



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή Εργασία

Συγκριτική αξιολόγηση ατομικών χρονομέτρων δορυφόρων GPS και Galileo



Φοιτήτρια: Ηλιοπούλου Ουρανία

A.M: 11023

Επιβλέπων Καθηγητής

Μιχάλης Ι. Γιαννίου, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής
Αττικής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συγκριτική αξιολόγηση ατομικών χρονομέτρων των συστημάτων

GPS και Galileo

Φοιτήτρια: Ηλιοπούλου Ουρανία

Τριμελής επιτροπή

Μ. Γιαννίου

Αναπληρωτής καθηγητής Π.Α.Δ.Α Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής

Β. Παγούνης

Καθηγητής Π.Α.Δ.Α Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής

Β. Ανδριτσάνος

Αναπληρωτής καθηγητής Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής

Copyright© Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Ηλιοπούλου Ουρανία, Μάρτιος, 2022

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Ηλιοπούλου Ουρανία του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 11023, φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

Ηλιοπούλου Ουρανία



Αφιερώσεις – Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, και την παρότρυνσή τους να συνεχίσω να προσπαθώ για την επίτευξη των στόχων μου παρά τις δυσκολίες.

Θέλω να ευχαριστήσω, επίσης, τον επιβλέποντα αυτής της πτυχιακής εργασίας, αναπληρωτή καθηγητή κ. **Μιχάλη Ι. Γιαννίου**, για τη συνεργασία, την καθοδήγηση και τις ώρες που θυσίασε από τον ελεύθερό του χρόνο για να με βοηθήσει στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων και τη σύνταξη του τεύχους.

Τέλος, ευχαριστώ τον δόκτορα **Erik Schoenemann** από τα κεντρικά της ESA/ESOC, για τις χρήσιμες συμβουλές σε θέματα που αφορούν τα χρονόμετρα Galileo.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ – ABBREVIATIONS LIST	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ GNSS	11
1.1 Παγκόσμια Συστήματα GNSS.....	11
1.2 GPS.....	11
1.4 GLONASS.....	13
1.5 BeiDou	13
1.6 Galileo.....	14
2. ΑΤΟΜΙΚΑ ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΑ.....	18
2.1 Ατομικά πρότυπα συχνότητας και ατομικά χρονόμετρα	18
2.2 Ατομικός χρόνος	19
2.3 Είδη Ατομικών Προτύπων Συχνότητας.....	19
2.3.1 Ατομικό πρότυπο συχνότητας καισίου.....	19
2.3.2 Ατομικό πρότυπο συχνότητας ρουβιδίου	21
2.3.3 Ατομικό πρότυπο συχνότητας υδρογόνου.....	22
2.4 Σταθερότητα ατομικών προτύπων συχνότητας	22
2.4.1 Drift.....	22

2.4.2 Allan variance	23
2.4.4 Hadamard Variance	23
2.4.5 Σύγκριση διαστημικών προτύπων συχνότητας.....	24
2.5 Διαστημικά ατομικά πρότυπα συχνότητας δορυφόρων GPS	24
2.6 Διαστημικά ατομικά πρότυπα συχνότητας Galileo	25
3. ΠΡΟΪΟΝΤΑ GNSS	27
3.1 Φορείς προϊόντων GNSS	27
3.1.1 IGS.....	27
3.1.2 CODE	27
3.2 Clock products	28
3.3 Άλλες υπηρεσίες.....	29
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	30
4.1 GPS.....	30
4.1.1 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Block IIA	31
4.1.2 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Block IIR-A.....	34
4.1.3 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Block IIR-B.....	38
4.1.4 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Block IIR-M	40
4.1.5 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Block IIF.....	43
4.1.6 GPS Allan variance	51
4.1.7 GPS Drift	64

4.2 Galileo	67
4.2.1 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Galileo.....	67
4.2.2 Galileo Allan variance	78
4.2.3 Galileo Drift.....	85
5. Σύγκριση GPS – Galileo.....	88
5.1 Σύγκριση μεγίστου σφάλματος χρονομέτρων για τους δορυφόρους GPS και Galileo.....	88
5.2 Σύγκριση Allan Variance GPS – Galileo.....	93
5.3 Σύγκριση drift GPS - Galileo.....	95
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ.....	98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	101
Παράρτημα Α: Αρχείο RINEX.....	101

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, αναλύονται και αξιολογούνται τα ατομικά χρονόμετρα των δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης GPS και Galileo. Γίνεται εκτενής αναφορά στα σφάλματα χρονομέτρων, στη μεταβλητότητα Allan και στην ολίσθηση (drift) των δορυφόρων GPS και Galileo.

Αναλύεται σε θεωρητικό επίπεδο η λειτουργία των ατομικών χρονομέτρων ρουβιδίου, καισίου και υδρογόνου, όπως επίσης και τα μέτρα σταθερότητας των ατομικών χρονομέτρων. Επίσης, αναλύονται οι φορείς GNSS και τα προϊόντα τους.

Σε πρακτικό επίπεδο, γίνεται επεξεργασία δεδομένων της Διεθνούς Υπηρεσίας GNSS (IGS), του Ευρωπαϊκού Κέντρου Προσδιορισμού Τροχιών (CODE) και της Γαλλικής Διαστημικής Υπηρεσίας (French Space Agency), με σκοπό την ανάλυση και την σύγκριση των σφαλμάτων χρονομέτρων, όπως επίσης και της σταθερότητας τους. Τα δεδομένα αυτά αφορούν στα έτη 2010-2014 για το σύστημα GPS και στα έτη 2013-2020 για το σύστημα Galileo.

Σε πρώτη φάση, δημιουργήθηκαν διαγράμματα που αναπαριστούν το σφάλμα των χρονομέτρων συναρτήσει του χρόνου, μέσω των οποίων γίνεται φανερό τόσο η απόλυτη τιμή του σφάλματος, όσο και η ολίσθηση (drift) του χρονομέτρου και η γήρανση (aging). Στην συνέχεια υπολογίστηκε η ολίσθηση των χρονομέτρων σε συνάρτηση του χρόνου καθώς και η μεταβλητότητα Allan και δημιουργήθηκαν τα σχετικά διαγράμματα.

Σε δεύτερη φάση, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων για τα συστήματα GPS και Galileo και αξιολογείται η εν γένει απόδοση των αντίστοιχων χρονομέτρων.

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the individual atomic frequency standards (AFS) of the GPS and Galileo satellite navigation systems, which are analyzed and evaluated. AFS offsets, Allan variance and drift of GPS and Galileo satellites clocks are the main focus points.

The function of the rubidium atomic frequency standard (RAFS), cesium frequency standard and hydrogen maser frequency standard, as well as the stability measures of each atomic clock, are analyzed at a theoretical level. In addition, all GNSS Services and their products are being analyzed.

On a practical level, data obtained by the International GNSS Service (IGS), the European Orbit Determination Center (CODE) and the French Space Agency is processed, for the purpose of analyzing and comparing clock offsets, as well as their stability. These data refer to the years 2010-2014 for the GPS system and to the years 2013-2020 for the Galileo system.

In the first phase, diagrams were created that represent the error of the clocks as a function of time, through which both the absolute value of the error, as well as the drift of the clock and the aging are revealed. Then the drift of the clocks as a function of time as well as the Allan variance were calculated and the respective diagrams were created.

In the second phase, the results of the data processing for the GPS and Galileo systems are compared and the overall performance of the respective atomic clocks is evaluated.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ – ABBREVIATIONS LIST

AFS	Atomic
CODE	Center for Orbit Determination Europe
Cs	Cesium
ESA	European Space Agency
FOC	Full Operational Capability
GEO	Geostationery Orbit
GLONASS	GLObalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IGSO	Inclined Geosynchronous Satellite Orbit
IOV	In Orbit Validation
MEO	Medium Earth Orbit
PHM	Passive Hydrogen Maser
PRN	PseudoRandom Noise
RAFS	Rubidium Atomic Frequency Standard
Rb	Rubidium
SAFS	Space Atomic Frequency Standard
SV	Space Vehicle
SVN	Space Vehicle Number
TAI	Temps Atomique International
UTC	Coordinated Universal Time

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έμφυτη ανάγκη του ανθρώπου να ξέρει τη θέση του στον χώρο, ώστε να μπορεί να προσανατολιστεί και εν συνεχεία να χαράξει την πορεία του, στα πρώιμα χρόνια ικανοποιήθηκε με την παρατήρηση ουράνιων σωμάτων. Αυτή η ανάγκη ώθησε στη διερεύνηση των νόμων που διέπουν την κίνηση των αστεριών και των πλανητών, αλλά και στην ανάπτυξη ρολογιών ακριβείας κατά τον 17^ο και 18^ο αιώνα, με σκοπό την εύρεση του γεωγραφικού μήκους, το οποίο με την σειρά του θα διευκόλυνε και θα αναβάθμιζε την χάραξη πορείας στα πλοία. Φτάνοντας στον 20^ο αιώνα, η πλοήγηση γίνεται κυρίως με δορυφόρους, με απαραίτητη προϋπόθεση της λειτουργίας του συστήματος την πολύ μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση του χρόνου, της τάξης του 10^{-12} , η οποία μπορεί να επιτευχθεί μόνο με χρήση ατομικών χρονομέτρων. Οι δορυφόροι χρησιμοποιούν διάφορα είδη χρονομέτρων, με το καθένα να έχει τα δικά του χαρακτηριστικά.

Ο κύριος λόγος ανάπτυξης του GPS, του πρώτου δορυφορικού συστήματος από τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, ήταν ο προσδιορισμός θέσης, χρόνου και ταχύτητας, οπουδήποτε στην επιφάνεια της Γης (ξηρά, αέρα θάλασσα), για την κάλυψη των στρατιωτικών αναγκών της πλοήγησης (*Φωτίου και Πικριδάς, 2012*). Η χρησιμότητά του στην παγκόσμια πολιτεία αναγνωρίστηκε σε πολύ πρώιμο στάδιο από το Αμερικανικό Υπουργείο Άμυνας, με αποτέλεσμα την ελεύθερη χρήση του από όλους τους πολίτες και τη συμβολή σε σπουδαία επιστημονικά επιτεύγματα (*Sturdevant et al. 1994*)

Ακολούθησε η Σοβιετική Ένωση, με την ανάπτυξη του δορυφορικού συστήματος GLONASS, για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις ενός συστήματος παρομοίων δυνατοτήτων με αυτών του GPS για τις ένοπλες δυνάμεις της. Δεν άργησαν να αναπτύξουν και τα δικά τους δορυφορικά συστήματα η Κίνα, με το BeiDou, καθώς και η Ευρωπαϊκή Ένωση, με το Galileo.

1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ GNSS

1.1 Παγκόσμια Συστήματα GNSS

Τα Παγκόσμια Συστήματα Δορυφορικής Πλοήγησης (GNSS) αποτελούνται από δορυφόρους σε τροχιά γύρω από την Γη, οι οποίοι στέλνουν σήματα στους χρήστες, ώστε να υπολογίζεται μέσω μετρήσεων αποστάσεων η θέση τους. Για να μπορέσουν να λειτουργήσουν οι δορυφόροι, χρειάζεται να έχουν επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου, το οποίο μέσω κεραιών τηλεπικοινωνιών (ενημέρωση μηνύματος πλοήγησης/ναυσιπλοΐας κάθε μερικές ώρες), τους στέλνει τα στοιχεία των δορυφορικών τροχιών και άλλες χρήσιμες ποσότητες, όπως οι παράμετροι διόρθωσης του δορυφορικού χρόνου για τον συγχρονισμό όλων των δορυφορικών ρολογιών με το σύστημα χρόνου του εκάστοτε συστήματος.

Τα μέχρι σήμερα υπάρχοντα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης είναι τα εξής:

- GPS (Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής)
- GLONASS (Ρωσία)
- BeiDou (Κίνα)
- Galileo (Ευρώπη)

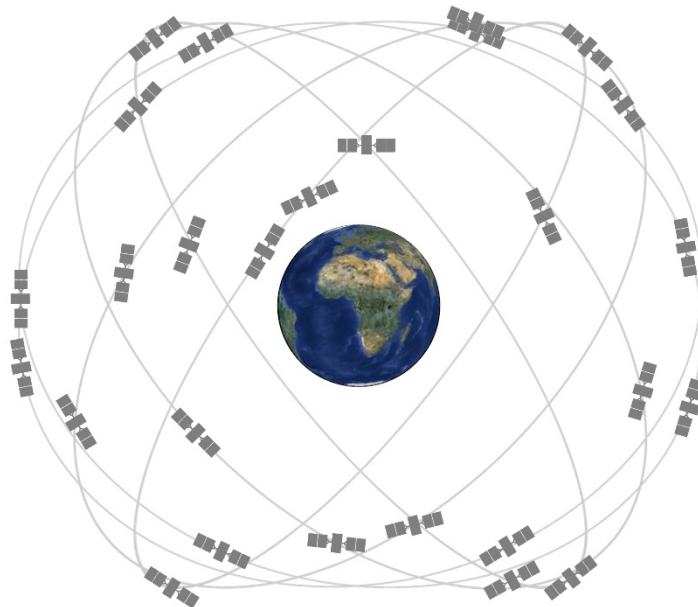
1.2 GPS

Το NAVSTAR Global Positioning System (GPS) σχεδιάστηκε τη δεκαετία του 1970 και ο αρχικός σχεδιασμός του δορυφορικού του τμήματος προέβλεπε 21 δορυφόρους, ενώ από τα τέλη του 1993 ο αριθμός τους είναι σταθερά πάνω από 24 (*Φωτίου και Πικριδάς, 2012*). Σήμερα έχει 31 δορυφόρους. Οι δορυφόροι είναι τοποθετημένοι σε 6 τροχιακά επίπεδα (Εικόνα 1-2), τα οποία σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 60° στο ισημερινό επίπεδο και έχουν γωνία κλίσης περίπου 55° ως προς το ισημερινό επίπεδο. Ο δορυφορικός σχεδιασμός έχει τέτοια διάταξη ανά τροχιακό επίπεδο, ώστε από κάθε σημείο της γήινης επιφάνειας να λαμβάνεται δορυφορικό σήμα από τουλάχιστον 4 δορυφόρους, θεωρώντας ότι δεν παρεμβάλλονται εμπόδια μεταξύ δέκτη και δορυφόρων και ταυτόχρονα να υπάρχει όσο το δυνατόν καλύτερη γεωμετρική μορφή

για τον προσδιορισμό θέσης. Η περίοδος περιφοράς κάθε δορυφόρου είναι μισή αστρική μέρα, δηλαδή 12 ώρες σε αστρικό χρόνο (Φωτίου και Πικριδάς, 2012).

Το τμήμα χρηστών αποτελείται από όλους τους χρήστες (πολίτες και στρατιωτικό προσωπικό) και τους δέκτες GPS, οι οποίοι υπολογίζουν την απόσταση από κάθε δορυφόρο σύμφωνα με τη Οδιάρκεια ταξιδιού του σήματος από τον δορυφόρο στον δέκτη.

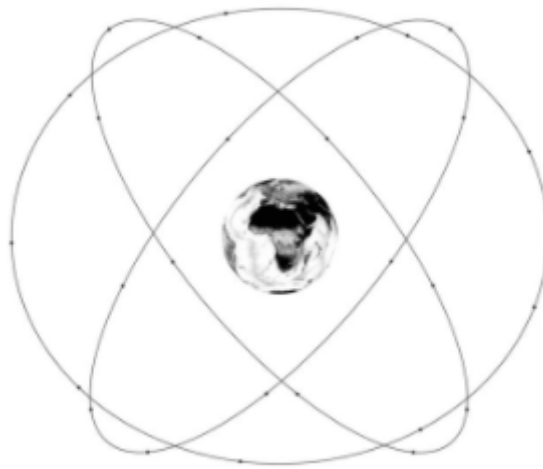
Για να μπορέσουν να λειτουργήσουν οι δορυφόροι, χρειάζεται να υπάρχει επικοινωνία με το τμήμα ελέγχου, το οποίο αποτελείται από ένα παγκόσμιο δίκτυο επίγειων σταθμών παρακολούθησης σε διάφορα μέρη της Γης. Οι επίγειοι σταθμοί παρακολούθησης μετρούν σήματα από τους δορυφόρους (Space Vehicle-SV) τα οποία ενσωματώνουν κάποια τροχιακά μοντέλα για κάθε δορυφόρο. Με βάση τα μοντέλα αυτά υπολογίζονται ακριβή δεδομένα σχετικά με τις τροχιές και τις διορθώσεις-προσαρμογές που πρέπει να γίνουν στα ρολόγια των SVs, ώστε να προσαρμόζονται στον GPS χρόνο. Ο σταθμός που ασκεί τον κύριο έλεγχο “φορτώνει” τέτοιου είδους δεδομένα στα SVs και αυτά με τη σειρά τους στέλνουν υποσύνολα αυτών στους δέκτες GPS μέσω ραδιοσημάτων.



Εικόνα 1-2: Σχηματισμός δορυφόρων GPS (Gps.gov)

1.4 GLONASS

Το σύστημα δορυφορικού εντοπισμού της Ρωσίας, GLONASS, είναι το δεύτερο κατά σειρά που τέθηκε σε λειτουργία. Σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό του συστήματος, περιλαμβάνει 24 δορυφόρους (21+3 εφεδρικούς), ισοκατανεμημένους σε τρία τροχιακά επίπεδα με οχτώ δορυφόρους στο κάθε ένα. Οι δορυφόροι διατηρούν μια σχεδόν κυκλική τροχιά με κλίση $64,8^\circ$ ως προς το ισημερινό επίπεδο (Εικόνα 1-3), περίοδο περιστροφής 11 ώρες και 15 λεπτά σε αστρικό χρόνο και σε ύψος 19.100χλμ πάνω από την επιφάνεια της Γης (Φωτίου και Πικριδάς, 2012).

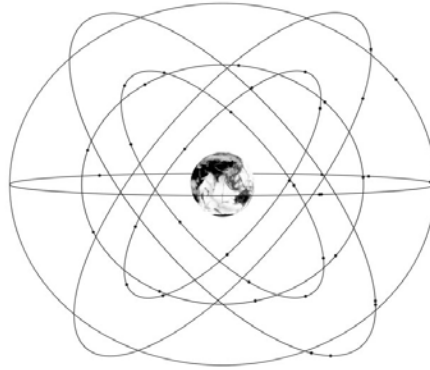


Εικόνα 1-3: Σχηματισμός δορυφόρων Glonass (Reid, 2017)

1.5 BeiDou

Σύμφωνα με το γραφείο πληροφοριών της Κίνας, το δορυφορικό σύστημα πλοήγησης της Κίνας, BeiDou, αναπτύχθηκε σε 3 στάδια κατασκευής. Το BeiDou 1, ξεκίνησε το 1994 και το 2000 εκτόξευσε δύο γεωστατικούς δορυφόρους (GEO). Το σύστημα παρείχε στους χρήστες προσδιορισμό θέσης και χρόνου στην περιοχή της Κίνας. Ο τρίτος γεωστατικός (GEO) δορυφόρος εκτοξεύτηκε το 2003 για να ενισχύσει την απόδοση του ήδη υπάρχοντος συστήματος. Το BeiDou 2, ξεκίνησε το 2004 και μέχρι το τέλος του 2012 είχε συνολικά 14 δορυφόρους και πιο συγκεκριμένα 5 GEO (Geostationary Orbit), 5 IGSO (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit), και 4 MEO (Medium Earth Orbit), προσφέροντας κάλυψη στην περιοχή Ασίας - Ειρηνικού (www.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument).

Το BeiDou 3 αποτελεί το τρίτο και τελευταίο στάδιο κατασκευής του συστήματος BeiDou (Εικόνα 1-4). Σήμερα υπάρχουν 48 λειτουργικοί δορυφόροι BeiDou σύμφωνα με την ιστοσελίδα GNSS planning οι οποίοι είναι MEO (Medium Earth Orbit), IGSO (Inclined Geosynchronous Orbit), GEO (Geostationary Orbit).



Εικόνα 1-4: Σχηματισμός δορυφόρων BeiDou (Reid,2017)

1.6 Galileo

Το δορυφορικό σύστημα της Ευρώπης, το Galileo, σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό θα αποτελούταν από 30 (27 λειτουργικούς και 3 εφεδρικούς) δορυφόρους, τοποθετημένους σε τρία τροχιακά επίπεδα σε μέση γήινη τροχιά με γωνία κλίσης 56° ως προς το ισημερινό επίπεδο (Εικόνα 1-5), περίοδο περιφοράς περίπου 14 ώρες σε αστρικό χρόνο και ύψος τροχιάς περίπου 23.600χλμ (Φωτίου και Πικριδάς, 2012). Επί του παρόντος, είναι ενεργοί 26 δορυφόροι.

Η ανάπτυξη του συστήματος ξεκίνησε με την εκτόξευση 2 δοκιμαστικών δορυφόρων GIOVE-A και GIOVE-B. Οι δοκιμαστικοί δορυφόροι GIOVE-A και GIOVE-B εκτοξεύτηκαν το 2005 και το 2008, αντίστοιχα (Πίνακας 1-1). Ο GIOVE-A ζύγιζε 600kg, η ισχύς του έφτανε τα 700W και η διάρκεια ζωής του υπολογίστηκε περί τα 2 χρόνια. Ο GIOVE-B ζύγιζε 523kg και είχε ίδια ισχύ και διάρκεια ζωής με τον GIOVE-A. Οι δοκιμαστικοί δορυφόροι δημιουργήθηκαν για να δοκιμαστούν στην πράξη οι αποδόσεις των δορυφόρων Galileo, όπως επίσης και η ικανότητά τους να ελέγχουν την MEO (Medium Earth Orbit), (Φωτίου και Πικριδάς, 2012).

Πίνακας 1-1

Στοιχεία δορυφόρων Giove-A και Giove-B

Satellite	Launch date	Status
Giove-A	28/12/2005	Retired 30/03/2012
Giove-B	26/04/2008	Retired 23/07/2012

Μετά τους δοκιμαστικούς εκτοξεύτηκαν οι δορυφόροι IOV (In Orbit Validation), στους οποίους συμπεριλαμβάνονται οι δορυφόροι E11, E12, E19 και E20 (Πίνακας 1-2), που εκτοξεύτηκαν το 2011 και το 2012. Κάθε IOV δορυφόρος, είναι εξοπλισμένος με ανακλαστήρα laser, για να επιτυγχάνει τροχιακό καθορισμό υψηλής ακρίβειας (www.esa.int/Applications/Navigation).

Ο κύριος λόγος κατασκευής των δορυφόρων Galileo IOV, ήταν η δοκιμαστική λειτουργία του διαστημικού τμήματος, του επίγειου τμήματος, του τμήματος χρήστη, όπως επίσης των υπηρεσιών προσδιορισμού θέσης, μέτρησης ταχύτητας και μέτρησης χρόνου του όλου συστήματος. Επί του παρόντος, είναι λειτουργικοί οι 3 από τους 4 IOV δορυφόρους (www.esa.int/Applications/Navigation)

Πίνακας 1-2

Στοιχεία δορυφόρων IOV

Satellite	Launch date	Status
Galileo-IOV FM1	21/10/2011	Operational
Galileo-IOV FM2	21/10/2011	Operational
Galileo-IOV FM3	12/10/2012	Operational
Galileo-IOV FM4	12/10/2012	Not Available

Η σειρά δορυφόρων Galileo FOC (Full Operational Capability – Πίνακας 1-3), είναι οι κατ'εξοχήν επιχειρησιακοί δορυφόροι του συστήματος Galileo και η πρώτη εκτόξευση έγινε το 2014. Σύμφωνα με τον σχεδιασμό της E.E., όλο το σύμπλεγμα δορυφόρων του

συστήματος Galileo θα αποτελείται από τους FOC δορυφόρους, οι οποίοι έχουν διάρκεια ζωής περί τα 12 χρόνια (www.esa.int/Applications/Navigation)

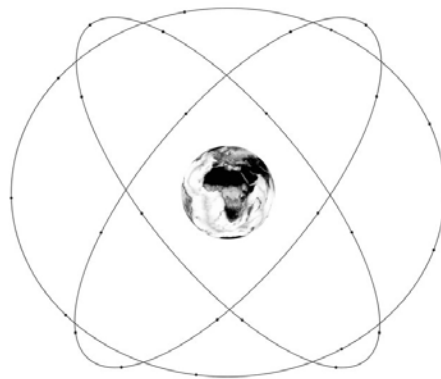
Πίνακας 1-3

Στοιχεία δορυφόρων FOC

Satellite	Launch date	Status
Galileo-FOC FM1	22/08/2014	Not Usable
Galileo-FOC FM2	22/08/2014	Not Usable
Galileo-FOC FM3	27/03/2015	Operational
Galileo-FOC FM4	27/03/2015	Not Usable
Galileo-FOC FM5	11/09/2015	Operational
Galileo-FOC FM6	11/09/2015	Operational
Galileo-FOC FM8	17/12/2015	Operational
Galileo-FOC FM9	17/12/2015	Operational
Galileo-FOC FM10	24/05/2016	Operational
Galileo-FOC FM11	24/05/2016	Operational
Galileo-FOC FM12	17/11/2016	Operational
Galileo-FOC FM13	17/11/2016	Operational
Galileo-FOC FM14	17/11/2016	Operational
Galileo-FOC FM14	17/11/2016	Operational
Galileo-FOC FM15	12/12/2017	Operational
Galileo-FOC FM16	12/12/2017	Operational
Galileo-FOC FM17	12/12/2017	Operational
Galileo-FOC FM18	12/12/2017	Operational
Galileo-FOC FM19	25/07/2018	Operational
Galileo-FOC FM20	25/07/2018	Operational

Satellite	Launch date	Status
Galileo-FOC FM21	25/07/2018	Operational
Galileo-FOC FM22	25/07/2018	Operational
Galileo-FOC FM23	05/12/2021	Under Commissioning
Galileo-FOC FM24	05/12/2021	Under Commissioning

Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του συστήματος αυτού, που δεν εμφανίζεται σε κανένα άλλο δορυφορικό σύστημα, είναι ότι εκτός από την κύρια χρησιμότητά του σαν σύστημα εντοπισμού, διαθέτει επιπλέον και λειτουργία έρευνας και διάσωσης (Search And Rescue). Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, ο χρήστης θα μπορεί να στέλνει από τον πομπό του σήμα κινδύνου στον δορυφόρο, ο οποίος θα το μεταδίδει στο Κέντρο Συντονισμού Διάσωσης μέσω αναμεταδότη και ταυτόχρονα θα ενημερώνει τον χρήστη ότι η μετάδοση έγινε με επιτυχία. Οι εκτοξεύσεις αναμένεται να ολοκληρωθούν το 2025, οπότε και αναμένεται να παρέχει διαθεσιμότητα υψηλού επιπέδου και προσδιορισμό θέσης στο ένα μέτρο περίπου (Φωτίου και Πικριδάς, 2012). Σύμφωνα με την ιστοσελίδα της ESA, οι υπηρεσίες του δορυφορικού συστήματος Galileo θα βελτιώσουν την ποιότητα ζωής και τις επιχειρήσεις σε όλη την Ευρώπη, δίνοντας νέες δυνατότητες στη δορυφορική πλοήγηση (π.χ στην πλοήγηση των πλοίων μέσα από στενά κανάλια).



