ.α., 2016]

3.2.4.2 Οπτικά ατομικά ρολόγια

Η μετάβαση σε υψηλότερες συχνότητες είναι αυτό που παρακίνησε τη δημιουργία των οπτικών ατομικών ρολογιών. Το πρώτο από αυτά τα ρολόγια αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και σήμερα μπορεί να κατασκευαστεί από μια σειρά ουδέτερων (neutral atom-based) ή ιοντισμένων εκδόσεων στοιχείων (ion based), όπως ο υδράργυρος (Hg), το στρόντιο (Sr), το ασβέστιο (Ca) και το υτέρβιο (Yb). Το κοινό γνώρισμα αυτών, είναι οι σχετικά υψηλές συχνότητες συντονισμού, οι οποίες βρίσκονται στο οπτικό φάσμα, σε συχνότητες αρκετών εκατοντάδων χιλιάδων gigahertz. Με τη χρήση υψηλότερης συχνότητας μειώνεται ο θόρυβος κβαντικής προβολής (βλ. παρ. 3.3.1), καθώς επίσης μειώνεται η σχετική επίδραση πολλών παραγόντων που μπορούν να μεταβάλουν τη συχνότητα ρολογιού. Αυτές περιλαμβάνουν αλληλεπιδράσεις με εξωτερικά μαγνητικά πεδία που προέρχονται από τη Γη ή το κοντινό περιβάλλον. Ως πρόσθετο χαρακτηριστικό, εάν ένα οπτικό ατομικό ρολόι αποτελείται από ιόντα, αυτά τα φορτισμένα άτομα μπορούν εύκολα να παγιδευτούν σε ένα ταλαντευόμενο ηλεκτρικό πεδίο που θα ακυρώσει το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης τους, εξαλείφοντας αποτελεσματικά το φαινόμενο Doppler.

Ωστόσο τα οπτικά ατομικά ρολόγια έχουν τους δικούς τους περιορισμούς. Εάν όλες οι άλλες ιδιότητες ενός ρολογιού είναι οι ίδιες, η μετάβαση σε οπτικές (υψηλότερες) συχνότητες θα πρέπει να μειώσει το θόρυβο κβαντικής προβολής σε σχεδόν μηδενικά επίπεδα. Όμως, πολλά οπτικά ρολόγια γίνονται με ιόντα αντί για ουδέτερα άτομα. Επειδή είναι φορτισμένα, τα ιόντα είναι αρκετά εύκολο να παγιδευτούν, αλλά μπορούν επίσης να ωθήσουν το ένα το άλλο όταν τοποθετούνται κοντά, δημιουργώντας κίνηση που είναι δύσκολο να ελεγχθεί προκαλώντας

μετατόπιση συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler. Ως αποτέλεσμα, τέτοια ρολόγια τείνουν να χρησιμοποιούν μόνο ένα ιόν κάθε φορά και έτσι είναι μόνο περίπου 20 φορές πιο σταθερά και 25 φορές πιο ακριβή από τα καλύτερα ρολόγια καισίου, τα οποία μπορούν εύκολα να περιέχουν ένα εκατομμύριο άτομα. [Bauch., 2019]

Ένας από τους βασικούς παράγοντες για την ακριβέστερη απόδοση των οπτικών ατομικών ρολογιών κατά τα τελευταία χρόνια ήταν η ανάπτυξη πηγών laser με πολύ περιορισμένα φασματικά χαρακτηριστικά, λειτουργώντας ουσιαστικά σε μία συγκεκριμένη συχνότητα.

Σε μεγάλο βαθμό λόγω αυτής της προσπάθειας, η σταθερότητα που επιτυγχάνεται εντός μιας ημέρας με ρολόγια καισίου ή μέσα σε λίγα λεπτά με ρολόγια οπτικών ιόντων, μπορεί πλέον να επιτευχθεί σε 1 δευτερόλεπτο με ένα ρολόι οπτικού πλέγματος.

Επομένως τα οπτικά ατομικά ρολόγια έπρεπε να επιλύσουν δύο σημαντικά προβλήματα που εισήγαγαν αβεβαιότητα στον προσδιορισμό συχνότητας, το πρώτο είναι το είδος του ατόμου - ιόντος που αποτελεί το ρολόι και δεύτερο το πλήθος αυτών που μελετώνται ταυτόχρονα, ώστε να εξαλείφεται ο θόρυβος κβαντικής προβολής.

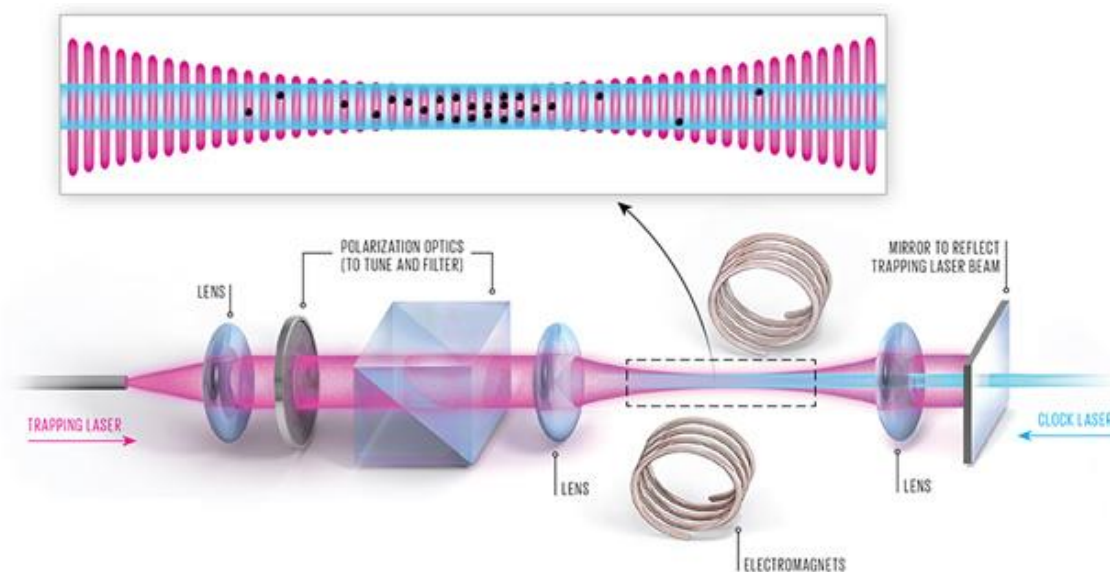
3.2.4.3 Οπτικά ατομικά ρολόγια πλέγματος

Πλέον μια νέα παραλλαγή αυτής της τεχνολογίας, το ρολόι οπτικού πλέγματος (Optical Lattice Clock), έχει πάρει το προβάδισμα. Σε αντίθεση με τα ρολόγια ενός ιόντος, τα ρολόγια οπτικού πλέγματος μπορούν ταυτόχρονα να μετρήσουν χιλιάδες άτομα που περιορίζονται στη θέση τους από μια ισχυρή ακτίνα laser, μειώνοντας τη στατιστική αβεβαιότητα.

Η βασική δομή ενός τέτοιου ρολογιού θα πρέπει να διαμορφώνεται κατασκευαστικά από ένα σύνολο που να είναι περιορισμένο σε διαστάσεις (για να ελαχιστοποιηθεί το φαινόμενο Doppler) και χαμηλής πυκνότητας (για να ελαχιστοποιηθούν οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις). (εικόνα 3.3)

Για να κατασκευαστεί ένα ατομικό ρολόι οπτικού πλέγματος, ένα σύνολο βραδέως κινούμενων ουδέτερων ατόμων ψυχόμενων από πολωμένο φως laser (παγίδευσης) αποστέλλονται σε ένα δοχείο κενού που περιέχει μια απλή εκπεμπόμενη δέσμη laser. Αυτό το φως του laser

αντανακλάται πίσω, με τη βοήθεια ενός καθρέφτη, σχηματίζοντας ένα μοτίβο πλέγματος με περιοχές υψηλής και χαμηλής έντασης, καθώς η δέσμη laser συμβάλλει με τον εαυτό της. Τα άτομα προσελκύονται από χιλιάδες φωτεινές περιοχές σε αυτό το οπτικό πλέγμα, στο οποίο τα άτομα προσπίπτουν εξαιτίας της δύναμης που αντλεί το καθένα από αυτά σε ένα σημείο όπου η ένταση του φωτός είναι στο μέγιστο. Τρία ζεύγη ηλεκτρομαγνητών συντονίζονται για να εξαλείψουν την επίδραση εξωτερικών μαγνητικών πεδίων.



Εικόνα 3.3 Διάγραμμα κατασκευαστικής δομής οπτικών ατομικών ρολογιών πλέγματος [Πηγή : spectrum.ieee.org, 2019]

Μόλις τα άτομα είναι στη θέση τους, χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό "laser του ρολογιού" για να ανακρίνει τα άτομα (interrogation time) έτσι ώστε να μπορεί να μετρηθεί η συχνότητα συντονισμού του ρολογιού.

Τα άτομα του ρολογιού δεν είναι τόσο εύκολο να εξαναγκαστούν σε ένα τέτοιο πλέγμα. Για να δημιουργηθεί ένα πλέγμα αρκετά ισχυρό, ώστε να παγιδεύσει και να κρατήσει ένα ουδέτερο άτομο, χρειάζεται μεγάλη ισχύς φωτός. Ωστόσο, μια τέτοια ισχυρή δέσμη laser, μπορεί να μεταβάλει τα επίπεδα ενέργειας στα άτομα του ρολογιού, μετατοπίζοντας τη συχνότητα μετάβασης. Η ποσότητα αυτής της μετατόπισης θα ποικίλει ανάλογα με την ένταση του φωτός παγίδευσης και αυτή η ένταση είναι δύσκολο να ελεγχθεί. Ακόμα και με πολύ προσεκτική βαθμονόμηση, αυτή η μεγάλη μετατόπιση της συχνότητας θα καθιστούσε το ρολόι πολύ πιο ανακριβές από ό, τι ακόμη και τα πρώτα ρολόγια καισίου.

Το 2002 αποδείχθηκε ότι όταν τα άτομα αλληλοεπιδράσουν με το φως παγίδευσης, η ενέργεια που σχετίζεται με κάθε ενεργειακό τροχιακό επίπεδο ηλεκτρονίων μειώνεται, με αποτέλεσμα κάθε τροχιακό να ανταποκρίνεται διαφορετικά, με μια ενεργειακή μετατόπιση που θα εξαρτηθεί από το μήκος κύματος του φωτός παγίδευσης. Για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος η μετατόπιση και των δύο τροχιακών θα είναι ίδια και έτσι η ενεργειακή διαφορά μεταξύ τους, θα παραμείνει αμετάβλητη. Αυτό το μήκος κύματος, όπου η συχνότητα του ρολογιού παραμένει η ίδια αν τα άτομα είναι παγιδευμένα ή όχι, διαφέρει για κάθε στοιχείο.

Αυτά τα ρολόγια κατάφεραν να ξεπεράσουν τα καλύτερα οπτικά ρολόγια ενός ιόντος, τόσο σε ακρίβεια όσο και σε σταθερότητα. Με την περαιτέρω ανάπτυξη, εκτιμάται ότι δεν θα χάσουν περισσότερο από ένα δευτερόλεπτο σε πάνω από 13,8 δισεκατομμύρια χρόνια συνεχούς λειτουργίας (όση είναι και η ηλικία του Σύμπαντος). [Katori, κ.α., 2011]

Τα ρολόγια οπτικού πλέγματος με τον υψηλό αριθμό των ταυτόχρονα διεγερθέντων ατόμων υπόσχονται εξαιρετική αναλογία σήματος προς θόρυβο καθώς ο θόρυβος της κβαντικής προβολής υπολογίζεται κατά μέσον όρο σε ένα σύνολο μερικών εκατοντάδων έως αρκετών χιλιάδων ατόμων. Συγκεκριμένα, για την εφαρμογή του οπτικού ρολογιού στη γεωδαισία, η υψηλή σταθερότητα του ρολογιού είναι μια πολύ βολική ιδιότητα, καθώς μειώνει το χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου ακρίβειας. Επιτρέπει επίσης την παρακολούθηση των μεταβολών χρόνου, οι οποίες πρέπει να αναλυθούν για να ληφθεί μια στατική λύση.

Στο μέλλον, τα οπτικά ατομικά ρολόγια ενδεχομένως να αντικατασταθούν από ρολόγια ακόμη υψηλότερων συχνοτήτων που βασίζονται σε ενεργειακές μεταβάσεις μέσα στον πυρήνα του ατόμου αντί για τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από αυτόν. [Bloom, κ.α., 2014]

Ανταγωνιστικό πλεονέκτημα των οπτικών ατομικών ρολογιών είναι ότι δεν είναι επιρρεπή στις συνήθεις πηγές εισαγωγής σφαλμάτων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Με σκοπό να γίνουν αντιληπτές όλες οι ιδιότητες των ατομικών, οπτικών ατομικών και των οπτικών ατομικών ρολογιών πλέγματος, είναι απαραίτητη η ανάλυση των βασικών ιδιοτήτων που τα χαρακτηρίζουν. Επομένως στις επόμενες παραγράφους, θα επεξηγηθούν οι αρχές λειτουργίας, οι βασικές ιδιότητες και οι γνωστές

αλληλεπιδράσεις των ατομικών ρολογιών που μπορούν να μοντελοποιηθούν.

3.3 Βασικές αρχές κβαντικής μηχανικής που διέπουν τα ατομικά ρολόγια

Η συχνότητα των ταλαντωτών των ρολογιών υπόκειται σε συστηματικές και τυχαίες μεταβολές σε σχέση με την προβλεπόμενη ονομαστική τιμή εξόδου τους. Οι ατομικές ιδιότητες όπως οι ενεργειακές διαφορές μεταξύ των ηλεκτρονίων και συνεπώς οι συχνότητες μετάπτωσης πιστεύεται ότι είναι φυσικές σταθερές και έτσι δεν εξαρτώνται από το χώρο και το χρόνο, εκτός από τις σχετικιστικές επιδράσεις. Αυτή η βασική αρχή διέπει όλα τα είδη ατομικών ρολογιών.

Σύμφωνα με τους κανόνες της κβαντικής μηχανικής, η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου δεσμευμένου σε ένα άτομο είναι κβαντισμένη. Αυτό σημαίνει ότι ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να καταλαμβάνει μόνο ένα από ένα διακεκριμένο αριθμό ζωνών τροχιάς (τροχιακό) γύρω από τον πυρήνα ενός ατόμου, αν και μπορεί να μεταπηδήσει από μία τροχιά σε άλλη, απορροφώντας ή εκπέμποντας ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επειδή η ενέργεια διατηρείται, αυτή η απορρόφηση ή εκπομπή θα συμβεί μόνο εάν η ενέργεια που αντιστοιχεί στη συχνότητα αυτής της ακτινοβολίας ταιριάζει με τη διαφορά ενέργειας μεταξύ των δύο τροχιακών που εμπλέκονται στη μετάβαση. Τα ατομικά ρολόγια λειτουργούν αξιοποιώντας αυτή τη συμπεριφορά. [Griffiths, κ.α., 2018]

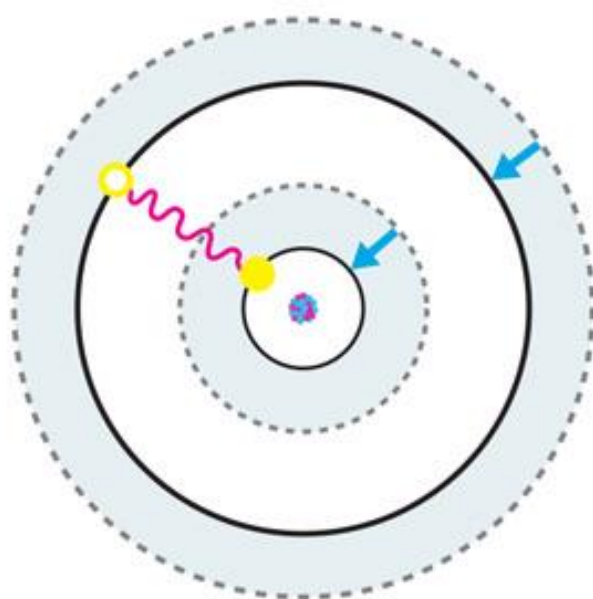
Τα άτομα διεγείρονται με μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συγκεκριμένης συχνότητας, η οποία μπορεί να προκαλέσει ένα ηλεκτρόνιο να μεταβεί σε μια τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας. (διεγερμένη κατάσταση του ρολογιού). Η πιθανότητα αυτής της μετάβασης εξαρτάται από τη συχνότητα της ακτινοβολίας που κατευθύνεται στο άτομο. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο κοντά αυτή βρίσκεται στην ενεργειακή διαφορά των τροχιακών, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να συμβεί η μετάβαση.

Για να διερευνηθεί η συστηματικότητα των μεταβάσεων χρησιμοποιείται μια δεύτερη πηγή ακτινοβολίας, για να διεγερθούν τα ηλεκτρόνια που παραμένουν σε χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση. Η κατάσταση αυτή αντιστοιχεί σε μια κατάσταση βραχείας διάρκειας και μεγαλύτερης ενέργειας. Αυτά τα ηλεκτρόνια απελευθερώνουν φωτόνια

κάθε φορά που επιστρέφουν πίσω από αυτή τη μεταβατική κατάσταση και η προκύπτουσα ακτινοβολία μπορεί να συλλεχθεί με ένα αισθητήρα που ανιχνεύει φως, όπως μια κάμερα ή ένα φωτοπολλαπλασιαστικό σωλήνα. [Razeghi., 2006]

Αν εντοπιστούν λίγα φωτόνια, αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια κάνουν σε μεγάλο βαθμό τη μετάβαση στο ρολόι, επομένως η εισερχόμενη συχνότητα διέγερσης είναι σε καλή αντιστοιχία με τη τιμή της συχνότητας μετάβασης. Αν πολλά φωτόνια απελευθερώνονται, αυτό σημαίνει ότι τα περισσότερα ηλεκτρόνια δεν διεγέρθηκαν από το σήμα του ρολογιού. Χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός βρόχου ανάδρασης για το συντονισμό της πηγής ακτινοβολίας έτσι ώστε η συχνότητά της (συχνότητα αναφοράς) να είναι πάντα κοντά στην συχνότητα της ατομικής μετάβασης.

Ουσιαστικά όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.4, ένα ηλεκτρόνιο (κίτρινη κουκίδα) μπορεί να απορροφήσει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία για να μεταπηδήσει από ένα τροχιακό επίπεδο χαμηλής ενέργειας σε ένα άλλο υψηλότερης γύρω από τον πυρήνα ενός ατόμου. Το φως που χρησιμοποιείται για την παγίδευση του ατόμου μπορεί να αλλάξει τη φυσική ενέργεια κάθε τροχιακού (διακεκομμένες γραμμές) σε διαφορετική ενέργεια (συμπαγείς γραμμές). Για τη συχνότητα αναφοράς παγίδευσης φως, η ενεργειακή μετατόπιση κάθε τροχιάς θα είναι ίδια και η συχνότητα της μετάβασης θα παραμείνει η ίδια. [Mai., 2013]



Εικόνα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση πυρήνα και ιόντων ενός ατόμου

Η μετατροπή αυτής της συχνότητας αναφοράς σε ρολόι που προσδιορίζει τα δευτερόλεπτα απαιτεί πρόσθετα βήματα. Γενικά, η συχνότητα που μετράται σε ένα ατομικό ρολόι χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση άλλων πηγών συχνοτήτων, όπως είναι οι συσκευές maser υδρογόνου και τα ρολόγια χαλαζία.

Σήμερα τα πιο συνηθισμένα ατομικά ρολόγια χρησιμοποιούν άτομα του καϊσίου-133, τα οποία έχουν μια μετάβαση ηλεκτρονίων που βρίσκεται στην περιοχή μικροκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Εάν το άτομο κρατηθεί στο απόλυτο μηδέν και είναι αδιατάραχτο, αυτή η μετάβαση θα πραγματοποιηθεί με μια συχνότητα ακριβώς 9.192.631.770 Hz. Αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται το δευτερόλεπτο στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI). [Lodewyck., 2019]

Στην πραγματικότητα, το καΐσιο-133 δεν είναι τόσο τέλεια γεννήτρια συχνοτήτων. Τα άτομα καϊσίου αντιμετωπίζουν διάφορες μορφές διαταραχών από το περιβάλλον τους. Πλέον τα ρολόγια του καϊσίου δεν μπορούν να βελτιωθούν περισσότερο. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ρολόγια του καϊσίου έχουν φθάσει στο όριο της άλλης βασικής μετρικής που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των ρολογιών, τη σταθερότητα της συχνότητάς τους. [Takano κ.α., 2017]

Η σταθερότητα συχνότητας χαρακτηρίζει τον τρόπο με τον οποίο η συχνότητα του ρολογιού μεταβάλλεται διαχρονικά. Όσο μεγαλύτερη είναι η αστάθεια συχνότητας, τόσο μεγαλύτερος είναι ο θόρυβος συχνότητας, έτσι ώστε η συχνότητα του ρολογιού να είναι μερικές φορές λίγο μεγαλύτερη και μερικές φορές λίγο χαμηλότερη από τη μέση τιμή.

Για παράδειγμα, η κίνηση ενός ατόμου μέσα στο χώρο μπορεί να μεταβάλει τη συχνότητα μετάβασης των ηλεκτρονίων μέσω του φαινομένου Doppler, καθώς επίσης οι αλληλεπιδράσεις με τα σύννεφα ηλεκτρονίων άλλων ατόμων μπορούν επίσης να μεταβάλλουν τις ενέργειες των καταστάσεων ηλεκτρονίων, αντίστοιχα όπως και τα εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. [Delva κ.α., 2015]

Η τεχνολογία μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις περισσότερες πηγές θορύβου συχνότητας. Αλλά υπάρχει μια θεμελιώδης πηγή αστάθειας που είναι πολύ δύσκολο να ξεπεραστεί, επειδή προέρχεται από τις βασικές αρχές των πιθανοτήτων που διέπουν την κβαντική επιστήμη.

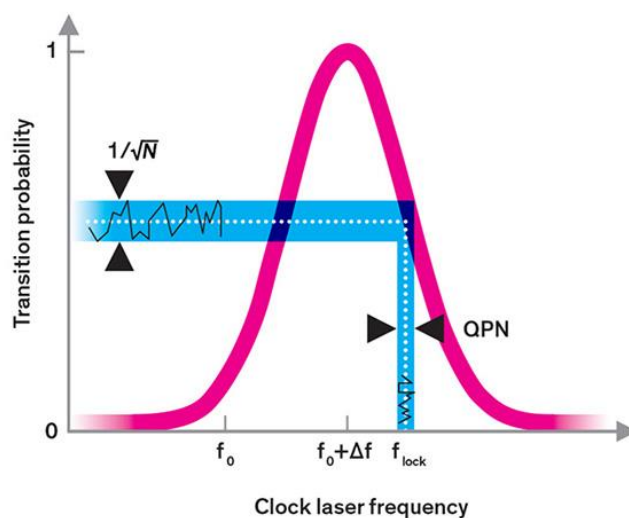
3.3.1 Ιδιότητες λειτουργίας ατομικών ρολογιών

Συνήθως τα ηλεκτρόνια σε ένα ατομικό ρολόι διεγείρονται με ακτινοβολία της οποίας η συχνότητα δεν ταιριάζει αρκετά με τη συχνότητα μετάβασης. Αυτό συμβαίνει επειδή η πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να διεγερθεί ακολουθεί μια καμπύλη κανονικής κατανομής (Gauss) (εικόνα 3.5).

Η θεμελιώδης συχνότητα μετάβασης ενός ατομικού ρολογιού (f_0) συχνά αντισταθμίζεται από κάποια ποσότητα (Δf). Για να ανιχνευθούν καλύτερα οι διακυμάνσεις γύρω από την προκύπτουσα συχνότητα μετάβασης ($f_0 + \Delta f$), η συχνότητα του laser του ρολογιού είναι λίγο διαφορετική (f_{lock}). Αυτό μειώνει την πιθανότητα, ένα ηλεκτρόνιο να κάνει μια λανθασμένη μετάβαση που οδηγεί σε αδικαιολόγητες διορθώσεις στη συχνότητα του laser του ρολογιού.

Θεωρώντας ένα μεγάλο επίπεδο εμπιστοσύνης, είναι ευκολότερο να διαπιστωθεί αν έχει συμβεί μια μικρή αλλαγή στη συχνότητα επειδή παράγεται πιο ανιχνεύσιμο αποτέλεσμα, αυξάνοντας ή μειώνοντας την πιθανότητα να διεγείρεται ένα ηλεκτρόνιο. Εξαιτίας αυτού, κατά την κανονική λειτουργία ενός ατομικού ρολογιού, η ακτινοβολία ρολογιού ρυθμίζεται έτσι ώστε να έχει μόνο 50% πιθανότητα να πάρει οποιοδήποτε δεδομένο άτομο για να κάνει τη μετάβαση του ρολογιού. Αλλά ακόμα και αν η συχνότητα ακτινοβολίας ρολογιού έχει οριστεί ακριβώς σε εκείνο το σημείο, ένα ηλεκτρόνιο θα είναι είτε σε κατάσταση διέγερσης είτε σε κατάσταση ηρεμίας μετά την μέτρησή του. Επομένως, ο μηχανισμός ανάδρασης θα υποθέσει εσφαλμένα ότι η συχνότητα ακτινοβολίας του ρολογιού είναι είτε πολύ υψηλή είτε πολύ χαμηλή και θα εισαγάγει μια αδικαιολόγητη διόρθωση συχνότητας.

Αυτές οι αναπροσαρμογές αποδίδουν επιπλέον θόρυβο στο ρολόι, που καλείται θόρυβος κβαντικής προβολής (Quantum Projection Noise - QPN) και αποτελούν την κύρια πηγή αστάθειας συχνότητας στα καλύτερα ρολόγια καισίου. Όπως και πολλές τυχαίες πηγές θορύβου, το μέσο επίπεδο θορύβου κβαντικής προβολής, μειώνεται με το χρόνο. Όσο περισσότερο κανείς παρατηρεί το ρολόι, τόσο συχνότερα οι τυχαίες μετατοπίσεις της συχνότητας προς τα επάνω ακυρώνουν τις προς τα κάτω μετατοπίσεις και ο θόρυβος τελικά γίνεται αμελητέος. [Santarelli., κ.α, 1999]



Εικόνα 3.5 Διάγραμμα πιθανοτήτων διέγερσης ηλεκτρονίων ατομικών ρολογιών [Πηγή : spectrum.ieee.org, 2019]

Το μειονέκτημα των ατομικών ρολογιών καισίου είναι ότι η παραπάνω διαδικασία διαρκεί πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα χρειάζεται περίπου μια μέρα ώστε η σταθερότητα των καλύτερων ρολογιών του καισίου για να φτάσει τα $2 \cdot 10^{-16}$, που αποτελεί το σταθερό επίπεδο ακρίβειας. Όπου, για ένα ρολόι καισίου με συχνότητα 9.2 gigahertz, μια ακρίβεια $2 \cdot 10^{-16}$ μεταφράζεται σε μια αβεβαιότητα 1.8 microhertz στη συχνότητα.

Για την αντιμετώπιση του θορύβου κβαντικής προβολής θα μπορούσαν να εκτελεστούν σειρές πειραμάτων. Αλλά κάθε μέτρηση θα πρέπει να αποτελείται από πολλά δεδομένα που λαμβάνονται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι τυχαίες διακυμάνσεις από μέτρηση σε μέτρηση. Σε μια σειρά πειραμάτων που έχουν σχεδιαστεί για να ωθήσουν την ακρίβεια ρολογιού καισίου σε τάξη μεγέθους $1 \cdot 10^{-17}$, ενδεχομένως να χρειαζόταν ένας ολόκληρος ημερολογιακός χρόνος για να γίνει μόνο μία μέτρηση τέτοιας τάξης ακρίβειας.

Ωστόσο, υπάρχουν και άλλοι τρόποι για την ελαχιστοποίηση του θορύβου κβαντικής προβολής. Ο θόρυβος παραμένει ίδιος ανεξάρτητα από τη συχνότητα, αλλά ο σχετικός του αντίκτυπος μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα. Και όπως ο μέσος όρος θορύβου κβαντικής προβολής μειώνεται όσο περισσότερο πραγματοποιεί παρατηρήσεις ένα

ρολόι, αυξάνοντας τον αριθμό των ατόμων που διερευνώνται ταυτόχρονα, τόσο αυξάνεται η αναλογία σήματος προς θόρυβο. Όσα περισσότερα άτομα μπορούν να συμμετέχουν σε μία μέτρηση, τόσο λιγότερη αβεβαιότητα θα εμπεριέχεται στον αριθμό των ατόμων που έκαναν τη μετάβαση.

3.3.2 Διαταραχές και σταθερότητα ατομικών ρολογιών

Οι διαταραχές μειώνουν την ακρίβεια του ρολογιού και αντιστοιχούν ποσοστιαία στο πόσο η μέση συχνότητα του ιόντος / ατόμου μετατοπίζεται από τη φυσική, μη διαταραγμένη τιμή της. Επομένως οι διαταραχές αυτές θα μπορούσαν να αναφερθούν ως συστηματικά σφάλματα, που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την αβεβαιότητα των ατομικών ρολογιών.

Ορισμένες από αυτές τις διαταραχές μπορούν να εξαλειφθούν και κάποιες να ελαχιστοποιηθούν από την κατάλληλη κατασκευή και σχεδιασμό των ρολογιών [Poli, κ.α., 2014]

Πιο συγκεκριμένα η συχνότητα της ατομικής μετάβασης ενός ατόμου ή ενός μόνο ιόντος μπορεί να διαταραχθεί από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η παρουσία ανεπιθύμητων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, παράλληλες επιδράσεις με άλλα ιόντα (σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν ρολόγια ατόμων), καθώς και των ατελών συνθηκών κενού στο εσωτερικό του ρολογιού. Τα σφάλματα που οφείλονται σε αυτές τις ιδιαιτερότητες υπεισέρχονται στην κατηγορία των συστηματικών σφαλμάτων και μπορούν να μοντελοποιηθούν.

Τα κύρια συστηματικά σφάλματα, καθώς και ο τρόπος που έχει επικρατήσει για τον προσδιορισμό τους αναλύονται παρακάτω.

3.3.2.1 Το φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler προκύπτει από την κίνηση ενός συστήματος (όπως άτομα σε ηρεμία ή ένα ιόν) σε σχέση με ένα αντίστοιχο σύστημα παρατηρητή. Αξιοποιώντας την αρχή διατήρησης της δυναμικής και κινητικής ενέργειας στη σχετικιστική θεωρία, η διόρθωση της συχνότητας παρατήρησης ($\Delta\nu$) (frequency shift) που πρέπει να συμπεριληφθεί εξαιτίας της εκπομπής ενός φωτονίου που έχει μάζα (m)

το οποίο κινείται με ταχύτητα (v) ως προς το σύστημα παρατήρησης που βρίσκεται σε ηρεμία, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\delta u = k \cdot v - \frac{1}{2} \omega_0 \frac{v^2}{c^2} \pm \frac{hk^2}{2m} \quad (3.1)$$

Όπου, k : το διάνυσμα περιγραφής του κύματος

ω_0 : η τιμή της συχνότητας ατομικής μετάβασης χωρίς επίδραση διαταραχών

h : η προσαρμοσμένη τιμή της σταθεράς του Planck

Τα στοιχεία της εξίσωσης (3.1) με τη σειρά που είναι διατυπωμένα αφορούν την επίδραση του φαινομένου πρώτης βαθμίδας, δεύτερης βαθμίδας και ο τρίτος όρος αφορά στο φαινόμενο της ανάκρουσης (recoil).

Πιο συγκεκριμένα, η επίδραση του φαινομένου πρώτης βαθμίδας σε ένα δείγμα ατόμων σε ισορροπία σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, λόγω της θερμικής στατιστικής κατανομής των ταχυτήτων, δημιουργεί μεταβολή των οπτικών γραμμών μετάβασης. Η μεταβολή αυτή ακολουθεί την κατανομή του Gauss και συνδέεται άμεσα και μόνο με τη θερμοκρασία. Σε τυπική θερμοκρασία δωματίου το φαινόμενο πρώτης βαθμίδας μπορεί να προκαλέσει αλλαγή της τιμής συχνότητας αρκετών gigahertz. Χαρακτηριστικό είναι ότι ακόμα και για διαφορές θερμοκρασίας της τάξης των microkelvin (που αποτελεί το κατώτερο κατώφλι θερμοκρασίας που μπορεί να επιτευχθεί με τις τεχνικές laser ψύξης), δημιουργείται μεταβολή μερικών εκατοντάδων kilohertz. [Kelly., 2014]

Η επίδραση του φαινομένου δεύτερης βαθμίδας εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας του εκπεμπόμενου φωτονίου. Η επίδραση αυτή προκαλεί ασυμμετρία της οπτικής γραμμής μετάβασης. Το μέγεθος αυτής της ασυμμετρίας τυπικά αξιολογείται ξεκινώντας από τη γνώση της κατανομής των ταχυτήτων των ατόμων. Για ατομικά ρολόγια ακριβείας, η μείωση του φαινομένου σε αμελητέο επίπεδο πραγματοποιείται με τη χρήση τεχνικών ψύξης laser. Για άτομα ή μεμονωμένα ιόντα που ψύχονται σε θερμοκρασίες millikelvin, η μετατόπιση από το κέντρο της οπτικής γραμμής είναι μικρή (10^{-17}), ενώ αντίστοιχα η συνεισφορά στην εξίσωση της συχνότητας παρατήρησης είναι της τάξης του 10^{-2} .

Ο τρίτος όρος που αναφέρεται στο φαινόμενο της ανάκρουσης, εξαρτάται από τη συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτονίου. Στην περίπτωση των ρολογιών μικροκυμάτων ο όρος αυτός δεν είναι στατιστικά σημαντικός λόγω της ακρίβειας της συγκεκριμένης κατηγορίας ρολογιών, αλλά στα σύγχρονα συστήματα ρολογιών και κβαντικών προτύπων συχνότητας η συνεισφορά είναι σημαντική (10^{-11}) και δεν είναι ορθό να μη συμπεριληφθεί. [Mandelberg, κ.α., 1962]

Για τη μοντελοποίηση και την ελαχιστοποίηση της επίδρασης του φαινομένου Doppler, αξιοποιείται η επιστήμη της φασματοσκοπίας (spectroscopy), η οποία δίνει τη δυνατότητα λεπτομερούς παρατήρησης των μεταβάσεων των ηλεκτρονίων. Μέσω της κατάλληλης κατασκευής των σύγχρονων ατομικών ρολογιών και χρήση συγκεκριμένων τεχνικών (διαδικασίες διέγερσης και ψύξης ατόμων, παγίδες), η συνολική επίδραση του φαινομένου μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. [Peres, κ.α., 2003]

3.3.2.2 Το φαινόμενο Zeeman – Αλληλεπίδραση με μαγνητικά πεδία

Οι διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις ατόμων ή ιόντων συνδέονται με τα στατικά μαγνητικά πεδία μέσω της μαγνητικής τους ροπής (μ). Η ενέργεια αλληλεπίδρασης $\delta E = \mu \cdot B$ είναι διαφορετική για την ήρεμη και διεγερμένη κατάσταση της μετάβασης του ρολογιού. Η αλληλεπίδραση αυτή αναφέρεται στο φαινόμενο Zeeman (φαινόμενο Zeeman είναι εκείνο κατά το οποίο μια φασματική γραμμή χωρίζεται σε διάφορα συστατικά λόγω της παρουσίας του μαγνητικού πεδίου). [Poli, κ.α., 2014]

Η διόρθωση της συχνότητας του ρολογιού (clock frequency shift) (δu) που θα πρέπει να συμπεριληφθεί, περιγράφεται από την εξίσωση (3.2).

$$\delta u = (g_e \cdot m_{F,e} - g_g \cdot m_{F,g})B + \beta B^2 = \alpha_{e,g}B + \beta_{e,g}B^2 \quad (3.2)$$

Όπου, B: το μαγνητικό πεδίο (μαγνητική επαγωγή)

g_e : η τιμή του συντελεστή Lande για την διηγηρμένη κατάσταση

g_g : η τιμή του συντελεστή Lande για την κατάσταση ηρεμίας

α, β : οι συντελεστές Zeeman που είναι διαφορετικοί για κάθε άτομο/ión

Εφόσον οι συντελεστές Zeeman είναι διαφορετικοί για κάθε άτομο ή ιόν που θα επιλεγεί για τη μελέτη (πίνακας 3.1), η συνεισφορά του μαγνητικού πεδίου μπορεί να απαλειφθεί, όσον αφορά στην επίδραση πρώτης βαθμίδας, επιλέγοντας το κατάλληλο άτομο/ión για το οποίο ισχύει $m_F=0$. Ωστόσο ακόμα και σε αυτή την περίπτωση δεν μπορούν να απαλειφθούν οι εναπομείναντες επιδράσεις λόγω του εκθετικού συντελεστή Zeeman, που οφείλονται στις αλληλεπιδράσεις των ατόμων/iónτων με κοντινές ατομικές καταστάσεις με μη μηδενικές μαγνητικές ροπές. [Numazaki., κ.α., 2010]

Άτομο / Ιόν	Συντελεστής μετάβασης σε διαφορετικά επίπεδα	Γραμμικός συντελεστής α (MHz/T)	Εκθετικός συντελεστής β (MHz/T ²)
²⁴ Mg	$m_F = 0$	0	164
⁴⁰ Ca	$m_F = 0$	0	64
⁸⁷ Sr	$m_F = \pm 9/2$	1.08	-23.3
¹⁷¹ Yb	$m_F = \pm 1/2$	2.1	-7
²⁷ Al ⁺	$m_F = \pm 5/2$	-82	-72
⁸⁸ Sr ⁺	$m_J = \pm 1/2$	56000	3.1

Πίνακας 3.1 Συντελεστές Zeeman για ορισμένα ρολόγια ατόμου / íοντος.