Εικόνα 1-5: Σχηματισμός δορυφόρων Galileo (Reid,2017)

2. ΑΤΟΜΙΚΑ ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΑ

2.1 Ατομικά πρότυπα συχνότητας και ατομικά χρονόμετρα

Ένα ατομικό πρότυπο συχνότητας (Atomic Frequency Standard - AFS) είναι μια συσκευή η οποία ανήκει στην κατηγορία των προτύπων συχνότητας (frequency standards) και χαρακτηρίζεται από εξαιρετικές αποδόσεις στην σταθερότητα συχνότητας και στην ακρίβεια. Η λειτουργία τους βασίζεται σε μία απλή ιδιότητα των ατόμων και των μορίων: τα άτομα/μόρια εκπέμπουν και απορροφούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε συγκεκριμένες σταθερές συχνότητες, οι οποίες έχουν σχέση με τη δομή τους. Η συχνότητα αυτή μετριέται σε Hertz. Η συχνότητα απορρόφησης/εκπομπής του ατόμου ή του μορίου παίζει τον αντίστοιχο ρόλο της συχνότητας ταλάντωσης του εκκρεμούς, δίνοντας την αντίστοιχη ακρίβεια μέτρησης χρόνου στα ρολόγια αυτά.

Οι περισσότερες βιομηχανικές και διαστημικά προσανατολισμένες κατασκευές, εστιάζουν στα «κλασσικά τρία» (*Vanier and Tomescu, 2015*) ατομικά πρότυπα συχνότητας: καισίου (Cs), MASER υδρογόνου (H-MASER) και ρουβιδίου (Rb). Επομένως, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι όλα τα διαστημικά ατομικά πρότυπα συχνότητας (SAFS- Space Atomic Frequency Standards) που έχουν τεθεί σε τροχιά ή έχουν σταλεί στο διάστημα, ανήκουν σε ένα από τα «κλασσικά τρία».

Οι προδιαγραφές των επίγειων ατομικών προτύπων συχνότητας και των διαστημικών προτύπων συχνότητας διαφέρουν. Πρώτον, τα διαστημικά πρότυπα συχνότητας πρέπει να είναι γενικώς μικρότερα, ελαφρότερα και να καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια από τα αντίστοιχα επίγεια. Δεύτερον, πρέπει να λειτουργούν σε απουσία ατμόσφαιρας (ελεγχόμενης ατμόσφαιρας), πρέπει να είναι ανθεκτικά στην εκτόξευση, όπως επίσης και στην ιονίζουσα ακτινοβολία του διαστήματος, αλλά και αξιόπιστα καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής. Παράλληλα, τα διαστημικά πρότυπα που χρησιμοποιούνται από τα GNSS απαιτείται να επιτυγχάνουν υψηλή σταθερότητα στην απόδοσή τους, της τάξεως του 10^{-14} κατά την διάρκεια μίας μέρας (Droz et al., 2009)

2.2 Ατομικός χρόνος

Σύμφωνα με τον αστροφυσικό και καθηγητή του Ε.Μ.Π., Ρ. Κορακίτη, ο Διεθνής Ατομικός Χρόνος (Temps Atomique International) είναι μια πρακτική κλίμακα χρόνου που βασίζεται όσο το δυνατόν καλύτερα στον ορισμό του δευτερολέπτου SI. Εκπληρώνει τις απαιτήσεις σε ακρίβεια, μακροπρόθεσμη σταθερότητα και αξιοπιστία. Το δευτερόλεπτο SI και ο TAI χρησιμοποιούνται ως βάση για παρεμβολή και πρόβλεψη σε άλλες κλίμακες χρόνου. Ο TAI είναι μία συντονισμένη κλίμακα χρόνου που έχει ως μονάδα της το δευτερόλεπτο SI στο γεωειδές. Ο όρος «συντονισμένη κλίμακα» σημαίνει μια κλίμακα χρόνου κατασκευασμένη από ένα κατάλληλο συνδυασμό πολλών κλιμάκων χρόνου, που υλοποιούνται από διάφορες συσκευές. Ο TAI προκύπτει από την ανάγνωση πολλών ατομικών χρονομέτρων, κατανεμημένων σε όλη τη Γη, μέσω μιας συγκεκριμένης στατιστικής διαδικασίας, αφού αφαιρεθούν οι συστηματικές διαφορές αναμεσά τους. Ακριβέστερα, ο υπολογισμός του TAI γίνεται συνδυάζοντας δεδομένα από όλα τα χρονόμετρα ακριβείας (πρότυπα χρονόμετρα καισίου ή MASER Υδρογόνου) που συμμετέχουν στην υλοποίησή του. Η διαθεσιμότητα, η αξιοπιστία και η βραχυπρόθεσμη σταθερότητα του TAI εξασφαλίζονται από έναν μεγάλο αριθμό εμπορικών χρονομέτρων, ενώ η ακρίβεια και η μακροπρόθεσμη σταθερότητα παρέχονται από εργαστηριακά χρονόμετρα καισίου και maser Υδρογόνου (Κορακίτης, 2008).

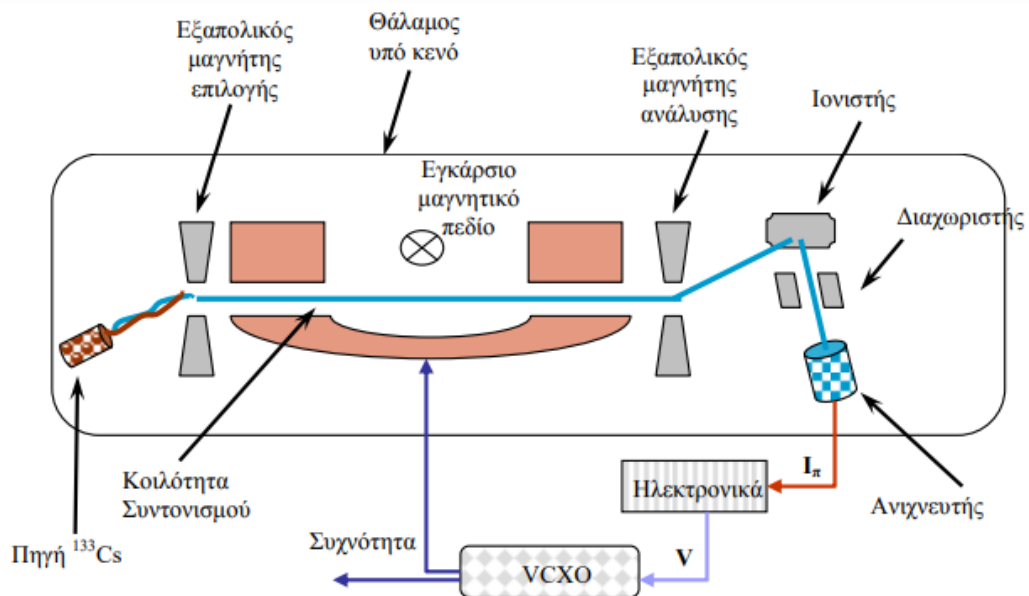
2.3 Είδη Ατομικών Προτύπων Συχνότητας

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.1 υπάρχουν τρία είδη χρονομέτρων, το ρουβίδιο (Rb), το καισίο (Cs) και το MASER υδρογόνου (PHM) (Κορακίτης, 2008).

2.3.1 Ατομικό πρότυπο συχνότητας καισίου

Σύμφωνα με τον Σαραφίδη (2008) ,η αρχή λειτουργίας ενός προτύπου Cs παρουσιάζεται στην εικόνα 2-1. Ένας ειδικός φούρνος δημιουργεί ένα ρεύμα ατόμων, το οποίο περνάει από έναν εξαπολικό μαγνήτη. Το μαγνητικό πεδίο διαχωρίζει τη δέσμη των ατόμων ανάλογα με την ενεργειακή τους κατάσταση: τα άτομα που βρίσκονται στο ενεργειακό επίπεδο με κβαντικό αριθμό $F=4$ κατευθύνονται προς τη μικροκυματική κοιλότητα συντονισμού. Εκεί ακτινοβολούνται δύο φορές (μέθοδος Ramsey), με αποτέλεσμα μερικά από αυτά

να αλλάζουν κατάσταση. Αυτά ακριβώς τα άτομα που έχουν υποστεί την μετάβαση κατευθύνονται από τον δεύτερο μαγνήτη επιλογής προς έναν ιονιστή και στην συνέχεια καταμετρούνται με έναν ανιχνευτή ιονισμού. Η ίδια γενική αρχή λειτουργίας ισχύει για όλα τα ατομικά πρότυπα. Η μικροκυματική κοιλότητα σαρώνεται με μια σειρά από συχνότητες και παρακολουθείται η απόκριση του ταλαντωτή. Όταν η συχνότητα που εφαρμόζεται στην κοιλότητα συντονισμού ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα μετάπτωσης μεταξύ των δύο ενεργειακών επιπέδων, τότε το σήμα του πολλαπλασιαστή εμφανίζει μία κορυφή με φασματικό πλάτος αντιστρόφως ανάλογο του χρόνου που χρειάζονται τα άτομα για να διασχίσουν τη μικροκυματική κοιλότητα (Σαραφίδης *et al*, 2007).



Εικόνα 2-1: Αρχή λειτουργίας ατομικού προτύπου (Σαραφίδης, 2008)

Λίγο μετά το 1967, τέσσερα ατομικά χρονόμετρα καϊσίου πέταξαν σε εμπορικές πτήσεις ανά τον κόσμο, στο λεγόμενο «Hafele-Keating experiment», με σκοπό την παρουσίαση των επιπτώσεων της θεωρίας της σχετικότητας. Τα χρονόμετρα ήταν τοποθετημένα σε αεροπλάνα τα οποία πετούσαν ανά τον κόσμο σε αντίθετες κατευθύνσεις. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1977, δύο ατομικά χρονόμετρα δέσμης καϊσίου (Cs beam) στάλθηκαν μαζί με τον δορυφόρο NTS-2 σε τροχιά. Έκτοτε, έχουν σταλεί στο διάστημα δεκάδες χρονόμετρα καϊσίου με το

Ρωσικό Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GLONASS) και το αντίστοιχο Αμερικάνικο (GPS).

Το ενδιαφέρον για τα ατομικά χρονόμετρα καισίου (Cs) προκύπτει από την ευρεία διαθεσιμότητα Cs στην Γη, όπως επίσης και στο χαμηλό του σημείο τήξης (*Vanier and Audoin, 2005*). Σε σύγκριση με τα χρονόμετρα ρουβιδίου και υδρογόνου, έχουν χαμηλό μακροπρόθεσμο frequency drift, πετυχαίνοντας έτσι εξαιρετική μακροπρόθεσμη σταθερότητα (*Microsemi, 2020, Batori, 2020*).

2.3.2 Ατομικό πρότυπο συχνότητας ρουβιδίου

Τα ατομικά χρονόμετρα ρουβιδίου (RAFS) ήταν τα πρώτα που εξετάστηκαν σε υποτροχιακή πτήση το 1961. Είναι επίσης τα πρώτα SAFS που τέθηκαν σε τροχιά μαζί με τον δορυφόρο NTS-1, τις πρώιμες μέρες του Global Positioning System (GPS) το 1974. Τα ατομικά χρονόμετρα ρουβιδίου είναι τα πρώτα και μοναδικά SAFS που έχουν σταλεί στο βαθύ διάστημα, στην αποστολή των Cassini-Huygens το 1977 (*Batori, et al. 2020*).

Μέχρι και σήμερα, το μεγάλο ενδιαφέρον που προκύπτει για τα RAFS πηγάζει από τον μικρό τους όγκο, το χαμηλό τους κόστος και τη χαμηλή τους κατανάλωση σε ενέργεια, εν συγκρίσει με αυτή του καισίου (Cs) και του υδρογόνου (PHM). Εξίσου σημαντική συμβολή στην αυξημένη ζήτηση έχει και η αυξημένη διάρκεια ζωής (*Batori, et al. 2020*).

Σε ότι αφορά την απόδοση των ατομικών προτύπων ρουβιδίου, πρέπει να διακρίνουμε δύο κατηγορίες, τη βραχυπρόθεσμη και την μακροπρόθεσμη σταθερότητα. Η βραχυπρόθεσμη σταθερότητα περιορίζεται από τον παράγοντα της ποιότητας του σήματος του ατομικού ταλαντωτή (atomic resonance) και την αναλογία signal to noise (SNR) η μακροπρόθεσμη σταθερότητα επηρεάζεται από μεταβολές της συχνότητας που μπορεί να προκαλούνται από εξωτερικούς παράγοντες που επιδρούν στο χρονόμετρο. (*Batori, et al. 2020*).

2.3.3 Ατομικό πρότυπο συχνότητας υδρογόνου

Το πρώτο ενεργό χρονόμετρο υδρογόνου (H) στάλθηκε στο διάστημα το 1976 για λιγότερες από 2 ώρες στα πλαίσια του πειράματος “Gravity Probe A experiment” (*Vessot et al., 1980*). Υπάρχουν δύο τύποι ατομικών προτύπων υδρογόνου, το ενεργό και το παθητικό. Το χρονόμετρο στην ενεργητική του μορφή (AHM, active ..), είναι ένα από τα πιο σταθερά SAFS. Παρ’ όλα αυτά, ο μεγάλος του όγκος και η υψηλή του κατανάλωση σε ενέργεια το καθιστούν ιδανικό μόνο για επίγειες και απλές διαστημικές εφαρμογές. Η παθητική του μορφή (PHM), έχει μικρότερο όγκο και κατανάλωση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαστημικές αποστολές (*Batori, et al. 2020*).

2.4 Σταθερότητα ατομικών προτύπων συχνότητας

Υπάρχουν διάφορα μέτρα για να αξιολογείται η σταθερότητα των ατομικών χρονομέτρων. Για την περιγραφή της μακροπρόθεσμης σταθερότητας, χρησιμοποιείται η ολίσθηση (drift) και η γήρανση (aging), δηλαδή η μεταβολή της ολίσθησης με τον χρόνο. Σε βραχυπρόθεσμη μελέτη, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται η μεταβλητότητα Allan (Allan variance) και το επίπεδο flicker (flicker floor). Τέλος, υπάρχει και η Hadamard variance, η οποία, όμως, χρησιμοποιείται στην πράξη σπανιότερα.

2.4.1 Drift

Το drift (ολίσθηση) είναι η μακροπρόθεσμη σταθερότητα (long-term stability) του εκάστοτε ατομικού ρολογιού (*Burt, 2017*) και ο υπολογισμός του προκύπτει από την διαίρεση :

$$\frac{\Delta f}{f} \quad (4.1),$$

όπου Δf η απόκλιση του χρονομέτρου από την συχνότητα και f η συχνότητα που παράγει το σφάλμα σε μία περίοδο χρόνου T (*Misra, Enge, 2001*). Ένα φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί σε ορισμένα ατομικά χρονόμετρα είναι η αλλαγή του drift με την πάροδο του χρόνου και έχει ονομασθεί γήρανση χρονομέτρου (aging).

2.4.2 Allan variance

Προκειμένου να μετρηθεί η σταθερότητα συχνότητας στα ατομικά χρονόμετρα, έπρεπε να βρεθεί ένα νέο είδος μεταβλητότητας, γιατί η κλασική μεταβλητότητα δεν συγκλίνει για κάποιους συχνά παρατηρούμενους θορύβους σε ταλαντωτές. Αντιθέτως, συνεχίζει να αυξάνεται όσο μεγαλώνει το N (μέγεθος δείγματος). Η νέα μεταβλητότητα ονομάστηκε Allan variance προς τιμήν του δημιουργού της, David W. Allan. Η απόκλιση συχνότητας (frequency deviation) δείχνει πόσο ξεφεύγει ο ταλαντωτής από την προβλεπόμενη ονομαστική συχνότητα (f_0) που πρέπει να έχει και ισούται με:

$$\Delta f = f - f_0 \quad (4.2)$$

Η σχετική απόκλιση συχνότητας ορίζεται ως:

$$F = \frac{f - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (4.3)$$

Ένα σφάλμα $\Delta f/f$ του ταλαντωτή θα οδηγήσει σε σφάλμα Δt μετά από μια περίοδο χρόνου T, δηλαδή:

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta t}{T} \quad (4.4)$$

Για μία σειρά μετρήσεων y_i , $i=1, 2, 3, \dots, N$, σχετικών αποκλίσεων συχνοτήτων ενός ταλαντωτή (εξαιτίας τυχαίων διακυμάνσεων) μετρημένων σε N διαδοχικές χρονικές στιγμές που απέχουν μεταξύ τους τ , η μεταβλητότητα Allan θα είναι ως εξής:

$$\sigma_{y(\tau)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (y_{i+1} - y_i)^2 \quad (4.5)$$

2.4.4 Hadamard Variance

Η μεταβλητότητα Allan λειτουργεί καλά για ατομικά χρονόμετρα καισίου, τα οποία δεν έχουν γραμμικό drift. Τα χρονόμετρα ρουβιδίου, όμως, έχουν έντονο γραμμικό drift, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζονται τα αποτελέσματα της Allan variance και η μέτρηση της σταθερότητας να μην είναι ακριβής. Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ένα διαφορετικό μέγεθος για την σταθερότητα συχνότητας, η οποία ξεπερνά τους περιορισμούς της Allan variance. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται Hadamard variance (4.6) και αφαιρεί όποιο γραμμικό σφάλμα υπάρχει (Kaplan, 2005).

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} E[(\bar{y}_{k+2} - 2\bar{y}_{k+1} + \bar{y}_k)^2] \quad (4.6)$$

2.4.5 Σύγκριση διαστημικών προτύπων συχνότητας

Η σύγκριση των διαστημικών προτύπων συχνότητας μπορεί να γίνει μέσω πολλών παραμέτρων και δεν είναι δυνατό να ορίσουμε ένα διαστημικό ατομικό πρότυπο ως «τέλειο». Η σταθερότητα (stability), η ορθότητα (accuracy), το βάρος (weight), το μέγεθος (volume), η κατανάλωση ενέργειας (power demand) και η ευκολία στο να κατασκευαστεί ξανά (intrinsic reproducibility), είναι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν παρθεί η απόφαση για το ποιο SAFS πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε κάποια εφαρμογή. Στον πίνακα 2-1, παρατίθενται ενδεικτικά οι παράμετροι σύγκρισης των SAFS με τις καλύτερες αποδόσεις (Cs, Rb, PHM) (Audoin, Vanier, et al. 1976).

Πίνακας 2-1

Σύγκριση ατομικών χρονομέτρων

Frequency standard	Intrinsic reproducibility	Accuracy	Stability		Weight (kg)
			Short term	Flicker floor	
H maser	10^{-12}	10^{-12}	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-15}$	45
Rb cell			$7 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-13}$	30
Cs beam	$5 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-14}$	30

2.5 Διαστημικά ατομικά πρότυπα συχνότητας δορυφόρων GPS

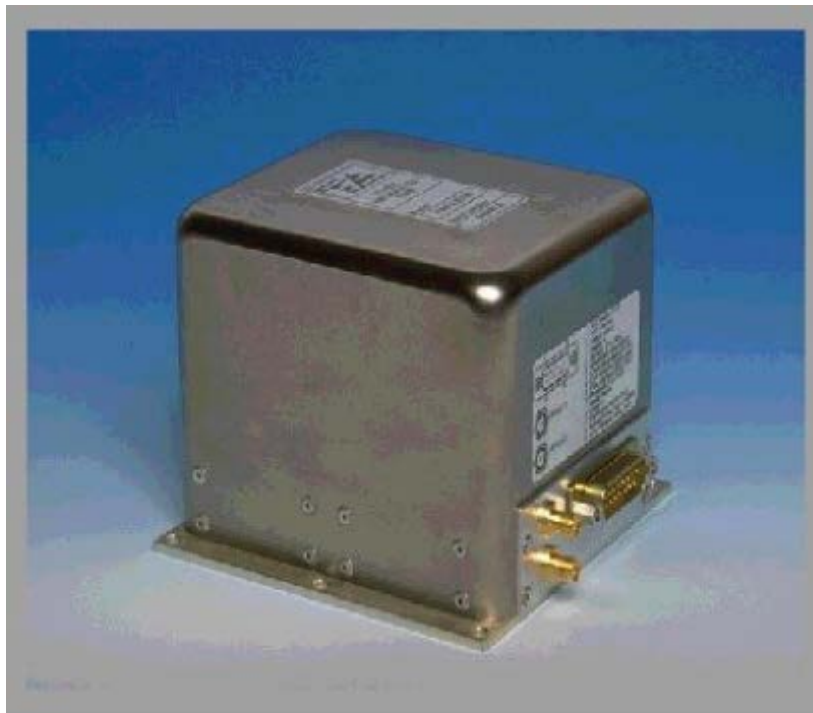
Ο πρώτος δορυφόρος GPS Block I εκτοξεύτηκε το 1978 και ήταν εξοπλισμένος με 2 ατομικά χρονόμετρα ρουβιδίου (RAFS) και 2 καισίου (Cs) (Φωτίου και Πικριδάς, 2012). Οι δορυφόροι Block II τέθηκαν σε τροχιά το 1989, οι Block IIA τον Νοέμβριο του 1990 και οι Block IIR τον Ιανουάριο του 1997, με επίσης χρονόμετρα Rb και 2 χρονόμετρα Cs.

Τον Σεπτέμβριο του 2005 εκτοξεύτηκε ο πρώτος δορυφόρος της σειράς IIR-M (με πρόσθετο πολιτικό και στρατιωτικό σήμα) με 3 ατομικά χρονόμετρα Rb (Φωτίου και Πικριδάς, 2012).

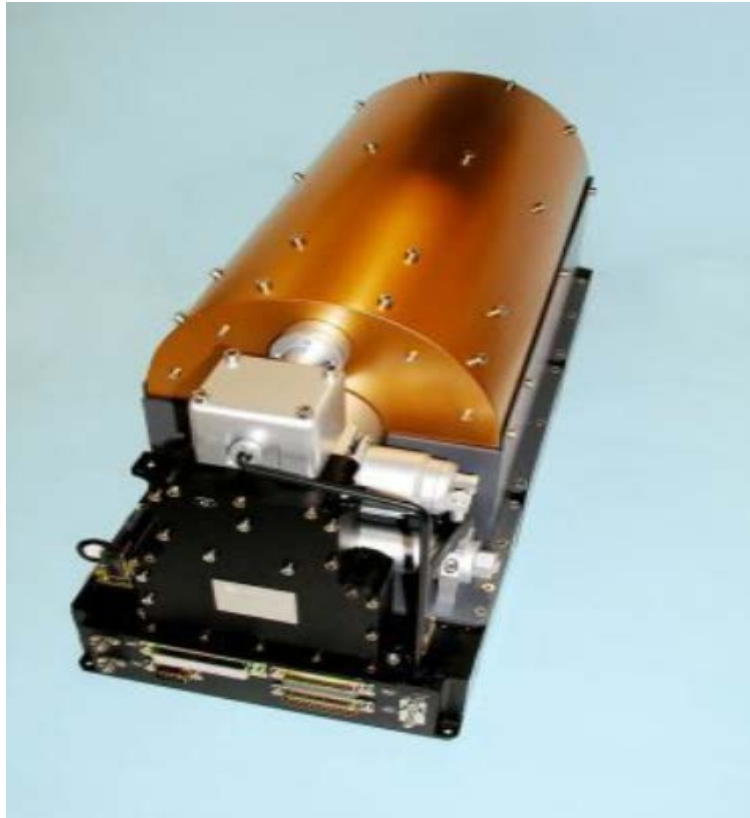
Τον Μάιο του 2010 έγινε η πρώτη εκτόξευση δορυφόρου Block IIF με 2 RAFS και 1Cs (Batori, et al. 2020). Η εκτόξευση του πρώτου δορυφόρου Block III έγινε τον Δεκέμβρη του 2018 και περιείχε 3 RAFS (Batori, et al. 2020). Το 2026 θα πραγματοποιηθεί η εκτόξευση δορυφόρων Block IIIF, η οποία θα ολοκληρωθεί το 2034.

2.6 Διαστημικά ατομικά πρότυπα συχνότητας Galileo

Ο δοκιμαστικός δορυφόρος GIOVE-A ήταν εξοπλισμένος με 2 ατομικά χρονόμετρα ρουβιδίου (Εικόνα 2-2), ενώ ο GIOVE-B με 2 ατομικά χρονόμετρα ρουβιδίου (Rb) και 1 ατομικό χρονόμετρο υδρογόνου (Εικόνα 2-3).



Εικόνα 2-2: Ατομικό χρονόμετρο ρουβιδίου δορυφόρων Galileo (Esa.int, 2022)



Εικόνα 2-3: Ατομικό χρονόμετρο υδρογόνου δορυφόρων Galileo (Esa.Int, 2022)

Η διάρκεια ζωής των δορυφόρων αυτών είχε υπολογιστεί περί τα δύο χρόνια, όμως λόγω του ποιοτικού τους σχεδιασμού, παρατάθηκε η διάρκεια στα 6 χρόνια, με αποτέλεσμα να αποσυρθούν το 2012.

Οι σειρές δορυφόρων IOV και FOC είναι εξοπλισμένες με 2 ατομικά χρονόμετρα υδρογόνου (PHM), και 2 ατομικά χρονόμετρα ρουβιδίου. Σύμφωνα με την ιστοσελίδα της ESA, τα χρονόμετρα υδρογόνου χρησιμοποιούνται ως βασικά χρονόμετρα και σε περίπτωση βλάβης αντικαθίστανται με αυτά του ρουβιδίου (www.esa.int/Applications/Navigation).

3. ΠΡΟΪΟΝΤΑ GNSS

Υπάρχουν φορείς και υπηρεσίες οι οποίες, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα GNSS από όλο τον πλανήτη, παράγουν κάποια προϊόντα για επιστημονική χρήση, όπως είναι οι τροχιές ακριβείας, οι παράμετροι για την ιονόσφαιρα και την τροπόσφαιρα, καθώς και ακριβή σφάλματα για τα δορυφορικά χρονόμετρα, τα οποία μας ενδιαφέρουν για την παρούσα πτυχιακή.

3.1 Φορείς προϊόντων GNSS

Η Διεθνής υπηρεσία GNSS και το Ευρωπαϊκό Κέντρο Προσδιορισμού Τροχιών (Center for Orbit Determination in Europe) είναι οι δύο μεγαλύτερες υπηρεσίες παραγωγής προϊόντων GNSS. Και οι δύο φορείς παρέχουν υψηλής ποιότητας GNSS δεδομένα, προϊόντα και υπηρεσίες για το διεθνές επίγειο σύστημα αναφοράς (ITRS), εφαρμογές εντοπισμού, πλοήγησης και μέτρησης χρόνου, όπως και άλλες εφαρμογές που οφελούν τις επιστήμες και την κοινωνία (www.igs.org). Για τις ανάγκες τις παρούσας πτυχιακής, έχουν αναλυθεί και επεξεργαστεί προϊόντα και των δύο φορέων.

3.1.1 IGS

Η IGS (International GNSS Service) είναι μια εθελοντική ομοσπονδία πολλών κέντρων (IGS analysis centers) ανά τον κόσμο, οι οποίοι αντλούν πληροφορίες από τους μόνιμους σταθμούς GNSS με σκοπό την παραγωγή προϊόντων GNSS ακριβείας. Τα προϊόντα προκύπτουν από τον συνδυασμό αποτελεσμάτων από ανεξάρτητα κέντρα, με αποτέλεσμα να έχουν υψηλή ακρίβεια, ορθότητα, σταθερότητα και αξιοπιστία συγκριτικά με τα αποτελέσματα του κάθε κέντρου ξεχωριστά (www.igs.org).