Οι διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου μπορεί να περιορίσουν τη σταθερότητα του ρολογιού και ουσιαστικά η αβεβαιότητα του ρολογιού μπορεί να περιοριστεί από την αβεβαιότητα που εισάγουν οι συντελεστές Zeeman και το δυναμικό του μαγνητικού πεδίου. Μέσω της κατάλληλης κατασκευής των σύγχρονων ατομικών ρολογιών και χρήση συγκεκριμένων τεχνικών (κατάλληλη μαγνητική θωράκιση (magnetic shielding)) είναι δυνατόν να μειωθούν οι μετατοπίσεις λόγω εναπομεινάντων μαγνητικών πεδίων και να επιτευχθούν σχετικές ακρίβειες προσδιορισμού της επίδρασης του φαινομένου της τάξης του 10^{-18} .

3.3.2.3 Αλληλεπίδραση με ηλεκτρικά πεδία

Τα ηλεκτρικά πεδία επηρεάζουν τα επίπεδα ατομικής ενέργειας μέσω του φαινομένου Stark (το φαινόμενο Stark είναι η μετατόπιση και ο διαχωρισμός των φασματικών γραμμών ατόμων και μορίων λόγω της παρουσίας ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου), και μια ποικιλία πιθανών πηγών ηλεκτρικών πεδίων μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές στη συχνότητα συγχρονισμού του ρολογιού. Τέτοιες πηγές είναι διάφορα

στατικά πεδία, κινητά επαγόμενα ηλεκτρικά πεδία για παγιδευμένα ιόντα, ακτινοβολία μαύρου σώματος και πεδία laser. [Poli, κ.α., 2014]

Η διόρθωση της συχνότητας του ρολογιού (clock frequency shift) (δu) που θα πρέπει να συμπεριληφθεί, περιγράφεται από την εξίσωση (3.3).

$$\delta u = -\frac{1}{2h} (\Delta\alpha_{DC} E_0^2 + \Delta\alpha_{AC}(\omega)(E(\omega)^2)) \quad (3.3)$$

Όπου: h : η προσαρμοσμένη τιμή της σταθεράς του Planck
 E_0 : η ένταση του στατικού ηλεκτρικού πεδίου
 $E(\omega)$: η ένταση του μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου
 $\Delta\alpha_{DC}$: η διαφορά της στατικής πόλωσης μεταξύ της ήρεμης και διεγερμένης κατάστασης
 $\Delta\alpha_{AC}$: η διαφορά της μεταβαλλόμενης πόλωσης μεταξύ ίδιων ενεργειακών καταστάσεων

Λόγω της εξέλιξης και βελτίωσης της ατομικής θεωρίας η συνεισφορά των ηλεκτρικών πεδίων (είτε στατικών είτε μεταβαλλόμενης έντασης και ισχύος) μπορεί να υπολογιστεί ποσοστιαία με μεγάλη ακρίβεια. [Lodewyck, κ.α., 2012] Ωστόσο, ένα σύγχρονο ατομικό ρολόι θα πρέπει να έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ελέγχεται εάν η πηγή φωτός που διεγείρει τη μετάβαση του ρολογιού αλληλοεπιδρά με άλλες μεταβάσεις που δεν αφορούν στον συντονισμό. Τέτοιες αλληλεπιδράσεις προκαλούν μη αμελητέες μεταβολές συχνότητας, ειδικά για αδύναμες μεταβάσεις όπως αυτές που βασίζονται σε μαγνητικές επαγωγές. [Zanon-Willete, κ.α., 2006]

3.3.2.4 Αλληλεπίδραση με ακτινοβολία μαύρου σώματος (blackbody radiation)

Ένας άλλος τύπος του φαινομένου Stark που είναι συνήθης στα σύγχρονα συστήματα μετρήσεων δίνεται από την αλληλεπίδραση με την ακτινοβολία μαύρου σώματος, η οποία εκπέμπεται από το περιβάλλον στο οποίο παγιδεύονται τα άτομα ή το ιόν του ρολογιού. Η αλληλεπίδραση βασίζεται στις γενικές αρχές της θεωρίας του Planck, και πιο συγκεκριμένα στην ανάλυση της φασματικής πυκνότητας της ενέργειας που εκπέμπεται από ένα σώμα, το οποίο διατηρείται σε

θερμοκρασία T ανά μονάδα όγκου, όταν εκείνο αλληλοεπιδρά με ηλεκτρομαγνητικά πεδία. [Porsev, κ.α., 2006]

Η γνώση της επίδρασης της ακτινοβολίας μαύρου σώματος επηρεάζει την αβεβαιότητα του ρολογιού επειδή οι συχνότητες μετάβασης ενός ρολογιού ορίζονται στους μηδέν βαθμούς του συστήματος Kelvin, επομένως θα πρέπει να είναι γνωστοί με μεγάλη ακρίβεια οι συντελεστές αναγωγής και υπολογισμού του φαινομένου μεταξύ των διαφορετικών θερμοκρασιών.

Για να υπολογιστεί και να μοντελοποιηθεί η αβεβαιότητα που εισάγει η ακτινοβολία στην τελική τιμή της συχνότητας, τα σύγχρονα ρολόγια αξιοποιούν ειδικούς χώρους αλληλεπίδρασης που ελέγχονται θερμοκρασιακά και μπορούν να λειτουργήσουν και σε κρυογονικές (πολύ χαμηλής θερμοκρασίας) συνθήκες. [Safronova, κ.α., 2009]

3.3.2.5 Επίδρασεις λόγω συγκρούσεων και συνθηκών πίεσης

Οι αλλαγές στην τελική τιμή της συχνότητας που οφείλονται στις φυσικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων που διεγείρονται, είναι στατιστικά σημαντικές. Σε ορισμένες κατηγορίες ατομικών ρολογιών η συγκεκριμένη κατηγορία επιδράσεων περιορίζει ουσιαστικά τη λειτουργία του ρολογιού. Οι διαφορετικές κατηγορίες ρολογιών μελετώνται διαφορετικά σχετικά με την επίδραση της συγκεκριμένης κατηγορίας.

Πιο συγκεκριμένα τα ρολόγια ενός ιόντος επηρεάζονται λιγότερο από τη συγκεκριμένη επίδραση. Στα ρολόγια ουδέτερων ατόμων, η πυκνότητα και το μέγεθος των ατόμων ενδεχομένως να δημιουργήσουν αυξομειώσεις της πίεσης που στη συνέχεια θα οδηγήσει σε εκτεταμένη επίδραση στην τελική τιμή της συχνότητας. Τα ρολόγια πλέγματος είναι εκείνα που επηρεάζονται περισσότερο εξαιτίας της μεγαλύτερης ευαισθησίας τους αλλά και του μεγαλύτερου αριθμού ατόμων. [Poli, κ.α., 2014]

3.3.2.6 Το φαινόμενο της βαρυτικής επίδρασης (Gravitational Effect)

Η βαρυτική επίδραση (βαρυτική φασματική μετατόπιση) είναι εκείνη που αξιοποιείται σε μέγιστο βαθμό και χρησιμοποιείται για να

πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη διδακτορική έρευνα. Πιο συγκεκριμένα, όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 2, μία από τις συνέπειες της γενικής θεωρίας της σχετικότητας είναι ότι η συχνότητα ενός ρολογιού που μετράται από παρατηρητή με δεδομένη την παρουσία βαρυτικού δυναμικού, εξαρτάται από το δυναμικό της βαρύτητας της θέσης του ρολογιού. [Delva, κ.α., 2012]

Αυτή η ιδιότητα, δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ δύο πανομοιότυπων ρολογιών που λειτουργούν σε διαφορετικές τοποθεσίες στη Γη. Από αυτά, θα προκύψει διαφορά συχνότητας ανάλογη με τη διαφορά δυναμικού στις δύο θέσεις. Η διαφορά στις προσδιοριζόμενες συχνότητες των ρολογιών σχετίζεται άμεσα με την απώλεια ενέργειας των φωτονίων για τη μετάβαση από το βαρυτικό δυναμικό της μίας θέσης σε σχέση με την άλλη, το οποίο αντιστοιχεί σε μια αλλαγή στο υψόμετρο, στη Γη. [Poli, κ.α., 2014]

3.4 Πρότυπα οπτικής ατομικής συχνότητας

Από όλες τις ποσοτικές μετρήσεις, η συχνότητα αντιπροσωπεύει εκείνη που μπορεί να προσδιοριστεί με τον υψηλότερο βαθμό ακρίβειας. Εκτός από τη σημαντική εφαρμογή για την υλοποίηση ρολογιών ακριβείας και την ίδρυση κλίμακας χρόνου, τα πρότυπα συχνότητας προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών λόγω του γεγονότος ότι πολλές φυσικές ποσότητες μπορούν να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια από τις σχετικές μετρήσεις συχνότητας. Τα πρότυπα συχνότητας στην υπέρυθη και στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται από δεκαετίες. [Riehle., 2006]

Ο βασικός στόχος των προτύπων ατομικής συχνότητας είναι να αναπαράγουν ένα σήμα που αντιστοιχεί στη μη διαταραγμένη συχνότητα μετάβασης μεταξύ δύο τροχιακών ενεργειακών επιπέδων, που καθορίζονται από τις φυσικές σταθερές. Η έξοδος ενός προτύπου συχνότητας είναι μια μικροκυματική ή οπτική συχνότητα. Το πρότυπο συχνότητας λειτουργεί ως ρολόι μετρώντας τον αριθμό των κύκλων που έχουν περάσει από ένα καθορισμένο χρόνο έναρξης [Horowitz, κ.α., 1989]

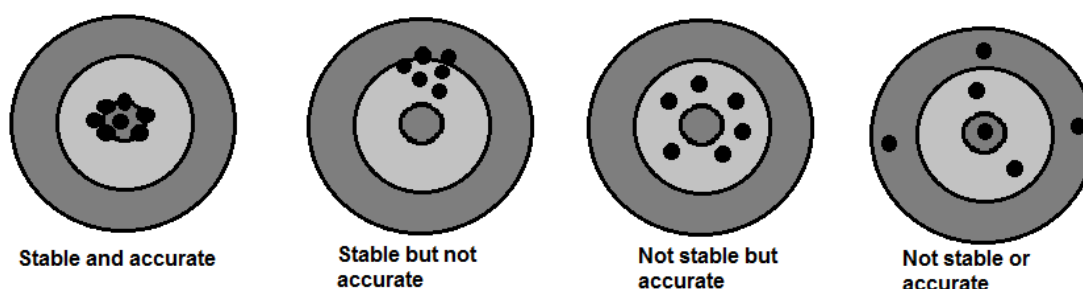
Παρά την εννοιολογική διαφορά των όρων πρότυπα συχνότητας και ρολόι, είναι όροι που μερικές φορές χρησιμοποιούνται συνώνυμα.

Τα κυρίαρχα αντικείμενα μελέτης που αφορούν στην ορθή χρήση προτύπων οπτικής συχνότητας είναι ο απαιτούμενος σταθερός ταλαντωτής (laser ρολογιού) και η συσκευή μέτρησης της οπτικής συχνότητας για την καταμέτρηση των κύκλων των οπτικών συχνοτήτων. [Hansch., 2006]

Πιο συγκεκριμένα, το σχήμα ενός προτύπου οπτικής συχνότητας, αποτελείται από ένα laser ρολογιού περιορισμένης γραμμής που ανιχνεύει περιοδικά ένα άτομο ή ένα σύνολο ατόμων. Το σήμα από τα άτομα είναι ανάλογο της πιθανότητας διέγερσης των ατόμων κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος και χρησιμοποιείται για την ταύτιση της συχνότητας συντονισμού του ρολογιού με τη συχνότητα μετάβασης των ατόμων. Ορισμένη ποσότητα της ακτινοβολίας του laser ρολογιού δεσμεύεται και αποτελεί την έξοδο του προτύπου συχνότητας (μετρούμενη τιμή συχνότητας). Ένα φίλτρο οπτικής συχνότητας χρησιμοποιείται για τη σύγκριση του προτύπου συχνότητας με άλλα πρότυπα (που συνήθως λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες μετάβασης) ή για τον υπολογισμό των οπτικών κύκλων.

Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά ενός προτύπου συχνοτήτων, όπως ακριβώς έχει διατυπωθεί και παραπάνω για την αξιολόγηση των ρολογιών, είναι η σταθερότητα και η συστηματική αβεβαιότητά του. Τα δύο αυτά στοιχεία συνδυασμένα αναφέρονται ως ακρίβεια.

Η σταθερότητα μπορεί να περιγραφεί ως η ικανότητα ενός ταλαντωτή να παράγει το ίδιο αποτέλεσμα σε αρκετές μετρήσεις και η αβεβαιότητα είναι το μέτρο του πόσο αυστηρά τα μετρημένα αποτελέσματα ταιριάζουν με τις αναμενόμενες τιμές.



Εικόνα 3.6 Σχηματικό διάγραμμα κατανόησης διαφοροποίησης μεταξύ σταθερότητας και αβεβαιότητας

Πιο συγκεκριμένα, ένας ταλαντωτής εμφανίζει μεγαλύτερη σταθερότητα όταν πραγματοποιεί πλήρη ταλάντωση αρκετές φορές ανά

δευτερόλεπτο, αλλά είναι ακριβής μόνο αν διατηρεί την ίδια διάρκεια μεταξύ κάθε ταλάντωσης. Αυξάνοντας τον αριθμό των πλήρων ταλαντώσεων ανά δευτερόλεπτο (συχνότητα), η ακρίβεια με την οποία ο καθορισμένος χρόνος μπορεί να προσδιοριστεί, αυξάνεται.

Το γεγονός αυτό μπορεί να μην οδηγήσει απαραίτητα σε ένα ακριβές ρολόι. Επομένως, πρέπει να προστεθεί μια αναφορά σε έναν ταλαντωτή για να διατηρηθεί ίδια η διάρκεια σε κάθε πλήρη ταλάντωση. Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση βρόχου ανατροφοδότησης. [Viswam., 2019]

Η μη σταθερότητα ποσοτικοποιεί τη στατιστική αβεβαιότητα της συχνότητας εξόδου του προτύπου συχνοτήτων f , ενώ η ακρίβεια αναφέρεται (συνήθως μια εκτίμηση) στην αβεβαιότητα της απόκλισης της συχνότητας εξόδου του προτύπου συχνοτήτων f από τη μη διαταραγμένη συχνότητα αναφοράς f_0 του ατόμου. Αυτές οι στατιστικές και συστηματικές αβεβαιότητες είναι επίσης γνωστές ως αβεβαιότητες τύπου A (υποδηλούμενες με uA) και τύπου B (υποδηλούμενες από uB), αντίστοιχα.

3.5 Παράμετροι μελέτης ατομικών ρολογιών

Στην ενότητα αυτή, θα αναλυθούν όλες εκείνες οι παράμετροι που οφείλουν να μελετηθούν, ώστε να προκύπτει αποτέλεσμα σχετικά με την επιρροή της κάθε μίας στην τελική ακρίβεια προσδιορισμού χρόνου ή συχνότητας.

Η έρευνα, επιλογή και ανάλυση των παραμέτρων που αφορούν στα οπτικά ατομικά ρολόγια, πραγματοποιήθηκε ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που οργανώθηκαν και μελετήθηκαν οι μεταβλητές και οι σταθερές, στην παράγραφο 2.6.

Οι παράμετροι που αφορούν στην αξιοποίηση των σύγχρονων ατομικών ρολογιών είναι η κατηγορία και το είδος, η κατασκευαστική δομή και η μεταφορά.

3.5.1 Κατηγορία και είδος ατομικού ρολογιού

Η παράμετρος της κατηγορίας και του είδους ρολογιού περιλαμβάνει την κύρια κατηγοριοποίηση των ρολογιών με βάση το

είδος του ατόμου ή του ιόντος που θα χρησιμοποιηθεί. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής και σε ότι αφορά στην συγκεκριμένη παράμετρο μελετώνται μόνο τα σύγχρονα ατομικά ρολόγια.

Η κύρια αρχική κατηγοριοποίηση περιλαμβάνει αφενός τα ατομικά ρολόγια μικροκυμάτων και αφετέρου τα οπτικά ατομικά ρολόγια. Κάθε μια από αυτές τις δύο κατηγορίες περιλαμβάνει περαιτέρω υπό-κατηγορίες.

Από την ανάλυση της παραμέτρου, προκύπτει ότι αφορά σε μεταβλητή, διότι η επιλογή διαφορετικής κάθε φορά κατηγορίας και είδους ρολογιού θα μεταβάλει με διαφορετικό ρυθμό και τρόπο την τελική αβεβαιότητα προσδιορισμού χρόνου ή συχνότητας. Επίσης λόγω της τεχνολογικής και τεχνογνωσιακής εξέλιξης πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί μεταξύ εσωτερικής δομής (κατασκευής) και ενεργού ατόμου ή ιόντος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προκύψει το ίδιο αποτέλεσμα.

Κάθε είδος ρολογιού έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, και η επιλογή του κατάλληλου εξαρτάται από τις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες της κάθε μελέτης, αλλά και από παράγοντες που αφορούν στην ακρίβεια, στη σταθερότητα και στην πολυπλοκότητα. Χαρακτηριστικό είναι ότι, όσο πιο σύγχρονο είναι ένα ρολόι, επομένως διαθέτει και πιο σύγχρονες διατάξεις, τόσο πιο ακριβές είναι αλλά ταυτοχρόνως και πιο περίπλοκο στην λειτουργία και συντήρηση του.

Επομένως γίνεται κατανοητό ότι η επιλογή μεταξύ των διαφορετικών τύπων ρολογιών, σε ότι αφορά στην κατηγορία και το είδος, είναι βασικής και πρωτεύουσας σημασίας. Επίσης σημειώνεται ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη αλληλεπίδραση της συγκεκριμένης παραμέτρου με τις υπόλοιπες διότι η επιλογή του είδους του ρολογιού είναι πρωταρχικής σημασίας και ουσιαστικά δεν εμφανίζει συμμεταβλητότητα με άλλα στοιχεία καθώς συμμετέχει αυτούσια στην τελική αβεβαιότητα προσδιορισμού χρόνου ή συχνότητας.

Τα ατομικά ρολόγια καισίου (μικροκυμάτων) παραμένουν έως και σήμερα, το διεθνές πρότυπο πρωτογενούς συχνότητας και έχουν φτάσει σε μια αβεβαιότητα κλασματικής συχνότητας μικρότερη από 10^{-16} . [Wynards, κ.α., 2005] Τα ατομικά ρολόγια αμμωνίου και καισίου

αναφέρονται ως πρότυπα συχνότητας μικροκυμάτων καθώς οι συχνότητες δόνησης βρίσκονται στην περιοχή μικροκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τα ατομικά ρολόγια καισίου φτάνουν στα όρια των δυνατοτήτων που ορίζουν τι μπορεί να επιτευχθεί με τέτοια συστήματα, και η αβεβαιότητά τους περιορίζεται πλέον από συγκρούσεις μεταξύ των ατόμων και από τα αποτελέσματα, λόγω της εξάρτησης τους από την ισχύ των μικροκυμάτων. [Gerginov., κ.α, 2010] Επομένως προκύπτει το συμπέρασμα ότι μόνο τα τελευταίας τεχνολογίας ρολόγια μικροκυμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για απαιτητικές σύγχρονες μελέτες κβαντικής και σχετικιστικής μηχανικής.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι υψηλότερες συχνότητες συντονισμού των ρολογιών προτιμώνται καθώς μπορούν να παρέχουν υψηλότερο επίπεδο σταθερότητας συχνότητας. Αυτό οδήγησε στην εφεύρεση ατομικών ρολογιών που λειτουργούν στον οπτικό τομέα.

Η αστάθεια ενός οπτικού ατομικού ρολογιού καθορίζει το μέσο ή το συνολικό χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης ανάλυσης συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα η αστάθεια συχνότητας του ατομικού ρολογιού δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση 3.4.

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{\Delta\nu}{\nu_0 \sqrt{N}} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}} \quad (3.4)$$

Όπου, ν_0 : Η συντονισμένη συχνότητα μετάβασης των ατόμων

$\Delta\nu$: Το εύρος της γραμμής μετάβασης

τ : Η μέση τιμή της περιόδου του φαινομένου

N : Το πλήθος των ατόμων

T_c : Ο χρόνος που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί μία πλήρης μέτρηση

Η σχέση 3.4 καταδεικνύει ότι η αστάθεια του ρολογιού μειώνεται όταν το εύρος της γραμμής της μετάβασης και της διάρκειας του κύκλου μέτρησης μειώνεται, και ο αριθμός των ατόμων και ο μέσος χρόνος αυξάνεται. Η χρήση προτύπων οπτικής συχνότητας, αντί για πρότυπα συχνότητας μικροκυμάτων, αύξησε το συντελεστή ποιότητας ($Q = \nu_0 / \Delta\nu$) του ρολογιού. Μαζί με το Q , το πλήθος των ατόμων που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση της σταθερότητας είναι σημαντικό καθώς αυξάνει την αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR).

Επομένως συνδυάζοντας τη θεωρητική γνώση που αναφέρει ότι η ιστορική εξέλιξη αντικατοπτρίζει τη βελτίωση της αβεβαιότητας καθώς επίσης και την πρακτική ανάλυση, όπως συμπεραίνεται από την εξίσωση 3.4, προκύπτει ότι τα οπτικά ατομικά ρολόγια υπερτερούν των ατομικών ρολογιών μικροκυμάτων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, τα οπτικά ατομικά ρολόγια κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τα ρολόγια ενός ιόντος και τα ρολόγια ουδέτερου ατόμου. Σε ένα ρολόι ιόντων, μόνο ένα ιόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί δεδομένου ότι η μελέτη πολλαπλών ιόντων θα οδηγήσει σε αλληλεπίδραση Coulomb μεταξύ των ιόντων που οδηγούν στην περαιτέρω ενεργειακή διέγερση τους.

Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη ρολογιών ουδέτερου ατόμου τα οποία διαθέτουν ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα, σε ότι αφορά στην απομόνωση από περιβαλλοντικές διαταραχές και στη χαμηλή επίδραση Doppler. Ιδιαίτερη είναι η σημασία των οπτικών ατομικών ρολογιών ουδέτερου ατόμου, τα οποία αναπτύσσονται παγιδεύοντας ουδέτερα άτομα σε οπτικό πλέγμα που σχηματίζεται από την παρέμβαση του λεγόμενου laser πλέγματος που παράγει στη συνέχεια ένα μοτίβο κύματος. Τα ουδέτερα άτομα εμφανίζουν μόνο μικρές αλληλεπιδράσεις σε σύγκριση με το εύρος αλληλεπιδράσεων Coulomb, των αντίστοιχων φορτισμένων σωματιδίων, επομένως μπορεί να παγιδευτεί μεγαλύτερος αριθμός ατόμων στο πλέγμα.

Στη σημερινή εποχή, τα περισσότερα οπτικά ατομικά πρότυπα συχνότητας που χρησιμοποιούν ένα μόνο παγιδευμένο ιόν, ως συχνότητα αναφοράς, είναι εκείνα με είδη ιόντων αλουμινίου ($^{27}\text{Al}^+$) [Brewer., κ.α., 2019][Chou, κ.α., 2010], ιόντων ασβεστίου ($^{40}\text{Ca}^+$) [Chwalla, κ.α., 2009][Zhang, κ.α., 2017][Huang., κ.α., 2019], ιόντων στροντίου ($^{88}\text{Sr}^+$) [Margolis, κ.α., 2004] [Dube, κ.α., 2016][Bilicki., 2017] και ιόντων υττερβίου ($^{171}\text{Yb}^+$) [Huntermann, κ.α., 2016][Godun, κ.α., 2014].

Αντίστοιχα, τα οπτικά ατομικά πρότυπα συχνότητας ουδέτερου ατόμου, όπου το σύνολο των κρύων ατόμων περιορίζεται σε ένα οπτικό πλέγμα για ανίχνευση της ατομικής συχνότητας αναφοράς, είναι είδη ατόμων στροντίου ($^{87/88}\text{Sr}$) [Nicholson, κ.α., 2012][Falke, κ.α., 2014] και υττερβίου (^{171}Yb) [Barber, κ.α., 2006]. Το σύνολο των προτύπων αυτών υπερκαλύπτουν και ορισμένες φορές ξεπερνούν το κατώφλι ακρίβειας της τάξης του 10^{-18} .

ΤΙΤΛΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	Κατηγορία και είδος ατομικού ρολογιού
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	Μεταβλητή
ΚΥΡΙΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	Πηγή της συχνότητας αναφοράς
<pre> graph TD Root[ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΚΑΙ ΕΙΔΟΣ] --> Micro[Μικροκυμάτων] Root --> Optical[Οπτικά Ατομικά] Micro --> Cesium[Ρολόγια Καισίου] Optical --> Single[Ενός ιόντος (Single - ion)] Optical --> Neutral[Ουδέτερου ατόμου (Neutral Atom)] Optical --> Lattice[Ρολόγια Πλέγματος (Optical Lattice Clocks)] </pre>	
ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	<ul style="list-style-type: none"> • Η ιστορική εξέλιξη στη συγκεκριμένη παράμετρο αντικατοπτρίζει την εκθετική βελτίωση της αβεβαιότητας. • Η επιλογή μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών πραγματοποιείται μέσω της ανάλυσης της αβεβαιότητας και της σταθερότητας. • Η σύγκριση και η αξιολόγηση μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών πραγματοποιείται μέσω της μελέτης των συστηματικών πηγών αβεβαιότητας των κάθε συγκεκριμένου ιόντος ή ατόμου. • Όσο πιο σύγχρονα είναι τα ατομικά ρολόγια, τόσο πιο πολλές διατάξεις περιλαμβάνουν, επομένως είναι και πιο πολύπλοκα.
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<input type="checkbox"/> Κόστος <input checked="" type="checkbox"/> Τεχνική υποδομή και εξοπλισμός <input type="checkbox"/> Εμπορικότητα <input checked="" type="checkbox"/> Πολυπλοκότητα <input checked="" type="checkbox"/> Μαθηματική και στατιστική ανάλυση <input type="checkbox"/> Επηρεασμός από άλλες παραμέτρους
ΛΕΞΕΙΣ -- ΚΛΕΙΔΙΑ	Single-ion Clocks, Neutral-Atom Clocks, Optical Lattice Clocks, Stability, Uncertainty

Πίνακας 3.2 Ταυτότητα παραμέτρου, Κατηγορία και είδος ατομικών ρολογιών

Επομένως συμπεραίνεται ότι από την κατηγορία των οπτικών ατομικών ρολογιών, αν και όλα τα ρολόγια, είτε ενός ιόντος είτε ουδέτερου ατόμου μπορούν να αξιοποιηθούν στις σύγχρονες μελέτες, τα ρολόγια πλέγματος παρουσιάζουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα, έστω και αν είναι περισσότερο πολύπλοκα.

Η επιλογή μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών πραγματοποιείται μέσω της ανάλυσης της αβεβαιότητας και της σταθερότητας του κάθε ατομικού ρολογιού. Η σύγκριση και αξιολόγηση μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών πραγματοποιείται μέσω της μελέτης των συστηματικών πηγών αβεβαιότητας και σφαλμάτων, των ατομικών ρολογιών κάθε συγκεκριμένου ιόντος ή ατόμου. Οι τιμές και το εύρος αυτών των σφαλμάτων εκφράζονται στις ίδιες μονάδες και σε κλασματική μορφή όπως γίνεται και η αναγραφή της ακρίβειας των ατομικών ρολογιών.

Οι κύριες πηγές συστηματικών σφαλμάτων που συμμετέχουν περισσότερο στην τελική διαμόρφωση της αστάθειας συχνότητας είναι τα φαινόμενα Doppler, Stark, Zeeman καθώς επίσης και οι ηλεκτρομαγνητικές συγκρούσεις και το φαινόμενο αλληλεπίδρασης με την ακτινοβολία μαύρου σώματος. Ο υπολογισμός της διόρθωσης (correction) αλλά και της αβεβαιότητας της διόρθωσης που θα πρέπει να εφαρμοστεί (uncertainty), υπολογίζεται και αυτός κλασματικά και για τα σύγχρονα οπτικά ατομικά ρολόγια πλέγματος οφείλει να παίρνει τιμές της τάξης του 10^{-16} - 10^{-18} . [Gill, 2011]

Πιο συγκεκριμένα για να βρεθούν ακριβώς οι τιμές αυτές, πραγματοποιείται μια a priori μελέτη προεκτίμησης των διορθώσεων που θα πρέπει να εφαρμοστούν στις μετρήσεις ενός οπτικού ατομικού ρολογιού, με σκοπό το αποτέλεσμα της παρατήρησης να πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο τη μη διαταραγμένη συχνότητα μετάβασης της πηγής αναφοράς. [Tyumenev, κ.α., 2016]. Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζεται μια μελέτη των διορθώσεων και της αβεβαιότητας των τιμών αυτών (uncertainty budget), για ένα τυπικό ατομικό ρολόι υττερβίου.

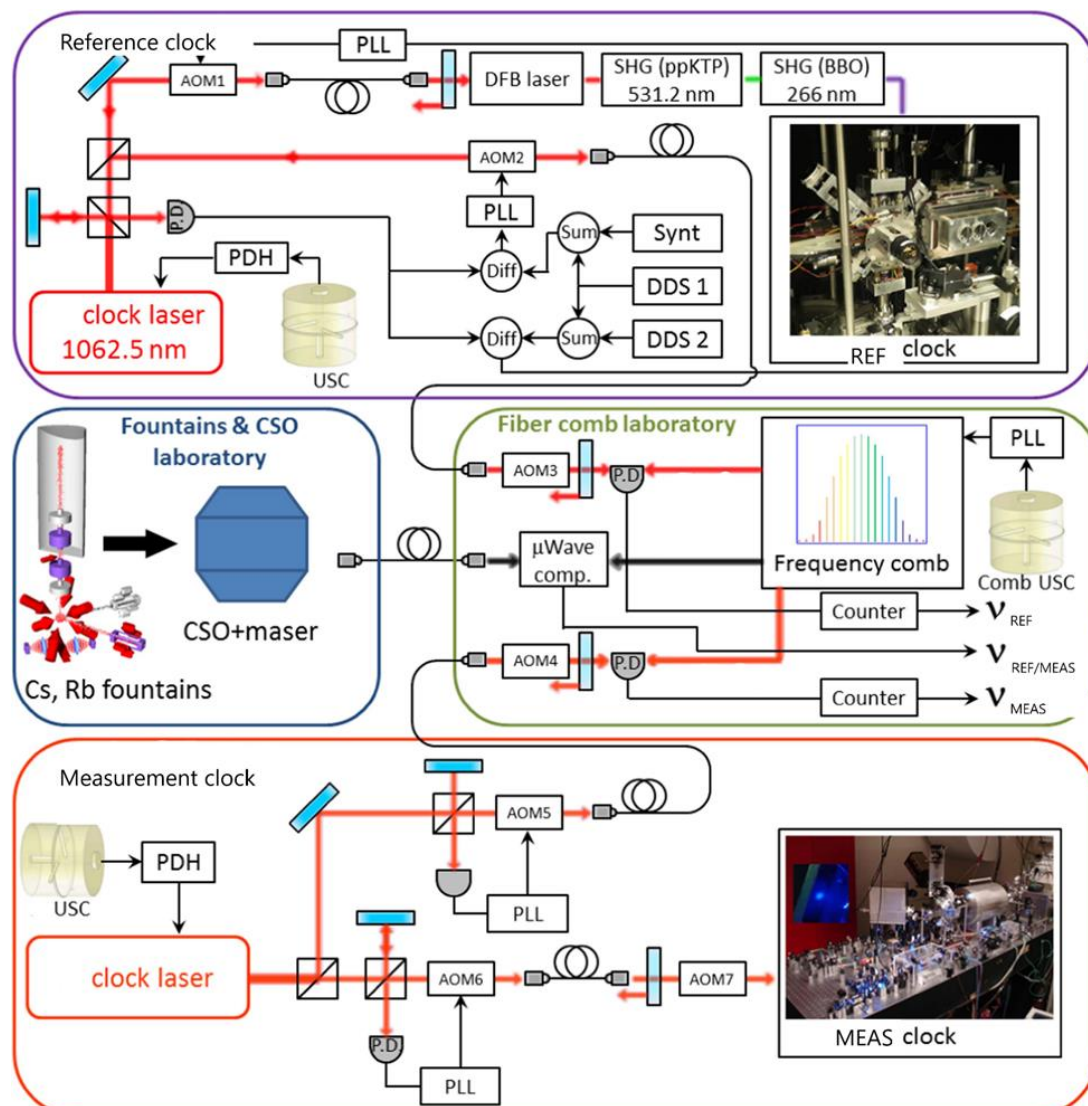
<i>ΠΗΓΕΣ ΣΥΤΣΗΜΑΤΙΚΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ</i>	<i>ΔΙΟΡΘΩΣΗ ($\times 10^{-17}$)</i>	<i>ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ($\times 10^{-17}$)</i>
<i>Laser πλέγματος</i>	2.8	± 1.1
<i>Laser ρολογιού</i>	0.0	± 0.1
<i>Φαινόμενο Zeeman 2^{ης} τάξης</i>	5.1	± 0.9
<i>Ακτινοβολία μαύρου σώματος</i>	16.1	± 3.3
<i>Συγκρούσεις</i>	1.6	± 1.5
<i>Φαινόμενο Doppler 1^{ης} τάξης</i>	0.0	± 2.0
<i>Συνολική αθροιστική επίδραση</i>	25.6	± 8.9

Πίνακας 3.3 Κλασματικές τιμές διόρθωσης και αβεβαιότητας για ένα τυπικό ατομικό ρολόι υττερβίου

Τα δεδομένα που αξιοποιούνται για αυτή τη στατιστική ανάλυση προκύπτουν από επαναλαμβανόμενες συγκρίσεις του ρολογιού μελέτης με άλλα πρότυπα συχνότητας τόσο στο φάσμα των μικροκυμάτων όσο και στον οπτικό τομέα (frequency ratio measurements). Μέχρι και αυτή τη χρονική περίοδο οι συγκρίσεις αυτές γίνονται με χρήση ατομικών ρολογιών καισίου που βρίσκονται σε συνεχή λειτουργία. [Akamatsu, κ.α., 2014] Η διαδικασία παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 3.7, όπου τα δύο ατομικά ρολόγια προς σύγκριση, το ρολόι αναφοράς (reference clock) και το ρολόι των παρατηρήσεων (measurement clock) του οποίου υπολογίζονται οι τιμές των διορθώσεων, είναι τοποθετημένα σε δύο ξεχωριστούς εργαστηριακούς χώρους που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους.

Ένα μικρό μέρος του φωτός διέγερσης από τα δύο ξεχωριστά ρολόγια, αποστέλλεται μέσω οπτικών ινών σε μία διάταξη φίλτρου συχνοτήτων, που βρίσκεται σε ένα τρίτο εργαστήριο (fiber comb laboratory). Η διάταξη αυτή είναι σε άμεση και συνεχή επικοινωνία με ένα σύνδεσμο σταθεροποιημένης συχνότητας, όπως προκύπτει από τη χρήση πρότυπων ρολογιών διατάξεων υδρογόνου, καισίου και ρουβιδίου (fountain clocks).

Η διαδικασία των μετρήσεων περιλαμβάνει την παρατήρηση της συχνότητας του κάθε παλμού των δύο ρολογιών και τη μετέπειτα σύγκριση της συχνότητας που προκύπτει από το φίλτρο με την αντίστοιχη συχνότητα που προκύπτει από τα πρότυπα ρολόγια. Εφόσον η παρατήρηση της συχνότητας των παλμών πραγματοποιείται κατά την ίδια χρονική διάρκεια, αντισταθμίζεται όποιος θόρυβος υπάρχει εξαιτίας της σύνδεσης με τα πρότυπα ρολόγια, και προκύπτουν τα δεδομένα σχετικά με το λόγο συχνοτήτων μεταξύ του ρολογιού αναφοράς και του αντίστοιχου των παρατηρήσεων. Με αυτόν το τρόπο προκύπτει η κλασματική αστάθεια συχνότητας (Allan deviation) μεταξύ των δύο ρολογιών συναρτήσεως του χρόνου, από όπου θα συμπληρωθούν οι συντελεστές των κύριων πηγών συστηματικών σφαλμάτων για το ρολόι των παρατηρήσεων. [Ohmae, κ.α., 2020]



Εικόνα 3.7 Σχηματική γραφική διάταξη συγκρίσεων (frequency ratio measurements) μεταξύ ρολογιού αναφοράς και ρολογιού παρατηρήσεων.

3.5.2 Μεταφορά συστημάτων ατομικών ρολογιών

Η παράμετρος της μεταφοράς των συστημάτων ατομικών ρολογιών περιλαμβάνει τις κύριες κατηγορίες τυπικής εξωτερικής δομής των ατομικών ρολογιών. Οι κύριες κατηγορίες των ατομικών ρολογιών, σε ότι αφορά στη δυνατότητα μεταφορά τους, είναι τα μόνιμα και τα μεταφερόμενα. Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες διαθέτουν περισσότερες από μία υπό-κατηγορίες.

Από την ανάλυση της παραμέτρου της μεταφοράς των συστημάτων μέτρησης, προκύπτει ότι αφορά σε σταθερά διότι δεν επηρεάζεται με μεταβαλλόμενο ρυθμό η αβεβαιότητα προσδιορισμού χρόνου ή συχνότητας από την αντίστοιχη επιλογή κατηγορίας μεταφοράς ρολογιού. Κάθε τύπος ρολογιού έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, και η επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας εξαρτάται αποκλειστικά από το σκοπό και τις ιδιαιτερότητες της κάθε εφαρμογής. Επίσης, υπάρχει άμεση αλληλεπίδραση με την κατηγορία και το είδος του ατομικού ρολογιού καθώς και με την κατασκευαστική του δομή. Ανάλογα με τις επιλογές που θα προκύψουν από τη συγκεκριμένη παράμετρο ενδεχομένως να χρειαστεί παραπάνω ανάλυση της παραμέτρου της κατασκευής. Επομένως γίνεται κατανοητό ότι η επιλογή μεταξύ των διαφορετικών τύπων ρολογιών, σε ότι αφορά στη μεταφορά, είναι βασικής και πρωτεύουσας σημασίας.

Από την αρχή της αξιοποίησης των συστημάτων ατομικών ρολογιών, η λειτουργία τους περιοριζόταν στα εργαστήρια, όπου και αναπτύσσονται και εξελίσσονται συστήματα ατομικών και οπτικών ατομικών ρολογιών τα οποία είναι μόνιμης έδρασης και αξιοποιούνται για εργαστηριακούς, ακαδημαϊκούς ή ακόμα και για εμπορικούς σκοπούς. [Nicholson, κ.α., 2015][McGrew, κ.α., 2018]

Πιο συγκεκριμένα, πειράματα ακριβείας με βάση εργαστηριακά συστήματα ρολογιών, μπορούν να διαμορφώσουν σύγχρονες εφαρμογές οπτικών ατομικών ρολογιών, όπως είναι η χρονομετρική χωροστάθμηση, η βελτίωση του δορυφορικού εντοπισμού και της πλοήγησης, η διατήρηση και παρατήρηση του χρόνου και η δημιουργία ενός πρότυπου ρολογιού αναφοράς στο διάστημα για διηπειρωτικές συγκρίσεις ρολογιών. Ωστόσο, εφαρμογές όπως η χρονομετρική χωροστάθμηση απαιτούν μεταφερόμενα ρολόγια για να παρέχουν την απαραίτητη ευελιξία στην επιλογή των περιοχών μέτρησης.

ΤΙΤΛΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<i>Μεταφορά συστήματος ατομικών ρολογιών</i>
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<i>Σταθερά</i>
ΚΥΡΙΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	<i>Δυνατότητα μετακίνησης των συστημάτων μέτρησης</i>
<pre> graph TD A[ΜΕΤΑΦΟΡΑ] --> B[Στατικά ή Μόνιμα (Stationary)] A --> C[Μεταφερόμενα (Remote)] C --> D[Μετακινούμενα (Transportable)] C --> E[Φορητά (Portable)] C --> F[Κινητά (Mobile)] F --> G[Διακοπτόμενης λειτουργίας] F --> H[Συνεχόμενης λειτουργίας (Αισθητήρες)] </pre>	
ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	<ul style="list-style-type: none"> • Τα κινητά ατομικά ρολόγια μπορούν να παρέχουν πληροφορίες και παρατηρήσεις φυσικών μεγεθών και κατά την διάρκεια της μετακίνησης τους. • Ο όγκος, το βάρος, η σταθερότητα, η ακρίβεια και η υπολογιστική ισχύς είναι τα κριτήρια αξιολόγησης των διαφορετικών μεταφερόμενων ρολογιών. • Τα κινητά ατομικά ρολόγια είναι πιο πολύπλοκα • Η εξέλιξη των στατικών εργαστηριακών ρολογιών προωθεί την περαιτέρω ανάπτυξη των μεταφερόμενων.
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<input checked="" type="checkbox"/> Κόστος <input checked="" type="checkbox"/> Τεχνική υποδομή και εξοπλισμός <input type="checkbox"/> Εμπορικότητα <input checked="" type="checkbox"/> Πολυπλοκότητα <input type="checkbox"/> Μαθηματική και στατιστική ανάλυση <input checked="" type="checkbox"/> Επηρεασμός από άλλες παραμέτρους
ΛΕΞΕΙΣ -- ΚΛΕΙΔΙΑ	<i>Mobile atomic clocks, portable atomic clocks, transportable and stationary atomic clocks</i>

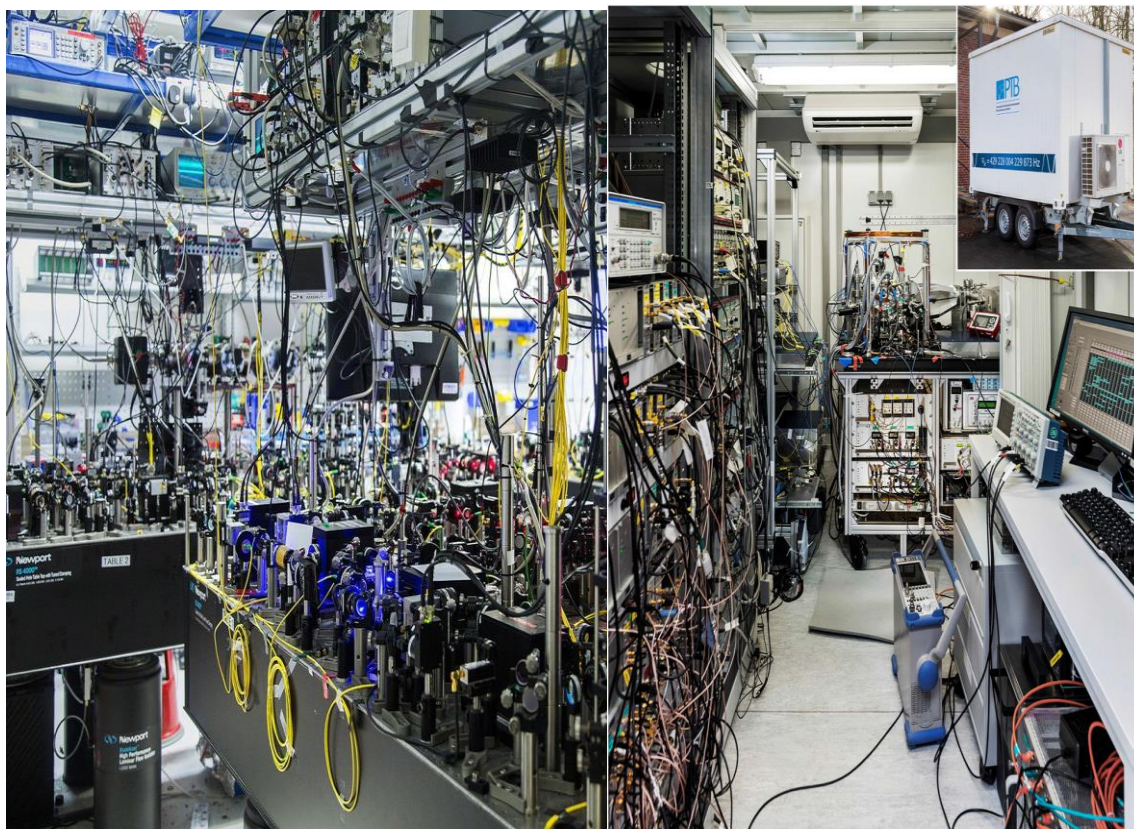
Πίνακας 3.4 Ταυτότητα παραμέτρου, Μεταφορά συστημάτων ατομικών ρολογιών

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των στατικών συστημάτων ατομικών ρολογιών δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την υιοθέτηση υψηλής ακρίβειας και σταθερότητας και στα μεταφερόμενα συστήματα. Μερικές από τις σημαντικότερες εξελίξεις που αφορούν σε τεχνολογική πρόοδο και βοηθούν την ανάπτυξη των μεταφερόμενων συστημάτων αναφέρονται παρακάτω:

- Τα υποσυστήματα και τα εξαρτήματα των ρολογιών είναι εξαιρετικά ανθεκτικοί και ακριβείς συντονιστές σήματος. [Vogt, κ.α., 2011][Chen, κ.α., 2014]
- Η ανάπτυξη της συμπαγούς τεχνολογίας laser για την προετοιμασία των ψυχόμενων ιόντων και ατόμων. [Nevsky, κ.α., 2013][Schwarz, κ.α., 2019]
- Η χρήση αποτελεσματικών πηγών ιόντων. [Kock, κ.α., 2016]
- Η χρήση εξειδικευμένων θαλάμων διέγερσης, ανίχνευσης και παγίδευσης της ατομικής συχνότητας. [Bowden, κ.α., 2019][Semerikov, κ.α., 2019]

Κατασκευάζοντας οπτικά ρολόγια συμπαγή και ανθεκτικά για μεταφορά, παρέχεται η δυνατότητα από περισσότερους χρήστες να αποκτήσουν πρόσβαση σε αυτές τις συσκευές και στο θεωρητικό υπόβαθρο υλοποίησης παρατηρήσεων με αυτές. Επιπλέον, η δυνατότητα μεταφοράς μετρητικών συστημάτων, έχει άμεση συνάφεια με τις τρέχουσες και μελλοντικές εφαρμογές οπτικών ρολογιών στο διάστημα. Τα μεταφερόμενα συστήματα οπτικών ατομικών ρολογιών είναι πλέον ακριβή και σταθερά, ώστε να μπορούν αξιοποιηθούν από την επιστήμη της μετρολογίας που αφορά στη συχνότητα και στη χρονική διατήρηση, επιτρέποντας τη δημιουργία ενός συνεπούς παγκόσμιου δικτύου ρολογιών μεγάλης ακριβείας. [Fischer, κ.α., 2004]

Η κύρια διαφορά μεταξύ των μετακινούμενων και των στατικών συστημάτων ατομικών ρολογιών αφορά κυρίως στο μέγεθος. Στις εικόνες 3.8α και 3.8β, παρουσιάζεται η διαφορά στη διάταξη και στη χωρική κάλυψη που αναπτύσσεται σε ένα στατικό (αριστερή εικόνα) και ένα φορητό ατομικό ρολόι (δεξιά εικόνα).



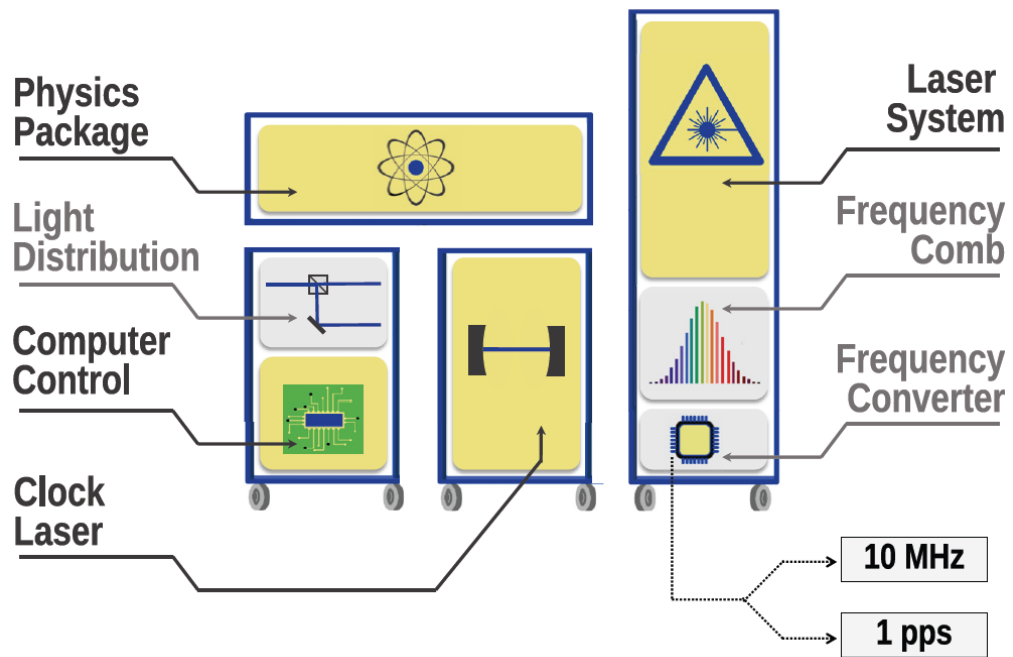
Εικόνα 3.8α Τυπική ανάπτυξη ενός στατικού εργαστηριακού ατομικού ρολογιού

Εικόνα 3.8β Τυπική ανάπτυξη ενός φορητού ατομικού ρολογιού, διαμορφωμένο σε τροχήλατο τρέιλερ

Κάθε μία από τις δύο αυτές κατηγορίες χρειάζεται τον ίδιο βασικό εξοπλισμό που αφορά στις θεμελιώδεις αρχές που ισχύουν για τη λειτουργία ενός ρολογιού, μόνο που στην περίπτωση των μεταφερόμενων ρολογιών οφείλουν να έχουν πολύ μικρότερες διαστάσεις συνολικά. Επίσης δημιουργείται η ανάγκη για την κατασκευή ειδικών διατάξεων εδραίωσης και πάκτωσης των επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων του κάθε μεταφερόμενου ρολογιού. Αυτές δημιουργούνται με σκοπό να απαλειφθούν οποιεσδήποτε διαταράξεις λόγω των δονήσεων και των αναταραχών εξαιτίας της σχετικής κίνησης του συνολικού συστήματος. Αντίθετα τα στατικά συστήματα δεν έχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές μεγέθους και δεν δημιουργείται η ανάγκη για πρόσθετη στατιστική ανάλυση πηγών σφαλμάτων. Άλλες ιδιότητες που διαφοροποιούν τα μεταφερόμενα από τα στατικά ατομικά ρολόγια είναι το χαμηλότερο βάρος (όγκος) καθώς επίσης και η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Οι παραπάνω ιδιότητες αποτελούν και ένα ποιοτικό αλλά και στατιστικό

μέτρο σύγκρισης μεταξύ των διαφορετικών μετακινούμενων συστημάτων. Επίσης γίνεται κατανοητό ότι τα μεταφερόμενα συστήματα, αν και πιο μικρά σε μέγεθος, είναι και πιο πολύπλοκα. [Gellesch, κ.α., 2020]

Στην εικόνα 3.9 παρουσιάζεται μία γραφική τυπική παρουσίαση των διαστάσεων και της σχετικού μεγέθους και της θέσης των διαφορετικών συστημάτων ενός μεταφερόμενου ατομικού ρολογιού.



Εικόνα 3.9 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργικών μονάδων και διαστάσεων μεταφερόμενου οπτικού ατομικού ρολογιού

Ένα από τα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα της χρήσης μεταφερόμενων συστημάτων οπτικών ρολογιών είναι ότι μπορούν να λάβουν μετρήσεις σε οποιαδήποτε τοποθεσία. Επομένως, τα μεταφερόμενα οπτικά ατομικά ρολόγια μπορούν να οδηγήσουν σε μετρήσεις πολύ υψηλότερης ανάλυσης και πυκνότητας, του δυναμικού βαρύτητας του πλανήτη.

Ο όρος μεταφερόμενα συστήματα χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός μεταξύ των στατικών και των μετακινούμενων ρολογιών. Ωστόσο, υπάρχουν διαφορετικές υποκατηγορίες που αφορούν στα μεταφερόμενα ρολόγια και εξαρτώνται από την κατάσταση μεταφοράς τους και την πλήρη ή μερική λειτουργικότητα

τους στο ύπαιθρο. Επομένως δημιουργούνται οι επιμέρους κατηγορίες ως εξής:

- **Μεταφερόμενα οπτικά ατομικά ρολόγια:** αρθρωτές συσκευές που είναι αρκετά συμπαγείς έτσι ώστε να μπορούν να μεταφέρονται σε μια τυπική πλατφόρμα φορητού, και λειτουργούν στον προορισμό τους εντός μικρού χρονικού διαστήματος διάρκειας μερικών ημερών.
- **Φορητά οπτικά ατομικά ρολόγια:** συσκευές που είναι κατασκευασμένες με αρθρωτό ή συμπαγή τρόπο, αλλά ως ενιαία μονάδα αρκετά μικρή ώστε να μεταφέρεται οδικώς με συμβατικό όχημα εμπορικής μεταφοράς. Το ρολόι είναι λειτουργικό στον προορισμό σε σύντομο χρονικό διάστημα διάρκειας μερικών ωρών. Για αυτόνομη λειτουργία, τα φορητά συστήματα ατομικών ρολογιών εγκαθίστανται σε ειδικά διαμορφωμένες και κλιματιζόμενες υποδοχές, που κατασκευάζονται σε ρυμουλκά τρέιλερ αυτοκινήτου. Τα συστήματα αυτά είναι κατάλληλα, για την υλοποίηση μετρήσεων υψομετρίας με ακρίβεια μερικών μέτρων καθώς και για διηπειρωτική διασύνδεση οπτικών ρολογιών. [Koller, κ.α., 2017]
- **Κινητά οπτικά ατομικά ρολόγια:** μικρές συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν και κατά τη διάρκεια της μεταφοράς τους. Τα κινητά ρολόγια είναι μονάδες συνήθως μικρές αρκετά για να τις χειριστεί ένα άτομο. Ανταγωνιστικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι ότι τα κινητά ατομικά ρολόγια μπορούν να αξιοποιηθούν και ως σύγχρονοι χωρικοί αισθητήρες και να πραγματοποιούν μετρήσεις σε όλη τη διαδρομή μεταξύ των διαφορετικών περιοχών παρατήρησης.

3.5.3 Κατασκευαστική δομή ατομικών ρολογιών

Η παράμετρος της κατασκευαστικής δομής των σύγχρονων ατομικών ρολογιών περιλαμβάνει τις κύριες κατηγορίες τυπικής εξωτερικής αλλά και εσωτερικής κατασκευαστικής δομής. Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται αναφορά στις τεχνολογικές και τεχνογνωσιακές εξελίξεις που εφαρμόζονται στα οπτικά ατομικά ρολόγια με τελικό στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας μέτρησης συχνότητας –

χρόνου. Η καταγραφή και παρουσίαση των στοιχείων της παραμέτρου γίνεται με γνώμονα την κατηγορία και το είδος του ατομικού ρολογιού.

Από την ανάλυση της παραμέτρου της μεταφοράς των συστημάτων μέτρησης, προκύπτει ότι αφορά σε μεταβλητή διότι επηρεάζεται με μεταβαλλόμενο ρυθμό η αβεβαιότητα προσδιορισμού χρόνου ή συχνότητας από την αντίστοιχη υιοθέτηση σύγχρονων διατάξεων laser, παγίδων και φίλτρων που αναφέρονται στην κατασκευαστική δομή. Επίσης, αναγνωρίζεται ότι υπάρχει άμεση αλληλεπίδραση με τη μεταφορά των παρατηρήσεων και το είδος του ρολογιού, λόγω των περιορισμών που θα υφίστανται ύστερα από την επιλογή κάθε μίας από τις διαφορετικές κατηγορίες κατασκευής.

Κάθε ρολόι βασίζεται σε έναν ταλαντωτή, ο οποίος καθορίζεται από μία συγκεκριμένη περιοδική συχνότητα αναφοράς. Από αυτήν την περιοδική αναφορά, μπορούν να αντληθούν μεγέθη όπως η συχνότητα αναφοράς καθώς και διάφορα χρονικά διαστήματα και χρονικές κλίμακες.

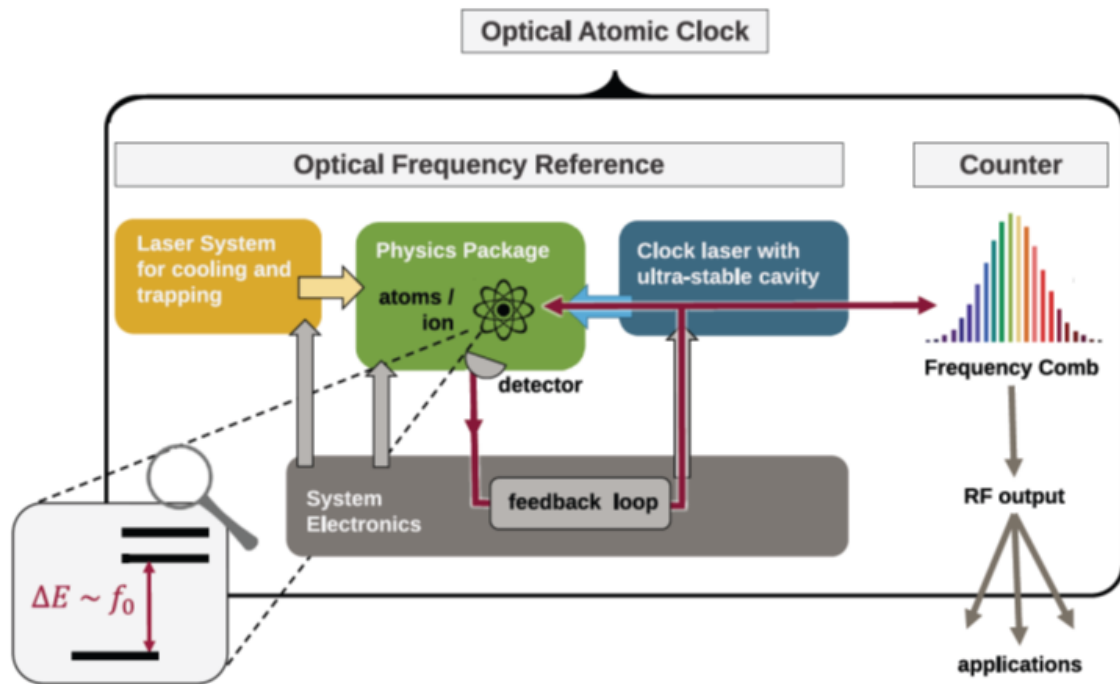
Στην συγκεκριμένη περίπτωση των ατομικών ρολογιών, μια ατομική μετάβαση ηλεκτρονίων μεταξύ των επιπέδων ενέργειας ενός ουδέτερου ατόμου ή ιόντος χρησιμεύουν ως περιοδική αναφορά. Αυτή η μετάβαση αναφέρεται ως μετάβαση (συχνότητας) ρολογιού. Για τα οπτικά ατομικά ρολόγια, η διαφορά ενέργειας μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων αντιστοιχεί σε συχνότητα στο οπτικό εύρος (εκατοντάδες THz ή $\sim 10^{14}$ Hz). [Gellesch, κ.α., 2020]

Τα οπτικά ατομικά ρολόγια τυπικά αποτελούνται από τέσσερα κύρια υποσυστήματα (εικόνα 3.10): το πακέτο φυσικής όπου προετοιμάζεται το σύνολο των ατόμων ή το παγιδευμένο ιόν, μια σειρά από laser ψύξης ή παγίδευσης καθώς και laser πλέγματος (στην περίπτωση ρολογιών με ουδέτερα άτομα), από το σταθεροποιημένο laser ρολογιού μαζί με την οπτική κοιλότητα ακριβείας και από τα ηλεκτρονικά συστήματα.

Τα οπτικά ατομικά ρολόγια ενσωματώνουν αρκετές σύγχρονες τεχνολογίες σε κάθε ένα από αυτά τα επιμέρους υποσυστήματα, που σκοπό έχουν να βελτιώσουν τόσο την αβεβαιότητα προσδιορισμού συχνότητας όσο και τη σταθερότητα. Στη συγκεκριμένη παράμετρο μελετώνται τα στοιχεία εκείνα της εξωτερικής και εσωτερικής κατασκευαστικής δομής των ατομικών ρολογιών.

ΤΙΤΛΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<i>Κατασκευή ατομικού ρολογιού</i>
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<i>Μεταβλητή</i>
ΚΥΡΙΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	<i>Επέμβαση για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών κάθε οπτικού ατομικού ρολογιού</i>
ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	<i>Κατηγορία και είδος ατομικού ρολογιού</i>
ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	<ul style="list-style-type: none"> • Κάθε διαφορετική κατηγορία και είδος ρολογιού δημιουργεί ξεχωριστές ανάγκες για βελτίωση της εσωτερικής και εξωτερικής κατασκευής του ατομικού ρολογιού. • Κάθε καινούργια τεχνολογική εξέλιξη χρειάζεται χρόνο και πειράματα για να ενισχυθεί η χρησιμότητα και η αποτελεσματικότητά της. • Η εξέλιξη στον τομέα της κατασκευής των ατομικών ρολογιών θα προωθήσει την αντίστοιχη εξέλιξη στον τομέα της μεταφοράς.
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	<input checked="" type="checkbox"/> Κόστος <input checked="" type="checkbox"/> Τεχνική υποδομή και εξοπλισμός <input type="checkbox"/> Εμπορικότητα <input checked="" type="checkbox"/> Πολυπλοκότητα <input type="checkbox"/> Μαθηματική και στατιστική ανάλυση <input checked="" type="checkbox"/> Επηρεασμός από άλλες παραμέτρους
ΛΕΞΕΙΣ -- ΚΛΕΙΔΙΑ	<i>Magic Wavelength, Fountain Microwave Technique, Femtosecond Comb, Optical Lattice, Quantum Amplifier, R.F Trap</i>

Πίνακας 3.5 Ταυτότητα παραμέτρου, Κατασκευή ατομικών ρολογιών



Εικόνα 3.10 Συνολική κατασκευαστική δομή ατομικών ρολογιών, όπου γίνεται αναγραφή των διαφορετικών υπό-συστημάτων.

Αρχικά, η ανάγκη για την ανάπτυξη των οπτικών ατομικών ρολογιών δημιουργήθηκε λόγω της ανάγκης για υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας. Τα οπτικά ανάλογα των ρολογιών μικροκυμάτων βασίζονται σε μεταβάσεις ιόντων ή ατόμων σε συχνότητες σχεδόν 10^5 φορές μεγαλύτερες, διατηρώντας ταυτόχρονα μικρό εύρος δέσμης. Αυτό προσφέρει σημαντική μείωση της αστάθειας του ρολογιού σε ισοδύναμους μέσους χρόνους σε σχέση με το ρολόγια μικροκυμάτων. Για παράδειγμα, ενώ τα καλύτερα ρολόγια μικροκυμάτων απαιτούν μέσο όρο αρκετές ώρες για να επιτευχθεί σχετική αστάθεια συχνότητας 10^{-15} , αυτό μπορεί να επιτευχθεί σε μερικές δεκάδες δευτερόλεπτα στα αντίστοιχα οπτικά. Το γεγονός αυτό, αύξησε τη σταθερότητα του ρολογιού όχι μόνο παρέχοντας καλύτερη ανάλυση χρόνου, αλλά διευκολύνοντας επίσης τον προσδιορισμό των συστηματικών μεταβολών της συχνότητας του ρολογιού λόγω περιβαλλοντικών διαταραχών όπως ηλεκτρικά, μαγνητικά και φωτεινά πεδία. Οι σχετικές τεχνικές παρατήρησης τέτοιων οπτικών μεταβάσεων μικρού εύρους δεν περιλαμβάνουν μόνο την ανάγκη για laser ψύξης για να απαλειφθεί η επίδραση Doppler (εκατοντάδες megahertz) που μεταβάλλει το φυσικό εύρος λειτουργίας του ρολογιού, αλλά και την ανάγκη για υψηλής σταθερότητας ανιχνευτές laser για ανάγνωση της οπτικής μετάβασης χωρίς απώλεια στην ανάλυση.

Τα άτομα / ιόντα πρέπει επίσης να παγιδευτούν και να βρίσκονται σε μια μικρή περιοχή του χώρου, ώστε οι χρόνοι ανάγνωσης

(interrogation time) να είναι επαρκείς (περίπου 1 δευτερόλεπτο), ώστε να αποφευχθεί η φασματική διεύρυνση του χρόνου ανάγνωσης. Επίσης, η αστάθεια είναι ανάλογη με το αντίστροφο της τετραγωνικής ρίζας του αριθμού των σωματιδίων. Επομένως εμφανίζεται απόκλιση στις πειραματικές μεθοδολογίες δημιουργίας οπτικού ρολογιού, ανάλογα με το αν κάποιος χρησιμοποιεί άτομα ή ιόντα.

Τα ρολόγια ιόντων βασίζονται κυρίως σε ένα μόνο ιόν, ψυχόμενο από διατάξεις laser, που περιορίζεται μέσα σε μια ηλεκτρομαγνητική παγίδα ραδιοσυχνοτήτων. Η διάταξη αυτή προσεγγίζει την ιδανική κατάσταση για ένα μόνο σωματίδιο σε ηρεμία απομονωμένο από το περιβάλλον. [Paul, 1990] Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι το χαμηλό επίπεδο ανιχνευθέντος σήματος καθώς πραγματοποιείται μετάβαση του ιόντος. Η αδυναμία αυτή μπορεί να αντιμετωπιστεί μερικώς μέσω κατάλληλης στροφής της συνολικής διάταξης. [Nagourney, κ.α., 1986].

Τα οπτικά ρολόγια ατόμων βασίζονται σε μία βελτίωση της μικροκυματικής τεχνικής εκτόξευσης προς τα πάνω (fountain microwave technique). Στην περίπτωση της εκτόξευσης προς τα πάνω, ο χρόνος ανάγνωσης περιορίζεται στην πράξη, από το ύψος της εκτόξευσης, με το τυπικό ύψος ενός μέτρου να έχει ως αποτέλεσμα τυπικό Διάστημα Ramsey ενός δευτερολέπτου μεταξύ της ανίχνευσης των επιβραδυνόμενων ατόμων στην εκτόξευση τους και καθώς πέφτουν πάλι κάτω. Σε ένα σύγχρονο οπτικό ρολόι που βασίζεται σε άτομα, αυτή η δυσκολία ξεπερνάται μέσω της χρήσης ενός οπτικού δικτυωτού πλέγματος για τον περιορισμό των ατόμων εντός της περιοχής ανάγνωσης. [Katori, κ.α., 2003]

Το πλέγμα περιλαμβάνει ένα σύνθετο κύμα σε μία, δύο ή τρεις διαστάσεις, που προβλέπει τοποθεσίες οπτικής παγίδευσης υπο-μήκους κύματος, ώστε να μπορεί να παγιδεύει πολύ κρύα άτομα. Στόχος είναι να διατηρηθεί μόνο ένα άτομο σε κάθε μια περιοχή παγίδευσης, προκειμένου να απαλειφθεί οποιαδήποτε πιθανότητα μεταβολής της συχνότητας λόγω συγκρούσεων. Ωστόσο, το πεδίο φωτός παγίδευσης πλέγματος προκαλεί στατιστικά σημαντική διαταραχή στα άτομα του ρολογιού, με αποτέλεσμα πολύ σημαντικές εναλλαγές λόγω του φαινομένου Stark των άνω και κάτω κατωφλίων της μετάβασης ρολογιού. Η αδυναμία αυτή διορθώνεται, με χρήση μιας συγκεκριμένης τιμής μήκους κύματος (magic wavelength) για το laser δικτυωτού πλέγματος, οπότε η εναλλαγή AC Stark του άνω και κάτω κατωφλίου

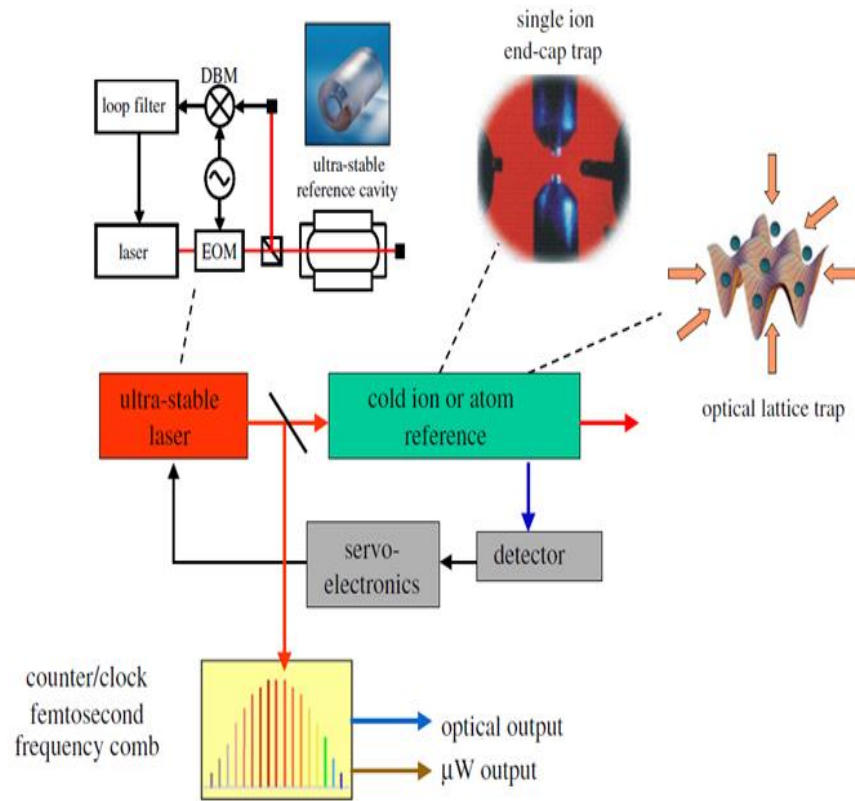
μπορούν να οριστούν και οι δύο με καλή ακρίβεια. Αυτό επιτρέπει περισσότερα άτομα να συμβάλλουν στο σήμα ρολογιού, το οποίο θα βελτιώσει την αναλογία σήματος προς θόρυβο, επομένως θα ενισχυθεί η σταθερότητα.

Πλέον, η συστηματική αβεβαιότητα για το κορυφαίο σύστημα ιόντων αφορά μια τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτό για τα ρολόγια του ουδέτερου ατόμου.

Για την κατασκευή ενός οπτικού ατομικού ρολογιού, η συχνότητα της ατομικής μετάβασης χρησιμοποιείται για να καθορίσει τη συμπεριφορά ενός τοπικού ταλαντωτή, ο οποίος σε αυτήν την περίπτωση είναι το "ρολόι laser". Πιο συγκεκριμένα ως ρολόι laser, ορίζεται ένα laser περιορισμένου εύρους φασματική γραμμής (narrow linewidth), σταθεροποιημένο σε μία εξαιρετικά ανθεκτική κοιλότητα με χαμηλή βραχυπρόθεσμη αστάθεια. Στην κυκλική λειτουργία της προετοιμασίας και διέγερσης της ατομικής αναφοράς, ο ηλεκτρονικός βρόγχος ανάδρασης επιτρέπει το συντονισμό της συχνότητας αυτού του laser με τη συχνότητα αναφοράς που αντιστοιχεί στη μετάβαση μεταξύ των ενεργειακών επιπέδων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα τέτοιο σύστημα αποτελεί ένα πρότυπο οπτικής συχνότητας. Για να δημιουργηθεί ένα οπτικό ατομικό ρολόι, εκτός από το πρότυπο οπτικής συχνότητας απαιτείται και ένα φίλτρο συχνότητας (frequency comb generator), (εικόνα 3.11) το οποίο αξιοποιείται ως μετρητής.

Αυτό το φίλτρο επιτρέπει την ανάλυση του σήματος του ρολογιού στο εύρος των ραδιοσυχνοτήτων. Επίσης η ανάπτυξη σύγχρονων φίλτρων ακριβείας φέμτο-δευτερολέπτου (femto-second) (10^{-15} s), προσφέρουν τη δυνατότητα για εύκολη, αποτελεσματική και γρήγορη σύγκριση μεταξύ μικροκυματικών και οπτικών διατάξεων. [Jones, κ.α., 2000] Στη συνέχεια, σε συνδυασμό με ένα άλλο ατομικό ρολόι με γνωστή συχνότητα αναφοράς, προσδιορίζεται η απόλυτη συχνότητα του laser ρολογιού που αναφέρεται στην ατομική μετάβαση. [Fortier, κ.α., 2019]



Εικόνα 3.11 Εσωτερική γραφική κατασκευαστική δομή οπτικού ατομικού ρολογιού

ΜΕΡΟΣ Β

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΡΟΛΟΓΙΩΝ

4.1 Γενικά

Η χρονομετρική χωροστάθμηση είναι μία μεθοδολογία που μπορεί να αξιοποιηθεί για τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της βαρύτητας γύρω από τις περιοχές μέτρησης. Για να υλοποιηθεί όμως η μεθοδολογία, με ακρίβεια που να συμβαδίζει με την τρέχουσα τυπική ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών (της τάξης του $\pm 1\text{cm}$), οφείλουν να χρησιμοποιηθούν σύγχρονες μετρητικές διατάξεις. Αυτά τα συστήματα μετρήσεων είναι τα οπτικά ατομικά ρολόγια, τα οποία μπορούν να προσδιορίσουν διαφορές συχνότητας με αναλογική ακρίβεια της τάξης του 10^{-18} .

Το υπόβαθρο της μεθοδολογίας αναφέρεται στη βαρυτική φασματική μετατόπιση (gravitational redshift effect), όπως περιγράφεται στη γενική θεωρία της σχετικότητας. Σύμφωνα με αυτή, οποιαδήποτε αλλαγή στο ρυθμό λειτουργίας δύο πανομοιότυπων διακριβωμένων συστημάτων παρατήρησης χρόνου, τοποθετημένων σε διακριτά σημεία, οφείλεται στη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο αυτών θέσεων, που συνδέεται αναλογικά με την υψομετρική διαφορά τους.

4.2 Στάδια εφαρμογής της μεθοδολογίας

Σύμφωνα με τη θεωρητική ανάλυση, ένα τυπικό σύστημα παρατηρήσεων χρονομετρικής χωροστάθμησης, αποτελείται από δύο τουλάχιστον διατάξεις πανομοιότυπων οπτικών ατομικών ρολογιών. Συνήθως η μία από τις δύο διατάξεις τοποθετείται σε ένα σταθερό σημείο για το οποίο είναι γνωστό το υψόμετρο με ακρίβεια. Η άλλη διάταξη μετακινείται κάθε φορά, ώστε να τοποθετείται σε όλες τις ενδεχόμενες θέσεις μελέτης. Για τις δύο τυπικά θέσεις, μπορεί μετά την ολοκλήρωση της μεθοδολογίας να προσδιοριστεί η μεταξύ τους υψομετρική διαφορά (ανάλογα με την επιφάνεια αναφοράς).