3.1.2 CODE

Από το 1992, το αστρονομικό ινστιτούτο του πανεπιστημίου της Βέρνης (Astronomical Institute University Berne) λειτουργεί το Κέντρο Προσδιορισμού Τροχιών στην Ευρώπη (Center of Orbit Determination in Europe). Είναι μια σύμπραξη των:

- Αστρονομικό Ινστιτούτο του Πανεπιστημίου της Βέρνης (AIUB, Bern, Switzerland)
- Ελβετικό ομοσπονδιακό γραφείο τοπογραφίας (Swisstopo, Wabern, Switzerland)
- Ομοσπονδιακή υπηρεσία Χαρτογραφίας και Γεωδαισίας (BKG, Frankfurt a. M., Germany) και
- Ινστιτούτο Αστρονομίας και Φυσικής Γεωδαισίας, Τεχνική Σχολή Μονάχου (IAPG/TUM, Munich, Germany).

Το CODE συνεισφέρει με τα προϊόντα του στο έργο της IGS με μία πλήρη και συνεχή επεξεργασία των μετρήσεων των δύο πλήρως λειτουργικών συστημάτων GNSS, δηλαδή του GPS και του GLONASS. Επίσης, συνεισφέρει στο multi-GNSS extension project (IGS MGEX), σύμφωνα με το οποίο επεκτείνει την επεξεργασία και σε άλλα δορυφορικά συστήματα, όπως το GALILEO, το BeiDou και το QZSS (www.aiub.unibe.ch).

3.2 Clock products

Τα κέντρα ανάλυσης ανά τον κόσμο παρέχουν δεδομένα στο συντονιστικό κέντρο ανάλυσης με ημερήσια ή εβδομαδιαία συχνότητα. Το συντονιστικό κέντρο στη συνέχεια συνδυάζει τα δεδομένα για να δημιουργήσει το τελικό προϊόν. Τα παραγόμενα αρχεία clock έχουν δύο μορφές, αρχεία με δεδομένα ανά 5 λεπτά και αρχεία με δεδομένα ανά 30 δευτερόλεπτα. Επίσης, διακρίνονται σε «γρήγορα» (rapid) και «τελικά» (final).

Ο rapid συνδυασμός δεδομένων ρολογιών είναι ένα ημερήσιο παράγωγο, διαθέσιμο περίπου 17 ώρες μετά την λήξη της προηγούμενης UTC μέρας.

Ο final συνδυασμός δεδομένων είναι το πιο υψηλής ποιότητας προϊόν για τα ατομικά χρονόμετρα και αποτελείται από ημερήσια αρχεία clock (clk files), τα οποία παράγονται σε εβδομαδιαία βάση, περίπου 13 ημέρες μετά το τέλος της και είναι διαθέσιμα περίπου 13 μέρες μετά το τέλος της εβδομάδας στην οποία αναφέρονται.

Όλα τα αρχεία clock παρέχονται σε μορφή RINEX (αρχεία ρολογιών, clock files) (www.cddis.nasa.gov). Στην εικόνα 3-1, απεικονίζεται ένα απόσπασμα αρχείου clk: η πρώτη στήλη αντιπροσωπεύει τον τύπο δεδομένων, η δεύτερη στήλη απεικονίζει το rpn (pseudorandom noise), η τρίτη στήλη το έτος, η τέταρτη στήλη τον μήνα, η πέμπτη στήλη την ημέρα, η έκτη στήλη την ώρα, η έβδομη στήλη τα λεπτά, η όγδοη στήλη τα

δευτερόλεπτα, η ένατη στήλη το σήμα, η δέκατη στήλη το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου (sec) και η ενδέκατη την ακρίβεια προσδιορισμού του σφάλματος (sec).

AS G03	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.805344515590E-05	0.403370206923E-10
AS G05	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.169480031335E-03	0.404893791476E-10
AS G06	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.104378866306E-03	0.403482279615E-10
AS G07	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.478810875551E-03	0.404270753349E-10
AS G08	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.144776749225E-04	0.404427841682E-10
AS G09	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.195062374680E-04	0.404027576681E-10
AS G10	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.337073022924E-04	0.419597967167E-10
AS G11	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.619175635403E-03	0.403467591266E-10
AS G12	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.349701584842E-03	0.402668714004E-10
AS G13	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.168122982752E-03	0.405327563651E-10
AS G14	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.183226255496E-04	0.402960260500E-10
AS G15	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.284868422006E-03	0.403418954702E-10
AS G16	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.615655347835E-04	0.405200563606E-10
AS G17	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.195406854136E-03	0.403705118927E-10
AS G18	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.458174461194E-03	0.404661794667E-10
AS G19	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.523285427713E-03	0.403372866786E-10
AS G20	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.374982866135E-03	0.404285805934E-10
AS G21	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.496756763228E-03	0.404319350641E-10
AS G22	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.415484164571E-03	0.404365201641E-10
AS G23	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.147299923980E-03	0.403763801995E-10
AS G24	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.865539052347E-05	0.402738562218E-10
AS G25	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.756801860382E-04	0.403045637066E-10
AS G26	2015	12	01	00	00	0.000000	2	-0.145041343642E-03	0.404081884492E-10
AS G27	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.404184050319E-04	0.405504417725E-10
AS G28	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.485128560389E-03	0.403686440874E-10
AS G29	2015	12	01	00	00	0.000000	2	0.646566808104E-03	0.403439563087E-10

Εικόνα 3-1: Απόσπασμα αρχείου RINEX. clk

3.3 Άλλες υπηρεσίες

Στο πλαίσιο της έρευνας, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία της ιστοσελίδας www.gnssplanning.com, αφού έγινε έλεγχος και διαπιστώθηκε ότι τα στοιχεία προγενέστερων ετών είναι ακριβή.

Προκειμένου να βρεθούν πληροφορίες σχετικά με το είδος του εν ενεργεία χρονομέτρου και του Block στο οποίο ανήκει το εκάστοτε Space Vehicle (SV) στους δορυφόρους GPS, χρησιμοποιήθηκαν αρχεία Advisory από την ιστοσελίδα της navcen και αρχείο atx από την ιστοσελίδα της IGS.

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό έχει γίνει επεξεργασία δεδομένων με σκοπό τον υπολογισμό των παραπάνω παραμέτρων, προκειμένου να συγκριθούν και να αξιολογηθούν. Για να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης στην αξιολόγηση των χρονομέτρων δορυφόρων Galileo, στο πλαίσιο της πτυχιακής εξετάσθηκαν επίσης και τα χρονόμετρα GPS σε όλες τις παραμέτρους και το ίδιο βάθος χρόνου, για όλους τους δορυφόρους GPS.

Για να εξετάσουμε τη συμπεριφορά των ατομικών δορυφορικών χρονομέτρων σε βάθος αρκετών ετών, αποφασίσθηκε να ληφθούν δεδομένα μία φορά τον μήνα. Λαμβάνοντας υπόψη τη σταθερότητα των δορυφορικών ατομικών χρονομέτρων, η προσέγγιση αυτή δεν συνεπάγεται μείωση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Τα χρονόμετρα αυτά έχουν πολύ μικρό drift, οπότε για να δει κανείς την ολίσθηση (drift) και την γήρανση (aging) θα έπρεπε να επεξεργαστεί πολυετή δεδομένα, πράγμα το οποίο θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρο να γίνει στο πλαίσιο μίας πτυχιακής.

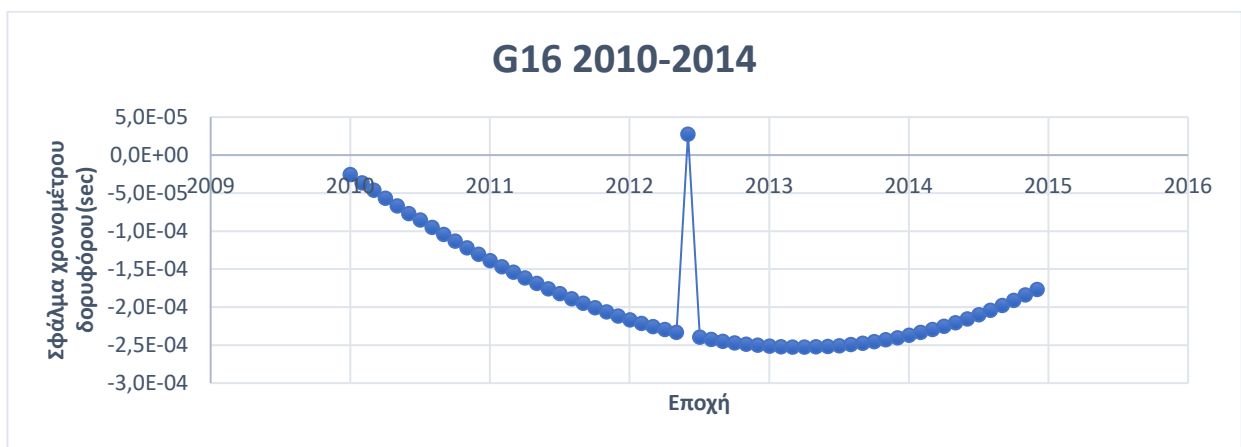
Δεδομένου ότι η διερεύνηση μπορεί να γίνει με αραιά δεδομένα, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν δεδομένα που αφορούν την πρώτη μέρα κάθε μήνα (από την ιστοσελίδα www.cddis.nasa.gov). Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αφορούν το έτος 2010, προκειμένου να συμπεριληφθούν στην έρευνα δορυφόροι από το Block IIA και μεταγενέστεροι αυτού. Ως τέλος της συλλογής δεδομένων ορίστηκε το 2014, γιατί η διάρκεια των πέντε ετών κρίθηκε αρκετή για να εξαχθούν ακριβή αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται στα επόμενα κεφάλαια, ξεχωριστά για GPS και Galileo, δεδομένου ότι το κάθε ένα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Μια σημαντική παράμετρος στην επεξεργασία δεδομένων GPS που λήφθηκε υπόψη, είναι ότι τα PRN (Pseudorandom Noise) ανατίθενται σε διαφορετικά SV (Space Vehicle), γιατί η διάρκεια ζωής του κάθε δορυφόρου είναι περιορισμένη.

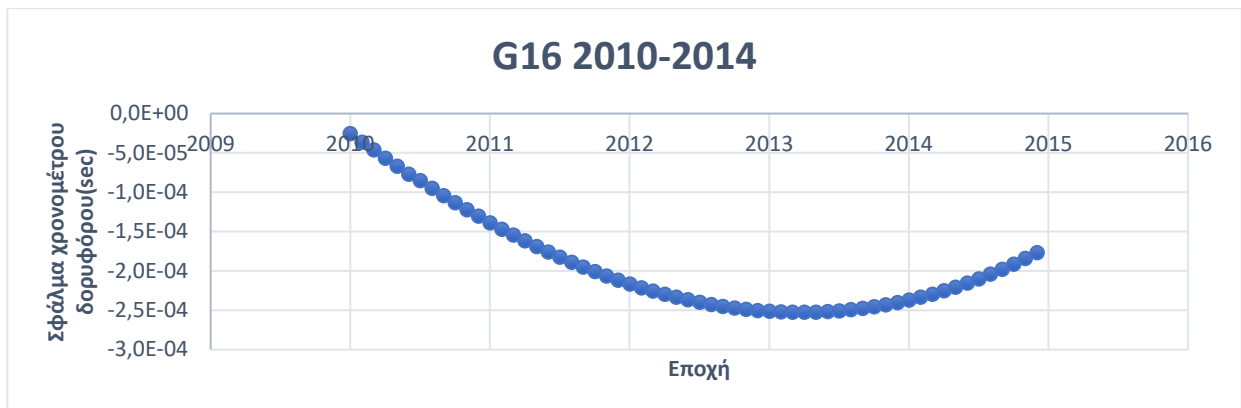
4.1 GPS

Η συλλογή δεδομένων με τα σφάλματα των χρονομέτρων GPS για την περίοδο 2010-2020, έγινε από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Προσδιορισμού Τροχιών (CODE) και τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της μορφής clk (αρχεία clock) ανά 30 δευτερόλεπτα και τύπου final. Για κάθε μήνα, επιλέχθηκε το αρχείο της πρώτης ημέρας και δημιουργήθηκαν διαγράμματα όπως το 4-1.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4-1, η τιμή στην εποχή 2012,41 (1 Ιουνίου του 2012) δεν είναι λογική. Αυτό εξετάσθηκε και εξακριβώθηκε ότι παρουσιάζεται σε όλους τους δορυφόρους τη συγκεκριμένη εποχή (δεν συμπεριλαμβάνονται εδώ για λόγους οικονομίας χώρου) και επειδή μια τέτοια συμπεριφορά δεν εξηγείται εύκολα, αναζητήθηκαν και τα αρχεία της IGS για να γίνει σύγκριση με τα αρχεία από CODE. Αυτό που προέκυψε, εμφανίζεται στο διάγραμμα 4-2. Άρα, συμπεραίνεται ότι εκείνη την εποχή τα clock offsets στα αρχεία clock από CODE δεν είναι σωστά. Όλα τα διαγράμματα που δίνονται στα παρακάτω κεφάλαια είναι με δεδομένα από το Ευρωπαϊκό κέντρο Προσδιορισμού Τροχιών εκτός από τον Ιούνιο του 2012.



Διάγραμμα 4-1: Clock offset του G16 για την περίοδο 2010-2014, με παρουσία απότομης αύξησης τον Ιούνιο του 2012.



Διάγραμμα 4-2: Clock offset του G16 για την περίοδο 2010-2014, μετά από αντικατάσταση της τιμής του Ιουνίου από CODE σε IGS.

4.1.1 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Block IIA

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται τα σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων GPS, οι οποίοι ανήκουν στο Block IIA (δύο χρονόμετρα Rb και δύο

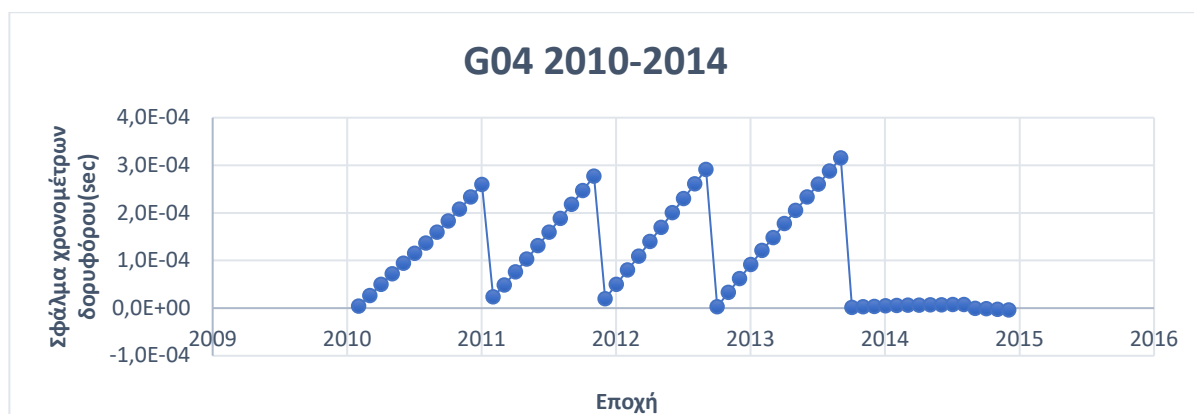
χρονομέτρα Cs), σύμφωνα με το αρχείο atx της IGS (αρχείο που περιλαμβάνει πληροφορίες για το Space Vehicle Number και το Block που έχει ανατεθεί στο εκάστοτε PRN). Μια ακόμα πληροφορία που δίνεται από το αρχείο atx, είναι ότι έχουν το ίδιο SVN για την περίοδο 2010-2014.

Στον πίνακα 4-3 παρουσιάζονται τα PRN με Block IIA και τα SVN τους (Space Vehicle Number). Στα διάγραμμα (4-5, 4-6, 4-7, 4-8) αποτυπώνονται τα σφάλματα των χρονομέτρων

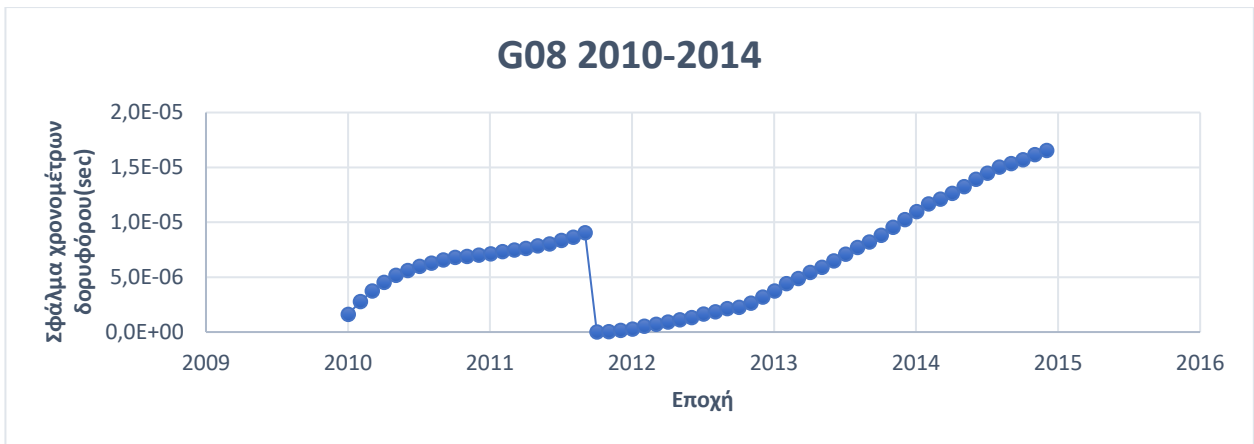
Πίνακας 4-3

Block και SVN δορυφόρων Block IIA

PRN	Block	SVN	Year
G04	IIA	34	1993-2015
G08	IIA	38	1997-2015
G10	IIA	40	1996-2015
G26	IIA	26	1992-2015
G32	IIA	23	2006-2016



Διάγραμμα 4-4: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G04 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-5: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G08 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-6: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G10 για την περίοδο 2010-2015.



Διάγραμμα 4-7: Πορεία σφάλματος χρονομέτρου δορυφόρου G26 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-8: Πορεία σφάλματος χρονομέτρου δορυφόρου G32 για την περίοδο 2010-2014.

Στους δορυφόρους των PRN G04, G08, G10, G26 (διαγράμματα 4-4, 4-5, 4-6 και 4-7) παρατηρούνται απότομες μειώσεις (κοντά στο 0) στο σφάλμα του χρονομέτρου. Η μείωση αυτή εμφανίζεται μετά από μεγάλη άνοδο του σφάλματος και δεν μπορεί να αποδοθεί σε αλλαγή δορυφόρου (Space Vehicle), γιατί σύμφωνα με το atx της IGS, δεν έχει γίνει αλλαγή στο space vehicle τη χρονική περίοδο 2010-2014. Αν και δεν έχει υπάρξει κάποια ανακοίνωση, θα μπορούσε κανείς να υποθέσει ότι έχει γίνει reset στο χρονόμετρο του δορυφόρου για να μην αυξηθεί περαιτέρω το σφάλμα.

Στις αρχές του 2014, το χρονόμετρο του δορυφόρου με PRN G04 αλλάζει απότομα συμπεριφορά, οπότε θα μπορούσε να συμπεράνει κανείς ότι έγινε αλλαγή στο χρονόμετρο που χρησιμοποιούσε.

Δεν φαίνεται να παρατηρείται aging στους δορυφόρους, με εξαίρεση αυτούς με PRN G08 και G32, όπου παρατηρείται έντονα.

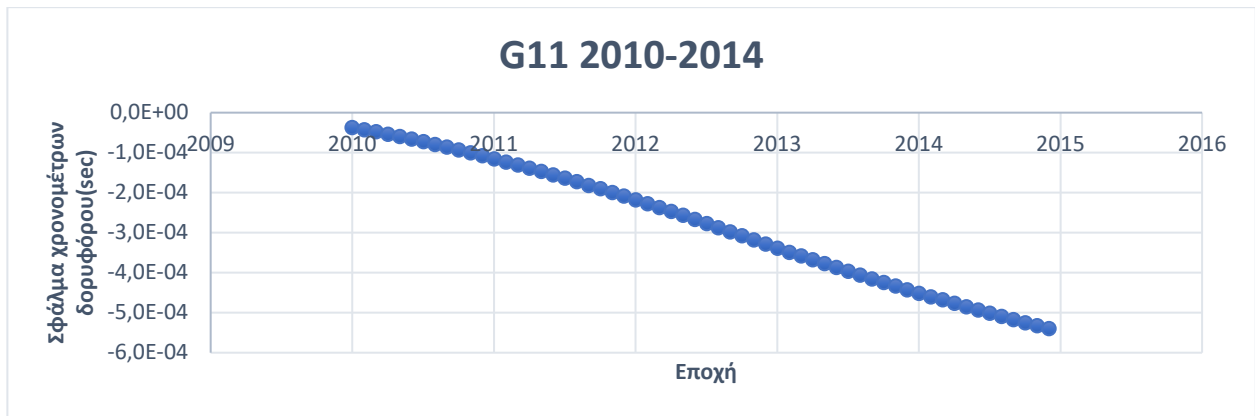
4.1.2 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Block IIR-A

Στα παρακάτω διαγράμματα (4-10, 4-11, 4-13, 4-14, 4-15, 4-16, 4-17) απεικονίζονται τα σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων GPS που ανήκουν στο Block IIR-A, οι οποίοι έχουν τρία χρονόμετρα Rb, για την περίοδο 2010-2014. Οι δορυφόροι αυτοί, σύμφωνα με το αρχείο atx της IGS, ανήκουν στο Block IIR-A και έχουν το ίδιο SVN (Space Vehicle Number) για την περίοδο 2010-2014. Στον πίνακα 4-9 παρουσιάζονται τα PRN με Block IIR-A και τα SVN τους (Space Vehicle Number).

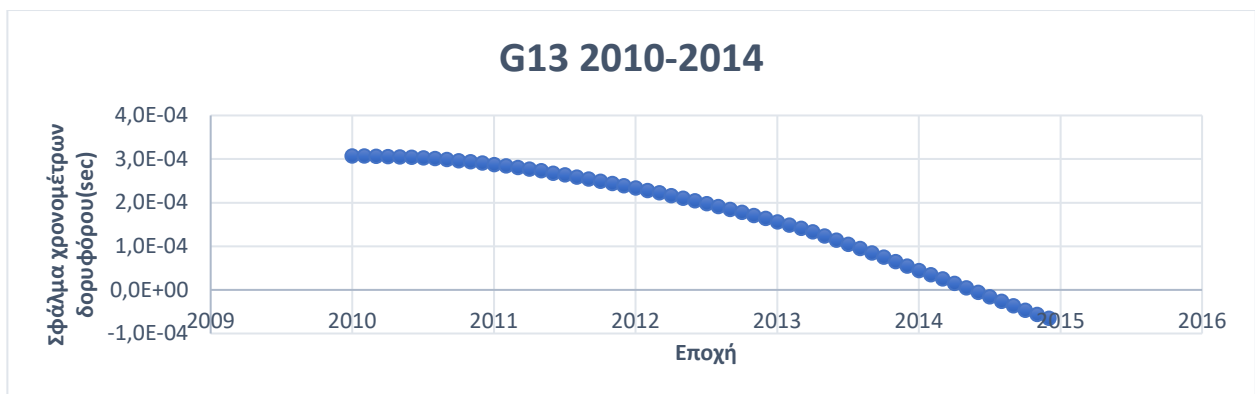
Πίνακας 4-9

Block και SVN δορυφόρων Block IIR-A

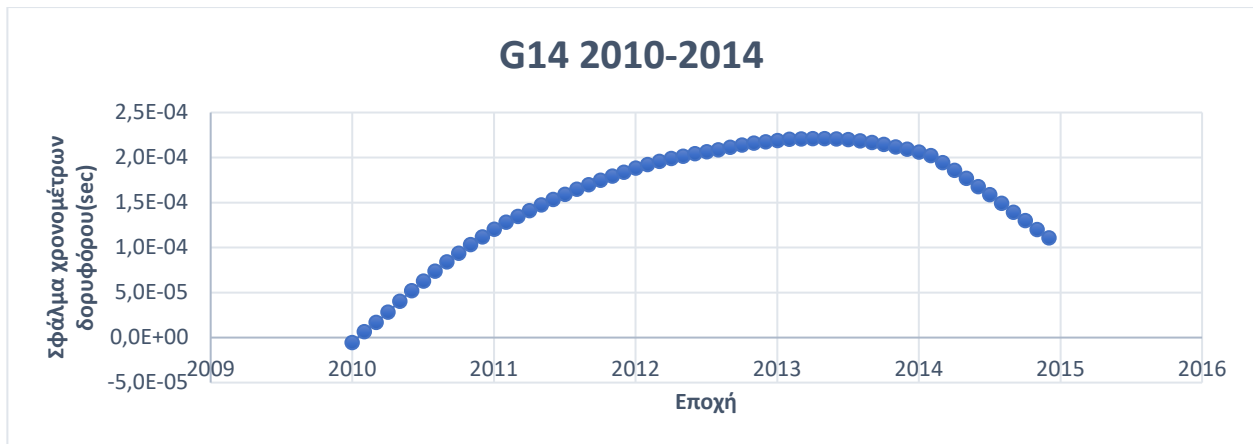
PRN	Block	SVN	Year
G11	IIR-A	46	1999-σήμερα
G13	IIR-A	43	1997-σήμερα
G14	IIR-A	41	2000-2020
G16	IIR-A	56	2003-σήμερα
G18	IIR-A	54	2001-2018
G20	IIR-A	51	2000-σήμερα
G21	IIR-A	45	2003-σήμερα
G28	IIR-A	44	2000-σήμερα



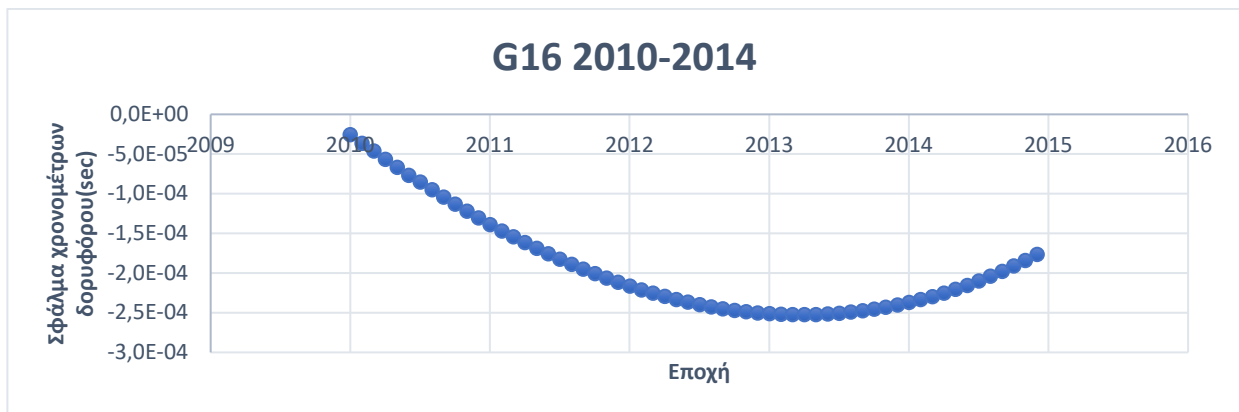
Διάγραμμα 4-10: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G11 για την περίοδο 2010-2014.



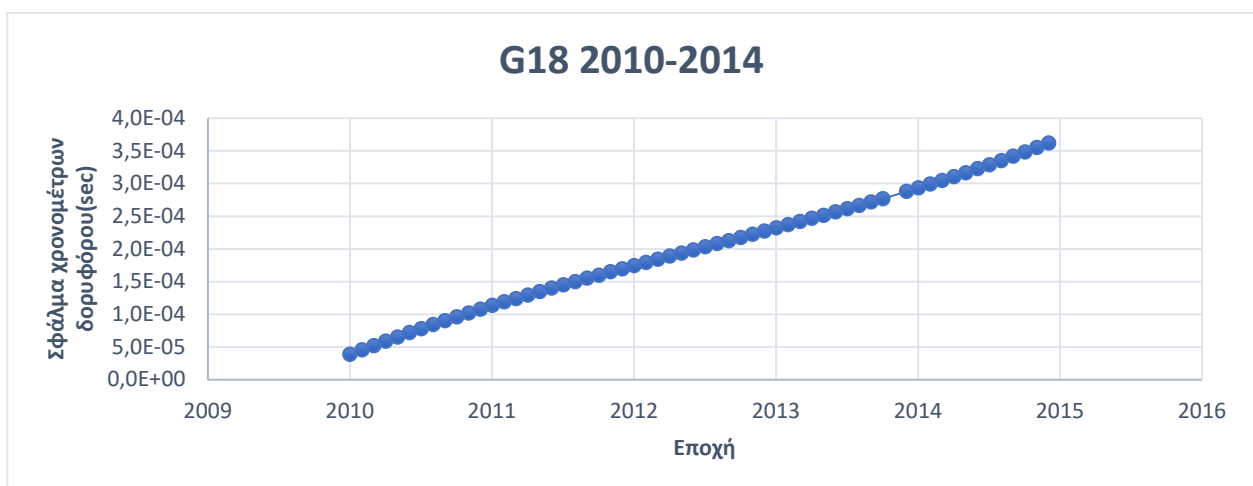
Διάγραμμα 4-11: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G13 για την περίοδο 2010-2014.



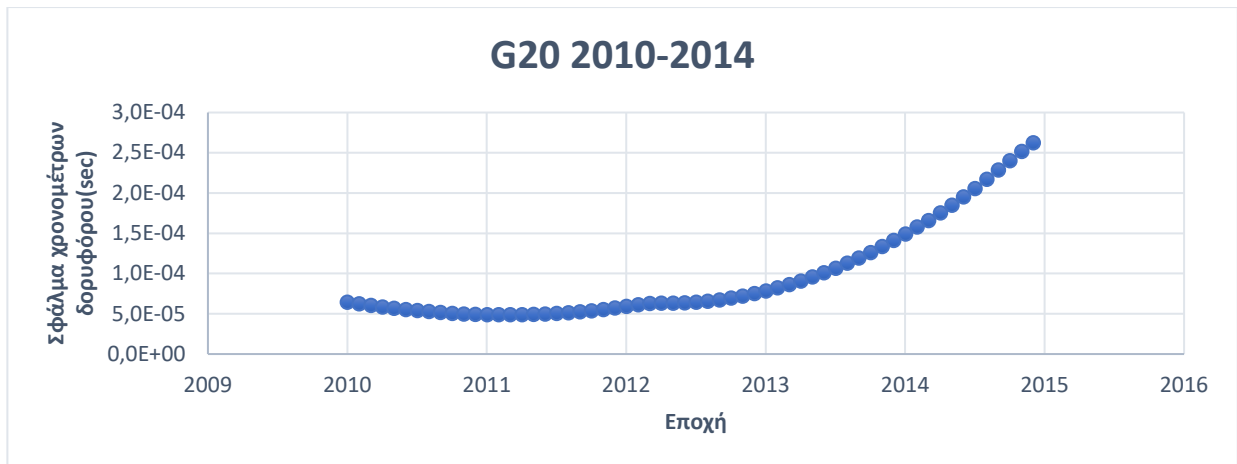
Διάγραμμα 4-12: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G14 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-13: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G16 για την περίοδο 2010-2014.



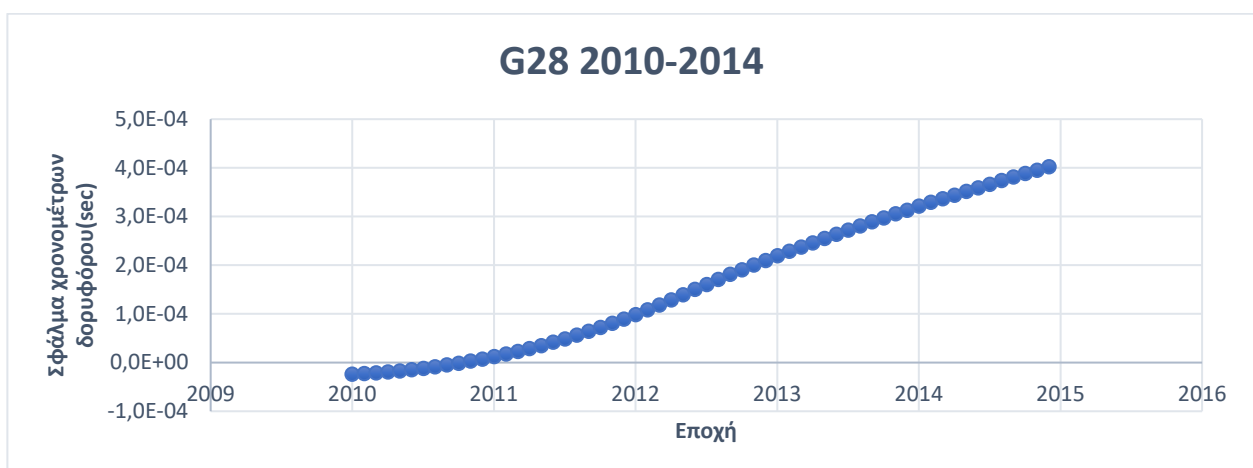
Διάγραμμα 4-14: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G18 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-15: Πορεία σφάλματος χρονόμετρων δορυφόρου G20 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-16: Πορεία σφάλματος χρονόμετρων δορυφόρου G21 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-17: Πορεία σφάλματος χρονόμετρων δορυφόρου G28 για την περίοδο 2010-2014.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα, προκύπτει η κατηγοριοποίησή τους σε δύο ομάδες: στην πρώτη ομάδα ανήκουν τα διαγράμματα 4-10, 4-14, 4-16, 4-17, στα οποία εμφανίζεται γραμμικό drift των δορυφόρων, ενώ στη δεύτερη ομάδα, ανήκουν τα διαγράμματα 4-11, 4-12, 4-13 και 4-15, στα οποία εμφανίζεται aging των δορυφόρων – με άλλα λόγια, αλλάζει το drift τους με το πέρασμα του χρόνου. Η διαφοροποίηση αυτή δεν θα μπορούσε να εξηγηθεί από αλλαγή σε άλλου είδους χρονόμετρο, διότι οι δορυφόροι αυτοί έχουν αποκλειστικά χρονόμετρα ρουβιδίου.

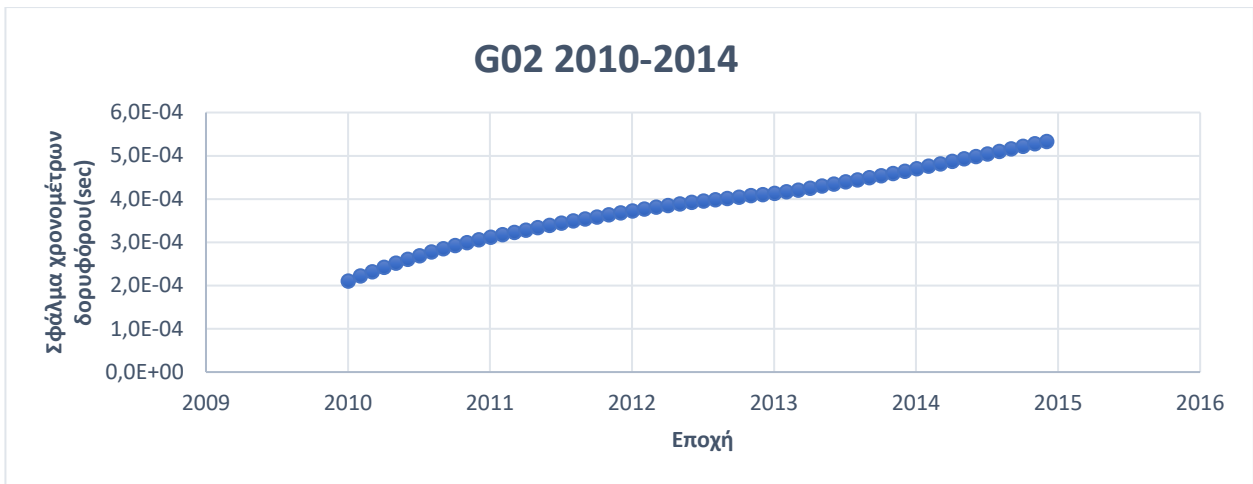
4.1.3 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Block IIR-B

Στα διαγράμματα (4-19, 4-20, 4-21, 4-22) απεικονίζονται τα σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων GPS που ανήκουν στο Block IIR-B, οι οποίοι έχουν τρία χρονόμετρα Rb. Για την περίοδο 2010-2014 και σύμφωνα με το αρχείο atx της IGS ανήκουν στο Block IIR-B και έχουν το ίδιο SVN (Space Vehicle Number) καθ' όλη τη διάρκεια της πενταετίας. Στον πίνακα 4-18 παρουσιάζονται τα PRN με Block IIR-B και τα SVN τους (Space Vehicle Number).

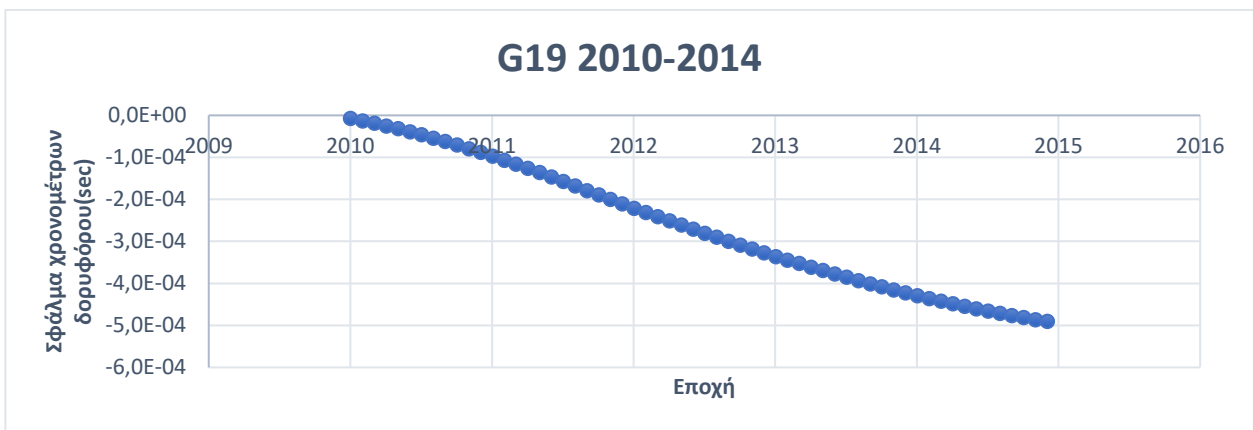
Πίνακας 4-18

Block και SVN δορυφόρων Block IIR-A

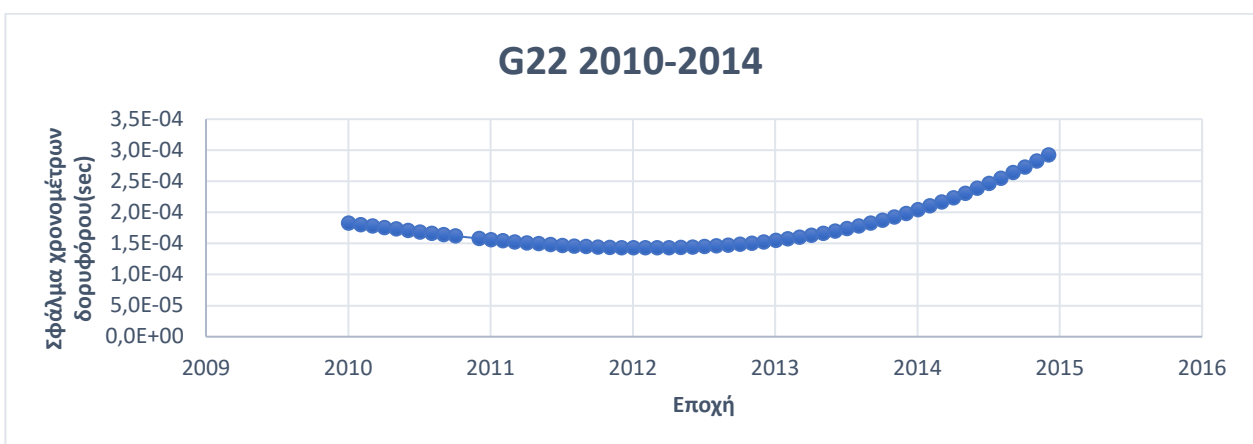
PRN	Block	SVN	Year
G02	IIR-B	61	2004-σήμερα
G19	IIR-B	59	2004-σήμερα
G22	IIR-B	47	2003-σήμερα
G23	IIR-B	60	2004-2020



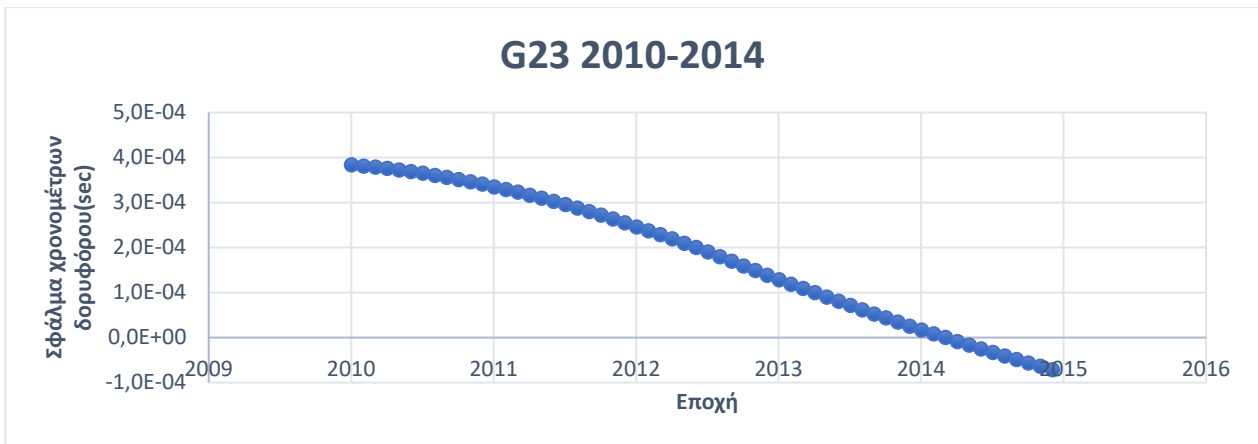
Διάγραμμα 4-19: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G02 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-20: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G19 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-21: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G22 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-22: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G23 για την περίοδο 2010-2014.

Τα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: σε αυτά που εμφανίζεται γραμμικό drift (διαγράμματα 4-19, 4-20, 4-22) και στο διάγραμμα 4-21 που εμφανίζεται aging.

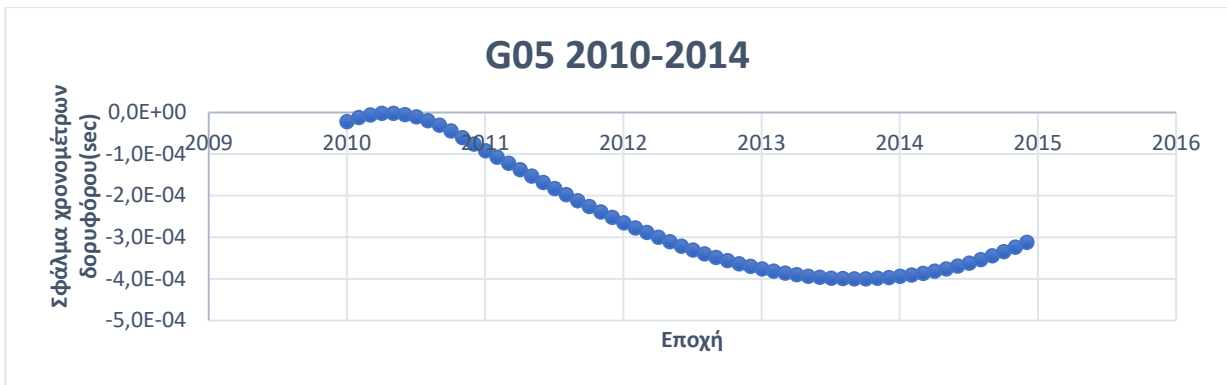
4.1.4 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Block IIR-M

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται τα σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων GPS που ανήκουν στο Block IIR-M οι οποίοι έχουν τρία χρονόμετρα Rb, για την περίοδο 2010-2014 και σύμφωνα με το αρχείο atx της IGS ανήκουν στο Block IIR-M. Επιπλέον, έχουν το ίδιο SVN (Space Vehicle Number) για την περίοδο αυτή. Στον πίνακα 4-23 παρουσιάζονται τα PRN με Block IIR-M και τα SVN τους (Space Vehicle Number).

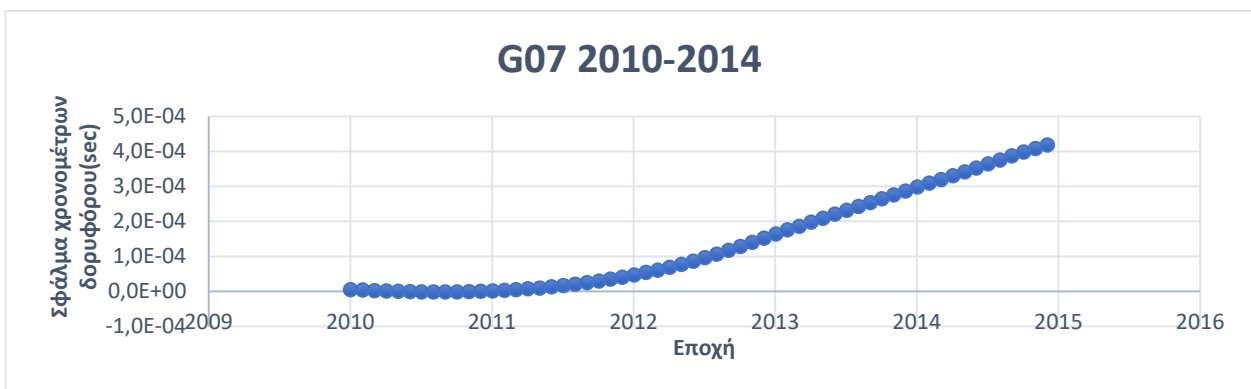
Πίνακας 4-23

Block και SVN δορυφόρων Block IIR-M

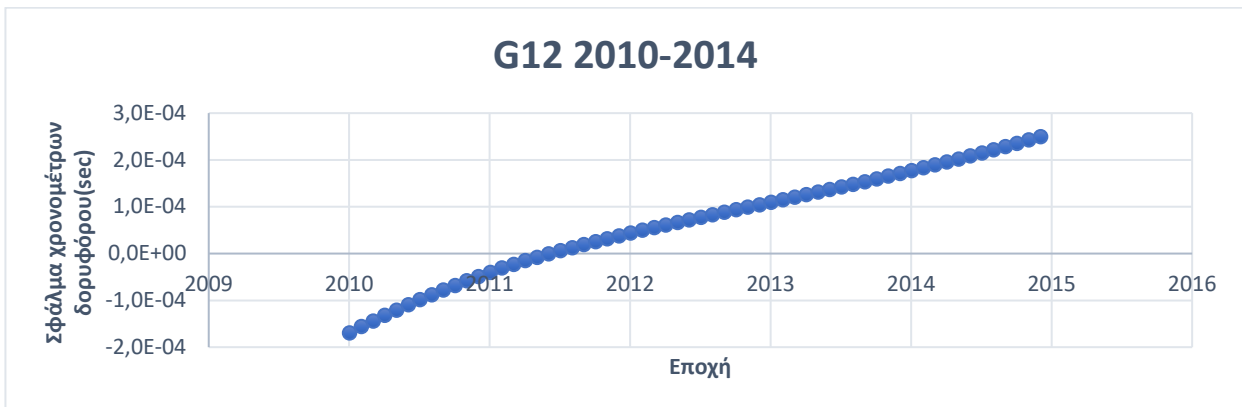
PRN	Block	SVN	Year
G05	IIR-M	50	2009-σήμερα
G07	IIR-M	48	2008-σήμερα
G12	IIR-M	58	2006-σήμερα
G15	IIR-M	55	2007-σήμερα
G17	IIR-M	53	2005-σήμερα
G29	IIR-M	57	2007-σήμερα
G31	IIR-M	52	2006-σήμερα



Διάγραμμα 4-24: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G05 για την περίοδο 2010-2014.



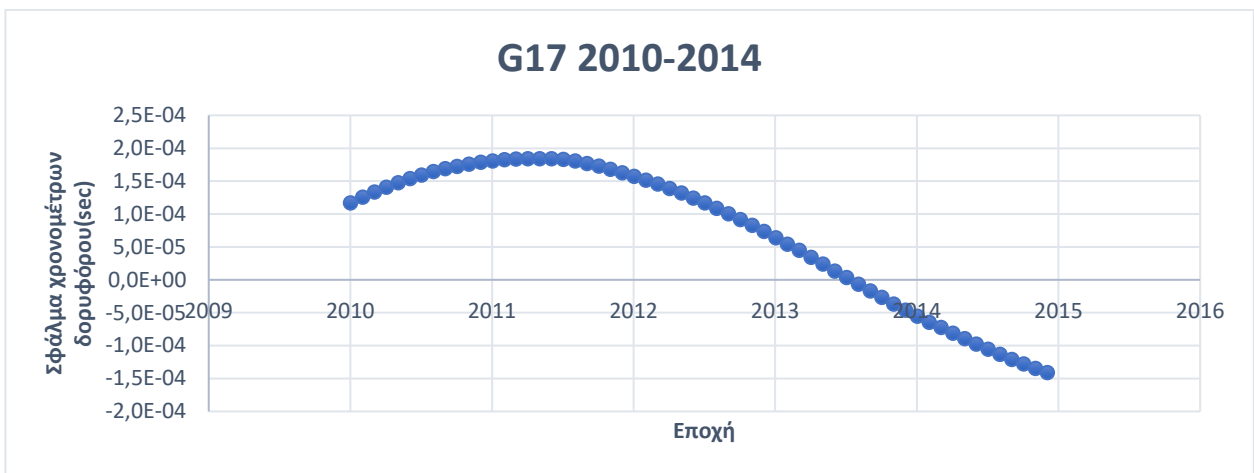
Διάγραμμα 4-25: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G07 για την περίοδο 2010-2014.



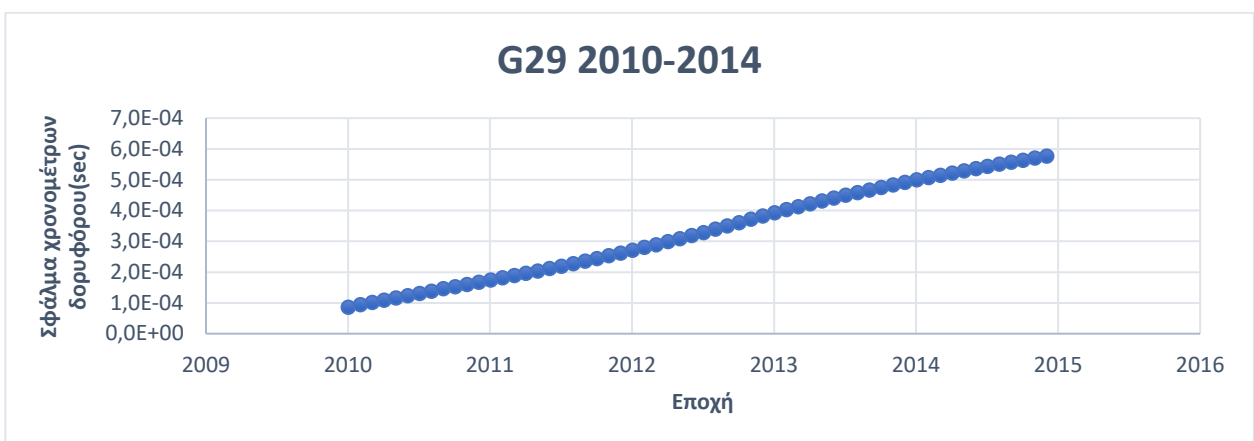
Διάγραμμα 4-26: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G12 για την περίοδο 2010-2014.



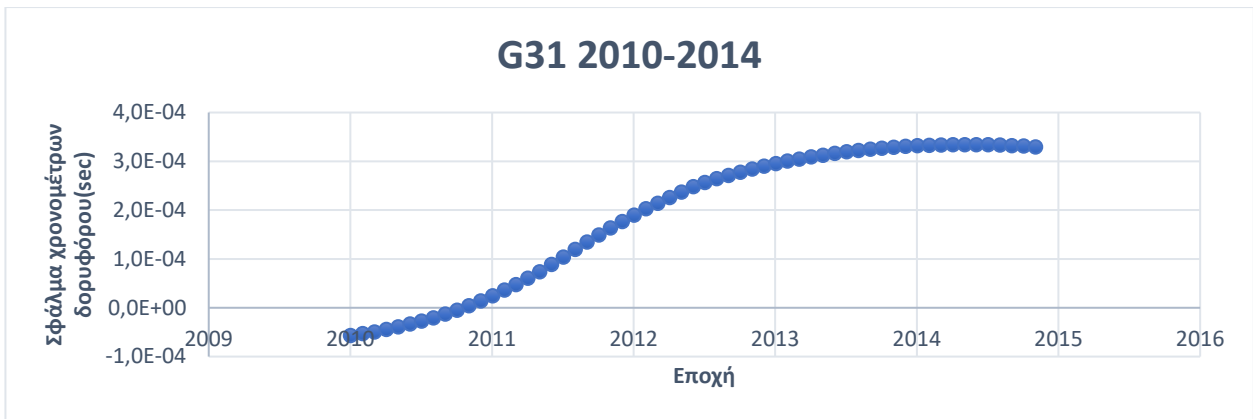
Διάγραμμα 4-27: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G15 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-28: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G17 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-29: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G29 για την περίοδο 2010-2014.



Διάγραμμα 4-30: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G31 για την περίοδο 2010-2014.

Και σε αυτή την περίπτωση, η συμπεριφορά των χρονομέτρων μπορεί να χωριστεί σε δύο ομάδες: στους δορυφόρους που εμφανίζουν σχεδόν γραμμικό drift (διαγράμματα 4-26, 4-29) και σε αυτούς που εμφανίζουν aging (διαγράμματα 4-24, 4-25, 4-27, 4-28, 4-30). Όπως αναφέρθηκε στο υπο-κεφάλαιο με τους δορυφόρους Block IIR-A, οι μεταβολές αυτές δεν θα μπορούσαν να εξηγηθούν από αλλαγή σε άλλου είδους χρονόμετρο, διότι οι δορυφόροι αυτοί έχουν αποκλειστικά χρονόμετρα ρουβιδίου.