Για να είναι αξιοποιήσιμη η τιμή της υψομετρικής διαφοράς και μετέπειτα η τιμή του υψομέτρου, πρέπει να οριστεί το σύστημα αναφοράς στο οποίο θα προσδιοριστούν οι τιμές καθώς επίσης και ο τύπος των υψομετρικών διαφορών. Σε προηγούμενες παραγράφους αναλύθηκε ότι οι υψομετρικές διαφορές που προσδιορίζονται από σχετικιστικά συστήματα αναφοράς αναφέρονται σε φυσικές επιφάνειες που δημιουργούνται από τις παρατηρήσεις χρόνου - συχνότητας. Οι επιφάνειες αυτές αντιστοιχούν στο γεωειδές, όπως περιγράφεται και στη κλασσική γεωδαισία, και οι υψομετρικές διαφορές που αναφέρονται σε αυτές είναι άμεσα αξιοποιήσιμες ορθομετρικές υψομετρικές διαφορές.

Η διαδικασία των παρατηρήσεων περιλαμβάνει τα επιμέρους στάδια της τοποθέτησης, λειτουργίας και σύγκρισης των μετρούμενων συχνοτήτων από τουλάχιστον δύο διατάξεις οπτικών ατομικών ρολογιών.

Πιο συγκεκριμένα οι δυο διατάξεις, αφού τοποθετηθούν στις περιοχές ενδιαφέροντος, τίθενται σε λειτουργία, με αρχικό σκοπό να παρέλθει ένα ικανό χρονικό διάστημα που χρειάζεται κάθε μία από αυτές, για να μπορέσει να προσδιορίσει συχνότητα με ακρίβεια και σταθερότητα σύμφωνα με τις προδιαγραφές της κατασκευής της. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή οι διατάξεις είναι έτοιμες να πραγματοποιήσουν μετρήσεις. Κάθε μία από τις διατάξεις λειτουργεί σε πρώτο βαθμό αυτόνομα, όπου προκύπτει η πρώτη έξοδος ιδιοσυχνότητας. Στη συνέχεια μέσω των κατάλληλων μέσων και τεχνικών πραγματοποιείται επικοινωνία και σύγκριση των εξόδων των δύο διατάξεων με σκοπό να ανιχνευθούν και να διορθωθούν οι τιμές που προέκυψαν. Έτσι υπολογίζονται οι τιμές συντεταγμένης συχνότητας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βασική σχέση που συνδέει τη διαφορά μετρούμενης συχνότητας με την αντίστοιχη υψομετρική διαφορά.

Για να υλοποιηθεί ορθά η μεθοδολογία και να παρέχεται δυνατότητα αξιολόγησης των τελικών αποτελεσμάτων (υψομετρικές διαφορές), πρέπει να έχουν αναλυθεί όλες οι επιμέρους πηγές εισαγωγής θορύβου και σφαλμάτων. Οι πηγές αυτές ερμηνεύονται μέσω της ανάλυσης συγκεκριμένων παραμέτρων που αφορούν στη μεθοδολογία και στα οπτικά ατομικά ρολόγια.

Επίσης γίνεται η παραδοχή ότι όλες οι πηγές σφαλμάτων μπορούν να αναλυθούν και να μελετηθούν διεξοδικά, εκτός από το φαινόμενο της βαρυτικής φασματικής μετατόπισης. Με τη συνδυασμένη μελέτη των πηγών σφαλμάτων, μπορεί είτε να απαλειφθεί είτε να ποσοτικοποιηθεί η

επίδρασή τους, επομένως ο μόνος όρος που θα απομείνει να δημιουργεί διαφορά στις τιμές των συχνοτήτων, επομένως και των υψομέτρων, είναι η επίδραση του βαρυτικού πεδίου.

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω παραδοχή, που αναφέρεται στην ορθότητα των οπτικών ρολογιών, ακολουθεί η αξιολόγηση της συνεισφοράς των υπολοίπων παραμέτρων στην τελική ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών.

4.3 Συγκριτική αξιολόγηση των παραμέτρων

Τα σύγχρονα οπτικά ατομικά ρολόγια έχουν προσεγγίσει ένα υψηλό επίπεδο ακρίβειας και σταθερότητας των μετρήσεων που παρέχουν με τη βοήθεια της σύγχρονης ψηφιακής τεχνολογίας. Έτσι ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις που ορίζονται από μεθοδολογίες που εισάγουν τη γενική θεωρία της σχετικότητας στην κλασική γεωδαισία.

Η δημιουργία οπτικών ατομικών ρολογιών αποτελεί ένα αναδυόμενο πεδίο έρευνας, με τις περισσότερες προτάσεις να αναφέρονται σε πειραματικό στάδιο. Η πολυπλοκότητα της κατασκευής, λειτουργίας, επικοινωνίας και μεταφοράς τους, είναι τα κύρια πεδία που οφείλουν να αναλυθούν. Η ανάλυση αυτή πρέπει να πραγματοποιηθεί τόσο ανεξάρτητα για κάθε μία από τις παραμέτρους αλλά και συνολικά. Έτσι μόνο εξασφαλίζεται η ονομαστική (κατασκευαστική) αβεβαιότητα που παρέχουν στις μετρήσεις τους, και η αξιοπιστία των παρατηρήσεων που εκτελούνται με οπτικά ατομικά ρολόγια.

Με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στις προηγούμενες ενότητες (βλ. κεφ. 2,3) αρχικά αναδεικνύεται και τεκμηριώνεται η ανάγκη συνολικής μελέτης των παραμέτρων εισαγωγής αβεβαιότητας στην εφαρμογή της μεθοδολογίας της χρονομετρικής χωροστάθμησης με χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών. Παράλληλα καταγράφηκαν όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν αφενός την ορθή λειτουργία και αφετέρου την επικοινωνία μεταξύ τους.

Κάθε μία από τις παραμέτρους επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο (ποιοτικά και ποσοτικά) την τελική αβεβαιότητα των παρατηρήσεων.

Ο ποιοτικός διαχωρισμός αφορά στη γενική συγκριτική κατάταξη των παραμέτρων ενώ ο ποσοτικός στην ειδική. Σκοπός της δημιουργίας των δύο διαφορετικών διαχωρισμών, είναι αφενός να προκύψει κατάταξη

των παραμέτρων τόσο με κριτήρια που αφορούν στην πρακτικότητα και τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθοδολογίας και αφετέρου τη μελέτη πηγών σφαλμάτων που ενδέχεται να επηρεάσουν την εφαρμογή της μεθοδολογίας..

Τα **ποιοτικά** χαρακτηριστικά που μελετώνται είναι έξι (6) και αντιστοιχούν στις κύριες πηγές που καθορίζουν τις σχέσεις ζήτησης και προσφοράς μεταξύ της αναγκαιότητας υλοποίησης της μεθοδολογίας και της τρέχουσας δυνατότητας εφαρμογής της. Στο πλαίσιο αυτό ορίζονται βασικά κριτήρια, όπου ελέγχεται η κλίμακα τήρησης τους από κάθε παράμετρο, αποκτώντας ορισμένα *βάρη*.

Αντίστοιχα τα **ποσοτικά** χαρακτηριστικά που μελετώνται είναι πέντε (5) και αφορούν τόσο στην εφαρμογή της μεθοδολογίας όσο και στη χρήση των οπτικών ατομικών ρολογιών. Στο πλαίσιο αυτό ορίζεται ένα μοντέλο που εκφράζεται με μια *κλίμακα βαθμών (grades)*, το οποίο καταλήγει σε μία συνάρτηση (εξίσωση) με την οποία μπορεί να υπολογιστεί για κάθε παράμετρο ξεχωριστά η συνεισφορά της στο συνολικό αποτέλεσμα.

Σκοπός είναι η ανεύρεση μιας διαδικασίας με την οποία θα προσδιορίζεται η συνολική συνεισφορά όλων των παραμέτρων στην τελική αβεβαιότητα προσδιορισμού συχνότητας. Ακολουθώντας το μαθηματικό μοντέλο της μεθοδολογίας της χρονομετρικής χωροστάθμησης η αβεβαιότητα αυτή θα "μεταφράζεται" στην τελική ακρίβεια προσδιορισμού ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών.

4.3.1 Γενική συγκριτική κατάταξη των παραμέτρων

Η γενική κατάταξη των παραμέτρων αξιολογείται ακολουθώντας τα *ποιοτικά* χαρακτηριστικά κάθε παραμέτρου. Σκοπός της γενικής κατάταξης των παραμέτρων είναι να διαμορφωθεί μία κατάσταση των ιδιαιτεροτήτων και χαρακτηριστικών της πρακτικής εφαρμογής των συνθηκών κάθε παραμέτρου.

Για την αξιολόγηση και κατάταξη εφαρμόστηκε η μέθοδος της πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπου ελέγχεται η τήρηση κάποιων συγκεκριμένων κριτηρίων, από κάθε παράμετρο ξεχωριστά. Τα κριτήρια αυτά τίθενται στην αρχή της διαδικασίας, και ανάλογα με την εφαρμογή τους κάποιες από τις παραμέτρους αποκτούν ορισμένα *βάρη*.

Στο τέλος της διαδικασίας η παράμετρος με το μεγαλύτερο άθροισμα βαρών, θα αποτελέσει την πιο σύνθετη παράμετρο ως προς τη μελέτη, βελτίωση, εξέλιξη και πρακτική εφαρμογή.

Τα βασικά κριτήρια ως προς τα οποία αξιολογούνται οι παράμετροι, θα αναφέρονται στα ακόλουθα ως *συνθήκες παραμέτρου* και εμπεριέχονται στις ταυτότητες των παραμέτρων, όπως δημιουργήθηκαν σε προηγούμενες ενότητες. Πιο συγκεκριμένα τα κριτήρια είναι:

- Κόστος
- Τεχνική υποδομή και εξοπλισμός
- Εμπορικότητα
- Πολυπλοκότητα
- Μαθηματική και στατιστική ανάλυση
- Επηρεασμός από άλλες παραμέτρους

4.3.1.1 Ποιοτική αξιολόγηση παραμέτρων

Κάθε παράμετρος αξιολογείται ως προς κάθε κριτήριο που αναπτύχθηκε και αποκτά βάρη σε μία κλίμακα που κυμαίνεται από το ελάχιστο 1 έως το μέγιστο 3.

Η παράμετρος "*μέτρηση*" αναφέρεται στο μετρούμενο μέγεθος και η αξιολόγησή της διαμορφώνεται από το κόστος, τον εξοπλισμό και τη μαθηματική ανάλυση. Η μαθηματική και στατιστική ανάλυση κατέχει το μεγαλύτερο βάρος (3) και ερμηνεύει την ανάγκη για μοντελοποίηση και ανάλυση των πηγών σφαλμάτων, ανεξαρτήτως της επιλογής του μεγέθους. Η τεχνική υποδομή και ο εξοπλισμός συμμετέχουν μερικώς στο άθροισμα των βαρών (2) διότι ανάλογα με την επιλογή του μετρούμενου μεγέθους επηρεάζεται η διάταξη των συστημάτων μέτρησης και καταγραφής. Επιπλέον το κόστος συμμετέχει με μικρό βάρος (1) διότι εναλλακτικές επιλογές του μετρούμενου μεγέθους έχουν μελετηθεί και δε χρειάζονται χρηματικοί πόροι για περαιτέρω εξέλιξή τους.

Η παράμετρος "*επικοινωνία*" αναφέρεται στην επιλογή του μέσου μετάδοσης και η αξιολόγησή της διαμορφώνεται από το κόστος, τον εξοπλισμό, την εμπορικότητα, τη μαθηματική ανάλυση και την επιρροή από άλλες παραμέτρους. Το κόστος, η εμπορικότητα και η υλικοτεχνική υποδομή συμμετέχουν με μεγάλο βάρος (3 για κάθε κριτήριο) διότι τα διαφορετικά μέσα βρίσκονται σε διαφορετική διαθεσιμότητα και στάδιο

εξέλιξης. Ανάλογα με το σκοπό των μετρήσεων και τον προϋπολογισμό σε κόστος και εξοπλισμό, μεταβάλλεται η πολυπλοκότητα και η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου. Η μαθηματική ανάλυση συμμετέχει μερικώς στο άθροισμα των βαρών (2) εξαιτίας της ανάλυσης και περιγραφής των πηγών σφαλμάτων που υφίστανται σε κάθε διαφορετικό μέσο μετάδοσης. Επίσης, η επιρροή από άλλες παραμέτρους συμμετέχει με μικρό βάρος (1), διότι μερικές ειδικές κατηγορίες μεταφοράς οπτικών ατομικών ρολογιών δημιουργούν περιορισμούς στη χρήση συγκεκριμένων μέσων και τεχνικών μετάδοσης.

Η παράμετρος "*κατηγορία και είδος*" αναφέρεται στα κύρια χαρακτηριστικά του οπτικού ατομικού ρολογιού. Η τεχνική υποδομή και εξοπλισμός συμμετέχουν με μεγάλο βάρος (3 για κάθε κριτήριο) διότι αντιστοιχούν στη μελλοντική εξέλιξη και συνεχή αναβάθμιση των στοιχείων των οπτικών ατομικών ρολογιών. Το κόστος και η πολυπλοκότητα συμμετέχουν μερικώς (2 κάθε κριτήριο), καθώς τα κύρια χαρακτηριστικά των σύγχρονων ατομικών ρολογιών μελετώνται και η περαιτέρω βελτίωσή τους δεν επηρεάζει τις τρέχουσες δυνατότητες αξιοποίησης και πρακτικής εφαρμογής της μεθοδολογίας. Η επιρροή από άλλες παραμέτρους συμμετέχει με μικρότερο βάρος (1), διότι μερικές επιλογές σύγχρονων μετακινούμενων οπτικών ατομικών ρολογιών προϋποθέτουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που αφορούν στο είδος. Με το ίδιο βάρος αξιολογείται και η χρήση τόσο απλοποιημένων όσο και προηγμένων μαθηματικών σχέσεων και μοντέλων (1) για την ανίχνευση και απαλοιφή των συστηματικών πηγών σφαλμάτων που διαφοροποιούνται ανάλογα με τη κατηγορία και το είδος των οπτικών ατομικών ρολογιών.

Η παράμετρος "*μεταφορά*" αναφέρεται στη δυνατότητα μετακίνησης ενός μετρητικού οπτικού ατομικού ρολογιού. Το κόστος και η εμπορικότητα συμμετέχουν με μεγάλο βάρος (3 για κάθε κριτήριο) διότι η ανάπτυξη και χρήση των σύγχρονων μετακινούμενων ατομικών ρολογιών δημιουργεί σημαντική εμπορική ζήτηση αλλά εξαιτίας της πολυπλοκότητας και της περιορισμένης εξέλιξης του εξοπλισμού, χρειάζονται περισσότεροι χρηματικοί πόροι για την ανάπτυξή τους. Επιπλέον η επιρροή από άλλες παραμέτρους συμμετέχει και αυτή με μεγάλο βάρος (3), διότι οποιεσδήποτε αλλαγές είτε στη κατασκευαστική δομή είτε στη κατηγορία του οπτικού ατομικού ρολογιού δημιουργούν αναπόφευκτους περιορισμούς στη βασική πρακτική εφαρμογή της μεταφοράς.

Η παράμετρος "κατασκευαστική δομή" αναφέρεται σε όλα τα συστήματα που βελτιώνουν την σταθερότητα της λειτουργίας των οπτικών ατομικών ρολογιών. Η πολυπλοκότητα συμμετέχει με μεγάλο βάρος (3) διότι η ανάπτυξη και εξέλιξη των σύγχρονων αυτών παρεμβάσεων στην εσωτερική και εξωτερική δομή των ρολογιών αφορά εξειδικευμένες μελέτες που αφορούν στις επιστήμες της φυσικής και της μετρολογίας. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η επιρροή από άλλες παραμέτρους (3) οφείλει την υψηλή τιμή βάρους στους περιορισμούς που δημιουργούνται κάθε φορά από την διαφορετική επιλογή τους είδους και της μεταφοράς των οπτικών ατομικών ρολογιών. Το κόστος και η τεχνική υποδομή συμμετέχουν μερικώς στο άθροισμα των βαρών (2 για κάθε κριτήριο). Αν και η εξειδικευμένη μελέτη των στοιχείων της κατασκευαστικής δομής προϋποθέτει εξέλιξη των σύγχρονων συστημάτων και αξιολογείται ως σημαντικά δαπανηρή, δεν είναι πάντοτε απαραίτητη στις τρέχουσες μελέτες και πρακτικές εφαρμογές της μεθοδολογίας.

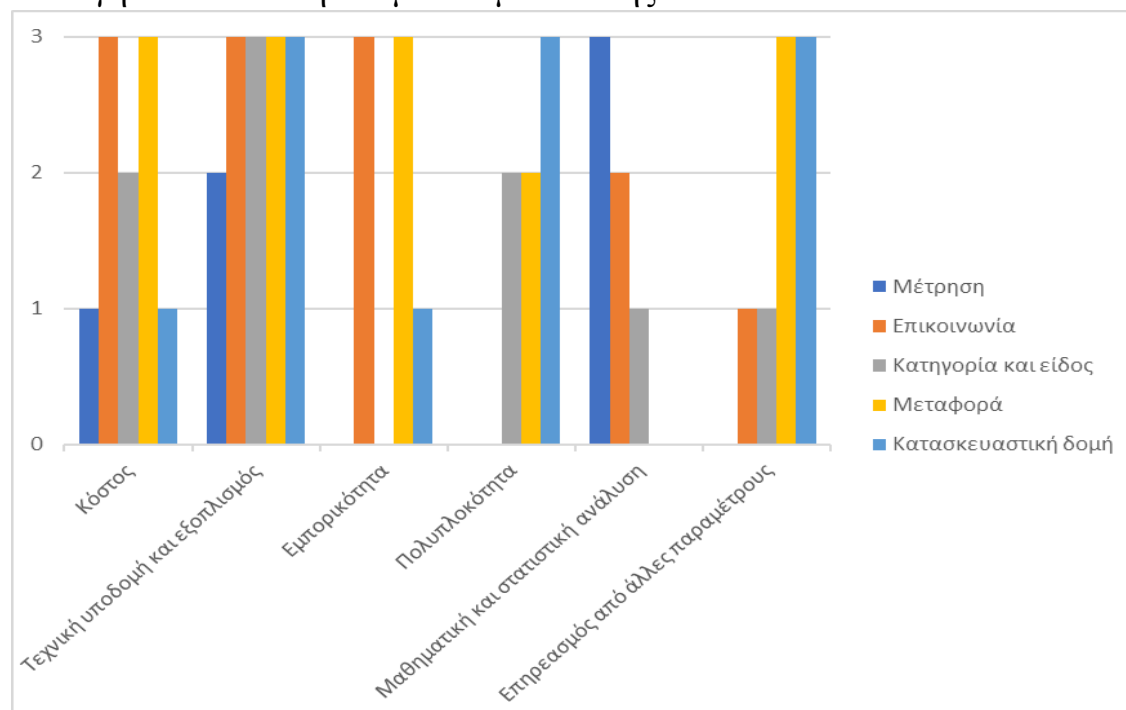
Στον πίνακα 4.1 και στο διάγραμμα 4.1 παρουσιάζεται, μέσω του συστήματος αξιολόγησης με τα βάρη, η κατάταξη των παραμέτρων.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ				
	<i>Μέτρηση</i>	<i>Επικοινωνία</i>	<i>Κατηγορία και είδος</i>	<i>Μεταφορά</i>	<i>Κατασκευαστική δομή</i>
<i>Κόστος</i>	1	3	2	3	2
<i>Τεχνική υποδομή και εξοπλισμός</i>	2	3	3	2	2
<i>Εμπορικότητα</i>	-	3	-	3	1
<i>Πολυπλοκότητα</i>	-	-	2	2	3
<i>Μαθηματική και στατιστική ανάλυση</i>	3	2	1	-	-
<i>Επηρεασμός από άλλες παραμέτρους</i>	-	1	1	3	3
Σύνολο	6	12	9	13	11

Πίνακας 4.1 Γενική αξιολόγηση παραμέτρων

Εξετάζοντας τα στοιχεία του πίνακα 4.1 παρατηρείται ότι η παράμετρος "μεταφορά" συγκεντρώνει το μεγαλύτερο άθροισμα βαρών. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα, το κόστος και την εμπορική -

επιστημονική αναγκαιότητα ύπαρξης διατάξεων ατομικών ρολογιών, που θα μπορούν να μεταφέρονται και να πραγματοποιούν παρατηρήσεις σε οποιοδήποτε σημείο της Φ.Γ.Ε. Στη συνέχεια ακολουθεί η παράμετρος "κατασκευαστική δομή" που οφείλει την υψηλή τιμή αθροίσματος, στη πολυπλοκότητα και στην αναγκαιότητα ύπαρξης υλικοτεχνικής υποδομής για τη μετέπειτα εξέλιξη της. Η παράμετρος "επικοινωνία" επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος αλλά και την ανάπτυξη πρόσθετων υποδομών (παγκόσμια δίκτυα οπτικών ινών) που θα διευκολύνουν την επιλογή του κατάλληλου μέσου μετάδοσης.



Διάγραμμα 4.1 Γενική αξιολόγηση παραμέτρων

4.3.2 Ειδική συγκριτική κατάταξη των παραμέτρων

Η ειδική αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω των ποσοτικών χαρακτηριστικών. Σκοπός της ειδικής αξιολόγησης, είναι να δημιουργηθεί μία συγκριτική κατάταξη των παραμέτρων, που καθορίζεται από το πλήθος των επιλογών και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε μίας. Στόχος είναι να περιλαμβάνονται στη μελέτη όλες οι ενδεχόμενες επιλογές που μπορούν να γίνουν σε επίπεδο κατηγοριών, οι οποίες είναι ικανές να μεταβάλουν και να καθορίσουν την συνεισφορά της συγκεκριμένης παραμέτρου στη συνολική συνδυαστική ανάλυση όλων. Επομένως, η ειδική (ποσοτική) αξιολόγηση αναφέρεται **αποκλειστικά στις επιλογές** που μπορούν να γίνουν για κάθε παράμετρο

ξεχωριστά, και αντιστοιχεί ουσιαστικά σε μία εξειδικευμένη μελέτη βελτιστοποίησης της συνεισφοράς κάθε μίας.

Τα στοιχεία της ειδικής αξιολόγησης των παραμέτρων, θα αξιοποιηθούν μετέπειτα για να διαμορφωθεί μία κατάσταση της θεωρητικής συνεισφοράς κάθε μίας ξεχωριστά στη τελική επιδιωκόμενη ακρίβεια των παρατηρήσεων.

Στις παραγράφους 2.6 και 3.5, αιτιολογήθηκε ο τρόπος με τον οποίο επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες παράμετροι. Επίσης πραγματοποιήθηκε και ένας αρχικός βασικός διαχωρισμός των παραμέτρων ως προς το ρυθμό επηρεασμού της μεταβολής της αβεβαιότητας. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με τη στασιμότητα ή δυναμικότητα της επίδρασης των παραμέτρων αυτών, κατατάσσονται σε σταθερές ή μεταβλητές αντίστοιχα.

Ο διαχωρισμός αυτός διευκολύνει τη διαδικασία κατάταξης των διαθέσιμων επιλογών κάθε παραμέτρου σε μία συγκεκριμένη ειδική συγκριτική σειρά. Οι επιλογές αυτές καθορίζονται από τις δημιουργούμενες κατηγορίες και υπό-κατηγορίες χαρακτηριστικών αυτών. Σε περίπτωση που κάποια από τις παραμέτρους χαρακτηρίζεται από περισσότερα από ένα στάδια κατηγοριοποίησης, πραγματοποιείται λειτουργική ανάλυση και της κύριας και της δευτερεύουσας κατηγοριοποίησης για τον προσδιορισμό του πλήθους των διαθέσιμων επιλογών.

Για να προσδιοριστεί η συνεισφορά κάθε μίας από τις μεταβλητές παραμέτρους, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί πιο σύνθετη ανάλυση. Η σύνθετη αυτή ανάλυση καθορίζεται και χαρακτηρίζεται από το πλήθος των εναλλακτικών κατηγοριών καθώς επίσης και από το επίπεδο ανάλυσης και εξέλιξής τους, για κάθε παράμετρο.

Αντίθετα, η ανάλυση των σταθερών παραμέτρων είναι απλούστερη, και η συνεισφορά τους καθορίζεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά και το σκοπό της εκάστοτε διαφορετικής μελέτης. Δηλαδή οι επιλογές των σταθερών παραμέτρων είναι αφενός περιορισμένες σε πλήθος και αφετέρου η επιλογή μεταξύ των κατηγοριών πραγματοποιείται με σκοπό την ικανοποίηση συγκεκριμένων συνθηκών κάθε μελέτης.

Αξίζει να σημειωθεί πως η ειδική κατάταξη που προκύπτει αντιστοιχίζεται και στο επιστημονικό ενδιαφέρον και ερευνητική

ενασχόληση κάθε μίας από τις παραμέτρους. Στην προσπάθεια εξέλιξης των οπτικών ατομικών ρολογιών, εργαστήρια ασχολούνται συνήθως με μία από όλες τις παραμέτρους, που αντιστοιχεί κυρίως σε εκείνες που παρουσιάζουν πιο σύνθετο τρόπο προσδιορισμού της συνεισφοράς τους, στην τελική αβεβαιότητα των παρατηρήσεων.

Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται επιγραμματικά τα κύρια στοιχεία και χαρακτηριστικά των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της κατάταξης.

Η παράμετρος "*κατηγορία και είδος*" είναι πρωταρχικής σημασίας διότι καθορίζει περισσότερα από ένα θεμελιώδη χαρακτηριστικά ενός οπτικού ατομικού ρολογιού. Η συγκεκριμένη παράμετρος είναι πρώτη στην ειδική κατάταξη διότι συγκεντρώνει το μεγαλύτερο πλήθος εναλλακτικών επιλογών και χαρακτηριστικών (>20, πίνακας 4.2). Ένα από τα χαρακτηριστικά αφορά στην επιλογή ατομικών ρολογιών ενός ιόντος ή ουδετέρου ατόμου ή ουδετέρου ατόμου πλέγματος. Η επιλογή αυτή επηρεάζει άμεσα την τελική αβεβαιότητα, διότι τα πιο σύγχρονα ατομικά ρολόγια ουδετέρου ατόμου ξεπερνούν την ακρίβεια των αντίστοιχων ενός ιόντος κατά μία τάξη μεγέθους. Άλλο χαρακτηριστικό αφορά στην επιλογή του ενεργού στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία του ρολογιού, είτε είναι ενός ιόντος είτε είναι ουδέτερου ατόμου. Κάθε ένα από τα στοιχεία διαθέτει διαφορετικές μορφολογικές ιδιότητες και συμπεριφέρεται διαφορετικά στις κύριες διαδικασίες (διέγερση, ψύξη, ανάγνωση) που υλοποιούνται κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων. Επίσης η επιλογή της κατηγορίας και του είδους επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό και την ανάλυση των συστηματικών πηγών εισαγωγής σφαλμάτων στις παρατηρήσεις. Οι διορθώσεις που οφείλουν να συμπεριλαμβάνονται κάθε φορά εξαρτώνται από την αρχική επιλογή του στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί (βλ. παρ. 3.3.2)

Στη συνέχεια της κατάταξης ακολουθεί η παράμετρος "*επικοινωνία*" των οπτικών ατομικών ρολογιών. Η παράμετρος αυτή ανήκει στην κατηγορία των μεταβλητών παραμέτρων και χαρακτηρίζεται από μεγάλο πλήθος διαθέσιμων επιλογών (12, πίνακας 4.2), διότι εκτός από τα διαφορετικά μέσα μετάδοσης μελετώνται ταυτόχρονα και οι διάφορες τεχνικές μετάδοσης σε κάθε ένα από αυτά. Συγκεκριμένα το πλήθος των επιλογών διαμορφώνεται από τις πέντε βασικές κατηγορίες μέσων μετάδοσης, και οι υπόλοιπες από τον συνδυασμό κάθε ενός μέσου με διαφορετική τεχνική μετάδοσης. Η επιλογή του μέσου μετάδοσης έχει εξέχουσα σημασία και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που

περιλαμβάνουν τον σκοπό καθώς επίσης και την υπάρχουσα τεχνική υποδομή και το διαθέσιμο εξοπλισμό. Επίσης το μέσο μετάδοσης καθορίζει και καθορίζεται από τη χωρική κλίμακα των παρατηρήσεων.

Η τρίτη κατά σειρά μεταβλητή είναι η παράμετρος "κατασκευαστική δομή" των οπτικών ατομικών ρολογιών. Η κατασκευαστική δομή αναφέρεται σε όλα εκείνα τα πρόσθετα ηλεκτρονικά συστήματα και υποσυστήματα τα οποία μπορούν να ενισχύσουν τη σταθερότητα και ακρίβεια των οπτικών ατομικών ρολογιών. Το πλήθος των διαθέσιμων επιλογών είναι περιορισμένο (8-10, πίνακας 4.2) και διαμορφώνεται από τις εξειδικευμένες παρεμβάσεις που μπορούν να υλοποιηθούν στη δομή των οπτικών ατομικών ρολογιών. Το πλήθος των επιλογών προσδιορίζεται από τις βασικές κατηγορίες επέμβασης στην εσωτερική ή στην εξωτερική δομή, και στη συνέχεια εξειδικεύεται από τη λειτουργική ανάλυση της κατηγορίας και του είδους του ρολογιού, στο πλαίσιο της δευτερεύουσας κατηγοριοποίησης. Το πλήθος των επιλογών δίνεται με τη μορφή διαστήματος διότι ενδεχόμενη επέμβαση στην εξωτερική δομή δεν περιορίζει την ταυτόχρονη επέμβαση στην εσωτερική δομή. Οι ενδεχόμενες παρεμβάσεις στην εσωτερική και εξωτερική δομή των οπτικών ατομικών ρολογιών συνήθως πραγματοποιούνται όταν δεν είναι δυνατόν με τις εφαρμοζόμενες τεχνικές να προκύψει το αναμενόμενο αποτέλεσμα. Ωστόσο η παράμετρος της κατασκευαστικής δομής είναι η πιο επιρρεπής στη σύγχρονη τεχνολογική εξέλιξη. Κάθε καινούργια εξέλιξη χρειάζεται χρόνο και πειράματα για να ενισχυθεί η χρησιμότητα και η αποτελεσματικότητά της.

Η τέταρτη, σε σειρά σημασίας, είναι η παράμετρος "μεταφορά". Όπως αναφέρθηκε, η συγκεκριμένη παράμετρος ανήκει στην κατηγορία των σταθερών, διότι οποιαδήποτε επιλογή μεταφοράς δεν επηρεάζει με μεταβαλλόμενο ρυθμό την τελική αβεβαιότητα των παρατηρήσεων, καθώς κάθε ατομικό ρολόι (είτε μόνιμο είτε μεταφερόμενο) κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει όσο το δυνατόν τις ίδιες επιδόσεις. Επομένως γίνεται αντιληπτό το μικρό εύρος και πλήθος των διαθέσιμων επιλογών (4-6, πίνακας 4.2), που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη παράμετρο και αναφέρεται στις κύριες κατηγορίες μεταφοράς. Οι επιλογές διαμορφώνονται αρχικά από την βασική επιλογή της στασιμότητας ή δυνατότητας μεταφοράς της μετρητικής διάταξης και συμπληρώνεται από τη λειτουργική ανάλυση κάθε μίας από αυτές. Το πλήθος των επιλογών δίνεται με τη μορφή διαστήματος διότι μερικές από

τις υπό-κατηγορίες μεταφερόμενων οπτικών ατομικών ρολογιών μπορούν να συνενωθούν σε ορισμένες περιπτώσεις μελέτης. Κάθε τύπος ρολογιού έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, και η επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας εξαρτάται αποκλειστικά από το σκοπό και τις ιδιαιτερότητες κάθε εφαρμογής. Η χωρική κλίμακα της μελέτης κατέχει και αυτή σημαντικό ρόλο στην επιλογή της κατηγορίας μεταφοράς του κάθε ρολογιού.

Η τελευταία, σε σειρά σημαντικότητας, είναι η παράμετρος "μέτρηση". Είτε χρησιμοποιηθούν σύγχρονες διατάξεις οπτικών ατομικών ρολογιών είτε χρησιμοποιηθούν σύγχρονα πρότυπα οπτικής συχνότητας, τα αποτελέσματα θα είναι συμβατά μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο ότι ο χρόνος και η συχνότητα είναι δύο αλληλένδετες έννοιες. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι το ενδεχόμενο πλήθος επιλογών είναι πολύ περιορισμένο (2, πίνακας 4.2). Ωστόσο δεν πρέπει να αγνοηθεί ότι η καταγραφή και σύγκριση συχνότητας είναι πιο ευέλικτη και εύκολη από τις αντίστοιχες διαδικασίες του χρόνου.

Με όσα αναφέρθηκαν, προκύπτει η ειδική συγκριτική κατάταξη των παραμέτρων, όπως περιγράφεται στον πίνακα 4.2.

<i>Αύξων αριθμός κατάταξης</i>	<i>Παράμετρος</i>	<i>Ενδεικτικό πλήθος διαθέσιμων επιλογών</i>
1	<i>Κατηγορία και είδος</i>	<i>>20</i>
2	<i>Επικοινωνία</i>	<i>12</i>
3	<i>Κατασκευαστική δομή</i>	<i>8-10</i>
4	<i>Μεταφορά</i>	<i>4-6</i>
5	<i>Μέτρηση</i>	<i>2</i>

Πίνακας 4.2 Ειδική συγκριτική κατάταξη παραμέτρων

4.3.2.1 Μοντέλο ποσοτικής αξιολόγησης των παραμέτρων

Όπως ήδη αναφέρθηκε υπάρχουν διάφορες παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την ορθή υλοποίηση της χρονομετρικής χωροστάθμησης με χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών. Επίσης σύμφωνα με τα παραπάνω, η ειδική κατάταξη ορίζει τη σειρά με την οποία θα πρέπει να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά κάθε μελέτης, με γνώμονα το πλήθος των διαθέσιμων επιλογών και το επίπεδο λειτουργικής ανάλυσης των παραμέτρων. Ωστόσο, οι σύγχρονες μελέτες υψομετρίας είναι πιο σύνθετες και επιβάλλουν τη συνδυασμένη μελέτη της συνολικής επιρροής όλων των παραμέτρων.

Επομένως για να γενικευτεί η διαδικασία της ποσοτικής (ειδικής) αξιολόγησης και κατάταξης των παραμέτρων για οποιαδήποτε εφαρμογή, δημιουργείται το μοντέλο αξιολόγησης της συνεισφοράς των παραμέτρων.

Οι παράμετροι αυτές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους ενώ η επίδραση της κάθε μιας δεν είναι πάντα ισοδύναμη και ισόποση, δηλαδή έχει διαβαθμίσεις. Αν και μελετήθηκε η επιρροή που έχουν μερικές παράμετροι σε άλλες, δεν δημιουργούνται αλληλοεπιδράσεις (συμμεταβλητότητα) μεταξύ τους. *Η επιρροή εκφράζεται ως περιορισμός ορισμένων επιλογών και συνδυασμών που μπορούν να εφαρμοστούν μεταξύ των παραμέτρων, παρά μια μαθηματική ποσοτική σχέση.*

Το μοντέλο αξιολόγησης της συνεισφοράς των παραμέτρων αφορά αποκλειστικά στην ποσοτική (ειδική) κατάταξη των παραμέτρων. Έτσι μπορεί να ορισθεί ένα μοντέλο μέσω μιας κλίμακας ενός συστήματος βαθμών (Grades), η οποία να εκφράζει τη διαβάθμιση της επίδρασης κάθε παραμέτρου. Το μέτρο της επίδρασης κάθε παραμέτρου αντανακλά άμεσα στη συνεισφορά κάθε μίας στη τελική αβεβαιότητα των παρατηρήσεων.

Στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή επιλέγεται η κλίμακα των βαθμών να ορισθεί από το 1 έως το 5, για κάθε παράμετρο. Με τον ελάχιστο βαθμό της κλίμακας (1) βαθμολογείται η ελάχιστη συνεισφορά κάθε στοιχείου της παραμέτρου στην τελική αβεβαιότητα. Αντίστοιχα, με τον μέγιστο βαθμό της κλίμακας (5), αξιολογείται η μέγιστη επίδραση καθεμιάς παραμέτρου στην τελική ακρίβεια των παρατηρήσεων.

Στην περίπτωση των σταθερών παραμέτρων οι βαθμοί δίνονται με τη μορφή απλών αριθμών, ενώ στην περίπτωση των μεταβλητών παραμέτρων με τη μορφή αριθμητικού διαστήματος. Αυτό πραγματοποιήθηκε για να αναδειχθεί περισσότερο ο μεταβαλλόμενος επηρεασμός της τελικής αβεβαιότητας, από κάθε παράμετρο ξεχωριστά. Επίσης η αναγραφή και συμπερίληψη διαστημάτων στο μοντέλο αξιολόγησης αντιστοιχίζεται στο διαφορετικό πλήθος εναλλακτικών επιλογών που μπορούν να γίνουν για κάθε βασική κατηγορία μίας παραμέτρου.