4.1.5 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Block IIF

Στην τετραετία 2010-2014 δεν υπήρχε κανένας δορυφόρος που σε όλο το χρονικό διάστημα να ανήκει στο Block IIF, παρά μόνο κατά περιόδους. Ο πρώτος μπήκε σε τροχιά τον Μάιο του 2010 και ακολουθήσαν οι υπόλοιποι με ρυθμό ένας ανά έτος. Επομένως, στην τετραετία, δεν υπάρχει κανένας δορυφόρος που να είναι καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου Block IIF, παρά μόνο από μια ημερομηνία και μετά. Για τον λόγο αυτό, μελετήθηκε η συμπεριφορά των χρονομέτρων των δορυφόρων (PRN) που υποστηρίζονται από SV (Space Vehicle) Block IIF και τα αποτελέσματα παρατίθενται στα παρακάτω διαγράμματα.

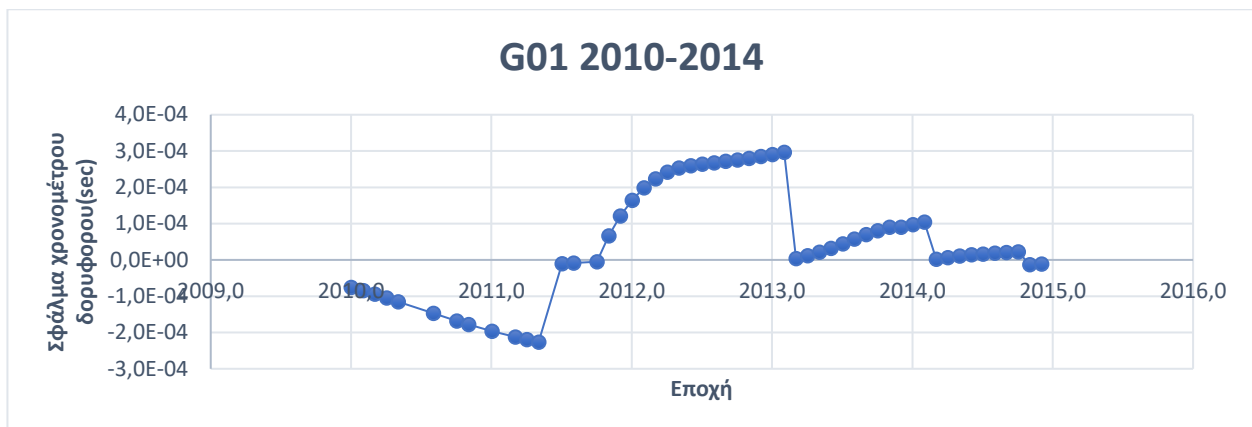
Στο διάγραμμα 4-32 απεικονίζεται το σφάλμα χρονομέτρων των δορυφόρων (SV-Space Vehicle) με PRN G01, ενώ για την καλύτερη και ευκολότερη κατανόηση των εναλλαγών SVN (Space Vehicle Number), δημιουργήθηκε ο πίνακας 4-31.

Εξετάζοντας τη συμπεριφορά του χρονομέτρου των δορυφόρων του PRN G01, παρατηρείται απότομη πτώση του σφάλματος (κοντά στο 0) στις αρχές του 2013 και του 2014. Αν και δεν έχει υπάρξει κάποια επίσημη ανακοίνωση, θα μπορούσε κανείς να υποθέσει ότι έχει γίνει reset στο χρονόμετρο προκειμένου να περιοριστεί η άνοδος του σφάλματος. Μετά τις αρχές του 2014, υπάρχει αισθητή μείωση του drift.

Πίνακας 4-31

Block και SVN με PRN G01

PRN	Block	SVN	Year
G01	IIR-M	49	έως 23/06/2011
G01	IIA	35	02/06/2011 - 12/07/2011
G01	IIF	63	16/07/2011 έως σήμερα



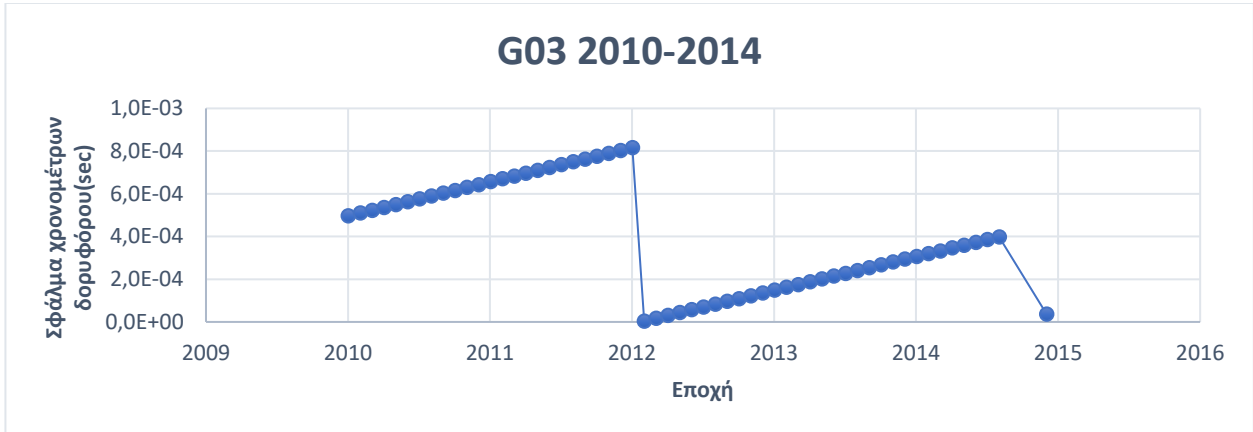
Διάγραμμα 4-32: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G01 για την περίοδο 2010-2014 (Block IIF από 16/07/2011 μέχρι σήμερα).

Το διάγραμμα 4-34 απεικονίζει τη συμπεριφορά των χρονομέτρων των δορυφόρων (SV) στους οποίους έχει ανατεθεί ο PRN G03. Σύμφωνα με το αρχείο atx (Πίνακας 4-33), μέχρι τον Δεκέμβρη του 2014 το PRN G03 είχε ανατεθεί σε δορυφόρο του Block IIA, ενώ από το 2014 και μετά άλλαξε σε Block IIF (δύο χρονόμετρα Rb και ένα Cs), πράγμα το οποίο φαίνεται στην απότομη πτώση στο τέλος του διαγράμματος. Στην προκειμένη περίπτωση, δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα για τη συμπεριφορά των χρονομέτρων του Block IIF, διότι είναι πολύ μικρό το χρονικό διάστημα.

Πίνακας 4-33

Block και SVN δορυφόρων Block IIF

PRN	Block	SVN	Year
G03	IIA	33	έως 18/08/2014
G03	IIA	35	05/09/2014 - 20/10/2014
G03	IIF	69	29/10/2014 έως σήμερα



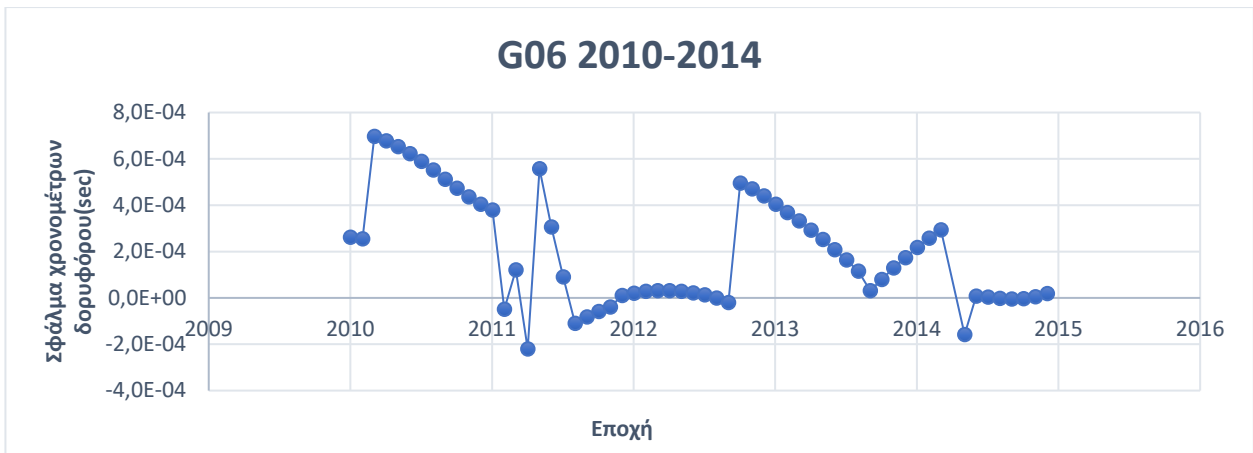
Διάγραμμα 4-34: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G03 για την περίοδο 2010-2014 (Block IIF από 29/10/2014 έως σήμερα).

Στο διάγραμμα 4-36 απεικονίζεται η συμπεριφορά των χρονομέτρων που έχουν ανατεθεί στο PRN G06, ενώ για την ευκολότερη κατανόηση των εναλλαγών που έχουν γίνει σε SVN (Space Vehicle Number) με το πέρασμα του χρόνου, δημιουργήθηκε ο πίνακας 4-35. Φαίνεται ότι το drift των χρονομέτρων του δορυφόρου ομαλοποιήθηκε μετά την εναλλαγή σε δορυφόρο Block IIF από δορυφόρο Block IIR-M (μέσα του 2014).

Πίνακας 4-35

Block και SVN δορυφόρων Block IIF

PRN	Block	SVN	Year
G06	IIA	36	10/03/1994-3/3/2014
G06	IIR-M	49	03/04/2014-05/05/2014
G06	IIF	67	17/05/2014-σήμερα



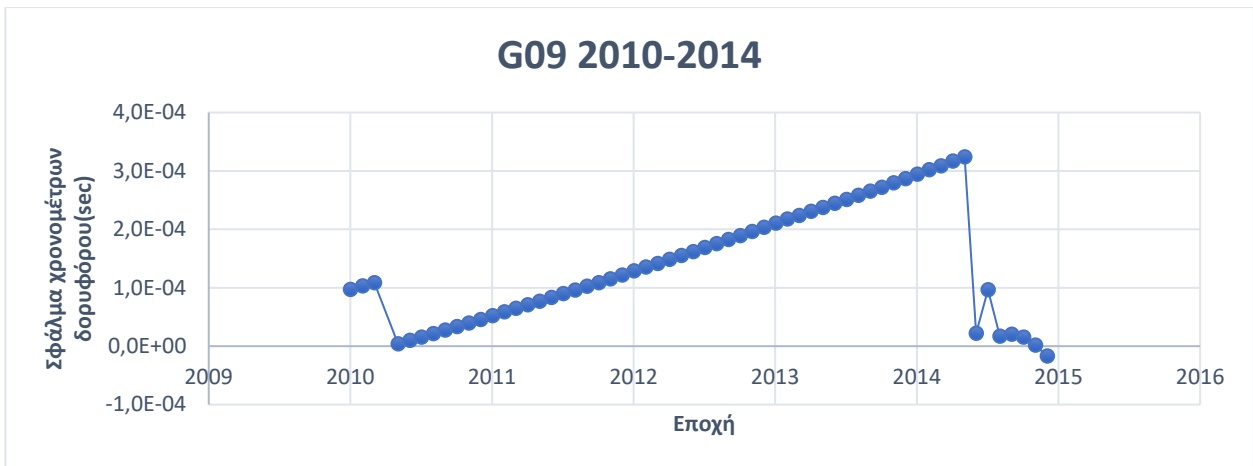
Διάγραμμα 4-36: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G06 για την περίοδο 2010-2014(Block IIF από 17/05/2014 έως σήμερα).

Ο PRN G09 (Διάγραμμα 4-38), είχε ανατεθεί σε δορυφόρο του Block IIA μέχρι 21/01/2014, από όπου άλλαξε σε Block IIF και παρέμεινε μέχρι το τέλος του 2014 (Πίνακας 4-37). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, μετά την απότομη αύξηση του σφάλματος στην εποχή 2014,41 (Ιούνιος), παρατηρείται μείωση του drift του χρονομέτρου, η οποία επιτεύχθηκε με αλλαγή του Block IIA σε Block IIF. Και σε αυτήν την περίπτωση, είναι πολύ μικρό το διάστημα λειτουργίας του δορυφόρου Block IIF για να εξαχθεί αξιόπιστο αποτέλεσμα.

Πίνακας 4-37

Block και SVN δορυφόρων Block IIR-A

PRN	Block	SVN	Year
G09	IIA	39	26/06/1996-21/07/2014
G09	IIF	68	02/08/2014-σήμερα



Διάγραμμα 4-38: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G09 για την περίοδο 2010-2014 (Block IIF από 02/08/2014 έως σήμερα).

Ο PRN (PseudoRandom Noise) G24 έχει ανατεθεί σε δορυφόρους διαφόρων Block και SVN (Space Vehicle Number) ανά τους μήνες, όπως φαίνεται στον πίνακα 4-39.

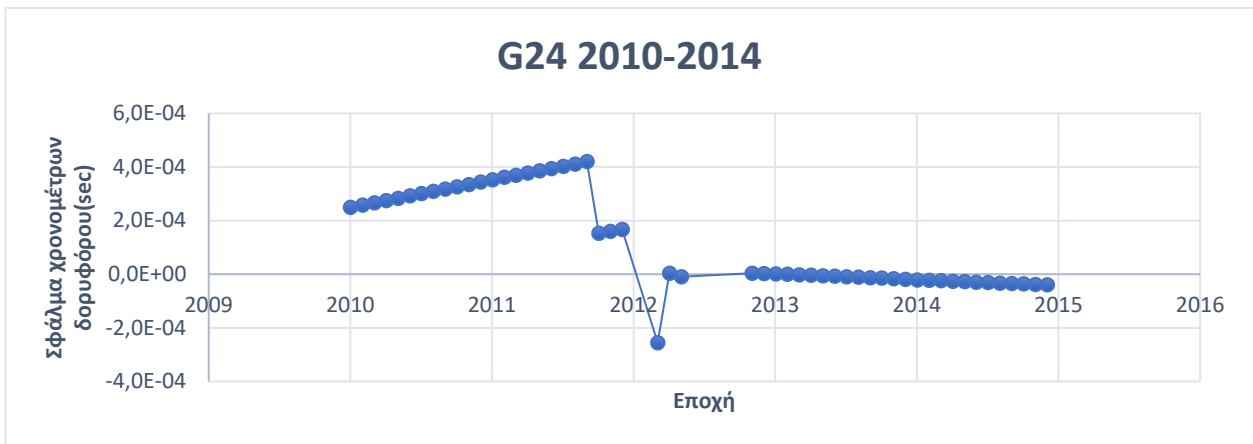
Πίνακας 4-39

Block και SVN δορυφόρων για το PRN G24

PRN	Block	SVN	Διάρκεια
24	IIA	24	30/09/2011 - 01/02/2012
24	IIR-M	49	02/02/2012 - 14/03/2012
24	IIA	32	15/03/2012 - 25/04/2012
24	IIA	37	26/04/2012 - 30/05/2012
24	IIR-M	49	09/08/2012 - 22/08/2012
24	IIF	65	04/10/2012 - σήμερα

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 4-40, δεν υπήρχαν δεδομένα για το G24 από τον Απρίλιο μέχρι τον Οκτώβρη του 2012 στα αρχεία clk από CODE. Έτσι, έγινε διερεύνηση και στα αρχεία από IGS, όπου διαπιστώθηκε ότι ούτε εκεί υπάρχουν δεδομένα. Μετά από έρευνα στην ιστοσελίδα www.GNSSplanning.com προέκυψε ότι, τη συγκεκριμένη περίοδο, οι δορυφόροι του PRN G24 ήταν μη υγιείς (unhealthy), με αιτιολόγηση «την παλαιότητα του almanac» («due to age of almanac»). Από την πολύ συχνή αλλαγή SVN (Space Vehicle Number) δικαιολογείται η μορφή του διαγράμματος στην περίοδο αυτή

(τέλη του 2011 μέχρι μέσα του 2012) και η εν τέλη σταθεροποίηση σε δορυφόρο του Block IIF από τα τέλη του 2012 μέχρι σήμερα.



Διάγραμμα 4-40: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G24 για την περίοδο 2010-2014 (Block IIF από 04/10/2012 έως σήμερα).

Ο PRN G25 έχει ανατεθεί σε SVN όπως φαίνεται στον πίνακα 4-41.

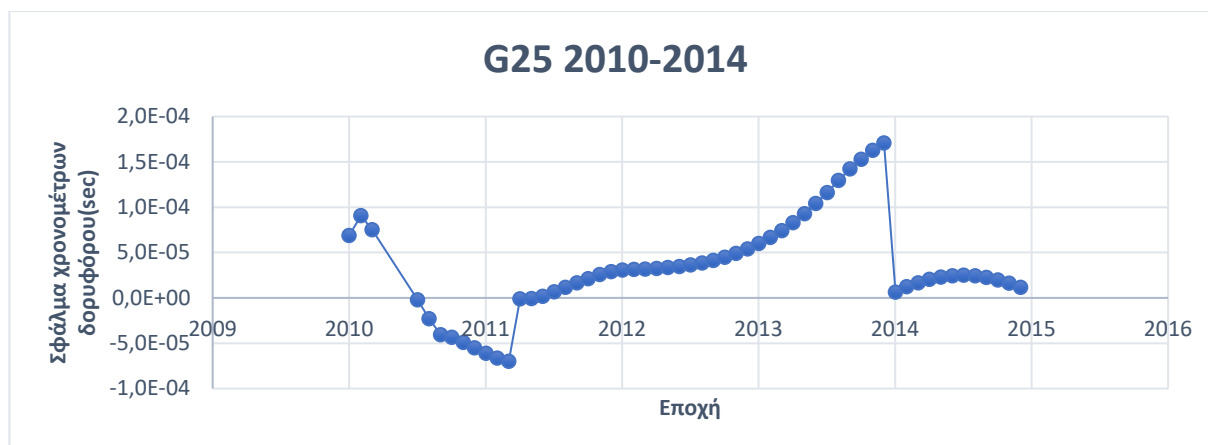
Πίνακας 4-41

Block και SVN δορυφόρων για το PRN G25

PRN	Block	SVN	Διάρκεια
25	IIF	25	01/01/2010 - 08/02/2010
25	IIF	35	09/02/2010 - 27/05/2010
25	IIF	62	26/05/2010 - σήμερα

Στο διάγραμμα 4-42 αποτυπώνεται η συμπεριφορά των δορυφόρων που έχουν ανατεθεί στο PRN G25. Παρατηρείται, από τις 26/05/2010 που έχει ανατεθεί σε δορυφόρο Block IIF, δύο φορές απότομος σχεδόν μηδενισμός του σφάλματος. Η αλλαγή αυτή δεν συνοδεύεται από κάποια επίσημη ανακοίνωση, οπότε θα μπορούσε κάποιος να υποθέσει ότι έχει γίνει reset στο χρονόμετρο του δορυφόρου για να μην αυξηθεί το σφάλμα περαιτέρω.

Στο μεσοδιάστημα των δύο αυτών απότομων αλλαγών του σφάλματος, παρατηρείται aging του χρονομέτρου.



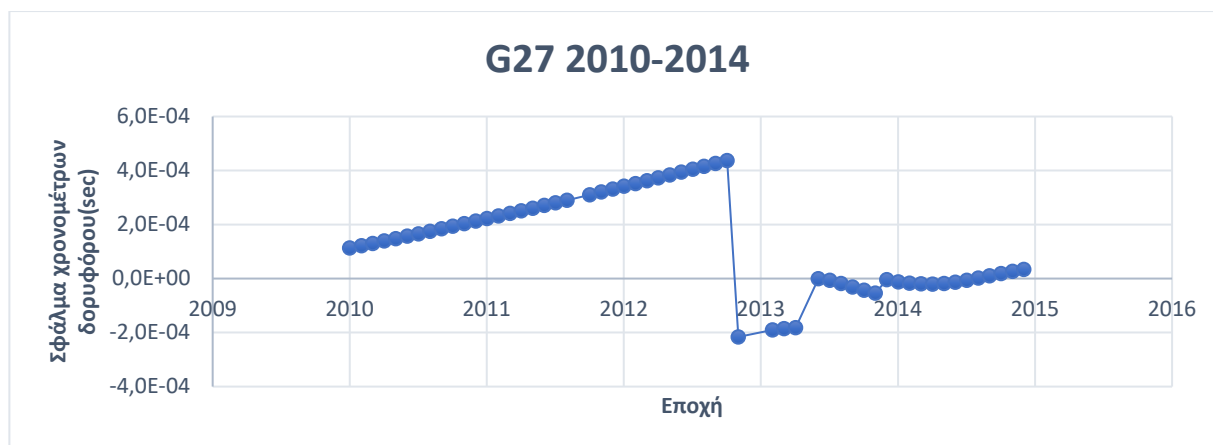
Διάγραμμα 4-42: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G25 για την περίοδο 2010-2014 (Block IIF από 26/05/2010 έως σήμερα).

Ο PRN G27 έχει αλλάξει SVN και Block δορυφόρων, όπως φαίνεται στον πίνακα 4-44. Από τον Δεκέμβρη του 2012 έως τον Ιούλιο του 2013, εμφανίζεται ως μη υγιής ο δορυφόρος του Block IIR-M με SVN 049, σύμφωνα με το www.GNSSplanning.com. Από τη διαμόρφωση του διαγράμματος 4-43, φαίνεται η αλλαγή Block τον Οκτώβρη του 2012 και ως εκ τούτου, η αλλαγή από χρονόμετρο Cs σε χρονόμετρο Rb. Εν συνεχεία, φαίνεται η αλλαγή σε Block IIF και η ομαλοποίηση του σφάλματος από τον Ιούλιο του 2013 μέχρι τα τέλη του 2014.

Πίνακας 4-43

Block και SVN δορυφόρων για το PRN G27

PRN	Block	SVN	Διάρκεια
G27	IIA	27	01/01/2010 - 17/10/2012
G27	IIR-M	49	18/10/2012 - 09/05/2013
G27	IIF	66	15/05/2013 - σήμερα



Διάγραμμα 4-44: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G27 για την περίοδο 2010-2014 (Block IIF από 15/03/2013 έως σήμερα).

Ο PRN G30 έχει αλλάξει πολλά SVN με την πάροδο των χρόνων (Πίνακας 4-45), πράγμα το οποίο είναι εμφανές στο διάγραμμα 4-46 από την εποχή 2011,3360 έως 2014,2527 και δικαιολογεί την περίεργη μορφή του διαγράμματος, η οποία φαίνεται να ομαλοποιείται μετά την αλλαγή σε δορυφόρο του Block IIF. Η περίοδος λειτουργίας του δορυφόρου Block IIF στην προκειμένη περίπτωση είναι πολύ μικρή και έτσι δεν μπορεί να εξαχθεί αξιόπιστο συμπέρασμα για την συμπεριφορά του χρονομέτρου του.

Πίνακας 4-45

Block και SVN δορυφόρων για το PRN G30

PRN	Block	SVN	Διάρκεια
30	IIA	30	01/01/2010 - 04/08/2011
30	IIA	35	05/08/2011 - 06/05/2013
30	IIR-M	49	10/05/2013 - 21/08/2013
30	IIA	32	22/08/2013 - 16/09/2013
30	IIA	37	19/09/2013 - 07/10/2013
30	IIA	27	03/12/2013 - 17/12/2013
30	IIR-M	49	19/12/2013 - 10/02/2014
30	IIF	64	11/02/2014 - σήμερα

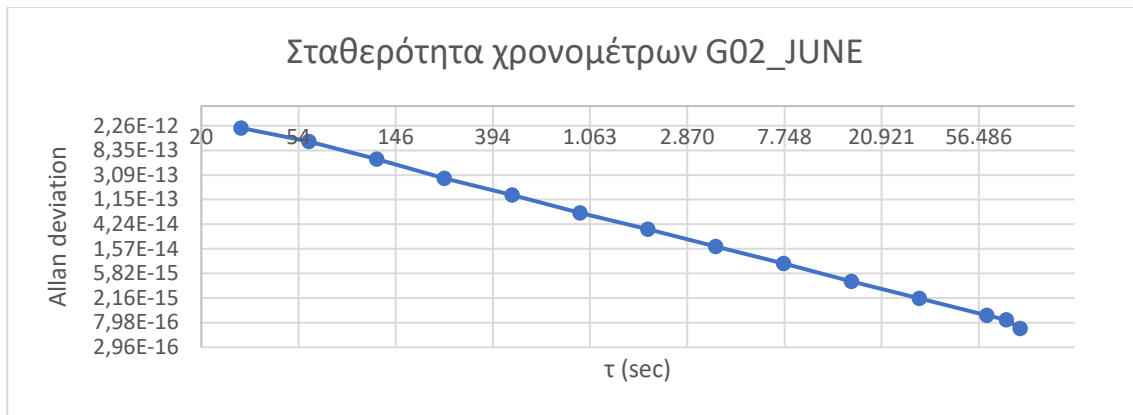


Διάγραμμα 4-46: Πορεία σφάλματος χρονομέτρων δορυφόρου G30 για την περίοδο 2010-2014 (Block IIF από 11/02/2014 έως σήμερα).

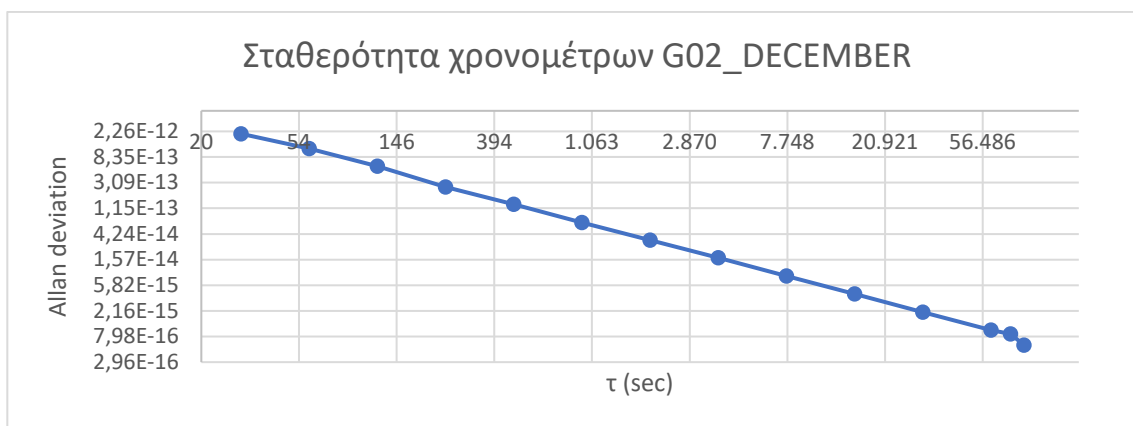
4.1.6 GPS Allan variance

Προκειμένου να γίνει η σύγκριση των χρονομέτρων GPS και Galileo, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η σταθερότητα (Allan variance) των χρονομέτρων και των δύο συστημάτων δορυφορικής πλοήγησης.

Στο παρόν υπο-κεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας δεδομένων GPS που λήφθηκαν από το CODE για το έτος 2017 και τον μήνα Ιούνιο. Η επιλογή του συγκεκριμένου έτους έγινε διότι υπάρχουν ενεργοί δορυφόροι από το Block IIA μέχρι το Block IIF, έτσι ώστε να προκύψουν αποτελέσματα για σχεδόν όλα τα Block GPS. Ως εξεταζόμενος μήνας επιλέχθηκε τυχαία ο Ιούλιος (Διάγραμμα 4-47). Έπρεπε, όμως, να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχει κάποια διαφορά στα αποτελέσματα με το πέρασμα του χρόνου. Για αυτόν τον λόγο, υπολογίστηκε η μεταβλητότητα Allan και για τον μήνα Δεκέμβριο (Διάγραμμα 4-48) για τρεις τυχαίους δορυφόρους (λόγω οικονομίας χώρου, παρατίθενται ενδεικτικά τα αποτελέσματα του ενός δορυφόρου). Αφού διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στη μεταβλητότητα Allan, συνεχίστηκε η επεξεργασία δεδομένων του μήνα Ιουλίου και για τους υπόλοιπους δορυφόρους.



Διάγραμμα 4-47: Σταθερότητα χρονομέτρων του PRN G02 για τον μήνα Ιούνιο του 2017.



Διάγραμμα 4-48: Σταθερότητα χρονομέτρων του PRN G02 για τον μήνα Δεκέμβριο του 2017.

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η σταθερότητα των χρονομέτρων δορυφόρων που ανήκουν στα Block IIA (G04), Block IIR-A (G28, G21, G20, G18, G14, G13, G11), Block IIR-B (G23, G19, G22, G02) και Block IIR-M (G31, G17, G15, G12, G07, G05). Αποφασίστηκε η παράθεση των διαγραμμάτων με βάση το PRN και όχι ομαδοποιημένα ανά Block, γιατί οι τιμές Allan deviation (τετραγωνική ρίζα Allan variance) κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα ανεξαρτήτως Block.

Απαραίτητη πληροφορία για την εξαγωγή συμπεράσματος είναι το είδος ρολογιού που χρησιμοποιεί ο κάθε δορυφόρος. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα το advisory αρχείο που υπάρχει στην ιστοσελίδα της navcen (www.navcen.uscg.gov), το οποίο περιέχει πληροφορίες για το είδος

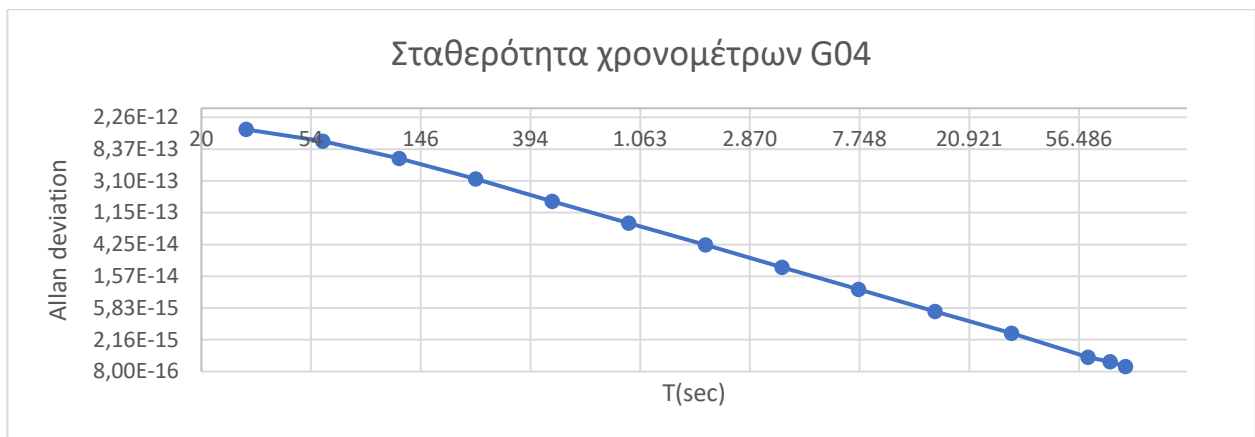
του χρησιμοποιούμενου χρονομέτρου σε όλες τις εποχές. Στο αρχείο που αφορά την πρώτη μέρα του μήνα Ιουλίου για το 2017 (Εικόνα 4-49), φαίνεται ότι σχεδόν όλοι οι δορυφόροι που ανήκουν στα Block IIA, IIR-A, IIR-B, IIR-M χρησιμοποιούσαν ένα από τα χρονόμετρα ρουβιδίου που υπάρχουν στον δορυφόρο.

```
UNCLASSIFIED
GPS OPERATIONAL ADVISORY      152.OA1
SUBJ: GPS STATUS              01 JUN 2017

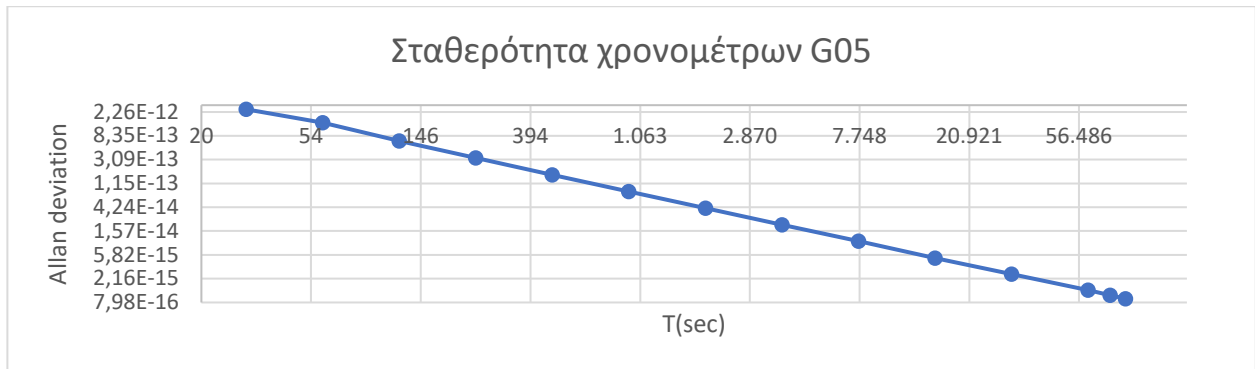
1. SATELLITES, PLANES, AND CLOCKS (CS=CESIUM RB=RUBIDIUM):
A. BLOCK I : NONE
B. BLOCK II: PRNS  1,  2,  3,  5,  6,  7,  8,  9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
   PLANE   : SLOT D2, D1, E1, E3, D4, A4, C3, F3, E2, D5, B4, F6, F1, F2
   CLOCK   :      RB, RB, RB, RB, RB, RB, RB, CS, RB, RB, RB, RB, RB, RB, RB
BLOCK II: PRNS 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29
   PLANE   : SLOT B1, C4, E4, C5, B6, D3, E6, F4, A1, B2, B5, C2, B3, C1
   CLOCK   :      RB, RB, RB, RB, RB, RB, RB, RB, RB, CS, RB, RB, RB, RB, RB
BLOCK II: PRNS 30, 31, 32
   PLANE   : SLOT A3, A2, F5
   CLOCK   :      RB, RB, RB
```

Εικόνα 4-49: Είδος ατομικού χρονομέτρου στους δορυφόρους GPS για την 01/06/2017

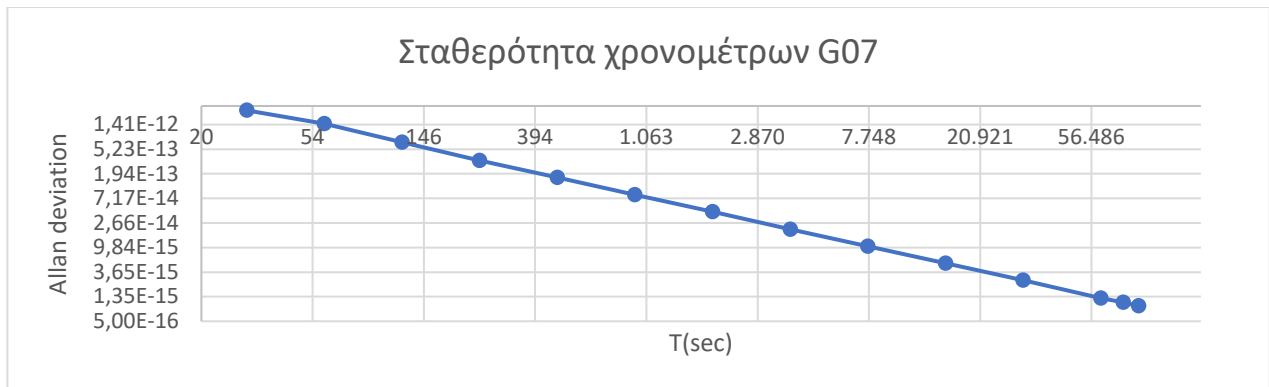
Στην συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα 4-50 έως 4-68. Προκύπτει, με βάση τα διαγράμματα, ότι η βραχυπρόθεσμη σταθερότητα των δορυφόρων στα προαναφερθέντα Block ξεκινάει από περίπου $3 \cdot 10^{-12}$ για τα πρώτα 30 δευτερόλεπτα και φτάνει περίπου $7 \cdot 10^{-16}$ στα 86.400 δευτερόλεπτα (ένα 24ωρο).



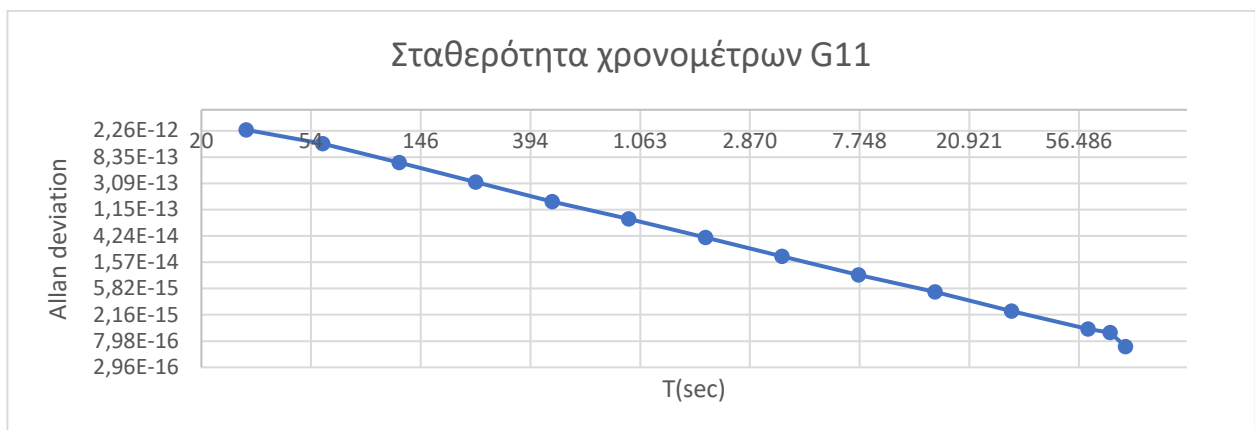
Διάγραμμα 4-50: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G04 για το έτος 2017.



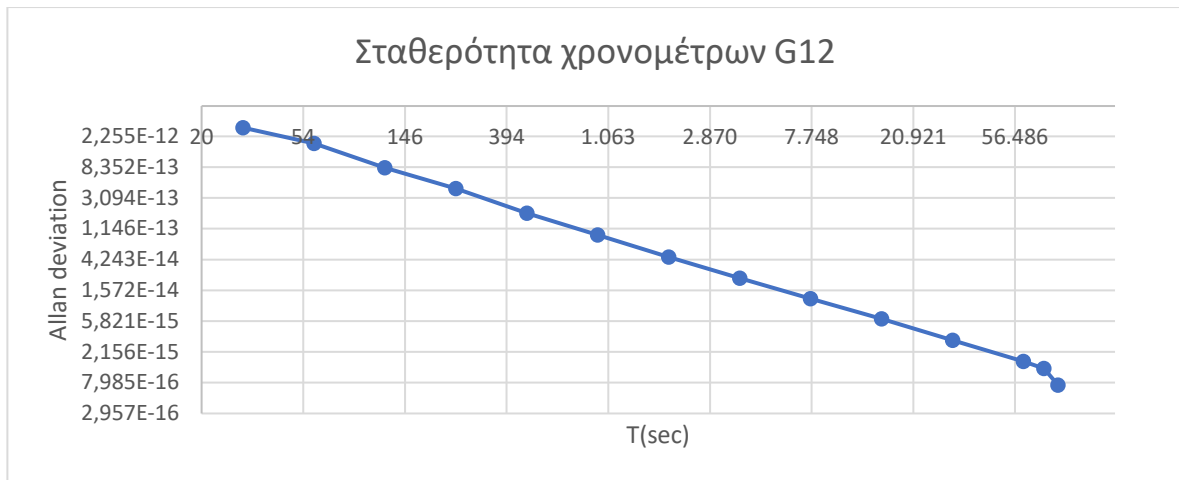
Διάγραμμα 4-51: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G05 για το έτος 2017.



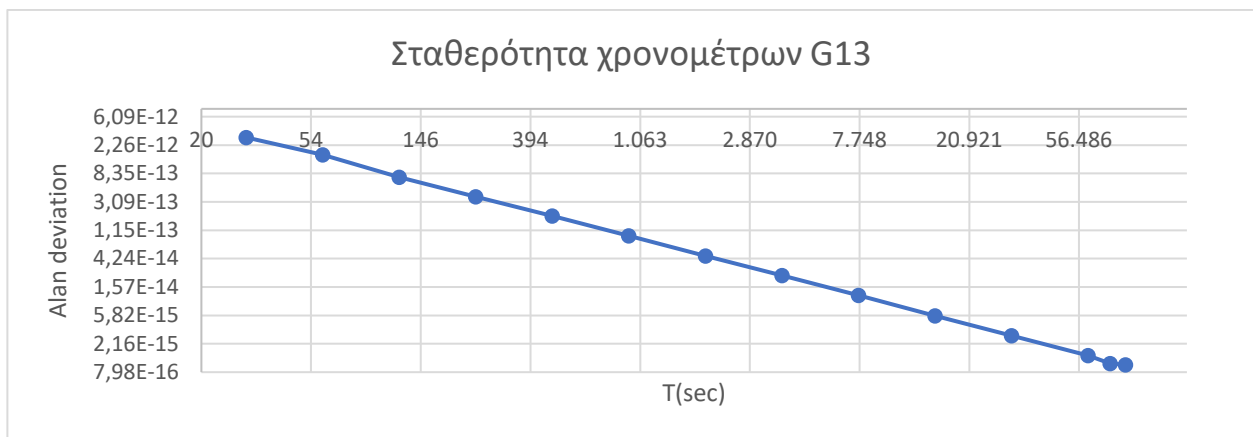
Διάγραμμα 4-52: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G07 για το έτος 2017.



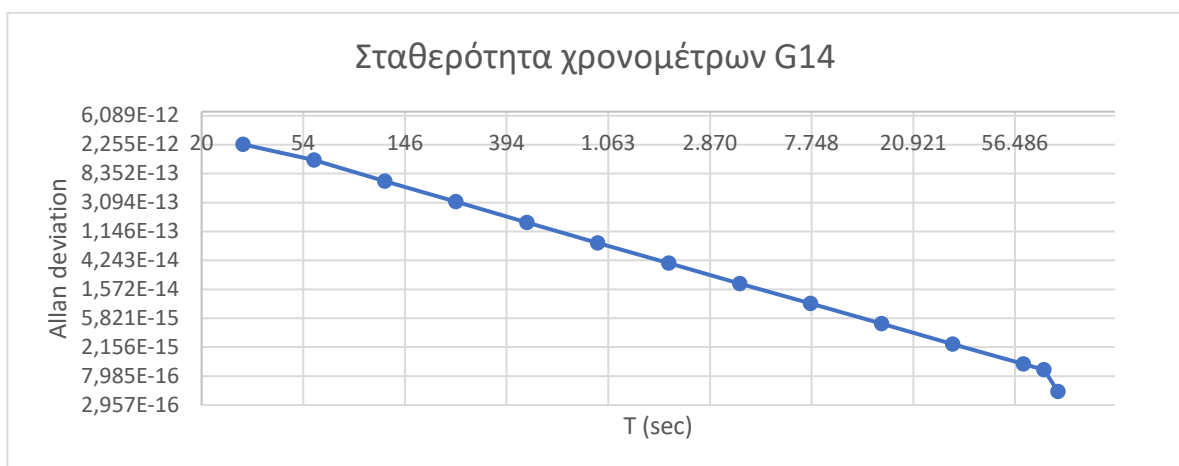
Διάγραμμα 4-53: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G11 για το έτος 2017.



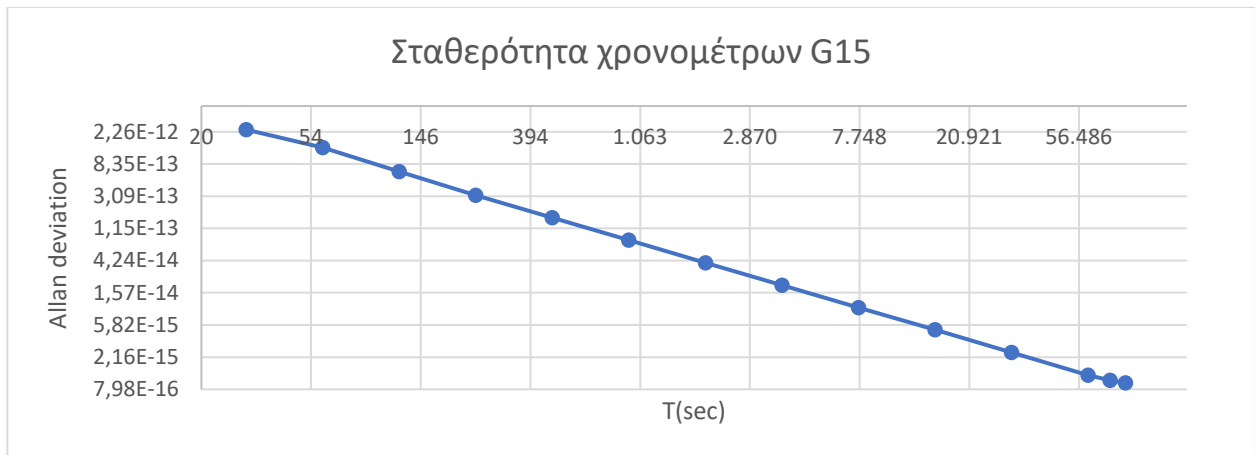
Διάγραμμα 4-54: Σταθερότητα χρονόμετρου PRN G12 για το έτος 2017.



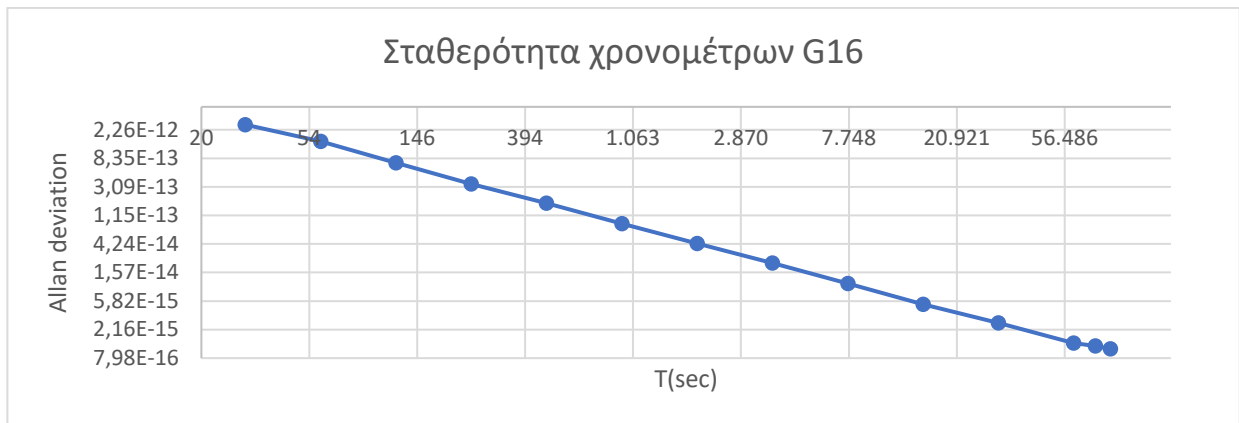
Διάγραμμα 4-55: Σταθερότητα χρονόμετρου PRN G13 για το έτος 2017.



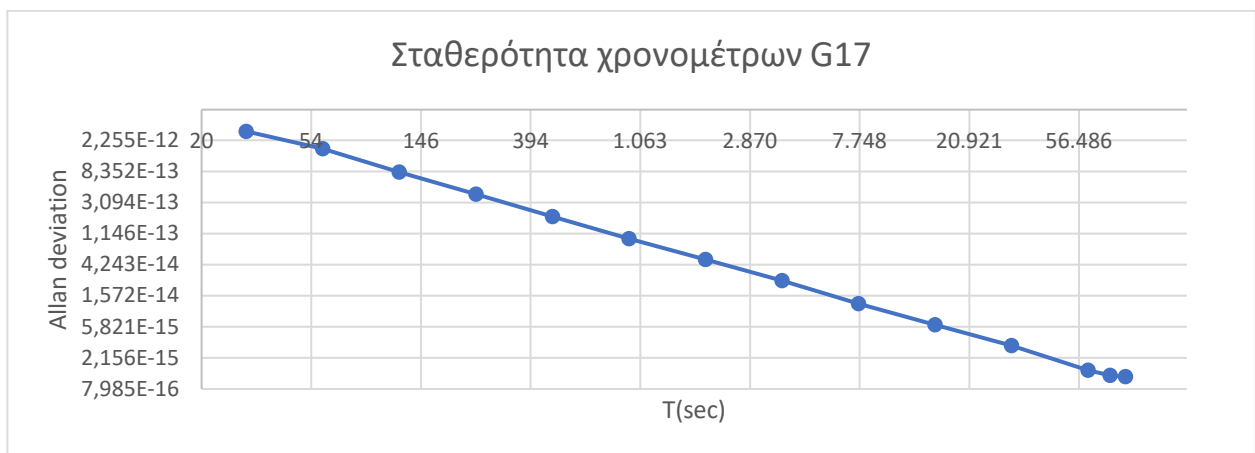
Διάγραμμα 4-56: Σταθερότητα χρονόμετρου PRN G14 για το έτος 2017.



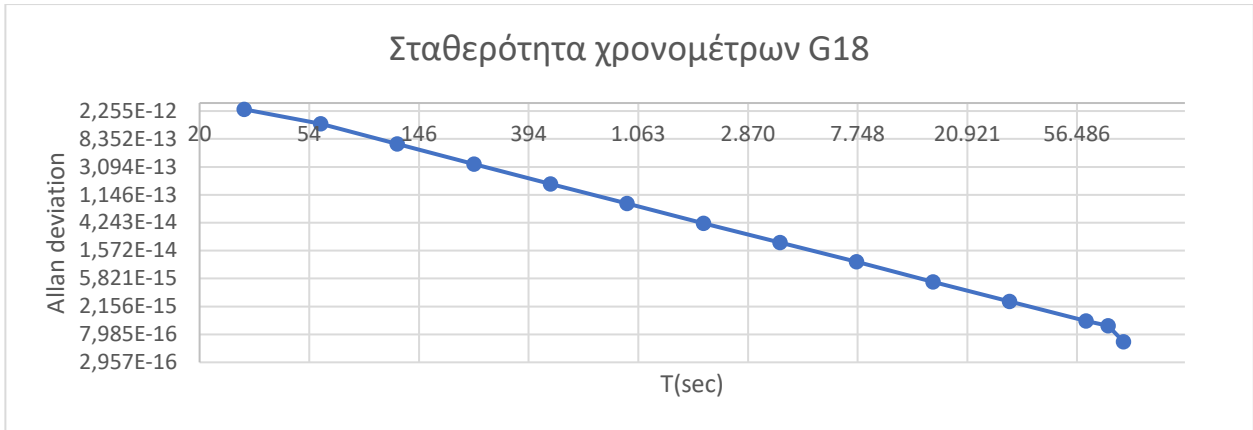
Διάγραμμα 4-57: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G15 για το έτος 2017.



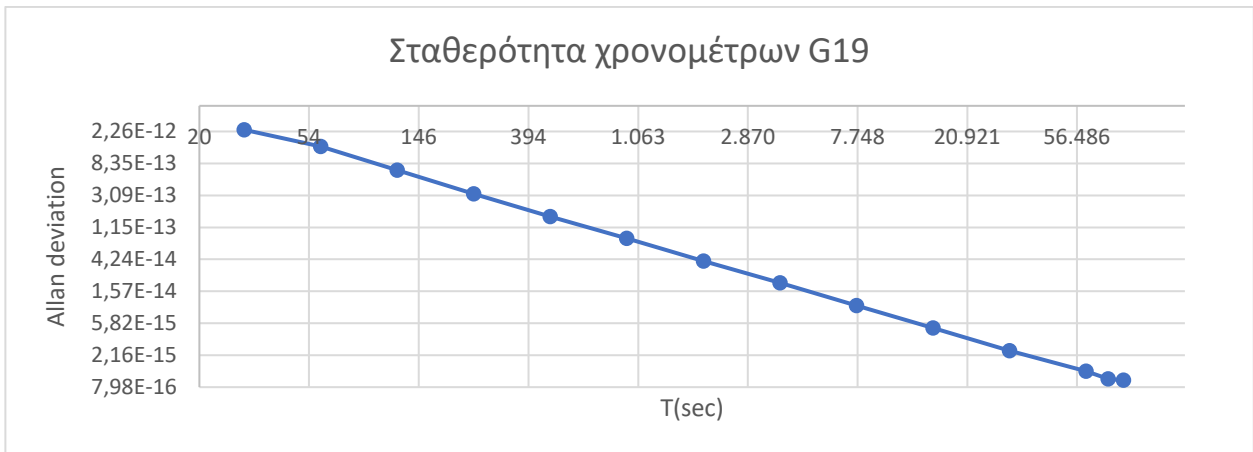
Διάγραμμα 4-58: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G16 για το έτος 2017.



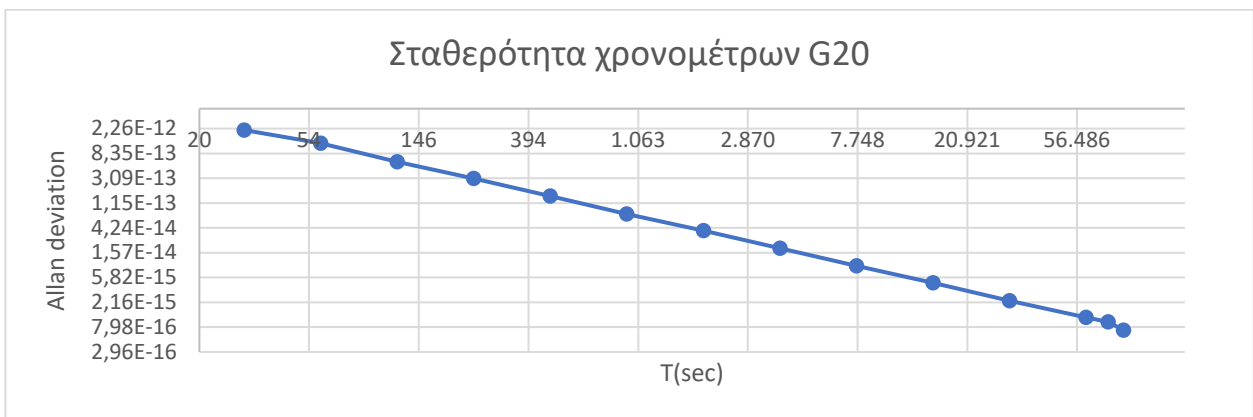
Διάγραμμα 4-59: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G17 για το έτος 2017.