Λαμβάνοντας υπόψη την ειδική αξιολόγηση των παραμέτρων, η παρακάτω καταγραφή αυτών πραγματοποιείται σύμφωνα με τη φθίνουσα σειρά κατάταξης. Επομένως, οι βασικές παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η ορθή και αξιόπιστη εφαρμογή της χρονομετρικής

χωροστάθμισης με χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών και η αντίστοιχη κλίμακα των βαθμών για κάθε μια παράμετρο είναι:

Η συνεισφορά της μεταβλητής παραμέτρου, **Κατηγορία και Είδος, (categ)**. Όπως αναλύθηκε τα οπτικά ρολόγια πλέγματος υπερτερούν από τα οπτικά ατομικά ρολόγια ουδέτερου ατόμου, και αυτά με τη σειρά τους υπερτερούν των οπτικών ατομικών ρολογιών ενός ιόντος. *(τα διαστήματα βαθμών καθορίζονται και από τη συνδυασμένη μελέτη των επιλογών που αφορούν στο ενεργό στοιχείο του ατομικού ρολογιού)*

Έτσι, αποφασίζεται:

- Ως βαθμός $G_{\text{categ}}=1-2$, όταν αξιοποιούνται οπτικά ατομικά ρολόγια πλέγματος.
- Ως βαθμός $G_{\text{categ}}=3-4$, όταν αξιοποιούνται οπτικά ατομικά ρολόγια ουδέτερου ατόμου.
- Ως βαθμός $G_{\text{categ}}=4-5$, όταν αξιοποιούνται οπτικά ατομικά ρολόγια ιόντος.

Η συνεισφορά της μεταβλητής παραμέτρου, **Επικοινωνία, (comm)**. Όπως αναλύθηκε η επικοινωνία μεταξύ τουλάχιστον δύο οπτικών ατομικών ρολογιών μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ίδια ακρίβεια είτε χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες είτε δορυφορικά συστήματα. Ωστόσο, οι τεχνικές μετάδοσης που αφορούν στις οπτικές ίνες είναι πιο εξειδικευμένες και μοντελοποιημένες καθώς επίσης ενδέχεται να αναπτυχθούν περισσότερο στο μέλλον. *(τα διαστήματα βαθμών καθορίζονται και από τη συνδυασμένη μελέτη των επιλογών που αφορούν στις τεχνικές μετάδοσης)*

Έτσι, αποφασίζεται:

- Ως βαθμός $G_{\text{comm}}=1-2$, όταν χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης τα υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν δίκτυα οπτικών ινών και δορυφορικά συστήματα.
- Ως βαθμός $G_{\text{comm}}=2-3$, όταν χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης οι οπτικές ίνες.
- Ως βαθμός $G_{\text{comm}}=2-3$, όταν χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης κάποιο δορυφορικό σύστημα.
- Ως βαθμός $G_{\text{comm}}=4-5$, χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης το ελεύθερο περιβάλλον.

Η συνεισφορά της μεταβλητής παραμέτρου, **Κατασκευαστική δομή (constr)**. Όπως αναλύθηκε, οποιαδήποτε εξειδικευμένη προσθήκη

είτε στην εσωτερική είτε στην εξωτερική δομή κάθε οπτικού ατομικού ρολογιού, θα ωφελήσει την τελική ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών. (τα διαστήματα βαθμών καθορίζονται και από τη συνδυασμένη μελέτη και εφαρμογή περισσότερης από μίας εξειδικευμένης επιλογής για κάθε μία κατηγορία κατασκευαστικής δομής)

Έτσι, αποφασίζεται:

- Ως βαθμός $G_{\text{constr}}=1-2$, όταν έχει πραγματοποιηθεί κάποια θετική παρέμβαση και στην εσωτερική δομή και στην εξωτερική δομή του οπτικού ατομικού ρολογιού.
- Ως βαθμός $G_{\text{constr}}=3-4$, όταν έχει πραγματοποιηθεί κάποια θετική παρέμβαση είτε στην εσωτερική δομή είτε στην εξωτερική δομή του οπτικού ατομικού ρολογιού.
- Ως βαθμός $G_{\text{constr}}=5$, όταν δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια παρέμβαση ούτε στην εσωτερική δομή ούτε στην εξωτερική δομή του οπτικού ατομικού ρολογιού.

Η συνεισφορά της σταθεράς παραμέτρου, **Μεταφορά (trans)**. Όπως αναλύθηκε τα στάσιμα (εργαστηριακά) οπτικά ατομικά ρολόγια παρέχουν την καλύτερη σταθερότητα. Ωστόσο και οι υπόλοιπες κατηγορίες αφορούν σε ακριβή και σταθερά ρολόγια αντίστοιχης τάξης αλλά συνυπολογίζεται η πολυπλοκότητα, η συντήρηση και ο χρόνος που χρειάζεται ώστε να είναι έτοιμο ένα οπτικό ατομικό ρολόι να πραγματοποιήσει παρατηρήσεις.

Επίσης να αναφερθεί ότι ένα τυπικό σύστημα παρατηρήσεων βασίζεται στις σχετικές μετρήσεις και στη συνεργασία τουλάχιστον δύο διατάξεων οπτικών ατομικών ρολογιών. Οι διατάξεις αυτές ενδέχεται να αποτελούνται από οπτικά ατομικά ρολόγια που διαθέτουν διαφορετικά χαρακτηριστικά μετακίνησης (συνεργασία εργαστηριακού και μεταφερόμενου οπτικού ατομικού ρολογιού). Σε αυτές τις περιπτώσεις πραγματοποιείται συνδυασμός των ιδιοτήτων και των δύο κατηγοριών, για την επιλογή της τελικής τιμής της βαθμολογίας της παραμέτρου.

Έτσι, αποφασίζεται:

- Ως βαθμός $G_{\text{trans}}=1$, όταν χρησιμοποιούνται συστήματα που αποτελούνται αποκλειστικά από στατικά-μόνιμα οπτικά ατομικά ρολόγια.
- Ως βαθμός $G_{\text{trans}}=2$, όταν χρησιμοποιούνται συστήματα που αποτελούνται τουλάχιστον από ένα στατικό – μόνιμο και τα υπόλοιπα είναι μεταφερόμενα οπτικά ατομικά ρολόγια.

- Ως βαθμός $G_{trans}=3$, όταν χρησιμοποιούνται συστήματα που αποτελούνται αποκλειστικά από μεταφερόμενα-μετακινούμενα οπτικά ατομικά ρολόγια.
- Ως βαθμός $G_{trans}=4$, όταν χρησιμοποιούνται συστήματα που αποτελούνται από τουλάχιστον ένα μεταφερόμενο-φορητό οπτικό ατομικό ρολόι.
- Ως βαθμός $G_{trans}=5$, όταν χρησιμοποιούνται συστήματα που αποτελούνται από τουλάχιστον ένα μεταφερόμενο-κινητό οπτικό ατομικό ρολόι (είτε συνεχόμενης είτε διακοπτόμενης λειτουργίας).

Η συνεισφορά της σταθεράς, **Μέτρηση (meas)**. Όπως αναλύθηκε η μέτρηση, καταγραφή και μεταφορά συχνότητας υπερτερεί των αντίστοιχων διαδικασιών του χρόνου.

Έτσι, αποφασίζεται:

- Ως βαθμός $G_{meas}=1$, όταν μετράται, μεταφέρεται, συγκρίνεται συχνότητα.
- Ως βαθμός $G_{meas}=2$, όταν μετράται, μεταφέρεται, συγκρίνεται χρόνος.

4.4 Προσδιορισμός της εξίσωσης συνεισφοράς αβεβαιότητας

Ο προσδιορισμός της εξίσωσης συνεισφοράς αβεβαιότητας μπορεί να γίνει με τη χρήση του παραπάνω συστήματος βαθμών, ώστε να μπορεί κάθε φορά με διαφορετική επιλογή και συνδυασμό παραμέτρων να υπολογίζεται θεωρητικά η μεταβολή της τελικής ακρίβειας προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών.

Το μαθηματικό μοντέλο εκφράζει τη μεταβολή της τελικής αβεβαιότητας προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, αξιοποιώντας τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, και μπορεί να ορισθεί ως εξής:

$$f(\Delta H) = f\{\text{categ, comm, constr, trans, meas}\} \quad (4.1)$$

Έτσι για κάθε παράμετρο, προστίθεται ο βαθμός G που αντιστοιχεί στη συνεισφορά του κάθε σετ επιλογών στη τελική αβεβαιότητα.

Υιοθετώντας τις υποθέσεις, ότι η συνάρτηση $f(\Delta H)$ είναι γραμμική και ότι οι παράμετροι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, προκύπτει η

παρακάτω εξίσωση που αποδίδει το άθροισμα των βαθμών G , για κάθε διαφορετική μελέτη, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της και την επιλογή των παραμέτρων:

$$G_{\text{Total}} = G_{\text{categ}} + G_{\text{comm}} + G_{\text{constr}} + G_{\text{trans}} + G_{\text{meas}} \quad (4.2)$$

Από τη σχέση 4.2 και σύμφωνα με το μοντέλο αξιολόγησης των παραμέτρων προκύπτει, ότι σε κάθε διαφορετική μελέτη όσο μικρότερη είναι ή τιμή του συντελεστή G_{Total} , τόσο μικρότερη θα είναι και η συνεισφορά των παραμέτρων στην τελική επιδιωκόμενη ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών.

Η ελάχιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο συντελεστής G_{Total} είναι 5 και αφορά στη βέλτιστη περίπτωση (οι συνθήκες και οι επιλογές του οπτικού ατομικού ρολογιού είναι ιδανικές για τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια που υπερκαλύπτει την ονομαστική ακρίβεια της μεθοδολογίας). Η μέγιστη τιμή του συντελεστή G_{Total} είναι 22 και αφορά στη χειρότερη περίπτωση (οι συνθήκες και οι επιλογές του οπτικού ατομικού ρολογιού ενδεχομένως να είναι ανεπαρκείς για τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια αντίστοιχης τάξης μεγέθους της ονομαστικής ακρίβειας της μεθοδολογίας).

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο αξιολόγησης που περιγράφηκε, δημιουργούνται n συνδυασμοί, που εκφράζουν το συνολικό αριθμό των εναλλακτικών περιπτώσεων πρακτικής εφαρμογής της χρονομετρικής χωροστάθμησης. Υπενθυμίζεται ότι από τις πέντε παραμέτρους του μοντέλου αξιολόγησης οι τέσσερις αξιολογούνται με βαθμό (grade) από 1 έως 5 και η εναπομείνασα μία με βαθμό από 1 έως 2, δηλαδή δημιουργούνται 22 βαθμοί που συνδυάζονται με τις 5 παραμέτρους.

Για να υπολογισθούν όλοι οι εναλλακτικοί συνδυασμοί n ακολουθείται η σχέση 4.3. Ωστόσο το πλήθος αυτό είναι πλασματικό καθώς δεν λαμβάνονται υπόψη οι λειτουργικοί περιορισμοί που δημιουργούνται από την επιρροή που έχουν μεταξύ τους μερικές από τις παραμέτρους.

$$n = \binom{22}{5} = \frac{22!}{5! \cdot (22-5)!} = \frac{22!}{5! \cdot 17!} = 10659 \quad (4.3)$$

Επομένως γίνεται αντιληπτό, ότι το πλήθος των εναλλακτικών συνδυασμών εφαρμογής της χρονομετρικής χωροστάθμησης με χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών είναι πολύ πιο περιορισμένο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

5.1 Γενικά

Η υλοποίηση της χρονομετρικής χωροστάθμησης με χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών βρίσκεται, μέχρι στιγμής, σε προχωρημένο πειραματικό στάδιο. Αν και η συμβολή της μεθοδολογίας στα σημερινά επιστημονικά ερευνητικά πειράματα είναι ευρεία και σημαντική, χρησιμοποιείται κυρίως επικουρικά με την εφαρμογή των συμβατικών μεθόδων, για να μειωθεί το κύριο ποσοστό θορύβου στις παρατηρήσεις αυτών.

Ωστόσο, το γεγονός αυτό αναμένεται να αλλάξει στο εγγύς μέλλον, όταν η εφαρμογή της μεθοδολογίας θα είναι αυτόνομη. Η ακρίβεια και σταθερότητα των οπτικών ατομικών ρολογιών συνεχίζει να βελτιώνεται ραγδαία και η χρήση τους εκτιμάται ότι θα γίνει διαθέσιμη σε μεγαλύτερο τμήμα της ερευνητικής κοινότητας.

Αυτό θα πραγματοποιηθεί μέσω της περαιτέρω εξέλιξης και οριστικοποίησης της δομής, λειτουργίας και επικοινωνίας των οπτικών ατομικών ρολογιών.

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη συνολική μελέτη και συμπερίληψη όλων των παραμέτρων σε μία κοινή έρευνα, με σκοπό να πραγματοποιηθεί αξιολόγηση των χαρακτηριστικών περιπτώσεων και συνθηκών που υφίστανται σε διαφορετικές τυπικές εφαρμογές της μεθοδολογίας (προσομοίωση παρατηρήσεων). Σκοπός είναι να δημιουργηθούν πρότυπα εφαρμογής της μεθοδολογίας (guidelines), που να περιγράφουν τη λογική με την οποία ο κάθε χρήστης οφείλει να κάνει τις κατάλληλες επιλογές του συστήματος παρατηρήσεων, με κύριο γνώμονα την τελική επιδιωκόμενη ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών.

Στο πλαίσιο της διδακτορικής έρευνας, ύστερα από τη συνολική μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την τελική αβεβαιότητα προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, πραγματοποιείται θεωρητική προσομοίωση εφαρμογής της μεθοδολογίας δομώντας διαφορετικά χαρακτηριστικά σενάρια υλοποίησης της. Η αξιολόγηση των σεναρίων

πραγματοποιείται με χρήση της εξίσωσης συνεισφοράς αβεβαιότητας, όπως προτείνεται στην ενότητα 4.2.4.

5.2 Δημιουργία σεναρίων εφαρμογής της μεθοδολογίας

Η διαδικασία της θεωρητικής προσομοίωσης των παρατηρήσεων περιλαμβάνει αρχικά τη δημιουργία εναλλακτικών σεναρίων. Τα σενάρια δομούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες και τα τυπικά ερωτήματα που θα δημιουργούνται κατά τη χρήση της μεθοδολογίας.

Τα σενάρια που δημιουργήθηκαν είναι δέκα (10) και βασικό χαρακτηριστικό αξιολόγησής τους είναι η τελική αβεβαιότητα προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών. Τα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τα σενάρια μεταξύ τους είναι είτε η αρχική δέσμευση ακρίβειας είτε η επιλογή των χαρακτηριστικών της εφαρμογής, που θα επηρεάσουν την επιλογή των κατηγοριών των παραμέτρων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σενάρια έχουν δομηθεί κυρίως με περιορισμούς και χαρακτηριστικά που αφορούν στις κύριες πηγές ανάλυσης. Αυτές είναι, η ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών και η απόσταση μεταξύ των συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών. Ανάλογα με τις επιλογές στα δύο αυτά χαρακτηριστικά, θα προκύψουν και οι επιλογές στα αντίστοιχα στοιχεία των παραμέτρων.

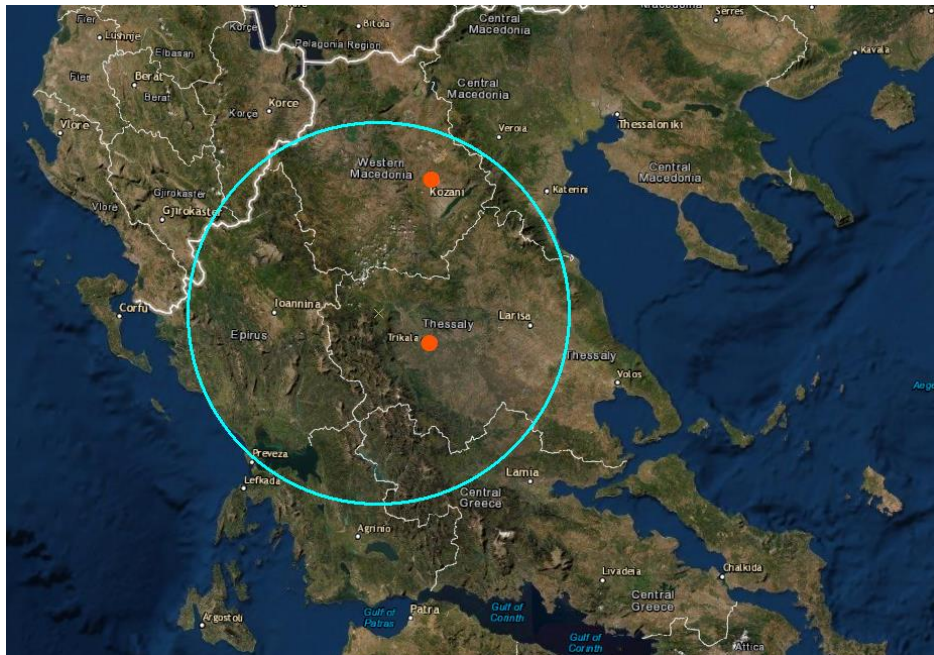
Η διατύπωση των σεναρίων έχει πραγματοποιηθεί με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η συμπερίληψη και απλών αλλά και πιο σύνθετων περιπτώσεων. Στις απλές περιπτώσεις οι επιλογές των παραμέτρων που οφείλουν να γίνουν είναι λιγότερο σύνθετες και αόριστες ενώ αντίθετα στις πιο σύνθετες περιπτώσεις οι επιλογές αυτές είναι πιο συνδυαστικές και δεσμευτικές.

Επιπλέον για κάθε σενάριο έχει δημιουργηθεί θεματικός χάρτης που περιλαμβάνει ενδεχόμενες θέσεις των οπτικών ατομικών ρολογιών καθώς επίσης και η απόσταση μεταξύ των διαφορετικών ευρύτερων τοποθεσιών που πραγματοποιούνται παρατηρήσεις για να προσδιοριστεί η σχετική ορθομετρική υψομετρική διαφορά.

➤ Σενάριο I

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου σεναρίου περιλαμβάνει τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια της τάξης του ± 1 cm,

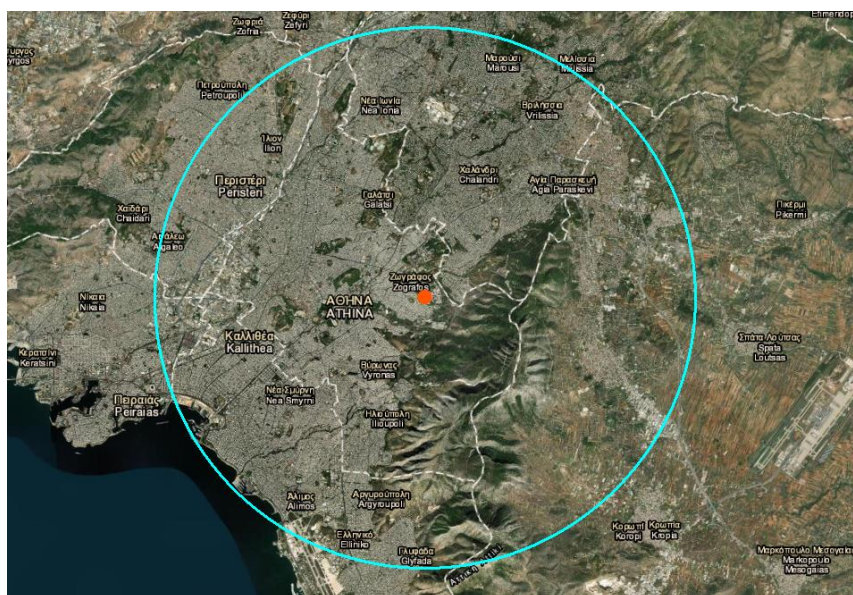
με την απόσταση, μεταξύ των τουλάχιστον δύο συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών, να είναι μικρότερη από 100 km. (εικόνα 5.1)



Εικόνα 5.1 Ενδεικτική χωροθέτηση δύο διατάξεων οπτικών ατομικών ρολογιών που απέχουν λιγότερο από 100km

➤ Σενάριο II

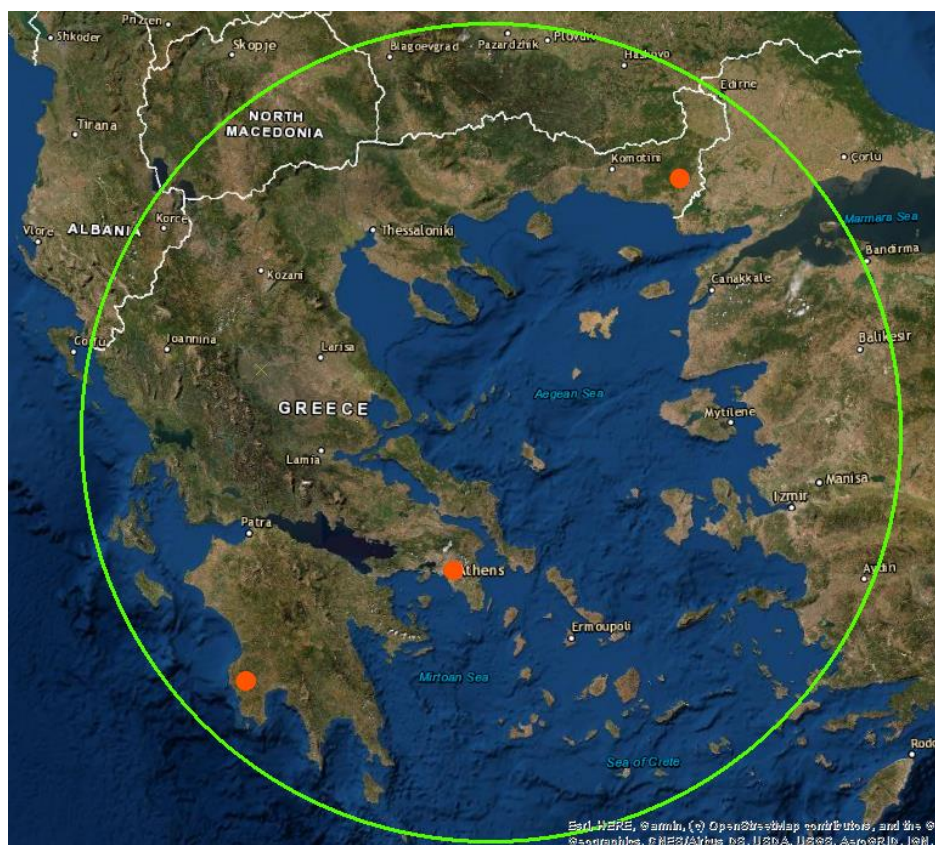
Η εφαρμογή του συγκεκριμένου σεναρίου περιλαμβάνει τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια της τάξης του $\pm 2-3$ cm, με την απόσταση να περιορίζεται σε τιμή μικρότερη από 10 km. (εικόνα 5.2)



Εικόνα 5.2 Ενδεικτική τοποθέτηση διάταξης οπτικού ατομικού ρολογιού και απεικόνιση χωρικής ζώνης ακτίνας 10km

➤ Σενάριο III

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου σεναρίου περιλαμβάνει τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια της τάξης του ± 1 cm, με την απόσταση να περιορίζεται σε τιμές που διαμορφώνονται από το τυπικό μέγεθος μίας χώρας. (εικόνα 5.3)



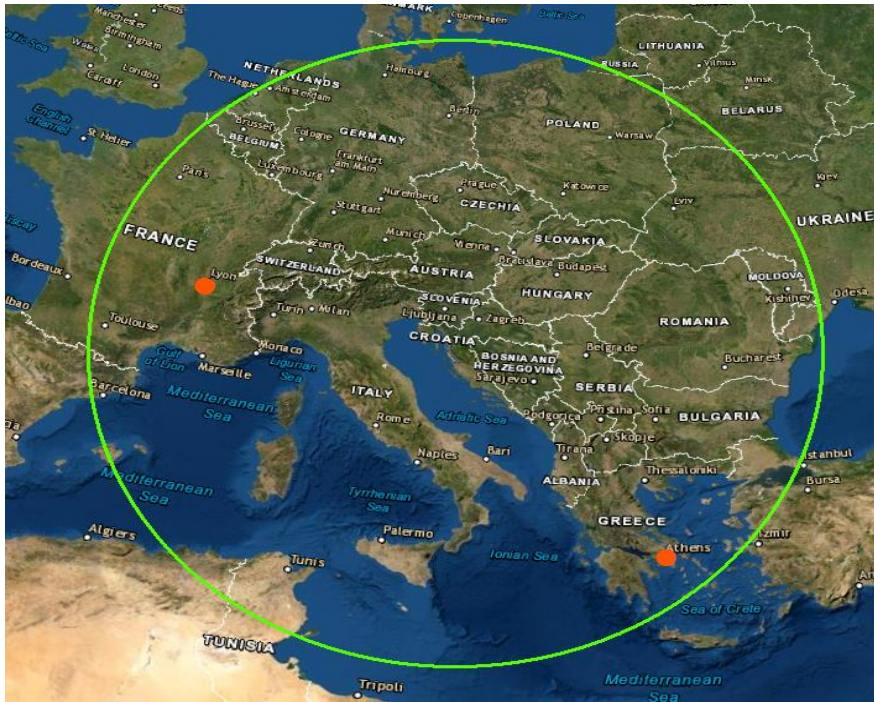
Εικόνα 5.3 Ενδεικτικές θέσεις συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών που καλύπτουν χωρικά τα όρια μιας χώρας

➤ Σενάριο IV

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου σεναρίου περιλαμβάνει τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια της τάξης του ± 1 cm, με την απόσταση να κυμαίνεται σε τιμές που διαμορφώνονται από χώρες που ανήκουν στην ίδια ήπειρο. (εικόνα 5.4)

➤ Σενάριο V

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου σεναρίου περιλαμβάνει τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια της τάξης του $\pm 2-3$ cm, με την απόσταση να κυμαίνεται σε τιμές που διαμορφώνονται από χώρες που ανήκουν στην ίδια ήπειρο. (εικόνα 5.4)



Εικόνα 5.4 Ενδεικτικές θέσεις συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών που καλύπτουν χωρικά τα όρια χωρών που ανήκουν στην ίδια ήπειρο

➤ Σενάριο VI

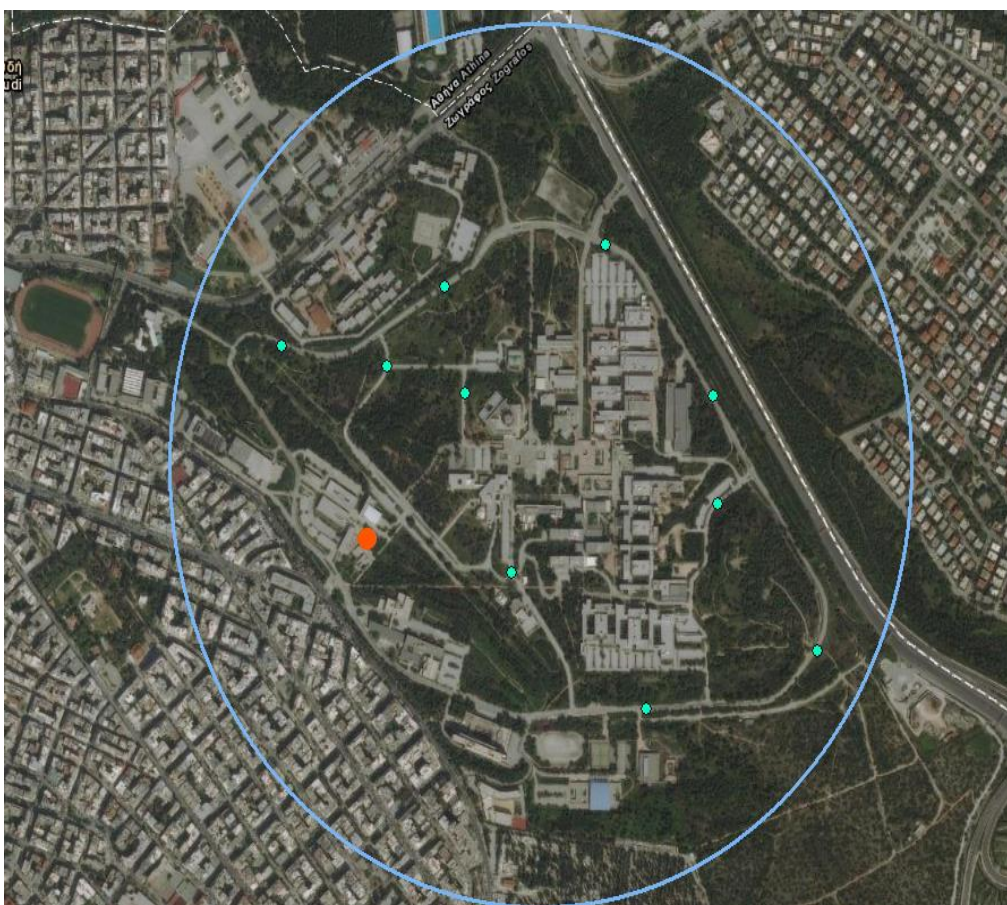
Η εφαρμογή του συγκεκριμένου σεναρίου περιλαμβάνει τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια της τάξης του ± 1 cm, με την απόσταση να κυμαίνεται στις μέγιστες δυνατές τιμές και αντιστοιχεί σε αποστάσεις μεταξύ χωρών που ανήκουν σε διαφορετική ήπειρο. (εικόνα 5.5)



Εικόνα 5.5 Ενδεικτικές θέσεις συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών που καλύπτουν χωρικά τα όρια χωρών που ανήκουν σε διαφορετικές ηπείρους

➤ Σενάριο VII

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου σεναρίου περιλαμβάνει τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια της τάξης του ± 1 cm, με την απόσταση να κυμαίνεται σε τιμές που αφορούν περιπτώσεις εφαρμογής συμβατικών επίγειων μετρήσεων υψομετρίας. Ο ειδικός περιορισμός αναφέρεται στη χρήση είτε κινητών είτε φορητών οπτικών ατομικών ρολογιών ώστε να εξασφαλίζεται όσο μεγαλύτερη συνοχή με τις εφαρμοζόμενες μεθόδους υλοποίησης υψομετρικών μελετών. (εικόνα 5.6)



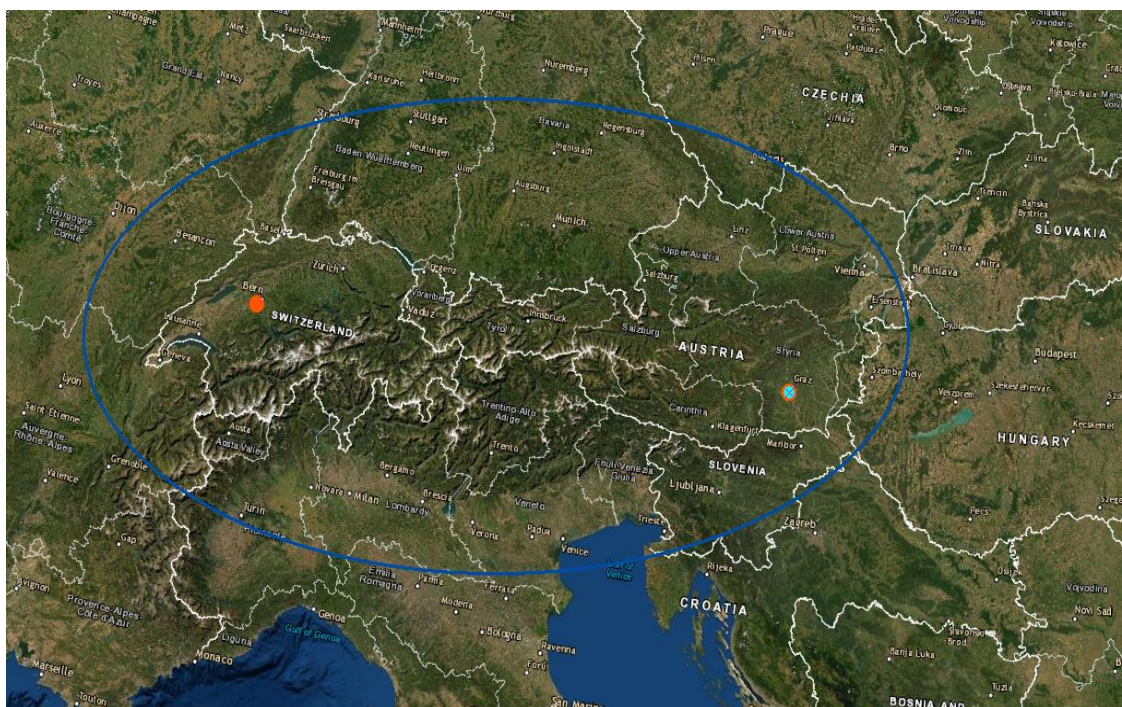
Εικόνα 5.6 Ενδεικτικές θέσεις συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών που καλύπτουν χωρικά τα όρια περιοχής μεταξύ 100m και 2km.

➤ Σενάριο VIII

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου σεναρίου δεν περιλαμβάνει κάποιον περιορισμό στην ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, με την απόσταση να κυμαίνεται σε τιμές που διαμορφώνονται από γειτονικές χώρες. Ο ειδικός περιορισμός αφορά στην απουσία συνδεδεμένου δικτύου οπτικών ινών μεταξύ των δύο χωρών. (εικόνα 5.7)

➤ Σενάριο IX

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου σεναρίου δεν περιλαμβάνει κάποιον περιορισμό στην ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, με την απόσταση να κυμαίνεται σε τιμές που διαμορφώνονται από γειτονικές χώρες. Ο ειδικός περιορισμός είναι ότι οι παρατηρήσεις πραγματοποιούνται μεταξύ ενός στάσιμου εργαστηριακού οπτικού ατομικού ρολογιού και ενός μεταφερόμενου. (εικόνα 5.7)



Εικόνα 5.7 Ενδεικτικές θέσεις συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών που καλύπτουν χωρικά τα όρια γειτονικών χωρών

➤ Σενάριο X

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου σεναρίου δεν περιλαμβάνει κάποιον περιορισμό ούτε στην ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, ούτε στην απόσταση μεταξύ των οπτικών ατομικών ρολογιών. Ο ειδικός περιορισμός αφορά στην αναγκαιότητα ύπαρξης παρατηρήσεων για πολλές διαφορετικές περιοχές σε μικρό χρονικό διάστημα. Επίσης προτιμάται και η απόκτηση πρόσθετων δυναμικών πληροφοριών σε όλη τη διάρκεια της μεταφοράς και λειτουργίας του συστήματος μετρήσεων.

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η κατανομή των σεναρίων στις δύο βασικές κατηγορίες χαρακτηριστικών, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Στην τελευταία στήλη του πίνακα γίνεται

καταγραφή της ύπαρξης πρόσθετων περιορισμών που δημιουργεί το κάθε σενάριο (συμβολισμός *). Σκοπός είναι να πραγματοποιηθεί μια εποπτεία των διαφορετικών σεναρίων που θα αξιολογηθούν στη συνέχεια.

<i>A/A ΣΕΝΑΡΙΩΝ</i>	<i>ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΔΙΩΚΟΜΕΝΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑ</i>	<i>ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ</i>	<i>ΕΙΔΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ</i>
I	±1 cm	≤100 km	-
II	±2-3 cm	≤≤10 km	-
III	±1 cm	ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΟΡΙΑ ΜΙΑΣ ΧΩΡΑΣ	-
IV	±1 cm	ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΙΔΙΑΣ ΗΠΕΙΡΟΥ	-
V	±2-3 cm	ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΙΔΙΑΣ ΗΠΕΙΡΟΥ	-
VI	±1 cm	ΔΙ-ΗΠΕΙΡΩΤΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ	-
VII	±1 cm	≥100m και ≤10 km	*
VIII	-	ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ	*
IX	-	ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ	*
X	-	ΣΥΝΕΧΩΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ	*

Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτική αντιστοίχιση σεναρίων με τα κύρια χαρακτηριστικά εφαρμογής

5.3 Αξιολόγηση σεναρίων

Η αξιολόγηση των διαφορετικών σεναρίων περιλαμβάνει την επεξήγηση των επιλογών, που οφείλουν να πραγματοποιηθούν για την εκπλήρωση των στόχων καθώς επίσης και τον υπολογισμό της συνολικής συνεισφοράς των παραμέτρων σύμφωνα με την προτεινόμενη εξίσωση αβεβαιότητας.

Επομένως για κάθε σενάριο γίνεται αξιολόγηση σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο γίνεται αναφορά των επιλογών που αφορούν στις κατηγορίες και υπο-κατηγορίες των παραμέτρων. Στο δεύτερο στάδιο υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή G_{Total} (§4.2.4).

Στη συγκεκριμένη διατριβή, η αξιολόγηση των σεναρίων επελέγη να διαμορφώνεται από τις βέλτιστες επιλογές μεταξύ των κατηγοριών των παραμέτρων για κάθε σενάριο ξεχωριστά, χωρίς να μελετώνται όλες οι εναλλακτικές προτάσεις υλοποίησης κάθε σεναρίου.

Υπενθυμίζεται ότι η τιμή του συντελεστή εξαρτάται αποκλειστικά από την επιλογή των χαρακτηριστικών των παραμέτρων. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του, τόσο πιο μικρή επιρροή έχουν οι συστηματικές και τυχαίες πηγές σφαλμάτων (που οφείλονται στις παραμέτρους) στον τελικό προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών. Με άλλα λόγια, όσο μικρότερη είναι η τιμή του συντελεστή G_{Total} , τόσο αυξάνονται οι πιθανότητες να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις σύμφωνα με το θεωρητικό σχεδιασμό και να επιτευχθεί ακρίβεια αντίστοιχη της ονομαστικής τιμής των σύγχρονων συστημάτων μέτρησης.