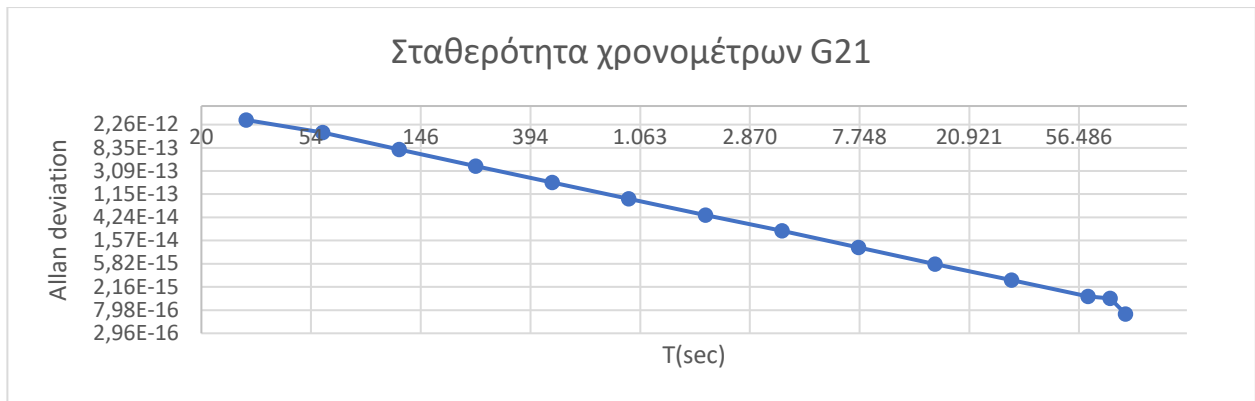
Διάγραμμα 4-60: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G18 για το έτος 2017.



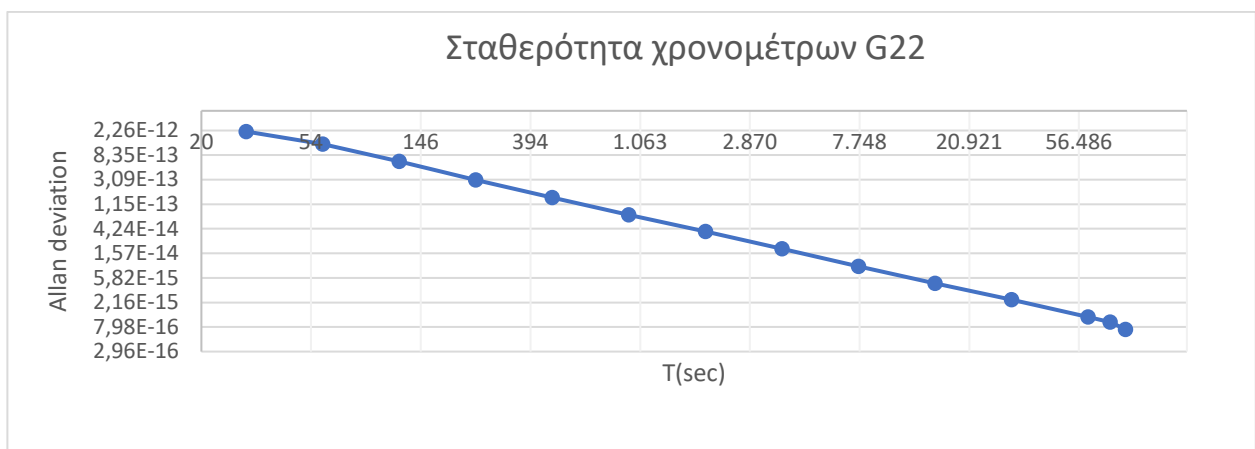
Διάγραμμα 4-61: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G19 για το έτος 2017.



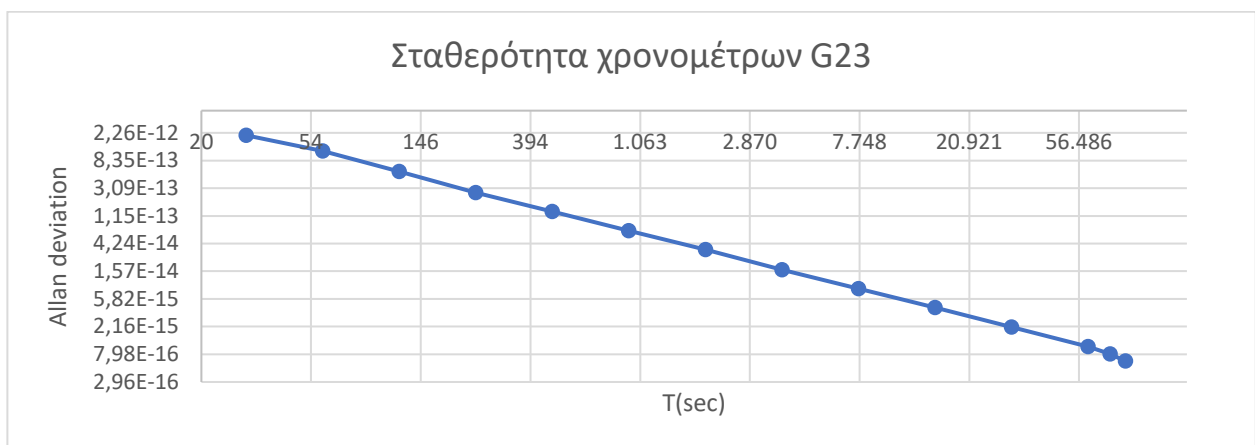
Διάγραμμα 4-62: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G20 για το έτος 2017.



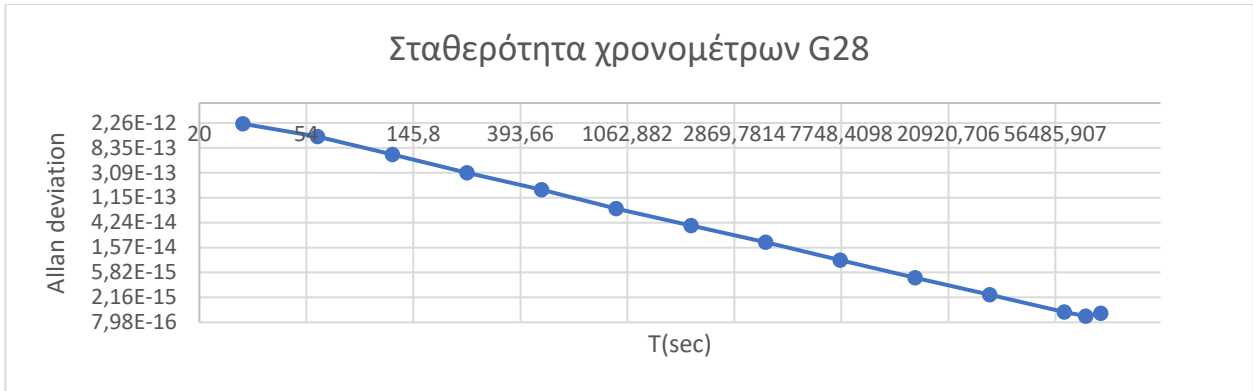
Διάγραμμα 4-63: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G21 για το έτος 2017.



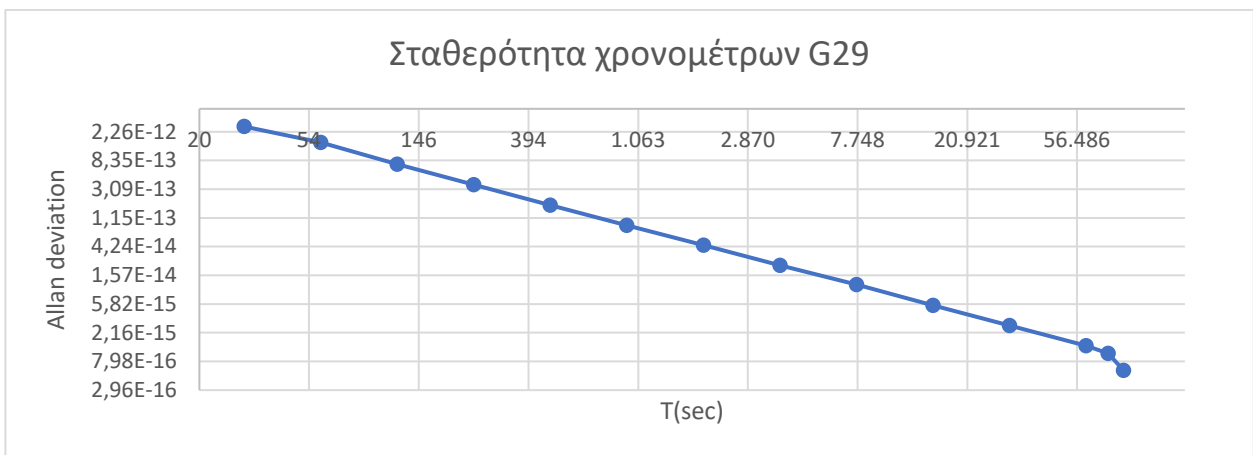
Διάγραμμα 4-64: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G22 για το έτος 2017.



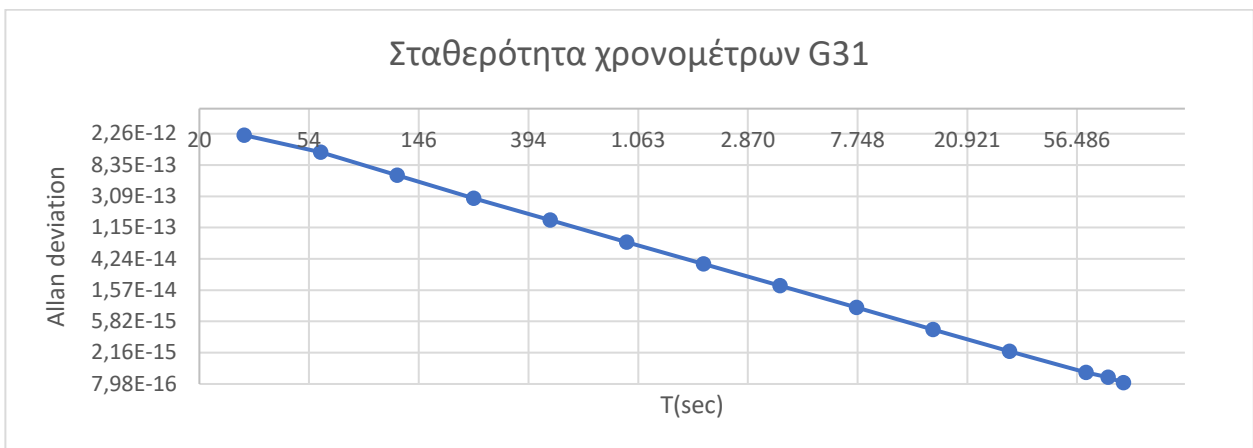
Διάγραμμα 4-65: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G23 για το έτος 2017.



Διάγραμμα 4-66: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G28 για το έτος 2017.



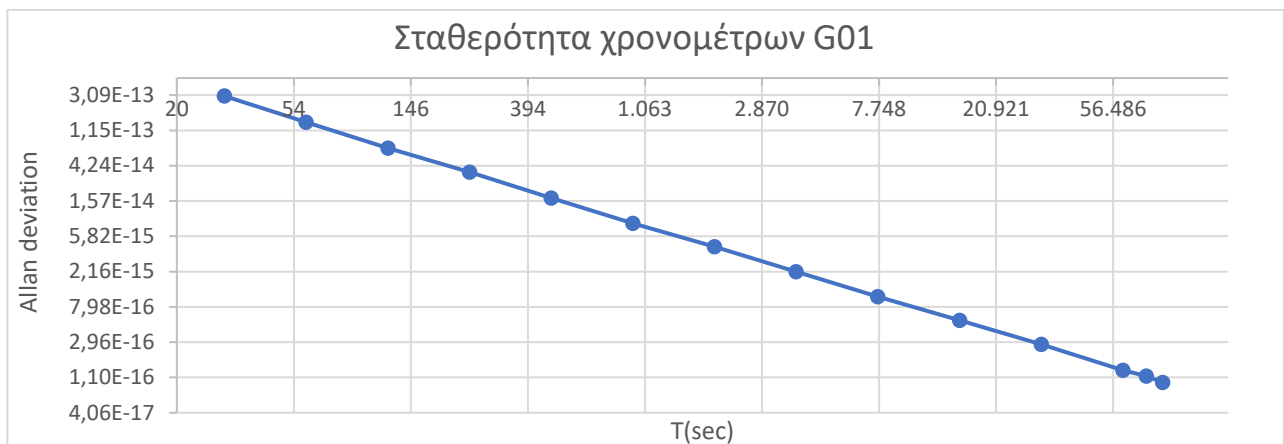
Διάγραμμα 4-67: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G29 για το έτος 2017.



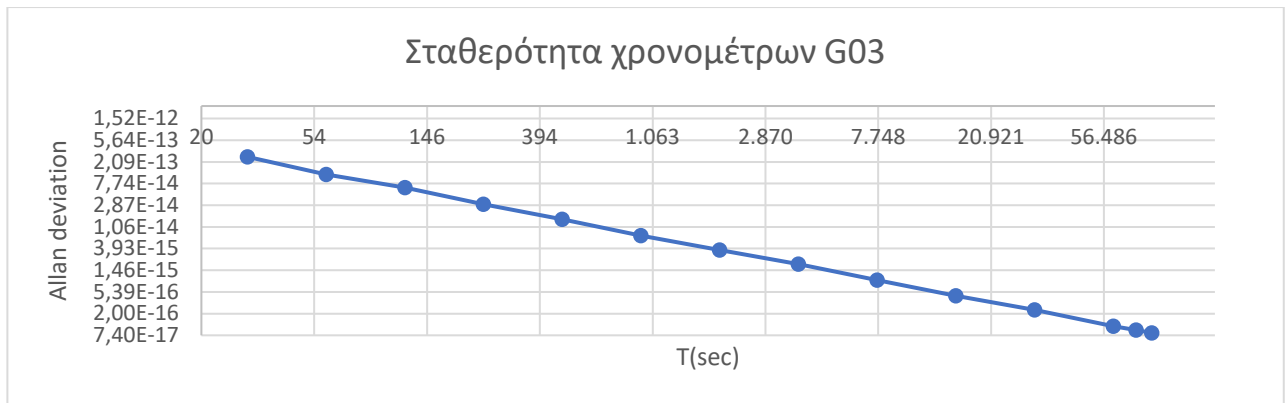
Διάγραμμα 4-68: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G31 για το έτος 2017.

Δορυφόροι IIF

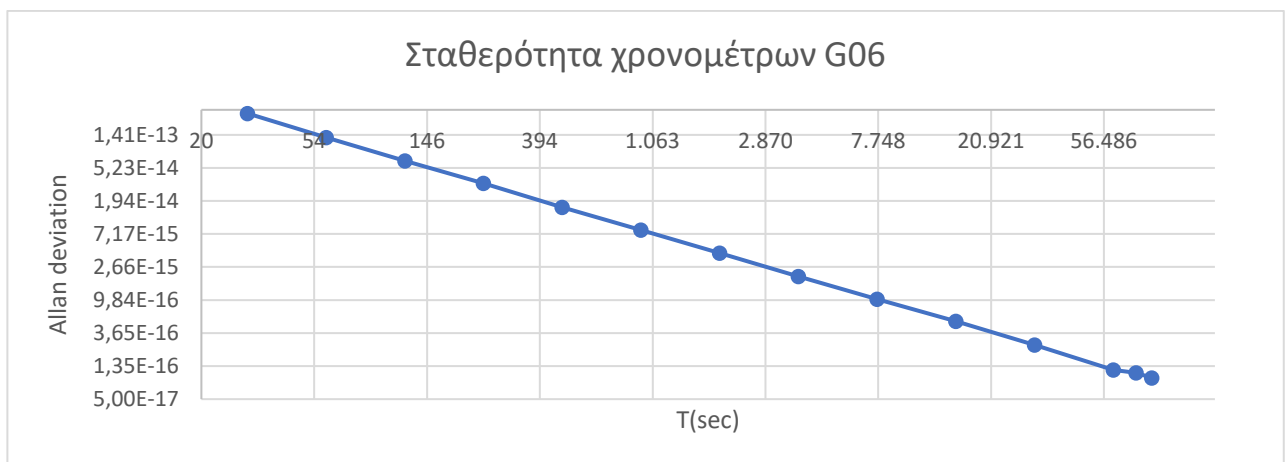
Στα παρακάτω διαγράμματα, απεικονίζεται η σταθερότητα των χρονομέτρων δορυφόρων που ανήκουν στο Block IIF, οι οποίοι παρουσιάζουν καλύτερη σταθερότητα από τους δορυφόρους των Block IIA, IIR-A, IIR-B και IIR-M. Η βραχυπρόθεσμη σταθερότητά τους ξεκινά από περίπου $3 \cdot 10^{-13}$ για τα πρώτα 30 δευτερόλεπτα και φτάνει περίπου $4 \cdot 10^{-17}$ στα 86.400 δευτερόλεπτα (ένα 24ωρο), με εξαίρεση τους δορυφόρους στα PRN 08 και 24, οι οποίοι φαίνεται να έχουν ίδια σταθερότητα με αυτούς προγενέστερων Blocks (IIA, IIR-A, IIR-B, IIR-M). Από το αρχείο με τις πληροφορίες για το Block και το είδος του χρησιμοποιούμενου χρονομέτρου, προκύπτει ότι οι δορυφόροι στα PRN G08 (Διάγραμμα 4-72) και G24 (Διάγραμμα 4-75) διαφέρουν από τους υπόλοιπους του Block IIF, γιατί χρησιμοποιούν χρονόμετρο καισίου (Cs). Σύμφωνα με αυτή την πληροφορία, θα μπορούσε κάποιος να υποθέσει ότι τα χρονόμετρα ρουβιδίου παλαιότερων Block (IIA, IIR-A, IIR-B, IIR-M) έχουν την ίδια βραχυπρόθεσμη σταθερότητα (30 sec) με τα χρονόμετρα καισίου (Cs) που περιέχονται στους δορυφόρους των Block IIF. Επίσης, όλα τα χρονόμετρα ρουβιδίου Block IIF έχουν καλύτερη σταθερότητα από τα χρονόμετρα των προγενέστερων Block.



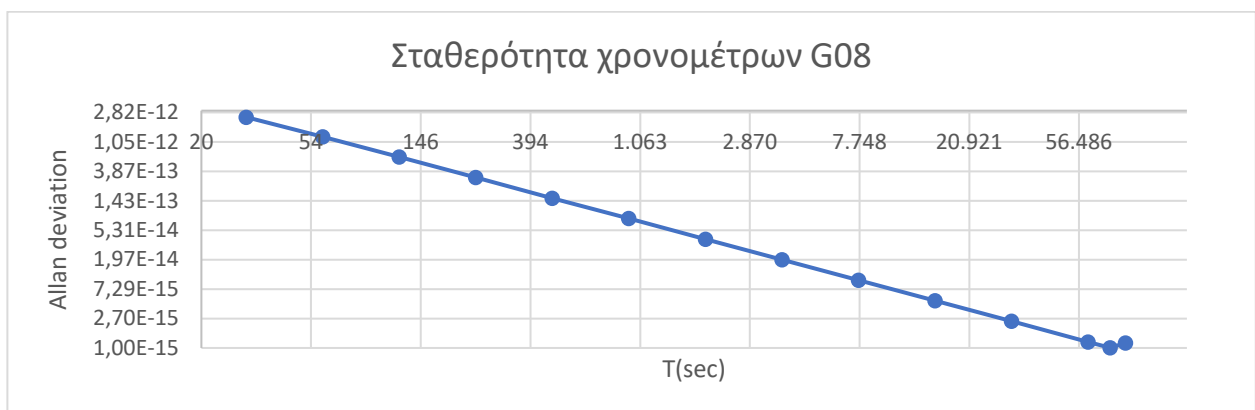
Διάγραμμα 4-69: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G01 για το έτος 2017.



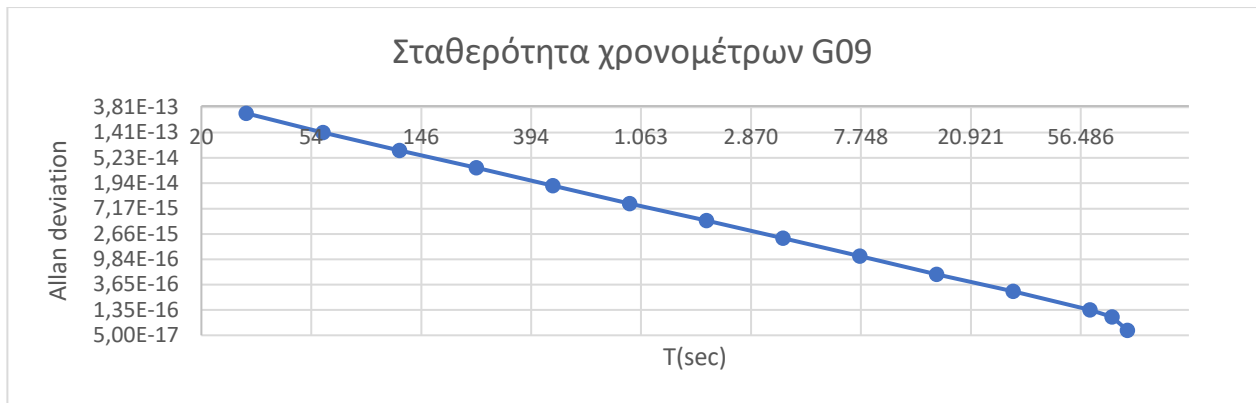
Διάγραμμα 4-70: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G03 για το έτος 2017.



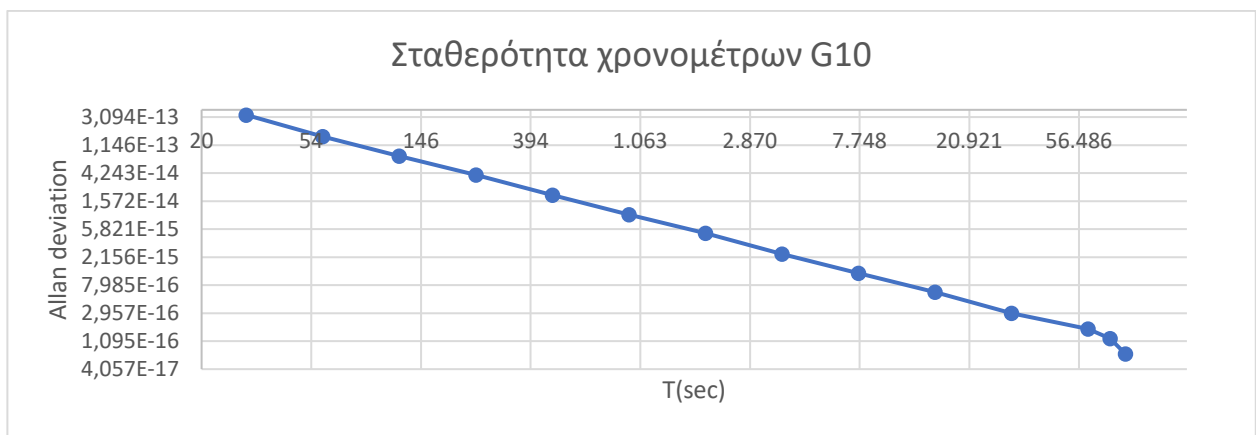
Διάγραμμα 4-71: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G06 για το έτος 2017.



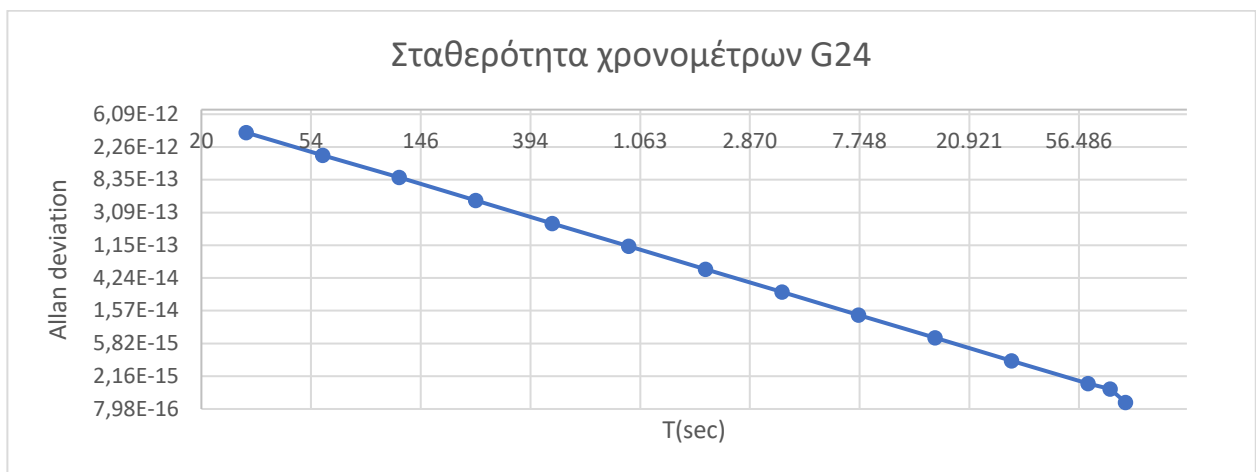
Διάγραμμα 4-72: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G08 για το έτος 2017.



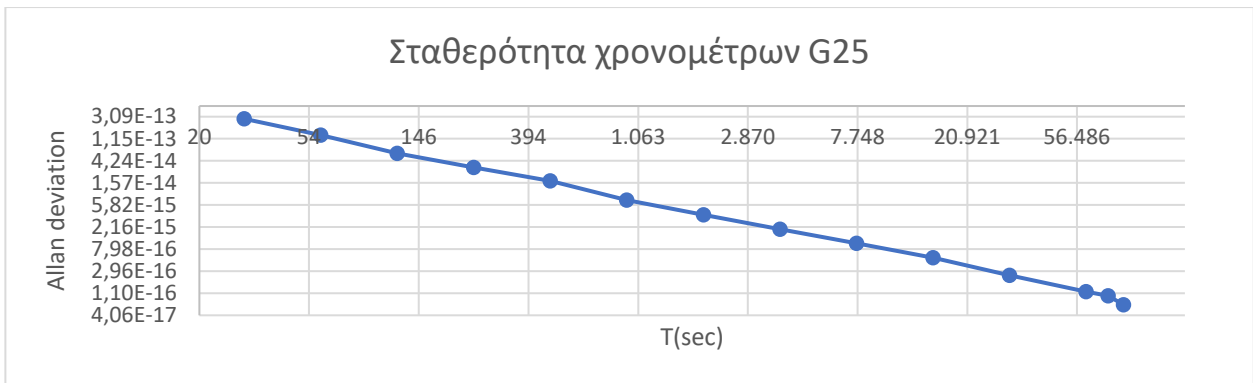
Διάγραμμα 4-73: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G09 για το έτος 2017.