Για την ορθή υλοποίηση της διαδικασίας αξιολόγησης και την επεξήγηση με όσο το δυνατόν καλύτερο τρόπο των στοιχείων της βαθμολογίων δομήθηκαν ορισμένοι βασικοί κανόνες. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ό,τι:

- Σε περιπτώσεις που παρουσιάζονται αοριστίες στη συνεισφορά συγκεκριμένων παραμέτρων (κυρίως στα πιο απλοϊκά σενάρια), επιλέγεται ως τιμή του συντελεστή G η μέση τιμή του ενδεχόμενου πλήθους τιμών.
- Σε περιπτώσεις που σε επίπεδο κατηγοριών παραμέτρων, δημιουργείται ανάγκη για συνδυασμένη μελέτη παραπάνω από μίας επιλογών, τότε ως συνεισφορά της παραμέτρου λαμβάνεται εκείνη που καθορίζεται από την υψηλότερη (χειρότερη) τιμή βαθμού.
- Σε περιπτώσεις που δημιουργούνται λειτουργικοί περιορισμοί στην αρχική δημιουργία του συστήματος των παρατηρήσεων (όπως στη περίπτωση αξιοποίησης ετερογενών χαρακτηριστικών μεταφοράς των οπτικών ατομικών ρολογιών) τότε στην αξιολόγηση η βαθμολογία της παραμέτρου θα καθορίζεται κάθε φορά από την επικρατούσα επιλογή. Για παράδειγμα, όταν υλοποιείται ένα σύστημα παρατηρήσεων που περιλαμβάνει ένα εργαστηριακό μόνιμο οπτικό ατομικό ρολόι (μέγιστη δυνατότητα σταθερότητας) και ένα ακόμα ρολόι διαφορετικής κατηγορίας μεταφοράς, τότε γίνεται η παραδοχή ότι το στάσιμο ρολόι πραγματοποιεί παρατηρήσεις χωρίς να εισάγει σφάλματα και θόρυβο στις παρατηρήσεις, επομένως ο μόνος παράγοντας που παραμένει είναι το μεταφερόμενο ρολόι.

❖ Σενάριο I

Η βασική επιλογή που αφορά στο πρώτο σενάριο αναφέρεται στην επιλογή του μέσου μετάδοσης από την μεταβλητή της επικοινωνίας των οπτικών ατομικών ρολογιών. Ύστερα από συνδυασμένη μελέτη και της απόστασης αλλά και της ακρίβειας συνίσταται η επικοινωνία να γίνει μέσω καλωδίων οπτικών ινών ($G_{comm}=3$). Αντίστοιχα η επιλογή της κατηγορίας και είδους του οπτικού ατομικού ρολογιού να γίνει είτε από την κατηγορία των ρολογιών ενός ιόντος είτε από την κατηγορία ουδέτερου ατόμου ($G_{categ}=4$). Αυτές οι επιλογές είναι ικανές να εκπληρώσουν τους βασικούς στόχους του σεναρίου.

Σε ότι αφορά στις υπόλοιπες παραμέτρους δεν παρουσιάζονται μεγάλες μεταβολές από την οποιαδήποτε επιλογή τους. ($G_{meas}=1$) Όπου, κρίνεται αόριστη η συνεισφορά των παραμέτρων μεταφορά και κατασκευαστική δομή στη συγκεκριμένη περίπτωση ($G_{constr}=2.5$, $G_{trans}=2.5$).

Επομένως, η τιμή του συντελεστή G_{Total} διαμορφώνεται ως εξής:

$$G_{Total}^I = 13$$

❖ Σενάριο II

Το δεύτερο σενάριο αναφέρεται σε πολύ περιορισμένο εύρος αποστάσεων, μόνο που στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει μεταβληθεί η επιδιωκόμενη τιμή της ακρίβειας. Η βασική επιλογή αφορά στην επιλογή του μέσου μετάδοσης και της κατηγορίας και είδους του οπτικού ατομικού ρολογιού. Ύστερα από συνδυασμένη μελέτη προκύπτει ότι αξιοποιώντας τα ίδια συστήματα οπτικών ατομικών ρολογιών με το πρώτο σενάριο ($G_{categ}=4$), θα μπορούσε να μεταβληθεί το μέσο μετάδοσης και να χρησιμοποιηθεί ο ελεύθερος αέρας. Επιπρόσθετα το αυξημένο όριο ακρίβειας δημιουργεί διαφορετική προσέγγιση στη μοντελοποίηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών που θα μπορούσε να είναι λιγότερο σχολαστική ($G_{comm}=4$). Αυτές οι επιλογές είναι ικανές να εκπληρώσουν τους βασικούς στόχους του σεναρίου.

Σε ότι αφορά στις υπόλοιπες παραμέτρους δεν παρουσιάζονται μεγάλες μεταβολές από την οποιαδήποτε επιλογή τους ($G_{meas}=1$), αλλά συνίσταται να χρησιμοποιούνται στάσιμα ρολόγια ($G_{trans}=1$) όταν επιλέγεται ως μέσο μετάδοσης ο ελεύθερος αέρας (σε αυτές τις περιπτώσεις έχει πραγματοποιηθεί κατασκευαστική μελέτη

βελτιστοποίησης των ατμοσφαιρικών συνθηκών). Αντίστοιχα είναι αόριστη η συνεισφορά της κατασκευαστικής δομής, ($G_{constr}=2.5$)

Επομένως, η τιμή του συντελεστή G_{Total} διαμορφώνεται ως εξής:

$$G_{Total}^{II} = 12.5$$

❖ Σενάριο III

Τα χαρακτηριστικά του τρίτου σεναρίου αντιπροσωπεύουν και τα τυπικά στοιχεία μιας μελέτης υψομετρίας που πραγματοποιείται στα χωρικά όρια μίας χώρας. Οι αποστάσεις που δημιουργούνται δεν είναι πολύ μεγάλες και συνήθως (ανάλογα με τη χώρα) υπάρχουν υφιστάμενα δίκτυα οπτικών ινών που μπορούν να αξιοποιηθούν ($G_{comm}=3$). Η επιλογή των οπτικών ινών επιτρέπει, από άποψη συνεισφοράς αβεβαιότητας, τη χρήση της κατηγορίας οπτικών ατομικών ρολογιών ουδέτερου ατόμου ($G_{categ}=3$). Αυτές οι επιλογές είναι ικανές να εκπληρώσουν τους βασικούς στόχους του σεναρίου.

Σε περίπτωση που η χώρα μελέτης διαθέτει και ηπειρωτικά αλλά και νησιωτικά συμπλέγματα, και αυτά δεν συνδέονται με υποθαλάσσιες υποδομές, τότε θα πρέπει να διερευνηθεί η επιλογή της δορυφορικής επικοινωνίας μεταξύ των μετρητικών διατάξεων

Σε ότι αφορά στις υπόλοιπες παραμέτρους δεν παρουσιάζονται μεγάλες μεταβολές από την οποιαδήποτε επιλογή τους. ($G_{meas}=1$) Όπου, κρίνεται αόριστη η συνεισφορά των παραμέτρων μεταφορά και κατασκευαστική δομή στη συγκεκριμένη περίπτωση ($G_{constr}=2.5$, $G_{trans}=2.5$).

Επομένως, η τιμή του συντελεστή G_{Total} διαμορφώνεται ως εξής:

$$G_{Total}^{III} = 12$$

❖ Σενάριο IV

Το τέταρτο σενάριο αναφέρεται σε μετρήσεις που πραγματοποιούνται μεταξύ δύο συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών που έχουν τοποθετηθεί χωρικά στα όρια μιας ηπείρου. Επομένως, σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια, έχει αυξηθεί η τιμή της απόστασης. Ύστερα από συνδυασμένη μελέτη και της απόστασης αλλά και της ακρίβειας συνίσταται η επικοινωνία να γίνει μέσω καλωδίων οπτικών ινών ($G_{comm}=2$) και η επιλογή της κατηγορίας και είδους του οπτικού ατομικού ρολογιού να αφορά στα σύγχρονα οπτικά ατομικά ρολόγια

πλέγματος ($G_{categ}=1$). Επίσης για να εξασφαλίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό η σταθερότητα των ρολογιών συνίσταται να πραγματοποιηθούν μερικές βελτιώσεις που αφορούν είτε στην εσωτερική είτε στην εξωτερική δομή των οπτικών ατομικών ρολογιών ($G_{constr}=3$). Αυτές οι επιλογές είναι ικανές να εκπληρώσουν τους βασικούς στόχους του σεναρίου.

Σε ότι αφορά στις υπόλοιπες παραμέτρους δεν παρουσιάζονται μεγάλες μεταβολές από την οποιαδήποτε επιλογή τους. ($G_{meas}=1$) Όπου, κρίνεται αόριστη η συνεισφορά της παραμέτρου μεταφορά στη συγκεκριμένη περίπτωση ($G_{trans}=2.5$).

Επομένως, η τιμή του συντελεστή G_{Total} διαμορφώνεται ως εξής:

$$G_{Total}^{IV} = 9.5$$

❖ Σενάριο V

Το πέμπτο σενάριο αναφέρεται σε αποστάσεις ίδιας τάξης μεγέθους με το τέταρτο σενάριο αλλά μεταβάλλεται η τιμή της τελικής επιδιωκόμενης ακρίβειας. Η διαφοροποίηση αυτή επιτρέπει αλλαγές τόσο στο μέσο μετάδοσης (όπου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν δορυφορικοί δέκτες για την επικοινωνία) ($G_{comm}=3$) ($G_{categ}=1$), όσο και στην ενδεχόμενη βελτίωση της κατασκευαστικής δομής των οπτικών ατομικών ρολογιών ($G_{constr}=4$). Αυτές οι επιλογές είναι ικανές να εκπληρώσουν τους βασικούς στόχους του σεναρίου.

Σε ότι αφορά στις υπόλοιπες παραμέτρους δεν παρουσιάζονται μεγάλες μεταβολές από την οποιαδήποτε επιλογή τους. ($G_{meas}=1$) Όπου, κρίνεται αόριστη η συνεισφορά της παραμέτρου μεταφορά στη συγκεκριμένη περίπτωση ($G_{trans}=2.5$).

Επομένως, η τιμή του συντελεστή G_{Total} διαμορφώνεται ως εξής:

$$G_{Total}^V = 11.5$$

❖ Σενάριο VI

Το έκτο σενάριο χαρακτηρίζεται από τις μέγιστες τιμές που ενδέχεται να λαμβάνει η απόσταση μεταξύ των μετρητικών συστημάτων, και αναφέρεται σε περιοχές μελέτης που βρίσκονται σε διαφορετικές ηπείρους. Η επικοινωνία των οπτικών ατομικών ρολογιών περιορίζεται στη χρήση δορυφορικών συστημάτων και μπορεί να βελτιωθεί μόνο εάν υπάρχουν διαθέσιμα υβριδικά δίκτυα επικοινωνίας ($G_{comm}=2$). Επίσης για καλύτερη απόδοση και σταθερότητα επιλέγονται τα οπτικά ατομικά

ρολόγια πλέγματος ($G_{categ}=1$). Στην περίπτωση των δι-ηπειρωτικών συνδέσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μεταφερόμενα συστήματα οπτικών ατομικών ρολογιών ($G_{trans}=2$) αλλά θα αυξηθεί ο χρόνος παρατηρήσεων που θα χρειαστεί το καθένα από αυτά για να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας. Αυτές οι επιλογές είναι ικανές να εκπληρώσουν τους βασικούς στόχους του σεναρίου.

Σε ότι αφορά στις υπόλοιπες παραμέτρους δεν παρουσιάζονται μεγάλες μεταβολές από την οποιαδήποτε επιλογή τους. ($G_{meas}=1$) Όπου, κρίνεται αόριστη η συνεισφορά της παραμέτρου κατασκευαστική δομή στη συγκεκριμένη περίπτωση ($G_{constr}=2.5$).

Επομένως, η τιμή του συντελεστή G_{Total} διαμορφώνεται ως εξής:

$$G_{Total}^{VI} = 8.5$$

❖ Σενάριο VII

Το έβδομο σενάριο αναφέρεται σε παρατηρήσεις που πραγματοποιούνται σε πολύ κοντινές αποστάσεις. Ο πρόσθετος περιορισμός αφορά στη χρήση κινητών ή φορητών ατομικών ρολογιών. Μέσω της επιλογής του πρόσθετου περιορισμού και της τελικής επιδιωκόμενης ακρίβειας, προσομοιάζεται όσο το δυνατόν περισσότερο η εφαρμογή της μεθοδολογίας της χρονομετρικής χωροστάθμησης με τις αντίστοιχες μεθόδους συμβατικής επίγειας υψομετρίας (γεωμετρική χωροστάθμηση, τριγωνομετρική υψομετρία).

Για να ικανοποιηθεί η συνθήκη της ακρίβειας, η επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων πραγματοποιείται με σύγχρονες τεχνικές μετάδοσης είτε οπτικών ινών είτε δορυφορικών συστημάτων ($G_{comm}=2$). Επίσης λόγω του περιορισμού της μεταφοράς και του μεγέθους των οπτικών μεταφερόμενων ατομικών ρολογιών ($G_{trans}=4.5$) ($G_{categ}=2$) και των σύγχρονων διατάξεων αυτής της κατηγορίας, πραγματοποιείται βελτιστοποίηση τόσο της εσωτερικής όσο και της εξωτερικής δομής τους ($G_{constr}=2$). Αυτές οι επιλογές είναι ικανές να εκπληρώσουν τους βασικούς στόχους του σεναρίου. Επίσης η επιλογή του παρατηρούμενου μεγέθους δεν δημιουργεί σημαντικές μεταβολές από την οποιαδήποτε επιλογή του. ($G_{meas}=1$).

Επομένως, η τιμή του συντελεστή G_{Total} διαμορφώνεται ως εξής:

$$G_{Total}^{VII} = 11.5$$

❖ Σενάριο VIII

Το όγδοο σενάριο αναφέρεται στην υλοποίηση παρατηρήσεων μεταξύ γειτονικών χωρών. Ο πρόσθετος περιορισμός αφορά στη μη ύπαρξη δικτύου οπτικών ινών ($G_{comm}=3$). Μέσω της επιλογής αυτής περιορίζεται η χρήση μέσων μετάδοσης. Η μόνη επιλογή είναι τα δορυφορικά συστήματα, όπου θα πρέπει να πραγματοποιηθεί έρευνα για την αξιοποίηση των πιο πρόσφατων τεχνικών μετάδοσης. Επιπλέον ανάλυση πρέπει να γίνει για την επιλογή της κατάλληλης κοινής κατηγορίας και είδους μεταξύ των συστημάτων οπτικών ατομικών ρολογιών, ώστε να εξασφαλίζεται συνοχή μεταξύ των μετρήσεων ($G_{categ}=3$). Στη συνοχή συμμετέχει και η μεταφορά, επομένως στη συγκεκριμένη περίπτωση προτείνεται η χρήση όμοιων χαρακτηριστικών μετακίνησης των μετρητικών διατάξεων. Εξαιτίας του περιορισμού του μέσου μετάδοσης, η προτιμότερη επιλογή αφορά στα μεταφερόμενα οπτικά ατομικά ρολόγια ($G_{trans}=3$). Επίσης συνίσταται διαδικασία βελτιστοποίησης της εσωτερικής και εξωτερικής δομής των ρολογιών ($G_{constr}=2$). Αυτές οι επιλογές είναι ικανές να εκπληρώσουν τους βασικούς στόχους του σεναρίου. Επίσης η επιλογή του παρατηρούμενου μεγέθους δεν δημιουργεί σημαντικές μεταβολές από την οποιαδήποτε επιλογή του. ($G_{meas}=1$).

Επομένως, η τιμή του συντελεστή G_{Total} διαμορφώνεται ως εξής:

$$G_{Total}^{VIII} = 12$$

❖ Σενάριο IX

Το ένατο σενάριο αναφέρεται σε αποστάσεις ίδιας τάξης μεγέθους με το όγδοο σενάριο αλλά αλλάζει ο πρόσθετος περιορισμός. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι παρατηρήσεις πραγματοποιούνται μεταξύ ενός εργαστηριακού οπτικού ατομικού ρολογιού και ενός αντίστοιχου μεταφερόμενου ($G_{trans}=2$). Εξαιτίας αυτής της συνθήκης περιορίζεται η κατηγορία και το είδος του οπτικού ατομικού ρολογιού αλλά και η επικοινωνία μεταξύ τους.

Πιο συγκεκριμένα, για να πραγματοποιούνται παρατηρήσεις χωρίς ασυμβατότητες, τα δύο συστήματα οπτικών ατομικών ρολογιών οφείλουν να ανήκουν στην ίδια κατηγορία και είδος ($G_{categ}=1$). Επομένως εάν το εργαστηριακό οπτικό ατομικό ρολόι είναι πλέγματος τότε τέτοιας κατηγορίας πρέπει να είναι και το μεταφερόμενο. Επίσης τα δύο μετρητικά συστήματα οφείλουν να έχουν και την ίδια επιρροή από την κατασκευαστική τους δομή ($G_{constr}=1$). Όσο αφορά στην επικοινωνία, ο

πιο ακριβής τρόπος που απομένει είναι τα δίκτυα οπτικών ινών ($G_{comm}=2$). Αυτές οι επιλογές είναι ικανές να εκπληρώσουν τους βασικούς στόχους του σεναρίου. Επίσης η επιλογή του παρατηρούμενου μεγέθους δεν δημιουργεί σημαντικές μεταβολές από την οποιαδήποτε επιλογή του. ($G_{meas}=1$).

Επομένως, η τιμή του συντελεστή G_{Total} διαμορφώνεται ως εξής:

$$G_{Total}^{IX} = 7$$

❖ Σενάριο X

Το δέκατο σενάριο χαρακτηρίζεται μόνο από περιορισμούς που αφορούν στην αξιοποίηση των μετρητικών συστημάτων ως αισθητήρων (συνεχής λειτουργία), και στην υλοποίηση των μετρήσεων σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Η τήρηση των δύο αυτών περιορισμών έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση σύγχρονων κινητών οπτικών ατομικών ρολογιών ($G_{trans}=5$).

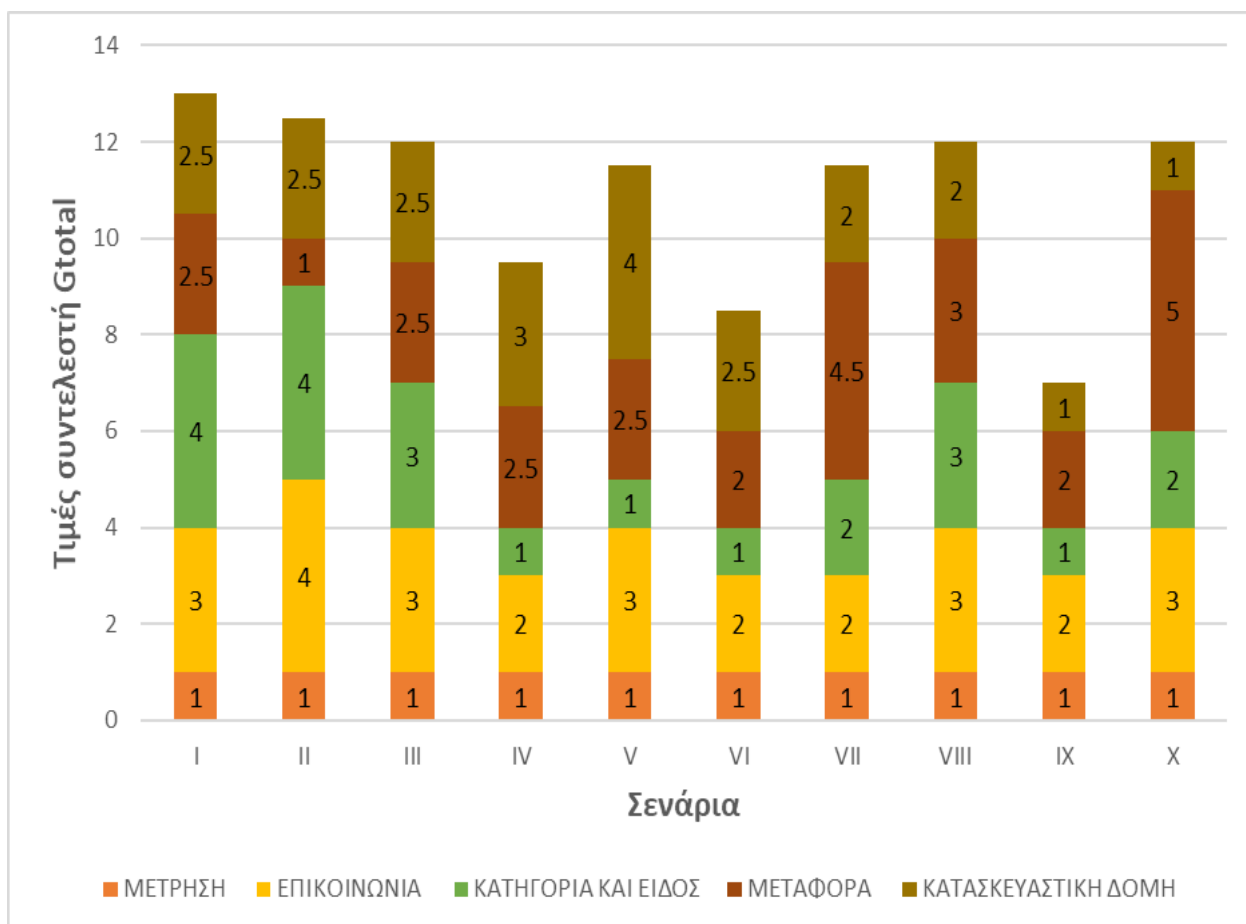
Το χρονικό διάστημα των παρατηρήσεων αντιστοιχεί στο διάστημα που μεσολαβεί μέχρι το ρολόι να είναι σε θέση να πραγματοποιήσει μετρήσεις με τη βέλτιστη ακρίβεια. Το δημιουργούμενο σύστημα μετρήσεων συνήθως περιλαμβάνει ένα στάσιμο οπτικό ατομικό ρολόι (που χρησιμοποιείται ως ρολόι αναφοράς), και το μεταφερόμενο κινητό οπτικό ατομικό ρολόι συνεχούς λειτουργίας ($G_{categ}=2$). Η συνθήκη αυτή οφείλει να τηρείται ώστε να υπάρχει αμφίδρομη σταθερή επικοινωνία μεταξύ των δύο συστημάτων σε πραγματικό χρόνο. Η επικοινωνία αυτή, θα γίνεται αξιοποιώντας δορυφορικά συστήματα διότι είναι διαθέσιμα προς χρήση σε οποιοδήποτε σημείο ($G_{comm}=3$). Για λόγους συμβατότητας μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών συστημάτων μετρήσεων, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση της κατασκευαστικής δομής και των δύο ($G_{constr}=1$). Αυτές οι επιλογές είναι ικανές να εκπληρώσουν τους βασικούς στόχους του σεναρίου. Επίσης η επιλογή του παρατηρούμενου μεγέθους δεν δημιουργεί σημαντικές μεταβολές από την οποιαδήποτε επιλογή του. ($G_{meas}=1$).

Επομένως, η τιμή του συντελεστή G_{Total} διαμορφώνεται ως εξής:

$$G_{Total}^X = 12$$

Στο διάγραμμα 5.1 εμφανίζονται συγκεντρωτικά οι τιμές του συντελεστή G_{Total} για κάθε ένα από τα διαφορετικά σενάρια.

Για κάθε στήλη του διαγράμματος γίνεται αναφορά και στις επιμέρους τιμές των παραμέτρων που καθορίζουν την τελική συνεισφορά στην ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών.



Διάγραμμα 5.1 Τιμές συντελεστή G_{Total} για κάθε σενάριο ανά παράμετρο

Από τη μελέτη του διαγράμματος 5.1, ενισχύεται η εγκυρότητα της ειδικής συγκριτικής κατάταξης. Όσο αφορά στη μελέτη των ακραίων περιπτώσεων, παρατηρείται ότι η παράμετρος "μέτρηση" δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την τελική ακρίβεια προσδιορισμού μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων, καθώς μπορεί να πάρει μόνο δύο τιμές βαθμών και σε όλες τις περιπτώσεις έχει τιμή ίση με ένα. Αντίθετα η παράμετρος "κατηγορία και είδος" παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος τιμών για κάθε ένα ξεχωριστό σενάριο και συμμετέχει ενεργά στην διαμόρφωση της τιμής του συντελεστή αξιολόγησης. Συνακόλουθα, η παράμετρος "επικοινωνία" επηρεάζει με πιο ήπιο αλλά στατιστικά σημαντικό τρόπο, για κάθε διαφορετικό σενάριο, την τιμή του συντελεστή αξιολόγησης. Αντίστοιχα οι παράμετροι "κατασκευαστική

δομή" και "μεταφορά" συμμετέχουν με συγκεκριμένες τιμές βαθμών σε ορισμένα μόνο σενάρια, διότι στα υπόλοιπα η επιρροή τους κρίνεται αόριστη (σε αυτές τις περιπτώσεις οποιαδήποτε επιλογή κατηγοριών αυτών των παραμέτρων δεν θα μεταβάλλει στατιστικά σημαντικά την τελική ακρίβεια).

Επίσης λόγω της ενιαίας κλίμακας βαθμών ορισμένες επιλογές μίας παραμέτρου επηρεάζουν με μεταβαλλόμενο τρόπο τις επιλογές άλλων παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο βαθμός της παραμέτρου "κατηγορία και είδος" μειώνεται (άρα έχει γίνει επιλογή της βέλτιστης κατηγορίας οπτικού ατομικού ρολογιού), παρατηρείται μια αύξηση του βαθμού της παραμέτρου "κατασκευαστική δομή" (δεν χρειάζονται μεγάλος αριθμός επεμβάσεων στα σύγχρονα οπτικά ατομικά ρολόγια πλέγματος). Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι μπορούν να εφαρμοστούν περιορισμένοι εναλλακτικοί συνδυασμοί που θα έχουν ως αποτέλεσμα την ίδια τελική τιμή συντελεστή αξιολόγησης. Όπως έχει ήδη όμως αναφερθεί, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης αξιολόγησης λήφθηκαν υπόψη οι βέλτιστες προτάσεις επιλογών μεταξύ των παραμέτρων, ακολουθώντας την ειδική συγκριτική κατάταξή τους. Οι σχέσεις που δημιουργούνται αναδεικνύονται στο στάδιο της δόμησης των σεναρίων και συγκεκριμένα στην υιοθέτηση ειδικών περιορισμών.

5.4 Δημιουργία προτύπων εφαρμογής της μεθοδολογίας

Η σύνταξη προτύπου εφαρμογής μιας διαδικασίας ή μεθοδολογίας αποτελεί ένα από τα συνηθέστερα τμήματα της επιστήμης της μετρολογίας. Μέσω αυτής της διαδικασίας και ύστερα από διαβουλεύσεις και αναλύσεις μεγάλου χρονικού διαστήματος, προκύπτει μια πρότυπη καθολική διαδικασία πραγματοποίησης και ελέγχου των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ολοκληρωμένη δημιουργία προτύπων εφαρμογής της χρονομετρικής χωροστάθμησης, με χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών καθώς δεν έχει παγιωθεί η υλοποίησή της από μεγαλύτερο τμήμα της ακαδημαϊκής και επιστημονικής κοινότητας. Ωστόσο, μπορούν να διατυπωθούν γενικές οδηγίες εφαρμογής (guidelines) της μεθοδολογίας που θα περιλαμβάνουν κατηγορίες διαφορετικών εναλλακτικών εφαρμογών της σε συνδυασμό με την αξιολόγησή της.

Πιο συγκεκριμένα στην προηγούμενη ενότητα δημιουργήθηκαν συγκεκριμένα σενάρια και στη συνέχεια με βάση τα χαρακτηριστικά τους αναλύθηκαν και αξιολογήθηκαν, αξιοποιώντας την προτεινόμενη εξίσωση αξιολόγησης.

Στην περίπτωση όμως των οδηγιών εφαρμογής της μεθοδολογίας δεν υπάρχουν συγκεκριμένα και σαφώς δομημένα σενάρια. Επίσης οι οδηγίες εφαρμογής οφείλουν να συμπεριλαμβάνουν όλες τις εναλλακτικές περιπτώσεις εφαρμογής της μεθοδολογίας. Επομένως πραγματοποιείται μια συνολική μελέτη και παρουσίαση των χαρακτηριστικών διαστημάτων τιμών που μπορεί να λάβει ο συντελεστής αξιολόγησης G_{Total} .

Έχει ήδη αναφερθεί ότι ο συντελεστής G_{Total} είναι καθαρός αριθμός και έχει εύρος τιμών $5 \leq G_{Total} \leq 22$. Όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή τόσο μικρότερη είναι η συνεισφορά των παραμέτρων, διότι οι επιλογές που έχουν πραγματοποιηθεί δεν δημιουργούν πρόσθετες πηγές αβεβαιότητας στον τελικό προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών.

Στον πίνακα 5.2, περιλαμβάνονται οι ενδεδειγμένες προτάσεις επιλογών που αφορούν στις παραμέτρους αξιολόγησης και αναφέρονται σε τρεις διακριτές κλάσεις συνεισφοράς. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται άμεση συσχέτιση και εποπτεία του εύρους του συντελεστή αξιολόγησης με τις αντίστοιχες επιλογές κατηγοριών παραμέτρων.

Κύριο χαρακτηριστικό των οδηγιών εφαρμογής είναι η τελική ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών και δευτερεύον χαρακτηριστικό τμηματικής διαφοροποίησης είναι η απόσταση μεταξύ των μετρητικών διατάξεων. Τα χαρακτηριστικά αυτά, όπως χρησιμοποιήθηκαν και για τη δόμηση των σεναρίων, είναι ικανά να καθορίσουν το σύνολο των επιλογών που οφείλουν να πραγματοποιηθούν.

Οι βασικοί κανόνες που προτείνεται να ακολουθούνται είναι οι εξής:

- ✓ Εφαρμογή διαδικασίας προεκτίμησης αβεβαιότητας πριν την υλοποίηση οποιασδήποτε εφαρμογής της χρονομετρικής χωροστάθμησης.

- ✓ Αξιοποίηση της συχνότητας, ως μέγεθος παρατήρησης. Προτείνεται ο προσδιορισμός της υψομετρικής διαφοράς να πραγματοποιείται μετά την ολοκλήρωση των παρατηρήσεων και την τελική εξαγωγή της διαφοράς συχνότητας μεταξύ των δύο χωρικών θέσεων.
- ✓ Χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών πλέγματος σύγχρονης τεχνολογίας σε όσες περιπτώσεις είναι δυνατόν.
- ✓ Οι παρατηρήσεις και η σύγκρισή τους οφείλουν να πραγματοποιούνται από συμβατές διατάξεις. Επομένως σε περίπτωση ετερογενών συστημάτων (συνδυασμός στάσιμων και μεταφερόμενων ρολογιών) προτείνεται η χρήση τουλάχιστον ίδιας κατηγορίας και είδους ρολογιών.
- ✓ Για μικρές αποστάσεις (<10 km) και με ταυτόχρονη μοντελοποίηση των ατμοσφαιρικών συνθήκων προτείνεται η χρήση του ελεύθερου αέρα ως μέσο μετάδοσης.
- ✓ Για μεσαίες αποστάσεις (<1000 km) και με ταυτόχρονη μελέτη των διαφόρων τεχνικών μετάδοσης προτείνεται η χρήση κατάλληλα κατασκευασμένων δικτύων οπτικών ινών ως μέσο μετάδοσης
- ✓ Για μεγάλες αποστάσεις (>1000 km) και με ταυτόχρονη μελέτη και μοντελοποίηση των σύγχρονων τεχνικών μετάδοσης προτείνεται η χρήση δορυφορικών συστημάτων ως μέσο μετάδοσης και επικοινωνίας των διατάξεων των οπτικών ατομικών ρολογιών.
- ✓ Η βελτιστοποίηση της εσωτερικής και εξωτερικής δομής των οπτικών ατομικών ρολογιών προτείνεται να πραγματοποιείται σε όσες περιπτώσεις είναι δυνατόν.
- ✓ Η αξιοποίηση μεταφερόμενων οπτικών ατομικών ρολογιών είναι αναγκαία αλλά προτείνεται ενδεδειγμένος σχεδιασμός και συντήρηση των συστημάτων κινητών και φορητών διατάξεων.

Εύρος τιμών συντελεστή αξιολόγησης	Οδηγίες εφαρμογής
$5 \leq G_{Total} \leq 10$	<p>Αξιοποίηση σύγχρονων οπτικών ατομικών ρολογιών πλέγματος</p> <p>Αξιοποίηση υβριδικών συστημάτων επικοινωνίας ή προηγμένων συστημάτων οπτικών ινών</p> <p>Χρήση στάσιμων διατάξεων οπτικών ατομικών ρολογιών ή αξιοποίηση μεταφερόμενων διακριβωμένης λειτουργίας ακριβείας</p> <p>Μοντελοποίηση και βελτίωση και της εξωτερικής και της εσωτερικής κατασκευαστικής δομής των οπτικών ατομικών ρολογιών</p>
$10 < G_{Total} \leq 15$	<p>Αξιοποίηση σύγχρονων οπτικών ατομικών ρολογιών ενός ιόντος ή ουδέτερου ατόμου</p> <p>Αξιοποίηση δικτύου οπτικών ινών ή συστημάτων επικοινωνίας που βασίζονται σε δορυφορικά συστήματα</p> <p>Χρήση τόσο στάσιμων όσο και μεταφερόμενων οπτικών ατομικών ρολογιών, με τη προϋπόθεση ότι πάντα το ένα θα είναι μόνιμο εργαστηριακό</p> <p>Μοντελοποίηση και βελτίωση είτε της εσωτερικής είτε της εξωτερικής κατασκευαστικής δομής</p>
$15 < G_{Total} \leq 22$	<p>Αξιοποίηση σύγχρονων οπτικών ατομικών ρολογιών ενός ιόντος ή ουδέτερου ατόμου</p> <p>Αξιοποίηση όλων των πιθανών μέσων και τεχνικών μετάδοσης, ακόμα και του ελεύθερου αέρα</p> <p>Χρήση τόσο στάσιμων όσο και μεταφερόμενων οπτικών ατομικών ρολογιών.</p> <p>Αξιοποίηση σύγχρονων κινητών οπτικών ατομικών ρολογιών συνεχούς ή διακοπτόμενης λειτουργίας για την απόκτηση πρόσθετων δεδομένων</p>

Πίνακας 5.2 Συνδυασμός οδηγιών εφαρμογής με εύρος τιμών συντελεστή αξιολόγησης

ΜΕΡΟΣ Γ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Γενικά

Αντικείμενο της διατριβής είναι η διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, όταν πραγματοποιείται χρονομετρική χωροστάθμηση με οπτικά ατομικά ρολόγια ακριβείας.

Επικεντρώνεται τόσο στη μελέτη των παραμέτρων που αφορούν στη μεθοδολογία όσο και στη μελέτη των παραμέτρων που αφορούν στα οπτικά ατομικά ρολόγια. Η συνολική και συνδυαστική μελέτη των παραμέτρων καθορίζει αφενός την τελική ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών και αφετέρου αποτελεί ένα μέτρο της σταθερότητας των οπτικών ατομικών ρολογιών που αξιοποιούνται.

Η συνολική μελέτη των παραμέτρων αποτελεί μία από τις πρωτοτυπίες της διατριβής. Από τη συνολική ανάλυση προκύπτουν οι φυσικοί και τεχνητοί περιορισμοί που δημιουργούνται μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών των παραμέτρων.

Βασικά κίνητρα για τη μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την εφαρμογή της χρονομετρικής χωροστάθμησης, όταν υλοποιείται με οπτικά ατομικά ρολόγια, αποτελούν:

- Η χρήση και καθιέρωση εισαγωγής των αρχών της γενικής θεωρίας της σχετικότητας στην κλασική γεωδαιτική θεωρία
- Η αξιοποίηση της χρονομετρικής χωροστάθμησης, η οποία είναι μία μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί αρκετά χρόνια πριν αλλά δεν μπορούσε να εφαρμοστεί αυτόνομα και ολοκληρωμένα λόγω του περιορισμού που δημιουργούσαν οι μετρητικές διατάξεις
- Η ανάπτυξη της τεχνολογίας, η οποία επιτρέπει πλέον την καταγραφή, επικοινωνία, μεταφορά και σύγκριση φυσικών βαθμωτών μεγεθών με πολύ μεγάλη ακρίβεια και σε μεγάλες αποστάσεις
- Η μελλοντική υιοθέτηση ενός ενοποιημένου υψομετρικού συστήματος αναφοράς που θα αναφέρεται σε συγκεκριμένη κοινή επιφάνεια αναφοράς και θα έχει μοναδική υψομετρική αφετηρία

Ύστερα από την απαραίτητη βιβλιογραφική έρευνα διαπιστώθηκε το πλεονέκτημα χρήσης της χρονομετρικής χωροστάθμησης σε σχέση με τις υπάρχουσες συμβατικές μεθόδους της κλασσικής υψομετρίας. Το πλεονέκτημα πηγάζει από το απλό μαθηματικό μοντέλο, που συνδέει αμφίδρομα την παρατηρούμενη διαφορά συχνότητας με τη διαφορά δυναμικού και συνακόλουθα την υψομετρική διαφορά μεταξύ δύο διακριτών θέσεων. Άρα η μεθοδολογία είναι ανεξάρτητη των συμβατικών πηγών σφαλμάτων και είναι ανεξάρτητη από οποιαδήποτε άλλα γεωδαιτικά δεδομένα και υποδομές.

Συγκεκριμένα, η γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν προβλέπει ότι δύο ρολόγια θα λειτουργούν σε διαφορετικούς ρυθμούς για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, εάν κινούνται με σχετική ταχύτητα ή υπό την επίδραση διαφορετικών πεδίων βαρύτητας. Για τη συνηθισμένη περίπτωση δύο ρολογιών που βρίσκονται ακίνητα στην επιφάνεια της Γης, η μετατόπιση της συχνότητας του κάθε ρολογιού είναι άμεσα ανάλογη με τη διαφορά του βαρυτικού δυναμικού και στις δύο θέσεις. Δηλαδή, ένα ρολόι σε χαμηλότερο υψόμετρο, επομένως σε ένα ισχυρότερο πεδίο βαρύτητας, επιβραδύνεται σε σχέση με ένα ρολόι σε μεγαλύτερο υψόμετρο, λόγω της σχετικιστικής μετατόπισης της συχνότητας. Για την ακρίβεια προσδιορισμού της μεταβολής της βαρύτητας, άρα και των υψομετρικών διαφορών, ουσιαστικό ρόλο κατέχει η ευαισθησία των ατομικών ρολογιών όσο αφορά στην ανίχνευση των μεταβολών συχνότητας

Επομένως, πρωταρχικός σκοπός είναι η μελέτη και ανίχνευση των ενδεχόμενων πηγών τυχαίων και συστηματικών σφαλμάτων που επηρεάζουν την ακρίβεια εφαρμογής της χρονομετρικής χωροστάθμησης, με απώτερο στόχο την ενίσχυση της αναγκαιότητας εξέλιξης των συστημάτων που θα οδηγήσουν σε ευρύτερη (και μελλοντικά καθολική) χρήση αυτής.

Τέλος, πραγματοποιείται θεωρητική προσομοίωση παρατηρήσεων καθώς επίσης και διαδικασία αξιολόγησης των παραμέτρων με σκοπό να προκύψουν οι συγκριτικές κατατάξεις. Μέσω αυτών των κατατάξεων πραγματοποιείται ιεράρχηση των παραμέτρων ως προς την επίδρασή τους με βάση αφενός συγκεκριμένα κριτήρια και αφετέρου ως προς τη βαθμολόγησή τους σε μία ενιαία κλίμακα.

6.2 Ερευνητικά ερωτήματα

Στην ενότητα αυτή διατυπώνονται και απαντώνται συνοπτικά τα ερευνητικά ερωτήματα (υποθέσεις έρευνας) που είχαν δημιουργηθεί στην αρχή της διατριβής. Στόχος της συγκεκριμένης ενότητας είναι να αναδειχθεί η χρησιμότητα της πρακτικής εφαρμογής της χρονομετρικής χωροστάθμησης με χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών.

- *Μπορεί η μεθοδολογία να αξιοποιηθεί για τον προσδιορισμό ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών για απομακρυσμένα σημεία που βρίσκονται σε οποιοδήποτε σημείο της φυσικής γήινης επιφάνειας;*

Η χρονομετρική χωροστάθμηση βασίζεται στην απομακρυσμένη σύγκριση των παρατηρούμενων συχνοτήτων μεταξύ τουλάχιστον δύο διακριβωμένων ατομικών ρολογιών ακριβείας. Επομένως η μεθοδολογία βασίζεται στην παρατήρηση φυσικού βαθμωτού μεγέθους και η ουσιαστική επιρροή που ενδεχομένως να επηρεάσει αφενός τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθοδολογίας και αφετέρου την ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, είναι η καταγραφή και σύγκριση των παρατηρούμενων μεγεθών. Όλες οι εναλλακτικές κατηγορίες που επιτρέπουν την επιτυχή εφαρμογή της μεθοδολογίας περιγράφονται από τη μεταβλητή παράμετρο "επικοινωνία".

- *Πως οφείλουν να κατασκευάζονται τα οπτικά ατομικά ρολόγια, με σκοπό να μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ευκολία από τον Αγρονόμο και Τοπογράφο Μηχανικό και να παράγουν αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα;*

Η δημιουργία των οπτικών ατομικών ρολογιών αποτελεί ερευνητικό αντικείμενο λίγων ακαδημαϊκών εργαστηρίων ανά τον κόσμο, διότι δεν υπάρχει διεθνής προτυποποίηση όσο αφορά στην κατασκευή τους. Για αυτό το λόγο η έρευνα σχετικά με τα κατασκευαστικά και λειτουργικά μέρη ενός οπτικού ατομικού ρολογιού με σκοπό την επίτευξη της ακρίβειας μέτρησης της συχνότητας, που είναι προϋπόθεση για την υλοποίηση της μεθοδολογίας, θεωρείται επίκαιρη και πρωτότυπη.

Όπως προέκυψε από την έρευνα οι παράμετροι που οφείλουν να μελετώνται και αφορούν στα οπτικά ατομικά ρολόγια, είναι οι εξής:

(Οι παράμετροι αναγράφονται σύμφωνα με τη φθίνουσα κατάταξη που έχει δημιουργηθεί από το πλήθος των διαθέσιμων επιλογών κάθε μίας)

- ✓ Η μεταβλητή παράμετρος "κατηγορία και είδος"
- ✓ Η μεταβλητή παράμετρος "κατασκευαστική δομή"
- ✓ Η σταθερή παράμετρος "μεταφορά"

- Από το συνδυασμό της μεθοδολογίας με τον κατάλληλο μετρητικό εξοπλισμό, μπορούν να προκύψουν αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα;

Με τη χρονομετρική χωροστάθμηση μπορούν να προσδιοριστούν υψομετρικές διαφορές με ακρίβεια που ουσιαστικά καθορίζεται από την «ευαισθησία» των μετρητικών διατάξεων στη παρατήρηση της συχνότητας. Μέσω της σχέσης που υπάρχει μεταξύ της υψομετρικής διαφοράς και της διαφοράς συχνότητας συμπεραίνεται ότι, όσο καλύτερης ακρίβειας είναι το ατομικό ρολόι που θα χρησιμοποιηθεί, τόσο μειώνεται και η αβεβαιότητα προσδιορισμού της υψομετρικής διαφοράς.

$\sigma\Delta H(m)$	± 0.01	± 1	± 10	± 100	± 500
$(\frac{\Delta f}{f_o})_{grav}$	$1 \cdot 10^{-18}$	$1 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-13}$

Πίνακας 6.1 Αντιστοίχιση τιμών αβεβαιότητας προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών με την ακρίβεια προσδιορισμού διαφορών συχνότητας

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα (6.1) παρατηρείται ότι για ακρίβεια της τάξης του $\pm 1cm$, απαιτείται η χρήση σύγχρονων οπτικών ατομικών ρολογιών ακρίβειας του 10^{-18} .

Συμπεραίνεται ότι ο συνδυασμός της μεθοδολογίας με την κατάλληλη κατηγορία ατομικού ρολογιού κατέχει σημαντικό ρόλο στην τελική ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, ανεξαρτήτως της τάξης μεγέθους της. Να αναφερθεί επίσης ότι τα σύγχρονα οπτικά ατομικά ρολόγια παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα από τις προγενέστερες κατηγορίες ρολογιών.

- Ποια είναι η χρησιμότητα της διδακτορικής διατριβής και ποια η μελλοντική προοπτική;

Όσο αφορά στην εξέλιξη της επιστήμης της σχετικιστικής γεωδαισίας αυτή αναφέρεται στην ενοποίηση διαφορετικών συστημάτων, είτε αυτά αναφέρονται σε παγκόσμια μοντέλα βαρύτητας και υψομέτρων

είτε του χρόνου. Η μελέτη και ανάλυση της ολοκληρωμένης εφαρμογής της μεθοδολογίας της χρονομετρικής χωροστάθμησης σε μεγαλύτερη κλίμακα, θα επικουρήσει τη συμπερίληψη της γενικής θεωρίας της Σχετικότητας και σε άλλους τομείς της ακαδημαϊκής και ερευνητικής κοινότητας.

Επομένως οι μέθοδοι που ενυπάρχουν στην επιστήμη της σχετικιστικής γεωδαισίας μπορούν να αξιοποιηθούν στην προσπάθεια ενοποίησης (unification) των διαφορετικών υψομετρικών συστημάτων ανά τον κόσμο, σε ένα. Πιο συγκεκριμένα η χρονομετρική χωροστάθμηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία, τον έλεγχο και την αξιολόγηση του, υπό δημιουργία, Παγκόσμιου Συστήματος Αναφοράς Υψομέτρων (International Height Reference System).

Η συνεισφορά της μεθοδολογίας σε μικρότερη κλίμακα (εθνική), θα μπορούσε να δώσει λύση στην αρχική ενοποίηση του ηπειρωτικού συστήματος με τα νησιωτικά, με στόχο την δημιουργία ενός Εθνικού Συστήματος Υψομέτρων. Στη συνέχεια μπορεί να πραγματοποιηθεί συσχέτιση του ενοποιημένου ελληνικού υψομετρικού συστήματος με τα υπόλοιπα Ευρωπαϊκά και Διεθνή.

Επιπλέον η επίλυση των βασικών περιορισμών που σχετίζονται με τον προσδιορισμό της υψομετρικής πληροφορίας σε οποιοδήποτε σημείο της φυσικής γήινης επιφάνειας με βάση ένα κοινό παγκόσμιο σύστημα αναφοράς, θα δημιουργήσει καινούργιες υποδομές μέσω των οποίων θα διευκολύνονται τόσο οι βασικές τοπογραφικές εργασίες και η πλοήγηση όσο και οι εφαρμογές υψηλής ακριβείας.

Η διδακτορική διατριβή συμβάλλει στη βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών με χρήση οπτικών ατομικών ρολογιών, μέσω της λεπτομερούς ανάλυσης των τυχαίων και συστηματικών πηγών σφαλμάτων.

6.3 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής προέκυψαν τόσο γενικά όσο και πιο εξειδικευμένα συμπεράσματα.

Τα **γενικά συμπεράσματα** είναι τα εξής:

- ❖ Η χρονομετρική χωροστάθμηση είναι μία μεθοδολογία προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών μεταξύ απομακρυσμένων

τοποθεσιών χρησιμοποιώντας ως παρατήρηση τη συχνότητα ή το χρόνο.

- ❖ Η μεθοδολογία της χρονομετρικής χωροστάθμησης είναι ανεξάρτητη από τις κύριες πηγές σφαλμάτων της συμβατικής υψομετρίας και η τελική ακρίβεια υψομετρικών διαφορών εξαρτάται από την ακρίβεια προσδιορισμού συχνοτήτων και την επικοινωνία των μετρητικών διατάξεων.
- ❖ Τα οπτικά ατομικά ρολόγια αποτελούν την πιο πρόσφατη εξέλιξη των μετρητικών διατάξεων χρόνου και είναι σχεδόν αλληλένδετη έννοια με τα πρότυπα οπτικής συχνότητας που αποτελούν την πιο πρόσφατη εξέλιξη των μετρητικών διατάξεων συχνότητας
- ❖ Οι δύο κύριες συνιστώσες αξιολόγησης των επιδόσεων των οπτικών ατομικών ρολογιών είναι η ακρίβεια και σταθερότητα των παρατηρήσεων. Τα αντίστοιχα μεγέθη, δηλαδή η αβεβαιότητα και η αστάθεια (Allan deviation) μπορούν να μοντελοποιηθούν και να ποσοτικοποιηθούν μελετώντας τις κύριες πηγές συστηματικών σφαλμάτων.
- ❖ Για να μελετηθεί η διερεύνηση των παραμέτρων για τη βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, γίνεται η θεωρητική παραδοχή ότι όλες οι ενδεχόμενες πηγές σφαλμάτων απαλείφονται (μέσω των κατάλληλων επιλογών του μελετητή), και παραμένει μόνο η συνεισφορά του φαινομένου της βαρυτικής φασματικής μετατόπισης. Μέσω αυτής της συνθήκης προκύπτει η θεωρητική τελική αβεβαιότητα προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών.
- ❖ Ο συνδυασμός της χρονομετρικής χωροστάθμησης με τα σύγχρονα οπτικά ατομικά ρολόγια μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών της τάξης του $\pm 1\text{cm}$ για αποστάσεις που κυμαίνονται από μερικές δεκάδες μέτρα έως και μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα.
- ❖ Κάθε παράμετρος μπορεί να χαρακτηρίζεται ως μεταβλητή ή ως σταθερά. Ο διαχωρισμός αυτός αναφέρεται στο ρυθμό μεταβολής της επιρροής της κάθε παραμέτρου στην τελική ακρίβεια. Πιο συγκεκριμένα και οι μεταβλητές και οι σταθερές επηρεάζουν ποσοστιαία την ακρίβεια αλλά οι σταθερές με συγκεκριμένο και αμετάβλητο ρυθμό ενώ οι μεταβλητές με πιο σύνθετο ρυθμό.

Στον παρακάτω συνοπτικό πίνακα ακολουθεί η βασική καταγραφή των στοιχείων των παραμέτρων που συμμετέχουν στην έρευνα όπως αναλύθηκαν στις επιμέρους παραγράφους 2.6 και 3.5.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ			
<u>ΤΙΤΛΟΣ</u>	<u>ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ</u>	<u>ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</u>	<u>ΕΡΕΥΝΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ</u>
<i>Μέτρηση</i>	Σταθερά	<i>Είδος φυσικού μεγέθους</i>	Χρονομετρική Χωροστάθμιση
<i>Επικοινωνία</i>	Μεταβλητή	<i>Μέσο μετάδοσης</i>	Χρονομετρική Χωροστάθμιση
<i>Κατηγορία και είδος</i>	Μεταβλητή	<i>Πηγή της συχνότητας αναφοράς</i>	Οπτικά ατομικά ρολόγια
<i>Μεταφορά</i>	Σταθερά	<i>Δυνατότητα μετακίνησης</i>	Οπτικά ατομικά ρολόγια
<i>Κατασκευαστική δομή</i>	Μεταβλητή	<i>Επέμβαση στα εξωτερικά η εσωτερικά στοιχεία</i>	Οπτικά ατομικά ρολόγια

Πίνακας 6.2 Συγκεντρωτικά βασικά στοιχεία των παραμέτρων

Τα γενικά συμπεράσματα καλύπτουν τα τρία πρώτα κεφάλαια της διατριβής και αναφέρονται στις βασικές αρχές τόσο της χρονομετρικής χωροστάθμισης όσο και των οπτικών ατομικών ρολογιών. Επίσης απεικονίζονται οι βασικές κατηγορίες και ο θεμελιώδης διαχωρισμός των παραμέτρων.

Τα **ειδικά συμπεράσματα** αφορούν στην ανάλυση των στοιχείων των παραμέτρων της μελέτης, και είναι τα εξής:

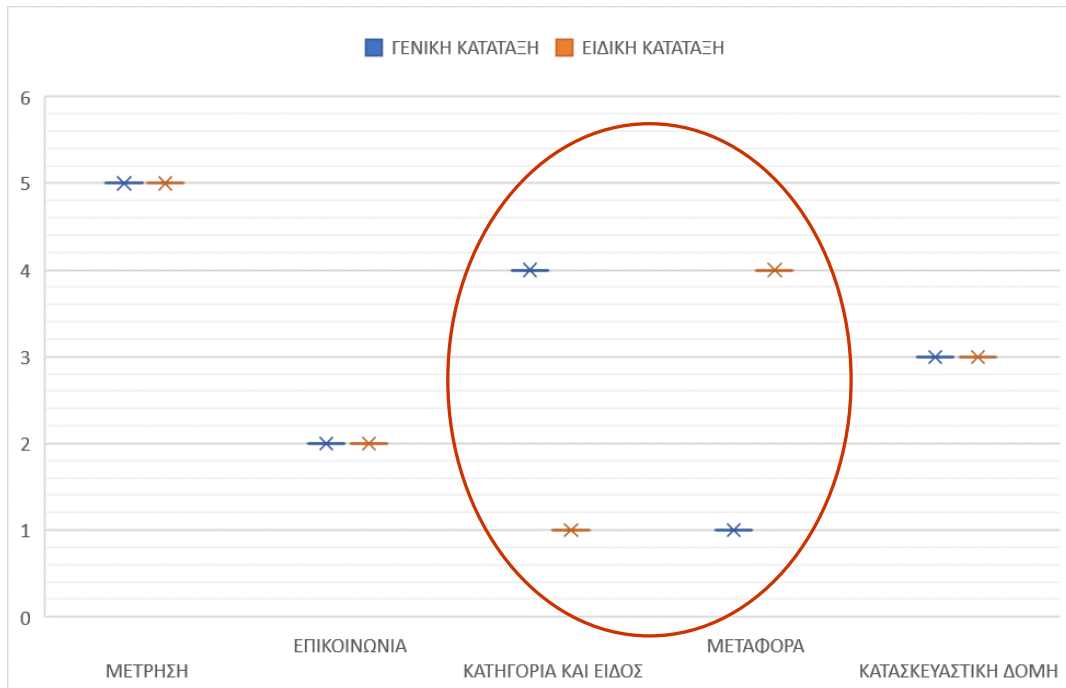
- Για να πραγματοποιηθεί η ενιαία μελέτη σχετικά με την επιρροή όλων των παραμέτρων στην τελική ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών μελετήθηκαν συνολικά όλες μαζί. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν οι περιορισμοί που δημιουργούν οι επιλογές μίας παραμέτρου στις αντίστοιχες επιλογές μίας άλλης.
- Κάθε μία από τις παραμέτρους επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο (ποιοτικά και ποσοτικά) την τελική αβεβαιότητα των παρατηρήσεων. Ο ποιοτικός διαχωρισμός αφορά στη γενική συγκριτική κατάταξη των παραμέτρων ενώ ο ποσοτικός στην ειδική. Σκοπός της δημιουργίας των δύο διαφορετικών διαχωρισμών, είναι αφενός να προκύψει αξιολόγηση των παραμέτρων τόσο με κριτήρια που αφορούν στην πρακτικότητα

και στη δυνατότητα εφαρμογής της μεθοδολογίας και αφετέρου τη μελέτη πηγών σφαλμάτων που ενδέχεται να επηρεάσουν την εφαρμογή της μεθοδολογίας.

- Η γενική κατάταξη των παραμέτρων αποτελεί το "εργαλείο" για την ποιοτική αξιολόγηση τους. Η ποιοτική αξιολόγηση των παραμέτρων φανερώνει ότι η παράμετρος που επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την πρακτική εφαρμογή της χρονομετρικής χωροστάθμησης είναι η μεταφορά των οπτικών ατομικών ρολογιών.
- Η ειδική κατάταξη των παραμέτρων αποτελεί το "εργαλείο" για τη δημιουργία του μοντέλου ποσοτικής αξιολόγησης. Η ειδική κατάταξη των παραμέτρων αναφέρεται σε μία αρχική κατάταξη των παραμέτρων με γνώμονα το πλήθος των διαθέσιμων επιλογών και της επιστημονικής λειτουργικής ανάλυσης. Η παράμετρος με τις περισσότερες επιλογές και τρέχουσα επιστημονική και ερευνητική εξέλιξη, είναι η κατηγορία και είδος του οπτικού ατομικού ρολογιού. Η αρχική επιλογή του είδους του ενεργού στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί αποτελεί τη σημαντικότερη επιλογή, καθώς καθορίζει αφενός το εύρος της ονομαστικής ακρίβειας του ρολογιού και αφετέρου το σύνολο των συστηματικών σφαλμάτων που θα εισαχθούν στις παρατηρήσεις.
- Από το συνδυασμό των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών συγκριτικών κατατάξεων (διάγραμμα 6.1), συμπεραίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις η παράμετρος "μέτρηση" συμμετέχει λιγότερο και στην πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας και διαθέτει το μικρότερο πλήθος διαθέσιμων επιλογών, επομένως λαμβάνει την τελευταία θέση (5^η) και στις δύο συγκριτικές κατατάξεις. Αντιστοίχιση των θέσεων κατάταξης μεταξύ γενικής και ειδικής κατάταξης παρουσιάζεται για τις παραμέτρους "επικοινωνία" και "κατασκευαστική δομή" που λαμβάνουν τη δεύτερη και την τρίτη θέση αντίστοιχα.

Οι διαφοροποιήσεις επομένως παρουσιάζονται για τις παραμέτρους "κατηγορία και είδος" και "μεταφορά", όπου παρατηρείται "συμπληρωματική" συμπεριφορά των δύο αυτών παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, η πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας επηρεάζεται στο μέγιστο βαθμό από την εξέλιξη των μεταφερόμενων οπτικών ατομικών ρολογιών, επομένως η μεταφορά λαμβάνει την πρώτη θέση στη γενική κατάταξη. Ωστόσο

δεν συμβαίνει το ίδιο για την ειδική κατάταξη διότι η μεταφορά (ως σταθερά παράμετρος) επηρεάζει με συγκεκριμένο και μη μεταβαλλόμενο τρόπο την τελική αβεβαιότητα προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών, επομένως λαμβάνει την τέταρτη θέση στην ειδική κατάταξη. Ακριβώς την αντίθετη συμπεριφορά παρουσιάζει η παράμετρος κατηγορία και είδος



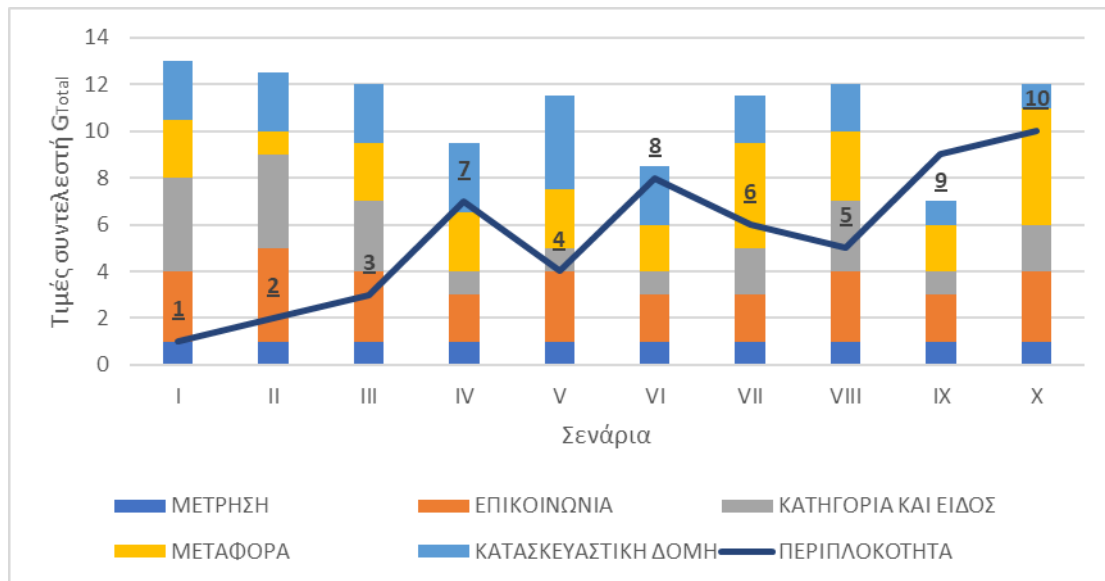
Διάγραμμα 6.1 Συνδυασμός ειδικής και γενικής συγκριτικής κατάταξης για κάθε παράμετρο

- Η διαδικασία της ειδικής κατάταξης των παραμέτρων δεν είναι αρκετή. Επομένως, για τη διεύρυνση της διαδικασίας ποσοτικής αξιολόγησης και κατάταξης των παραμέτρων για οποιαδήποτε εφαρμογή, οφείλει να δημιουργηθεί μοντέλο αξιολόγησης των παραμέτρων.
- Η διαδικασία δημιουργίας ενός μοντέλου αξιολόγησης περιλαμβάνει την υιοθέτηση μιας κλίμακας βαθμών (grades), που εκφράζει τη διαβάθμιση της επίδρασης κάθε παραμέτρου και κυμαίνεται από το 1 έως το 5. Οι βαθμοί καθορίζονται από τις εναλλακτικές επιλογές που μπορούν να γίνουν στο επίπεδο μελέτης των παραμέτρων, και αντιστοιχίζονται στις κατηγορίες και υπό-κατηγορίες που δημιουργούνται σε αυτές. Η διαδικασία της αξιολόγησης ολοκληρώνεται με τη δημιουργία της εξίσωσης συνεισφοράς αβεβαιότητας.

- Η εξίσωση συνεισφοράς αβεβαιότητας αποτελεί μια αθροιστική γραμμική σχέση που προσδιορίζει το συντελεστή G_{Total} , ο οποίος εκφράζει την συνολική συνεισφορά των παραμέτρων στην τελική επιδιωκόμενη ακρίβεια. Η ελάχιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο συντελεστής G_{Total} είναι 5 και αφορά στη βέλτιστη περίπτωση ενώ η μέγιστη τιμή του συντελεστή G_{Total} είναι 22 και αφορά στη χειρότερη περίπτωση.
- Η χρησιμότητα της εξίσωσης συνεισφοράς αβεβαιότητας αποδεικνύεται μέσω της αξιοποίησής της στη θεωρητική προσομοίωση εφαρμογής της μεθοδολογίας.
- Τα εναλλακτικά σενάρια που δημιουργήθηκαν καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα των πιθανών περιπτώσεων χρήσης της χρονομετρικής χωροστάθμησης και είναι μεταβαλλόμενης δυσκολίας και περιπλοκότητας. Η αξιολόγηση των σεναρίων πραγματοποιείται με ευκολία όταν έχει δομηθεί σωστά το σύστημα βαθμολόγησης των ποσοτικών χαρακτηριστικών. Δηλαδή περιέχονται όσο το δυνατόν περισσότερες κλίμακες που καθορίζονται από τις επιλογές κάθε παραμέτρου.
- Από τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των διαφορετικών σεναρίων προκύπτει σχεδόν σαφές συμπέρασμα ως προς τη δημιουργία συγκεκριμένης σχέσης μεταξύ της περιπλοκότητας (πιο σύνθετα σενάρια) και του συντελεστή G_{Total} . Δηλαδή όσο αυξάνονται οι απαιτήσεις σε ακρίβεια και ταυτόχρονα μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των οπτικών ατομικών ρολογιών, ο συντελεστής μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο ότι γίνονται πιο προσεκτικές και πιο ακριβείς επιλογές στα στοιχεία της κάθε παραμέτρου. Όσο επιλέγονται τα καλύτερα στοιχεία της κάθε παραμέτρου τόσο μειώνεται και η τιμή του συντελεστή G_{Total} . Ωστόσο αυτή η συνθήκη δεν ισχύει πάντα, διότι όπως παρουσιάζεται στο σενάριο IX, η περιπλοκότητα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, αλλά η τιμή του συντελεστή είναι μεγάλη. Αυτό οφείλεται στη συμπερίληψη όλων των παραμέτρων στην εξαγωγή του συμπεράσματος και στους περιορισμούς που δημιουργεί η μία παράμετρος στην άλλη.

Στο διάγραμμα 6.2 απεικονίζεται η αξιολόγηση των σεναρίων με βάση τις τιμές του συντελεστή G_{Total} , καθώς επίσης και η περιπλοκότητα μέσω της δημιουργίας μίας αυθαίρετης κλίμακας με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 1 και 10. Όσο μεγαλύτερη είναι η

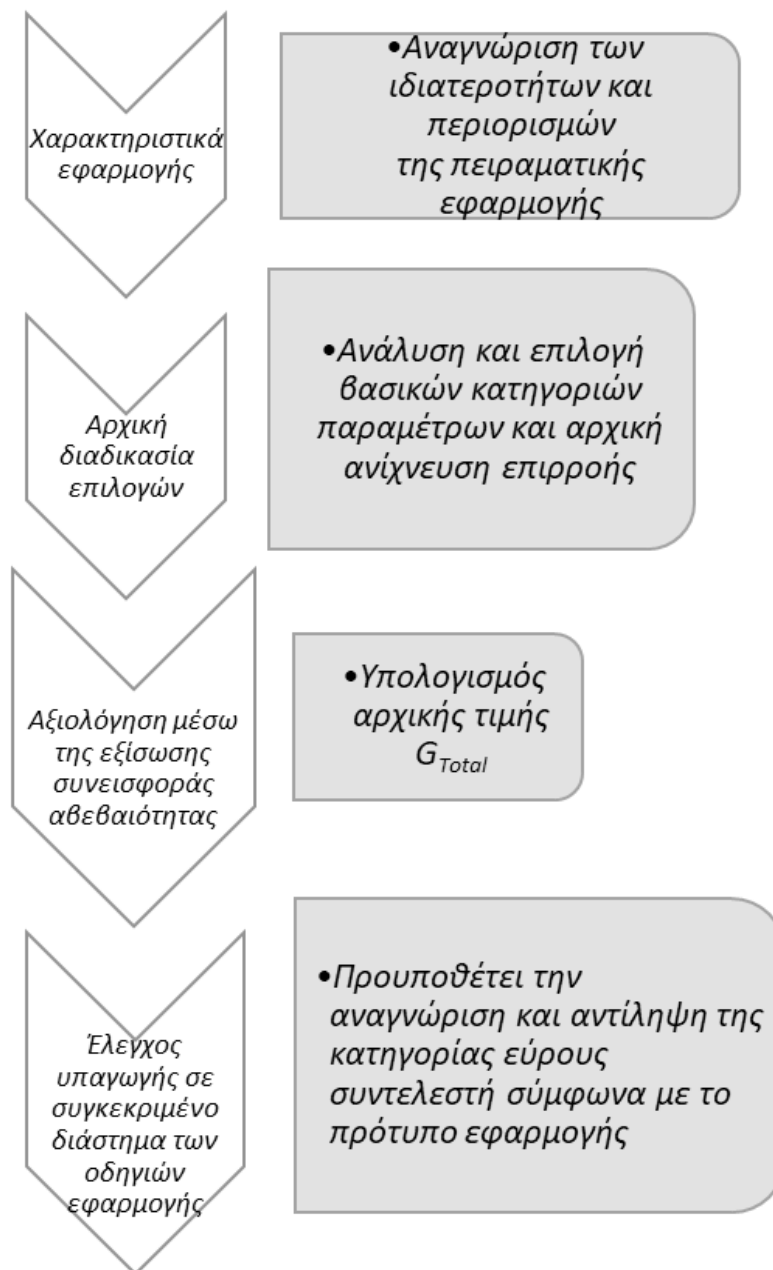
τιμή του σεναρίου στην αυθαίρετη κλίμακα τόσο πιο σύνθετο είναι.



Διάγραμμα 6.2 Αξιολόγηση σεναρίων με ταυτόχρονη εμφάνιση γραμμής τάσης της περιπλοκότητας

- Σε περιπτώσεις που δύο διαφορετικά σενάρια επιλογών για το ίδιο σενάριο, σε επίπεδο ανάλυσης κατηγοριών παραμέτρων, οδηγούν στην ίδια ακριβώς τιμή του ποσοτικού συντελεστή αξιολόγησης G_{Total} , τότε οφείλει να πραγματοποιηθεί πιο λεπτομερής ερμηνεία των επιμέρους επιλογών (βελτιστοποίηση). Σε αυτό το προχωρημένο στάδιο, η ερμηνεία περιλαμβάνει συνδυασμένη ανάλυση των ποσοτικών αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα ποιοτικά.
- Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργηθούν πρότυπες οδηγίες εφαρμογής της μεθοδολογίας. Αυτές λειτουργούν ως μία ουσιαστική προεκτίμηση των επιλογών που μπορούν να γίνουν με γνώμονα το εύρος τιμών που ορίζεται ότι μπορεί να πάρει ο συντελεστής αξιολόγησης για κάθε διαφορετική μελέτη.
- Η διαδικασία της αξιοποίησης των οδηγιών εφαρμογής γίνεται κατανοητή σε περιπτώσεις που πραγματοποιείται μελέτη βελτίωσης και προεκτίμησης της τιμής του συντελεστή αξιολόγησης (διάγραμμα 6.3). Αρχικά αναγνωρίζονται τα χαρακτηριστικά της κάθε εφαρμογής. Σε επόμενο στάδιο πραγματοποιούνται οι βασικές επιλογές που καθορίζουν την

συνεισφορά των παραμέτρων και δομείται το μοντέλο ποσοτικής αξιολόγησης. Με τα στοιχεία που προέκυψαν και με βάση την εξίσωση συνεισφοράς, πραγματοποιείται υπολογισμός της αρχικής τιμής του συντελεστή G_{Total} .



Διάγραμμα 6.3 Διάγραμμα ροής μελέτης βελτίωσης και προεκτίμησης της τιμής του συντελεστή αξιολόγησης

Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση της προσδιοριζόμενης τιμής του συντελεστή για να διερευνηθεί σε ποια από τις τρεις διακριτές κλάσεις των οδηγιών εφαρμογής αντιστοιχίζεται.

Ύστερα από προσεκτική μελέτη των θεωρητικών και ποσοτικών στοιχείων που δομούν τις κατηγορίες των οδηγιών εφαρμογής πραγματοποιείται έλεγχος υπαγωγής της τρέχουσας μελέτης στη σωστή κατηγορία.

Σε περίπτωση που ο έλεγχος είναι επιτυχημένος, πραγματοποιείται εφαρμογή της μεθοδολογίας σύμφωνα με τις επιλογές που ορίστηκαν.

Σε περίπτωση που ο έλεγχος **δεν** είναι επιτυχημένος, η διαδικασία επαναλαμβάνεται αλλάζοντας ορισμένες αρχικές αποφάσεις ώστε να μεταβληθεί η τιμή του συντελεστή αξιολόγησης. Οι αλλαγές των παραμέτρων προτείνεται να γίνονται με σειρά που λαμβάνει υπόψη τα στοιχεία της ειδικής συγκριτικής κατάταξης.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται επανάληψη του σταδίου του ελέγχου, όπου είτε ολοκληρώνεται η διαδικασία είτε υλοποιείται περαιτέρω αλλαγή των αποφάσεων μέχρι να ικανοποιηθούν οι συνθήκες του συντελεστή αξιολόγησης.

6.4 Προτάσεις

Ύστερα από την ολοκλήρωση της διατριβής και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της, προκύπτουν ορισμένα ενδιαφέροντα σημεία τα οποία είναι χρήσιμο να διερευνηθούν στο μέλλον.

Πρώτον, είναι ενδιαφέρον να πραγματοποιηθεί πλήρης πειραματική εφαρμογή της μεθοδολογίας αξιοποιώντας αποκλειστικά τις παρατηρήσεις των οπτικών ατομικών ρολογιών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα ατομικά ρολόγια χρησιμοποιούνταν επικουρικά στις μελέτες συμβατικής υψομετρίας, όμως εξαιτίας της ραγδαίας εξέλιξης τους πλέον μπορούν να αξιοποιηθούν αυτόνομα.

Πλήρης εφαρμογή της χρονομετρικής χωροστάθμησης τόσο σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο θα μπορούσε να επισπεύσει τις διαδικασίες ενοποίησης των διαφορετικών υψομετρικών συστημάτων αναφοράς. Ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη και υλοποίηση της ενοποίησης των επιμέρους υψομετρικών συστημάτων στον Ελλαδικό χώρο αποκλειστικά με χρήση παρατηρήσεων χρόνου-συχνότητας.

Επίσης σε περίπτωση που υλοποιηθούν υψομετρικές μελέτες χρονομετρικής γεωδαισίας και δημοσιευτούν τα αποτελέσματα και τα χαρακτηριστικά τους, αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την

λειτουργική εφαρμογή του μοντέλου αξιολόγησης και των οδηγιών εφαρμογής.

Επιπρόσθετα η εξέλιξη και ανάλυση της κατηγορίας των μεταφερόμενων - κινητών οπτικών ατομικών ρολογιών ενδέχεται να απασχολήσει σε μεγαλύτερο βαθμό την επιστημονική ακαδημαϊκή κοινότητα. Η κατηγορία αυτή των οπτικών ατομικών ρολογιών μπορεί να συλλέγει δεδομένα σε συνεχόμενο πραγματικό χρόνο κατά τη μετακίνηση από τη μία περιοχή μελέτης στην άλλη, επομένως μπορούν να χαρακτηριστούν ως αισθητήρες. Ενδιαφέρον θα είχε να μελετηθεί εάν μπορούν να εφαρμοστούν οι υπάρχουσες μεθοδολογίες βελτιστοποίησης της χωρικής θέσης και του πλήθους αυτών των αισθητήρων για καλύτερη και πιο λεπτομερή κάλυψη μιας ευρύτερης περιοχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A

1. Adam J., Augath W., Brouwer F., Engelhardt G., Gurtner W., Harsson B.G., Ihde G., Ineichen D., Lang H., Luthardt J., Sacher M., Schlüter W., Springer T., Wöspelmann G., *Status and development of the European height systems. In: Schwarz KP, Geodesy Beyond 2000. International Association of Geodesy Symposia, vol 121. Springer, Berlin, 2000*
2. Akamatsu D., Yasuda M., Inaba H., Hosaka K., Tanabe T., Onae A., Hong F-L., *Frequency ratio measurement of ^{171}Yb and ^{87}Sr optical lattice clocks*, Optics Express, vol. 22, pp. 7898-7905, 2014
3. Allan D.W., Weiss M.A., *Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View Of A GPS Satellite*, Proc. 34th Ann. Freq. Control Symposium, USAERADCOM, 1980
4. Αλεβιζάκου Ε.Γ., Λάμπρου Ε., *Προσδιορισμός Της Αποχής Του Γεωειδούς N σε Αστική Περιοχή, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010*
5. Andritsanos VD., Grigoriadis VN., Vergos GS., Pagounis V., Tziavos IN., *GOGE/GRACE GGM evaluation over Attica and Thessaloniki, Greece and local geoid modelling in support of height unification*, South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics, vol. 4, pp. 105-122, 2015
6. Antonopoulos A., Agatza-Balodimou A.M., Paradissis D., *Towards the definition of a new height system of reference for the hellenic area*, Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, 2001
7. Ardanal A., Safari A., *Global Height datum Unification: a new approach in the gravity potential space*, Journal of Geodesy 79, Springer, 2005
8. Arias EF, *The metrology of time*, Philos Trans R Soc A 363:2289–2305, 2005
9. Audoin C., Guinot B., *The Measurement of Time*, Cambridge University Press, Cambridge, 2001

10. Austin R., *Gravitational Time Dilation Derived from Special Relativity and Newtonian Gravitational Potential*, European Scientific Journal, vol. 13, 2017

B

11. Balasubramania N., *Definition and realization of a global vertical datum*, Department of Geodetic Science and Surveying, OSU Report No. 427, Ohio State University, USA, 1994
12. Barber Z.W., Hoyt C.W., Oates C.W., *Direct excitation of the forbidden clock transition in neutral Yb 174 atoms confined to an optical lattice*, Phys. Rev. Lett., vol. 96, p. 083002, 2006
13. Bauch A., *Time and frequency comparisons using radiofrequency signals from satellites*, In: *Comptes Rendus Physique* 16.5, pp. 471–479, 2015
14. Bauch A., *Time and Frequency Metrology in the Context of Relativistic Geodesy*, Fundamental Theories of Physics 196, Springer-Verlag, Switzerland, 2019
15. Bhattacharyya S., Minwalla S and Wadia S.R., *The incompressible non-relativistic Navier-Stokes equation from gravity*, Journal of High Energy Physics, JHEP08, 2009
16. Βέης Γ., Μπιλλήρης Χ. και Παπαζήση Κ., *Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας, Διδακτικές Σημειώσεις, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007*
17. Bennet M., Schatz M.F., Rockwood H., Wiesenfeld K., *Huygens's Clocks*, Proceedings of the Royal Society, Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2002
18. Bercy A., et al., *Two-way optical frequency comparisons at 5×10^{-21} relative stability over 100km telecommunication network fibers*, In: *Physical Review A* 90.6, 2014
19. Bilicki S., *Strontium optical lattice clocks: clock comparisons for timescales and fundamental physics applications*, PhD thesis, Observatoire de Paris-SYRTE, 2017
20. Bjerhammar A., *On a relativistic Geodesy*, Journal of Bulletin géodésique, Springer, 1985

21. Bloom B., Nicholson T., Williams J., Campbell S., Bishof M., Zhang X., Zhang W., Bromley L. and Ye J., “*An Optical Lattice Clock with Accuracy and Stability at the 10^{-18} Level*”, National Institute of Standards and Technology and University of Colorado, USA, 2014
22. Bondarescu R., Bondarescu M., Hetenyi G., Boschi L., Jetzer P., Balakrishna J., *Geophysical applicability of atomic clocks: direct continental geoid mapping*, Geophys. J. International, 191, 2012
23. Boucher C., Altamini Z., *ITRS, PZ-90 and WGS 84: current realizations and the related transformation parameters*, Journal of Geodesy, Springer, vol. 75, 2001
24. Boulder Atomic Clock Optical Network (BACON) Collaboration, *Frequency Ratio Measurements with 18-digit Accuracy Using a Network of Optical Clocks*, Physics Optics, arXiv:2005.14694 [physics.atom-ph], 2020
25. Bowden W., Hobson R., Hill I.R., *A pyramid MOT with integrated optical cavities as a cold atom platform for an optical lattice clock*, Sci. Rep., vol. 9, p. 11704, 2019
26. Brewer SM., Chen J-S., Hankin A-M., Clements ER., Chou CW., Wineland DJ., Hume DB., Leibrandt Dr., *An 27Al^+ quantum-logic clock with systematic uncertainty below 10^{-18}* , arXiv preprint arXiv:1902.07694, 2019
27. Brumberg V.A, Groten E., *IAU resolutions on reference systems and time scales in practice*, Astronomy & Astrophysics, Vol. 367, No. 3, 2000
28. Burns M., Leveille M., Dominguez A., Gebhard B., Huests S., Steele J., *Measurement of gravitational time dilation: An undergraduate research project*, American Journal of Physics, vol. 85, no. 757, 2017
29. Burša M., Kenyon S., Kouba J., Šíma Z., Vátrt V. and Voojtíšková M., *A Global Vertical Reference Frame Based on Four Regional Vertical Datums*, Stud Geophys Geod 48, 2004
30. Burša M., Kouba J., Müller A., Raděj K., True S.A., Vátrt V. and Voojtíšková M., *Determination of Geopotential Differences between Local Vertical Datums and Realization of a World Height System*, Stud Geophys Geod 45, 2001

C

31. Calonico D., et al., *High-accuracy coherent optical frequency transfer over a doubled 642km fiber link*, In: Applied Physics B 117.3, 2014
32. Calonico D., Clivati C., Mura A., Tampellini A., Gertosio M., Levi F., *Time and Frequency Distribution over fibre for Geodesy, Seismology and Industry*, 2018 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication (ISPCS), Switzerland, 2018
33. Campbell J., LohmarFJ., *On the Computation of ionospheric path delays for VLBI from satellite Doppler observations*, NOAA Technical Report NOS.: NGS, 1982
34. Cecilia C., Davide C., Matteo F. , Alberto M. and Filippo L., *A fiber link for the remote comparison of optical clocks and geodesy experiments*, Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum, Denver, 2015
35. Chen Q.F., Nevsky A., Cardace M., *A compact, robust, and transportable ultra-stable laser with a fractional frequency instability of 1×10^{-15}* , Rev. Sci. Instrum., vol. 85, p. 113107, 2014
36. Cheng T.P., *Relativity, gravitation, and cosmology—a basic introduction*, Oxford University Press, Oxford, 2005
37. Chou W., Hume D., Koelemeij J., Wineland D. and Rosenband T., *Frequency comparison of two high-accuracy optical clocks*, Physical Review Letters, American Physical Society, 2010
38. Chwalla M., Benhelm J., Kim K., *Absolute frequency measurement of the $40\text{Ca}^+ 4s^2S_{1/2} - 3d^2 D_{5/2}$ clock transition*, Phys. Rev. Lett., vol. 102, p. 023002, 2009

D/Δ

39. Damour T., Soffel M., Xu C.M., *General-relativistic celestial mechanics. i. method and definition of reference systems*, Phys. Rev. D, 43:3273-3307, 1991
40. Damour T., Soffel M., Xu C.M., *General-relativistic celestial mechanics. ii. translational equations of motion*, Phys. Rev. D, 45:1017-1044, 1992

41. Damour T., Soffel M., Xu C.M., General-relativistic celestial mechanics. iii. Rotational equations in motion, *Phys. Rev. D*, 47:3124, 1993
42. Δεληκαράογλου Δ., *Εισαγωγή στο Γήινο Πεδίο Βαρύτητας*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007
43. Δεληκαράογλου Δ., *Φυσική Γεωδαισία – Θεωρητικές και Τεχνολογικές Βάσεις*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010
44. Defraigne P., Aerts W., Harmegnies A., Petit G., Rovera D., Uhrich P., *Advances in multi-GNSS time transfer*, Procc in. Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), 2013
45. Dehmelt H., *Coherent spectroscopy on single atomic system at rest in free space*, *Journal of Physics*, 1981
46. Delva P. and Lodewyck J., *Atomic Clocks: new prospects in metrology and geodesy*, Relativistic Positioning Systems and their Scientific Applications Workshop, Slovenia, 2012
47. Delva P., Puchades N. and Lodewyck J., *Chronometric Geodesy and Fundamental Physics*, American Geophysical Union, Fall General Assembly, 2016
48. Delva P., Denker H., and Lion G., *Chronometric Geodesy: Methods and Applications*, Relativistic Geodesy, Foundations and Applications, Springer, 2019
49. Denker H., *Gravity potential for optical clock comparisons*, European Metrology Research Programme, International Timescales with Optical Clocks, 2017
50. Denker H., Timmen L., Voigt C., Weyers S., Peik E., Margolis H., Delva P., Wolf P., Petit G., *Geodetic methods to determine the relativistic redshift at the level of 10^{-18} in the context of international timescales: a review and practical results*, *Journal of Geodesy*, 2017
51. Denker H., Timmen L. and Voigt C., *Gravity field modelling with regard to optical clock comparisons*, Proceedings at the International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems (GGHS 2016), Greece, 2016
52. Denny M., *The pendulum Clock: a venerable dynamical system*, *European Journal of Physics*, Volume 23, Number 4, 2002

53. Diddams S.A., *Direct link between Microwave and Optical Frequencies with a 300 THz Femtosecond Laser Comb*, In: Physical Review Letters 84.22, 2000
54. Dube P., Madej A.A., Jian B., *Sr single-ion clock*, J. Phys: Conf. Ser., vol. 723, p. 012018, 2016

F

55. Falke S., Lemke N., Grebing C., *A strontium lattice clock with 3×10^{-17} inaccuracy and its frequency*, N. J. Phys., vol. 16, p. 073023, 2014
56. Featherstone W.E. and Kuhn M., *Height systems and vertical datums: A review in the Australian context*, Journal of Spatial Science, Taylor & Francis, p. 21-41, 2010
57. Featherstone W.E., *Towards the unification of the Australian height datum between the mainland and Tasmania using GPS and AUSGeoid98*, Geom Res Australasia, 33–54, 2000
58. Fischer M., Kolachevsky N., Zimmermann M., Holzwarth R., Udem T., Hänsch T.W., Abgrall M., Grünert J., Maksimovic I., Bize S., Marion H., Pereira Dos Santos F., Lemonde P., Santarelli G., Laurent P., Clairon A., Salomon C., Haas M., Jentschura U.D., Keitel C., *New Limits on the Drift of Fundamental Constants from Laboratory Measurements*, Phys. Rev. Lett. 92, 230802, 2004
59. Flurry J., *Relativistic Geodesy*, 8th Symposium on Frequency Standards and Metrology, Journal of Physics: Conference Series, IOPscience, 2015
60. Forman P., *Atomichron®: the atomic clock from concept to commercial product*, Proceedings of the IEEE, v.73, p. 1181-1204, 1985
61. Fortier T., Baumann E., *20 years of developments in optical frequency comb technology and applications*, Commun. Phys., vol. 2, p. 153, 2019
62. Fujieda M., et al., *All-optical link for direct comparison of distant optical clocks*, In: Optics Express 19.17, 2011

G

63. Gatti A., Reguzzoni M. and Venuti G., *The height datum problem and the role of satellite gravity models*, J Geod, 1–8, 2012

64. Gill P., *When should we change the definition of the second?* Phil. Trans. R. Soc. Vol. 369, pp. 4109-4130, 2011
65. Gillies G., *The Newtonian gravitational constant: recent measurements and related studies*, Reports on Progress in Physics, 1997
66. Giorgetta F., Swann W., Sinclair L., Swann C., Baumann E., Coddington I., Newbury N., *Optical two-way time and frequency transfer over free space*, Nature Photonics, 2013
67. Ge Y., Chen S., Wu T., Fan C., Qin W., Zhou F., Yang X., *An analysis of BDS-3 real-time PPP: Time transfer, positioning, and tropospheric delay retrieval*, Measurement vol. 172, Elsevier, 2021
68. Gellesch M., Jones J., Barron R., Singh A., Sun Q., Bongs K., Singh Y., *Transportable optical atomic clocks for use in out-of-the-lab environments*, Advanced Optical Technologies, vol. 9, no. 5, 2020
69. Georgopoulos G.D., Telioni E.C., *Determination of local geoid model in Attica Basin Greece*, Survey Review, Taylor & Francis, Volume 47, p.109-114, 2014
70. Gerginov V., Nemitz N., Griebisch M., Kazda M., Li R., Gibble K., Wynands R., Weyers S., *Recent improvements and current uncertainty budget of PTB fountain clock CSF2*, In EFTF- 2010 24th European Frequency and Time Forum, pages 1–7. IEEE, 2010.
71. Godun R.M., Nisbet-Jones P.B.R, Jones J.M., *Frequency ratio of two optical clock transitions in $^{171}\text{Yb}^+$ and constraints on the time variation of fundamental constants*, Phys. Rev. Lett., vol. 113, p. 210801, 2014
72. Grafarend E.W., *The definition of the telluroid*, Bull. Geodesique 52, 25–37, 1978
73. Griffiths D., and Schroeter D., *Introduction to Quantum Mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press, doi:10.1017/9781316995433, 2018
74. Guinot B., *Time scales in the context of general relativity*, Philos Trans R Soc A 369:4131–4142, 2011
75. Guinot B., Arias E.F., *Atomic time-keeping from 1955 to the present*. Metrologia 42:S20–S30, 2005

H

76. Hachisu H., Fujieda M., Nagano S., Gotoh T., Nogami A., Ido T., Falke St., Huntemann N., Grebing C., Lipphardt B., Lisdat C., Piester D., *Direct comparison of optical lattice clocks with an intercontinental baseline of 9000km*, In: Optics Letters 39.14, July 2014
77. Hänsch T.W., *Passion for precision (Nobel lecture)*, Review of Modern Physics, 2006
78. He Y., et al., *Stable radio-frequency transfer over optical fiber by phase conjugate frequency mixing*, In: Optics Express 21.16, 2013
79. Heiskanen W., and Moritz H., *Physical Geodesy*, W.H Freeman and Company, London, 1967
80. Hoffman-Wellenhof B., and Moritz H., *Physical Geodesy*, Springer Science & Business Media, 2006
81. Horowitz P., Hill W., *The Art of Electronic*, Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, 1989
82. Huang Y., Guan H., Zeng M., Tang L., Gao K., *40Ca^+ ion optical clock with micromotion induced shifts below 10^{-18}* , Physical Review A, 99(1):011401, 2019
83. Huntermann N., Sanner C., Lipphardt B., Peik E., *Single-ion atomic clock with 3×10^{-18} systematic uncertainty*, Phys. Rev. Lett., vol. 116, p. 063001, 2016

I

84. Ihde J., Sanchez L. and Barzaghi R., *Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHR)*, Journal of Surveys in Geophysics, Springer, 2017
85. Ihde J. and Sánchez L., *A unified global height reference system as a basis for IGGOS*, J Geodyn 40, 2005
86. Ihde J., Adam J., Gurtner W., Harsson B.G., Sacher M., Schluter W., Woppelmann., *The Height Solution of the European Vertical Reference Network (EUVN)*, Astronom. Geod. Arb, 61, 132-145, 2000

J

87. Jiang, H., *Transfer of an optical frequency over an urban fiber link*, J. Opt. Soc. Am. B 25, 2029–2035, 2008

88. Jones D.J., Diddams S.A., Ranka J.K., Stentz A., Windeler R.S., Hall J.L., Cundiff S.T., *Carrier envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis*, Science 288, 635–639, 2000

K

89. Kajita M., *The Fundamentals of an Atomic Clock, Measuring Time – Frequency measurements and related developments in physics*, IOPscience, 2018
90. Κανελλόπουλος Ν., *Αξιοποίηση Ρολογιών Ακριβείας στη Σύγχρονη Επιστημονική Θεωρία και Έρευνα, Μετρήσεων διαδρομές, Τιμητικός τόμος στη μνήμη της καθ. Ευαγγελίας Λάμπρου*, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, 2021
91. Kaplan GH., *The IAU resolutions on astronomical reference systems, time scales, and Earth rotation models—explanation and implementation*, U.S. Naval Observatory, USA, 2005
92. Katori H., Takamoto M., Palchikov V.G., Ovsiannikov V.D., *Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap*, Phys. Rev. Lett. 91, 173005, 2003
93. Katori H., Takano T. and Takamoto M., *Optical lattice clocks and frequency comparison*, Journal of Physics: Conference Series, Volume 264, 22nd International Conference on Atomic Physics, Australia, 2011
94. Κατσάμπαλος, Κ., Τζιαβός, Η., *Φυσική Γεωδαισία*, Εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1991.
95. Kéfélian F., *High-resolution optical frequency dissemination on a telecommunications network with data traffic*, In: Optics Letters 34.10, 2009
96. Kelly E.M., *Relativistic Doppler effect in light clocks construed as a result of prior acceleration*, Foundations of Physics, Springer, 1984
97. Kearsley A., Ahmad Z., Chan A., *National Height Datums, Levelling, GPS Heights and Geoids*, Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry, and Surveying, vol. 59, pp. 53-88, 1993
98. Khazraei S.M., Nafisi V., Amiri-Simkooei A.R., and Asgari J., *Combination of GPS and Leveling Observations and Geoid Models Using Least-Squares Variance Component Estimation*, Journal of Surveying Engineering, ASCE, 2017

99. Klioner S.A., *The problem of clock synchronization: a relativistic approach*, *Celest Mech Dyn Astron*, 53:81-109, 1992
100. Kock O., He W., Swierad S., *Laser controlled atom source for optical clocks*, *Sci. Rep.*, vol. 6, p. 37321, 2016
101. Koller S.B., Grotti J., Vogt S., Al-Masoudi A., Dorschner S., Hafner S., Sterr U., Lisdat C., *Transportable Optical Lattice Clock with 7×10^{17} uncertainty*, *Physical Review Letters*, vol. 118, 2017
102. Kopeikin S., *Celestial coordinate reference systems in curved space-time*, *Celestial Mechanics*, 44:87, 1988
103. Kopeikin S., Kanushin V., Tolstikov A. and Karpik A., *Chronometric measurement of orthometric height differences by means of atomic clocks*, *Journal of Gravitation and Cosmology*, Springer, 2016
104. Kopeikin S., Efroimsky M., Kaplan G., *Relativistic Celestial Mechanics of the Solar System*, Wiley: Berlin, xxxii+860 pp., 2011
105. Krehlik P., et al., *Multipoint dissemination of RF frequency in fiber optic link with stabilized propagation delay*, In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 60.9, 2013

L/Λ

106. Lambourne R.J.A., *Relativity, gravitation and cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge, 2010
107. Λάμπρου Ε., *Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Αστρογεωδαιτικών Προσδιορισμών με Ψηφιακά Γεωδαιτικά Όργανα*, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2003
108. Λάμπρου Ε., και Πανταζής Γ., *Εφαρμοσμένη Γεωδαισία*, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, 2010
109. Landau LD. and Lifshitz EM., *Quantum Mechanics, Nonrelativistic theory*, Moscow, Science, 1974
110. Laurent P., *The ACES/PHARAO space mission*, In: *Comptes Rendus Physique* 16.5, pp. 540–552, 2015
111. Lion G., Panet I., Wolf P. and Guerlin C., *Determination of a high spatial resolution geopotential model using atomic clock comparisons*, *Journal of Geodesy*, Springer, 2017

112. Lisdat C., Grosche G., Quintin N., Shi C., Raupach S.M.F., Grebing C., Nicolodi D., Stefani F., Al-Masoudi A., Dorscher S., Hafner S., Robyr J-L., Chiodo N., Bilicki S., Bookjans E., Koczwara A., Koke S., Kuhl A., Wiotte F., Meynadier F., Camisard E., Abgrall M., Lours M., Legero T., Schnatz H., Sterr U., Denker H., Chardonnet H., Le Coq Y., Santarelli G., Amy-Klein A., Le Targat R., Lodewyck J., Lopez O., Pottie P.E., *A clock network for geodesy and fundamental science*, Nature Communications, 7:12443, 2016
113. Levy-Leblond J-M., *One more derivation of the Lorentz transformation*, American Journal Of Physics, 1976
114. Lewandowski W., Azoubib J., Klepczynski W.J., *GPS: primary tool for time transfer*, in Proceedings of the IEEE, vol. 87, no. 1, pp. 163-172, 1999
115. Lodewyck J., “*On a definition of the SI second with a set of optical clock transitions*”, Institute of Physics Publishing, Metrologia 56, 2019
116. Lodewyck J., Zawada M., Lorini L., Gurov M., Lemonde P., *Observation and cancellation of a perturbing dc stark shift in strontium optical lattice clocks*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012
117. Lombardi M., *Fundamentals of Time and Frequency*, The Mechatronics Handbook, CRC Press, 2002
118. Lombardi M.A, *The evolution of time measurement, Part 2: quartz clocks [Recalibration]*, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine Volume: 14 , Issue: 5 , 2011
119. Loomis A.L., *The Precise Measurement of Time: (Plates 9 and 10.)*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 91, Issue 5, 1931
120. Lopez O., et al., *High-resolution microwave frequency dissemination on an 86km urban optical link*, In: Applied Physics B 98.4, 2009
121. Lopez O., Haboucha A., Chanteau B., Chardonnet C., Amy-Klein A., Santarelli G., *Ultra-stable long-distance optical frequency distribution using the Internet fiber network*, Optics Express, vol. 20, no. 21, 2012
122. Lu Z., Qu Y., Qiao S., *Geodesy*, Springer-Verlag, 2014

123. Ludlow A., Boyd M. and Ye J., *Optical Atomic Clocks*, Reviews of modern physics, 2015
124. Luther, G. and Towler, W., *Redetermination of the Newtonian Gravitational Constant G*, Phys. Rev. Lett.vol. 48, p.121, 1982

M

125. Ma L.S., Jungner, P., Ye, J., Hall, J.L., *Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by optical fiber or other time-varying path*, Opt. Lett. 19, 1777–1779, 1994
126. Mai E. and Muller J., *General remarks on the potential use of atomic clocks in relativistic geodesy*, Zeitschrift fur Geodasie, Geoinformation und Landmanagement, Vol. 138 (4) , pp. 257-266, 2013
127. Mandelberg H.I., Witten L., *Experimental Verification of the Relativistic Doppler Effect*, Journal of the Optical Society of America Vol. 52, Issue 5, 1962
128. Margolis H.S., Barwood G.P., Huang G., *Hertz-level measurement of the optical clock frequency in a single 88Sr^+ ion*, Science, vol. 306, p. 1355, 2004
129. Marra G., et al., *High-resolution microwave frequency transfer over an 86- km-long optical fiber network using a mode-locked laser*, In: Optics Letters 36.4, 2011
130. Marra G., Margolis S., Richardson D.S., *Dissemination of an optical frequency comb over fiber with 3×10^{-18} fractional accuracy*, In: Optics Express 20.2, 2012
131. Matthys R.J., *Accurate Clock Pendulums*, Oxford University Press, 2004
132. McGrew W.F., X. Zhang X., Fasano R.J., *Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level*, Nature, vol. 564, p. 87, 2018
133. Mehlstaubler T., Grosche G., Lisdat C., Schmidt P., Denker H., *Atomic Clocks for Geodesy*, Reports on Progress in Physics, Vol. 81, IOP Science, 2018

134. Miao L. and Ludger Timmen I., *Regional gravity field modelling and Relativistic geodesy*, Collaborative Research Centre, Leibniz Universität Hannover, Germany, 2016
135. Μιντουράκης Ι., *Υπολογισμός του θαλάσσιου γεωειδούς στον Ελλαδικό χώρο με τη χρήση δεδομένων δορυφορικής αλτιμετρίας και μοντέλων επιχειρησιακής ωκεανογραφίας*, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2020
136. Misner CW., Thorne KS. And Wheeler JA., *Gravitation.*, Macmillan, 1973
137. Moritz H., Hofmann-Wellenhof B., *Geometry, relativity, geodesy*, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1993
138. Muller J., Soffel M., Klioner S.A., *Geodesy and Relativity*, J Geod 82:133-145, 2008
139. Muller J., Dirkx D., Kopeikin SM., Lion G., Panet I., Petit G. and Visser PNAM., *High Performance Clocks and Gravity Filed Determination*, Space Science Reviews, 2018

N

140. Nagourney W., Sandberg J., Dehmelt H.G., *Shelved electron amplifier: observation of quantum jumps*, Phys. Rev. Lett. 56, 2797–2799, 1986
141. Nevsky A., Alighanbari S., Chen Q.F., *Robust frequency stabilization of multiple spectroscopy lasers with large and tunable offset frequencies*, Opt. Lett., vol. 38, p. 4903, 2013
142. Nicholson T.L., Martin M.J., Williams J.R., *Comparison of two independent Sr optical clocks with 1×10^{-17} stability at 103s*, Phys. Rev. Lett, vol. 109, p. 230801, 2012
143. Nicholson T.L., Campbell S., Hutson R., *Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty*, Nat. Com., vol. 6, p. 1, 2015
144. Numazaki K., Imai H., Morinaga A., *Measurement of the second-order Zeeman effect on the sodium clock transition in the weak-magnetic-field region using the scalar Aharonov-Bohm phase*, Physical Review A, American Physical Society, 2010

O

145. Ohmae N., Bregolin F., Nemitz N., Katori H., *Direct measurement of the frequency ratio for Hg and Yb optical lattice clocks and closure of the Hg/Yb/Sr loop*, Opt. Express 28, 15112-15121, 2020

P

146. Pan M. and Sjöberg L.E., *Unification of vertical datums by GPS and gravimetric geoid models with application to Fennoscandia*, J Geod 72, 64–70, 1998
147. Paul W., *Electromagnetic traps for charged and neutral particles*, Rev. Mod. Phys. 62, 531–540, 1990
148. Pavlis N., *Relativistic Geodesy for the Unification of Vertical Datums*, Proceedings at the International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems (GGHS 2016), Greece, 2016
149. Pavlis N., Weiss M., *The relativistic redshift with 3×10^{-17} uncertainty at NIST, Boulder, Colorado, USA*, Metrologia 40:66–73, 2003
150. Peres A., Terno D.R., *Relativistic doppler effect in quantum communication*, Journal of Modern Optics, 50:6-7, 2003
151. Petit G., et al., *10^{-16} frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution*, In: Metrologia 52.2, pp. 301–309, 2015
152. Petit G., Wolf P., Delva P., *Atomic time, clocks and clock comparisons in relativistic space-time: a review*, In: Kopeikin SM (ed) Frontiers in relativistic celestial mechanics, vol 2: Applications and experiments. De Gruyter, 2014
153. Petit G., Wolf P., *Relativistic theory for time comparisons: a review*, Metrologia 42:138–144, 2005
154. Piester D., Bauch A., Breakiron L., Matsakis D., Blanzano B., Koudelka O., *Time transfer with nanosecond accuracy for the realization of International Atomic Time*, Metrologia 45, IOP Publishing, 2008
155. Pikovski I., Zych M., Costa F., Bruner C., *Time dilation in quantum systems and decoherence*, New Journal of Physics, vol 19, 2017
156. Poli N., Oates C.W., Gill P., Tino G.M., *Optical Atomic Clocks*, Rivista Del Nuovo Cimento, Societa Italiana di Fisica, 2014

157. Porsev S.G., Derevianko A., *Multipolar theory of blackbody radiation shift of atomic energy levels and its implications for optical lattice clocks*, Phys. Rev. A 74, 2006
158. Pound R.V., Rebka G.A., *Gravitational red-shift in nuclear resonance*, Phys Rev. Lett. 3:439–441, 1959
159. Predehl K., *A 920-Kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place*. Science 336, 441–444, 2012

R

160. Ramsey F. N., *Applications of Atomic Clocks*, Laser Physics at the Limits, Springer-Verlag, Berlin, 2002
161. Ramsey F. N., *History of early atomic clocks*, Institute of Physics Publishing, Metrologia 42, 2005
162. Rapp R.H., *A World Vertical Datum Proposal*, AVN, 197–304, 1995
163. Razeghi M., “*Introduction to Quantum Mechanics*”, Fundamentals of Solid-State Engineering. Springer, Boston, 2006
164. Ricard Y., Fleitout L., Froidevaux C., *Geoid Heights and lithospheric Stresses for a dynamic earth*, Annales Geophysicae, 1984
165. Riehle F., *Frequency Standards: Basics and Applications*, Wiley-VCH Verlag, 2006
166. Riehle F., *Optical clock networks*, Nature Photonics, vol. 11, 2017
167. Rulke A., Liebsch G. and Sacher M., *Unification of European Height System Realizations*, Journal of Geodetic Science, Springer, 2012
168. Rummel R., *Global Unification of Height Systems and GOCE*, in: *Gravity, Geoid and Geodynamics 2000*, IAG Symposia 123, Springer, 2002
169. Rummel R. and Teunissen P., *Height datum definition, height datum connection and the role of the geodetic boundary value problem*, Bull Géod 62, 477–498, 1988

S

170. Sacher M., Ihde J., Liebsch G. and Mäkinen J., *EVRF2007 as realization of the European Vertical Reference System*, B Geod Sci Aff 68, 2009

171. Safronova M., Jiang D., Arora B., Clark C., Kozlov M., Safronova U., Johnson W., *Black-body radiation shifts and theoretical contributions to atomic clock research*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009
172. Sanchez L., *Towards a vertical datum standardization under the umbrella of Global Geodetic Observing System*, Journal of Geodetic Science, De Gruyter, 2012
173. Sanchez L., *International Height Reference System (IHRIS): Required measurements and expected products*, GGOS Days 2016, Cambridge MA, 2016
174. Sanchez L. and Sideris M., *Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHRIS)*, Geophysical Journal International, 2017
175. Sánchez L., *Strategy to Establish a Global Vertical Reference System, Geodetic Reference Frames*, IAG Symposia 134, Springer, 2009
176. Santarelli G., Laurent Ph., Lemonde P. and Clairon A., *Quantum Projection Noise in an Atomic Fountain: A High Stability Cesium Frequency Standard*, Physical Review Letters, vol.82, 1999
177. Sanso F., Reguzzoni M., Barzaghu R., *Geodetic Heights*, Springer AG, 2019
178. Schwarz R., Dörscher S., Al-Masoudi A., *A compact and robust cooling laser system for an optical strontium lattice clock*, Rev. Sci. Instrum., vol. 90, 2019
179. Schediwy S.W., et al., *Stabilized microwave-frequency transfer using optical phase sensing and actuation*, In: Optics Letters 42.9, 2017
180. Schutz B., *Gravity from the ground up*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003
181. Schutz B., *A first course in general relativity*, Cambridge University Press, Cambridge, 2009
182. Semerikov I.A., Zalivako I.V., Borisenko A.S., *Threedimensional Paul trap with high secular frequency for compact optical clock*, Bull. Lebedev Phys. Inst., vol. 46, p. 297, 2019

183. Sinclair L-C., *Comparing Optical Oscillators across the Air to Milliradians in Phase and 10^{-17} in Frequency*, In: Physical Review Letters 120.5, 2018
184. Sklar L., *Space, Time and Spacetime*, University of California Press, 1977
185. Sliwczyński L., et al., *Frequency distribution in delay-stabilized optical DWDM network over the distance of 3000km*, In: 2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum. IEEE, 2015
186. Smiles S., *John Harrison, the Chronometer-Maker*, Longman's magazine, Vol. 1, Iss. 2, London, 1882
187. Smith E., *The Riefler Clock System of the Cincinnati Observatory*, Popular Astronomy, vol. 19, pp.344-351, 1911
188. Soffel M., Langhans R., *Space time reference systems*, Springer, 2013
189. Soffel M., Klioner S.A., Petit G., Wolf P., Kopeikin S.M., Bretagnon P., Brumberg V.A., Capitaine N., Damour T., Fukushima T., *The IAU 2000 Resolutions for Astrometry, Celestial Mechanics, and Metrology in the Relativistic Framework: Explanatory Supplement*, The Astronomical Journal, Vol. 126, 2003
190. Soffel M., Herold H., Ruder H., and Schneider M., *Relativistic theory of gravimetric measurements and definition of the geoid*. Manuscr. Geod. 13, p. 143–146, 1988
191. Soycan M., *Determination of Geoid Heights by GPS and Precise Trigonometric Levelling*, Survey Review, Taylor & Francis, vol. 38, p.387-296, 2006
192. Schwarzschild K., *On the gravitational field of a mass point according to Einstein's theory*, 1916

T

193. Takano T., Mizushima R., and Katori H., *Precise determination of the isotope shift of ^{88}Sr – ^{87}Sr optical lattice clock by sharing perturbations*, Applied Physics Express, 2017
194. Tampellini A., et al., *Effect of a timebase mismatch in two-way optical frequency transfer*, In: Metrologia 54.6, 2017

195. Tampellini A., *Coherent fibre-optic link: applications in Time and Frequency metrology, Geodesy, Radio Astronomy and Seismology*, Doctoral Dissertation, Doctoral Program in Metrology, Politecnico di Torino, 2019
196. Tapley B.D., Kim M-C., *Applications to Geodesy*, International Geophysics, vol. 69, p. 371-406, Elsevier, 2001
197. Tenzer R., Vaníček P., Santos M., Featherstone W.E., Kuhn M., *The rigorous determination of orthometric heights*, J Geodesy 79, 82–92, Springer, 2005
198. Trojanowicz M., Osada E. and Karsznia K., *Precise local quasigeoid modelling using GNSS/levelling height anomalies and gravity data*, Survey Review, 52:370, 76-83, 2017
199. Tyumenev R., Favier M., Bilicki S., Bookjans E., Le Targat R., Lodewyck J., Nicolodi D., Le Coq Y., Abrugall M., Guena J., De Sarlo L., Bize S., *Comparing a mercury optical lattice clock with microwave and optical frequency standards*, New J. Phys, vol. 18, 2016

V

200. Van Flandern, T., *Status of the occultation determination of G-dot*, in *On the measurement of Cosmological variations in gravitational constant*, University of Florida press, p.21-28, 1978
201. Vanicek P., and Krakiwsky E.J., *Geodesy: The Concepts*, Elsevier, 1986
202. Vergos G.S., and Tziavos I.N., *Unification of the Greek vertical datum through a deterministic adjustment of tide gauge, marine geoid and sea surface topography data*, Department of Geodesy and Surveying, Aristotle University of Thessaloniki, 2008
203. Viswam S., *Advanced Laser Frequency Stabilization Systems for Mobile Strontium Optical Lattice Clocks*, PhD Thesis, University of Birmingham, 2019
204. Vermeer M., *Chronometric Levelling*, Technical report, Finnish Geodetic Institute, Helsinki, 1983
205. Vogt S., Lisdat C., Legero T., *Demonstration of a transportable 1 Hz-linewidth laser*, Appl. Phys. B, vol. 104, p. 741, 2011

W

206. Wang B., et al., *Precise and Continuous Time and Frequency Synchronisation at the 5×10^{-19} Accuracy Level*, In: Scientific Reports, 2012
207. Wynands R., Weyers S., *Atomic Fountain Clocks*, Institute Of Physics Publishing, Metrologia 42, S64–S79, 2005
208. Wieser A., Gaggl M., *Improved Positioning Accuracy with High Sensitivity GNSS Receivers and SNR Aided Integrity Monitoring of Pseudo-Range Observations*, ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach CA, 2005
209. Will C.M., *Theory and experiment in gravitational physics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993
210. Weiss M., Pavlis N., A re-evaluation of the relativistic redshift on frequency standards at NIST, Boulder, Colorado, USA. Metrologia 54:535–548, 2017
211. Wolf P., *Relativity and metrology*, In: Proceedings of International School of Physics “Enrico Fermi”, Course CXLVI, recent advances in metrology and fundamental constants. Società Italiana di Fisica, Italy, pp 575–598, 2001
212. Wu H., Muller J., Lammerzahn C., *Clock Networks for Height System Unification: a simulation study*, Geophys J. Int 216, 1954–1607, 2019

X

213. Xiao-ping WU., *Title definition of quasi-geoid and some questions encountered in airborne gravimetry*, Science of Surveying and Mapping, CNKI, 2006
214. Xu P., *A quality investigation of global vertical datum connection*, Geophys J Int 110, 361–370, 1992

Y

215. Yilmaz N., *Comparison of different height systems*, Journal of Geo-spatial Information Science, Taylor & Francis, p.209-214, 2012

Z

216. Zanon-Willeite T., Ludlow A.D., Blatt S., Boyd M., Arimondo E., Ye J., *Cancellation of Stark Shifts in Optical Lattice Clocks by Use of Pulsed Raman and Electromagnetically Induced Transparency Techniques*, Phys. Rev. Lett. 97, 2006
217. Zhang P, Cao J., Shu H., *Evaluation of blackbody radiation shift with temperature-associated fractional uncertainty at 10^{-18} level for 40Ca^+ ion optical clock*, J. Phys. B: Mol. Opt. Phys., vol. 50, p. 015002, 2017
218. Zilkoski D.B., Richards J.H. and Young G.M., *Results of the general adjustment of the North American Vertical datum of 1988*, Surv Land Inf Sys 52, 1992
219. Zych M., *Quantum Systems under Gravitational Time Dilation*, Springer Books, 2017

Ξενόγλωσσες βιβλιογραφικές αναφορές: 210

- Από τις οποίες (33) αναφέρονται σε επιστημονικά βιβλία, ακαδημαϊκές σημειώσεις και διδακτορικές διατριβές.
- Από τις οποίες (177) αναφέρονται σε επιστημονικά περιοδικά, δημοσιεύσεις και πρακτικά διεθνών συνεδρίων.

Ελληνόγλωσσες βιβλιογραφικές αναφορές: (9)

- Από τις οποίες (7) αναφέρονται σε επιστημονικά βιβλία, ακαδημαϊκές σημειώσεις και διδακτορικές διατριβές.
- Από τις οποίες (2) αναφέρονται σε επιστημονικά περιοδικά, δημοσιεύσεις και πρακτικά διεθνών συνεδρίων.

ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

1. https://www.esa.int/Applications/Navigation/ESA_sets_clock_by_distance_ant_spinning_stars (*Last Access 03/2021*)
2. <https://www.newscientist.com/article/mg23331184-900-atomic-clocks-make-best-measurement-yet-of-relativity-of-time/> (*Last Access 03/2021*)
3. <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/geostationary-satellite> (*Last Access 03/2021*)
4. <https://www.scribd.com/document/453482194/Cambridge-Textbooks-Quantum-Mechanics> (*Last Access 03/2021*)
5. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/g/Gravitational+Redshift> (*Last Access 03/2021*)
6. <https://www.bipm.org/en/bipm/tai/time-transfer/> (*Last Access 03/2021*)
7. <https://spectrum.ieee.org/aerospace/satellites/introducing-the-worlds-most-precise-clock> (*Last Access 03/2021*)
8. <https://www.cambridge.org/core/books/introduction-to-quantum-mechanics/990799CA07A83FC53> (*Last Access 03/2021*)
9. <https://confluence.qps.nl/qinsky/9.1/en/geoid-model-glossary-182618401.html> (*Last Access 03/2021*)
10. <https://www.cambridge.org/core/topics/introduction-to-quantum-mechanics/990799CA07A83FC5312402AF6860311E#> (*Last Access 03/2021*)
11. <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/> (*Last Access 03/2021*)
12. <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.1487109/> (*Last Access 03/2021*)
13. <https://opentextbc.ca/physicstestbook2/chapter/simultaneity-and-time-dilation/> (*Last Access 03/2021*)
14. <https://www.zmescience.com/science/news-science/mobile-optical-atomic-clock-043242/> (*Last Access 03/2021*)
15. https://www.nasa.gov/mission_pages/tim/clock/overview.html (*Last Access 03/2021*)
16. <https://www.space.com/atomic-clock-nasa-falcon-heavy-stp2.html> (*Last Access 03/2021*)