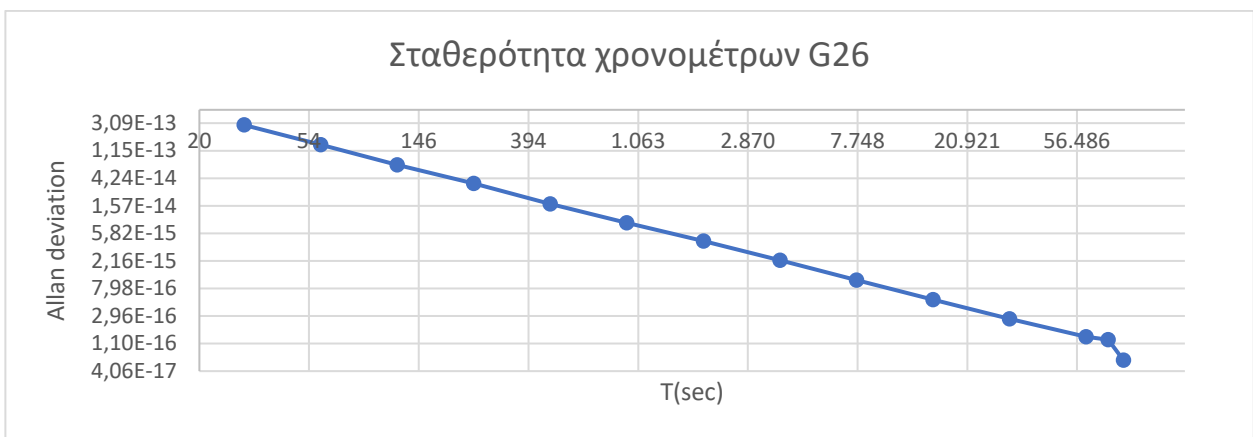
Διάγραμμα 4-74: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G10 για το έτος 2017.



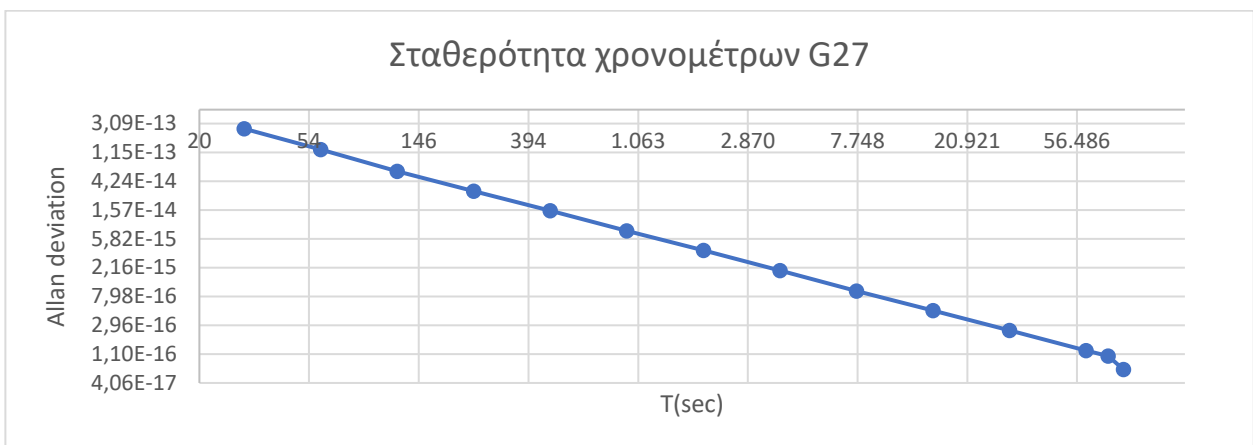
Διάγραμμα 4-75: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G24 για το έτος 2017.



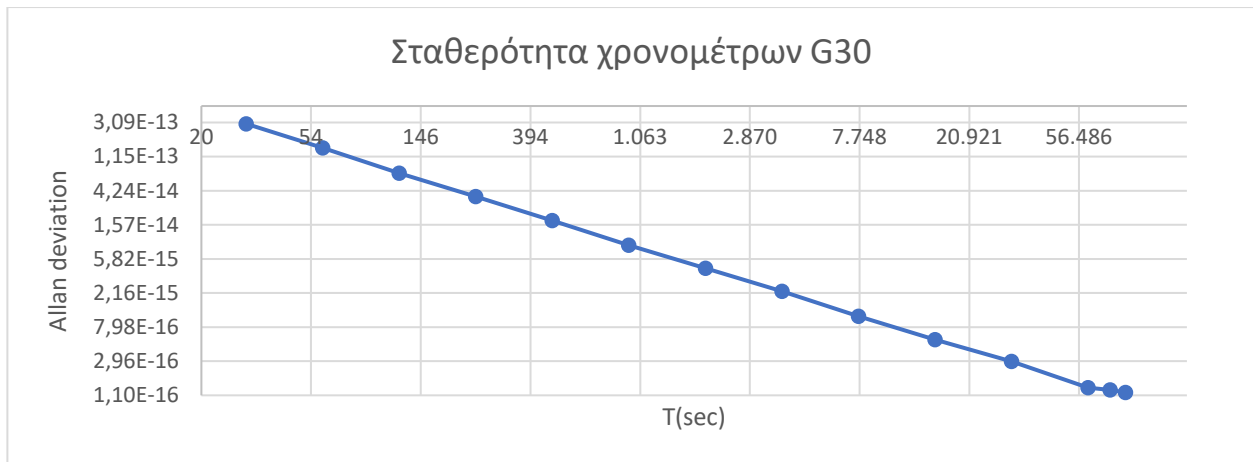
Διάγραμμα 4-76: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G25 για το έτος 2017.



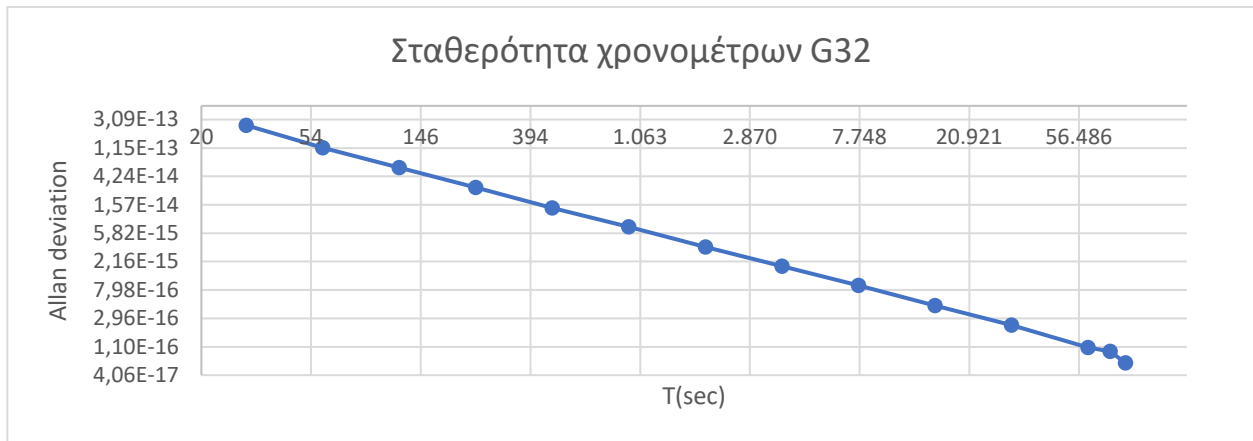
Διάγραμμα 4-77: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G26 για το έτος 2017.



Διάγραμμα 4-78: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G27 για το έτος 2017.



Διάγραμμα 4-79: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G30 για το έτος 2017.



Διάγραμμα 4-80: Σταθερότητα χρονομέτρου PRN G32 για το έτος 2017.

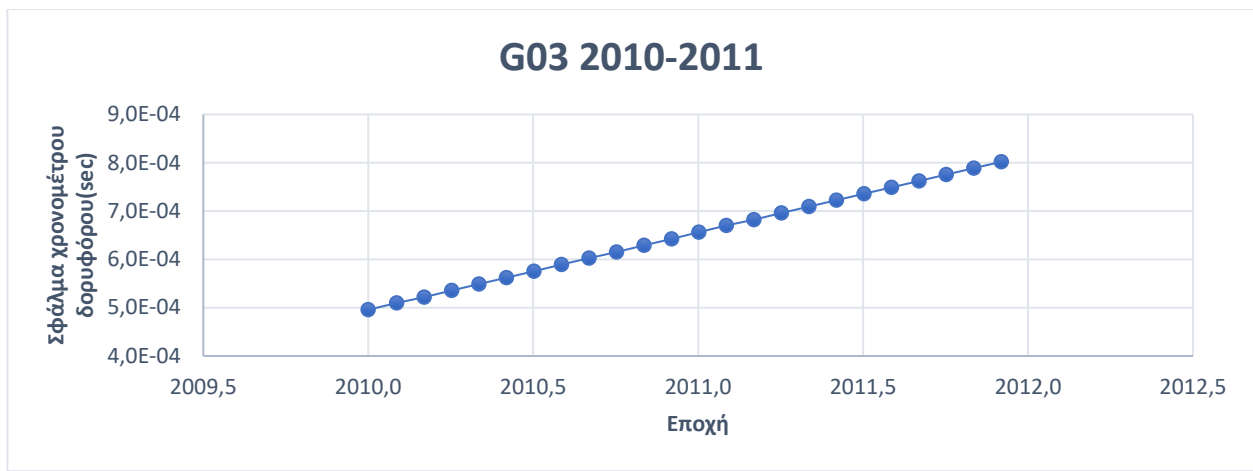
4.1.7 GPS Drift

Προκειμένου να γίνει η σύγκριση της σταθερότητας των χρονομέτρων GPS και Galileo, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η ολίσθηση (drift) των χρονομέτρων και των δύο συστημάτων δορυφορικής πλοήγησης. Στο παρόν υπο-κεφάλαιο παρατίθενται τα διαγράμματα με την απεικόνιση του σφάλματος χρονομέτρου GPS σε μία διετία.

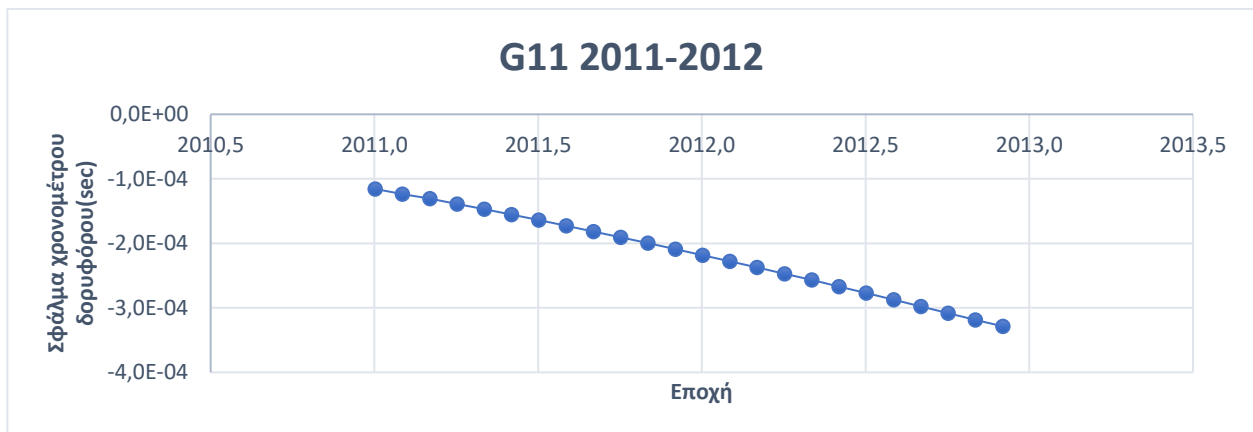
Από τη χρονική μεταβολή του σφάλματος του χρονομέτρου φαίνεται ξεκάθαρα ο ρυθμός μεταβολής του χρονομέτρου των δορυφόρων GPS ανά διετία. Επιπλέον, υπολογίστηκε και η τιμή του μέσου drift για τα συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, το Block του δορυφόρου και το είδος ρολογιού που χρησιμοποιείται. Για την απεικόνιση του drift επιλέχθηκαν τα PRN των οποίων τα

διαγράμματα στα υπό-κεφάλαια 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5 είχαν έντονη εμφάνιση drift (G21, G19, G18, G11, G10, G09, G07, G03).

Παρακάτω παρατίθενται κάποια ενδεικτικά διαγράμματα του clock offset (σφάλμα χρονομέτρου δορυφόρου) με εμφάνιση drift. Στον πίνακα 4-83 δίνονται οι τιμές του μέσου drift που υπολογίστηκαν για τους δορυφόρους, όπως και άλλες πληροφορίες όπως το Block και το είδος χρονομέτρου, προκειμένου να γίνει σύγκριση μεταξύ τους.



Διάγραμμα 4-81: Σφάλμα χρονομέτρου δορυφόρου με PRN G03 για την περίοδο 2010-2011



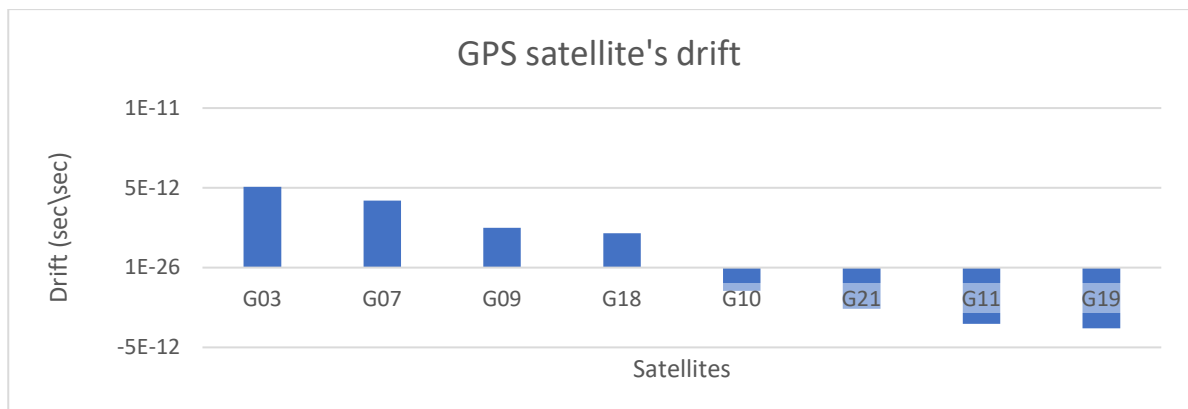
Διάγραμμα 4-82: Σφάλμα χρονομέτρου δορυφόρου με PRN G11 για την περίοδο 2011-2012.

Πίνακας 4-83

Block, SVN, Drift, χρονόμετρο δορυφόρου για τα PRN των δορυφόρων με drift.

PRN	SVN	Μέσο Drift (sec/sec)	Block	Clock	Year
G03	33	5,064E-12	IIA	Cs	2010-2011
G07	48	4,206E-12	IIR-M	Rb	2013-2014
G09	39	2,498E-12	IIA	Cs	2011-2012
G10	40	-1,451E-12	IIA	Cs	2013-2014
G11	46	-3,523E-12	IIR-A	Rb	2011-2012
G18	54	2,148E-12	IIR-A	Rb	2013-2014
G19	59	-3,800E-12	IIR-B	Rb	2011-2012
G21	45	-2,578E-12	IIR-A	Rb	2011

Το καλύτερο drift δορυφόρου είναι αυτό που πλησιάζει περισσότερο στο μηδέν. Προκειμένου να γίνει ευκολότερα αντιληπτό ποιο SV από τον πίνακα 4-83 έχει το καλύτερο drift, δημιουργήθηκε το διάγραμμα 4-84:



Διάγραμμα 4-84: Drift δορυφόρων GPS.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, τα drift μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: η πρώτη κατηγορία περιέχει τα PRN G03, G07, G09, G18 των οποίων το drift κυμαίνεται από 2×10^{-12} έως 5×10^{-12} , ενώ η δεύτερη κατηγορία περιέχει τα PRN G10, G21, G11, G19 των οποίων το drift κυμαίνεται από $-3,5 \times 10^{-12}$ έως $-1,5 \times 10^{-12}$. Πέραν του ότι οι δορυφόροι GPS των Block IIA, IIR-A, IIR-B, IIR-M έχουν καλό drift, δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα σχετικά με την απόδοση των χρονομέτρων, διότι την καλύτερη απόδοση σε drift την έχει

δορυφόρος του Block IIA με χρονόμετρο Cs (G10), όπως επίσης και τη χειρότερη απόδοση (G03).

4.2 Galileo

Προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά των χρονομέτρων Galileo, χρησιμοποιήθηκαν αρχεία clk με δεδομένα ανά 30 δευτερόλεπτα (clk_30s.Z) τύπου final, από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Προσδιορισμού Τροχιών (CODE) και τη Γαλλική Διαστημική Υπηρεσία. Χρησιμοποιήθηκαν αρχεία της πρώτης μέρας κάθε μήνα, από το 2013 έως το 2020, διότι το 2013 είναι το έτος που εμφανίστηκαν τα πρώτα clk αρχεία του συστήματος Galileo.

Αποφασίσθηκε να εξεταστούν τα αρχεία clk σε βάθος χρόνου 8 ετών, ώστε να είναι ακριβή τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν, δεδομένου ότι είναι ένα καινούργιο σύστημα εντοπισμού και δεν είναι όλοι οι δορυφόροι ενεργοί σε όλες τις χρονικές στιγμές, όπως συμβαίνει στο σύστημα GPS.

4.2.1 Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων Galileo

Η πληροφορία για το είδος χρονομέτρου που χρησιμοποιεί ο εκάστοτε δορυφόρος βρέθηκε στα αρχεία ειδοποιήσεων προς τους χρήστες (Archived User Notifications – NAGU, Gsc-europa.eu, 2016).

Όλοι οι δορυφόροι Galileo χρησιμοποιούν χρονόμετρα maser υδρογόνου (PHM) εκτός από τους δορυφόρους E11 ο οποίος :

- στις 15/10/2013 αλλάζει από RAFS σε PHM
- από 15/05/2016 αλλάζει σε RAFS το οποίο χρησιμοποιεί μέχρι σήμερα)

τον E19, ο οποίος:

- στις 14/10/2013 αλλάζει από RAFS σε PHM
- στις 09/07/2016 αλλάζει από PHM σε RAFS
- στις 26/07/2016 αλλάζει σε PHM το οποίο χρησιμοποιεί μέχρι σήμερα

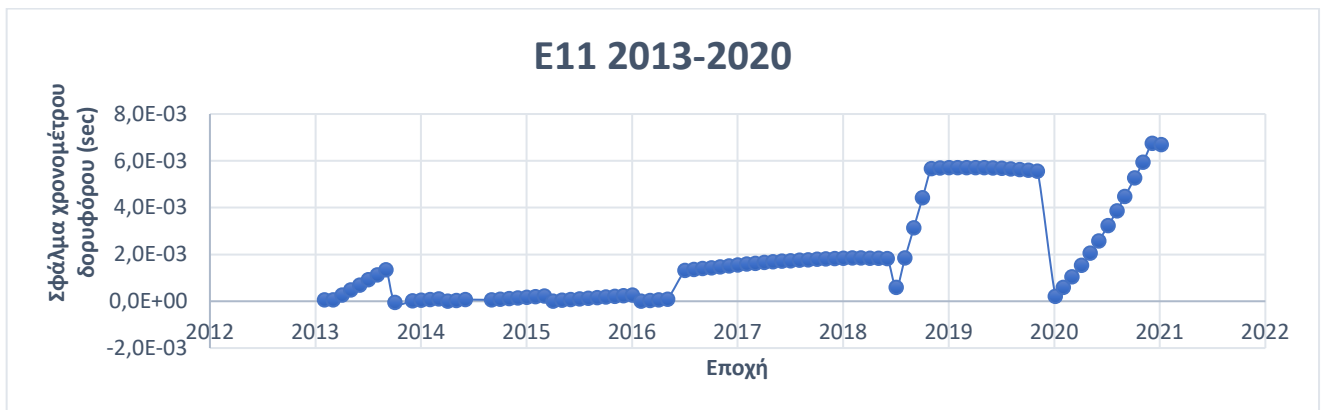
τον E20, ο οποίος:

- από 23/08/2013 έως 22/05/2014 χρησιμοποιούσε RAFS

και από τον E22 οποίος:

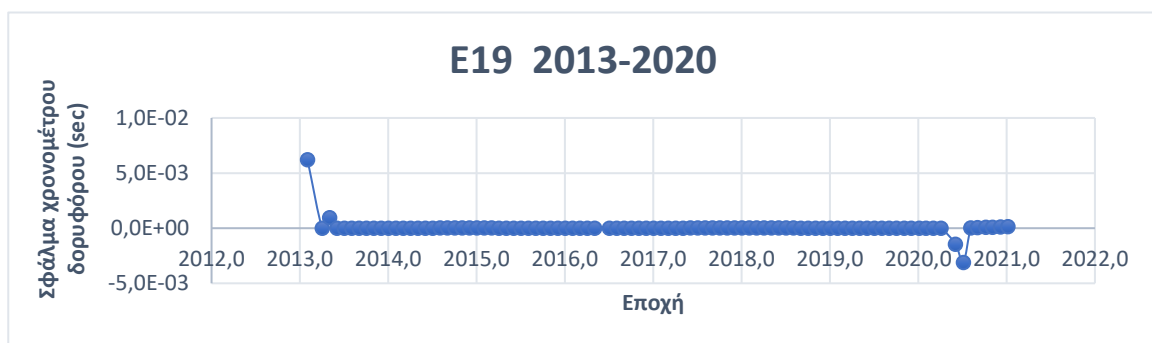
- στις 03/08/2016 αλλάζει από PHM σε RAFS, το οποίο χρησιμοποιεί έως σήμερα.

Ο δορυφόρος E11 (Διάγραμμα 4-85), σύμφωνα με τα αρχεία NAGU, τον Νοέμβριο του 2013 έχει μεταπηδήσει από χρονόμετρο ρουβιδίου σε χρονόμετρο υδρογόνου, πράγμα το οποίο φαίνεται στο διάγραμμά του. Στα μέσα του 2018 και τις αρχές του 2020 εμφανίζεται απότομη μείωση του σφάλματος (κοντά στο 0), πράγμα το οποίο δεν δικαιολογείται από αλλαγή σε χρονόμετρο μέσω κάποιας επίσημης ανακοίνωσης. Οπότε, θα μπορούσε κάποιος να υποθέσει ότι έγινε reset χρονομέτρου.



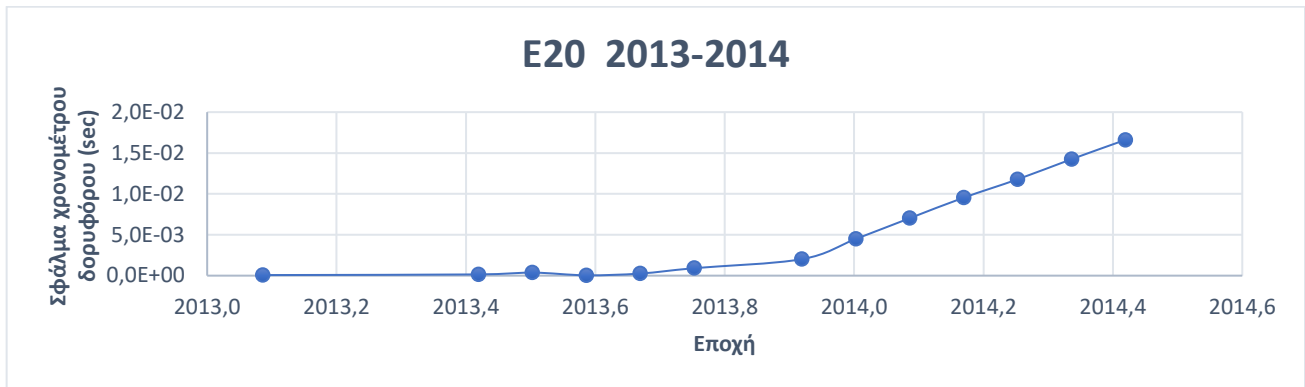
Διάγραμμα 4-85: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E11.

Η πορεία σφάλματος του χρονομέτρου με E19 φαίνεται να είναι ομαλή χωρίς drift.



Διάγραμμα 4-86: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E19

Ο δορυφόρος με PRN E20 (Εικόνα 4-87) εξαιρείται της διαδικασίας αξιολόγησης λόγω ελλিপών δεδομένων. Όπως φαίνεται και στην επίσημη ανακοίνωση της ESA, τέθηκε εκτός λειτουργίας λίγο μετά την εκτόξευσή του (Εικόνα 4-88).



Διάγραμμα 4-87: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E20.

DATE GENERATED (UTC): 2014-05-28 09:45

NAGU TYPE: UNP_UNUFN

NAGU NUMBER: 2014014

NAGU SUBJECT: UNAVAILABLE FROM 2014-05-27 UNTIL FURTHER NOTICE

NAGU REFERENCED TO: N/A

START DATE EVENT (UTC): 2014-05-27 12:30

END DATE EVENT (UTC): N/A

SATELLITE AFFECTED: GSAT0104

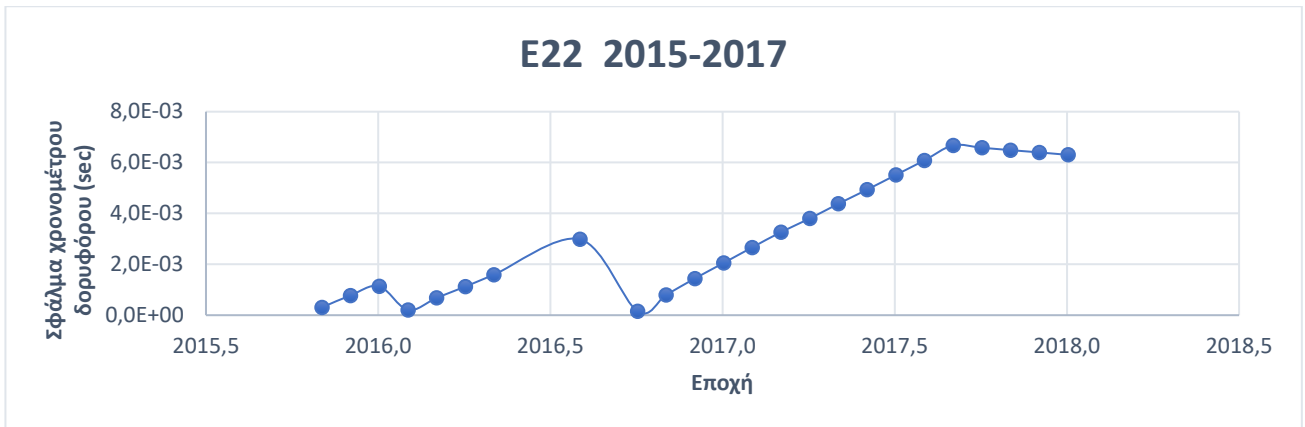
SPACE VEHICLE ID: 20

SIGNAL(S) AFFECTED: ALL

EVENT DESCRIPTION: GALILEO SATELLITE GSAT0104 (ALL SIGNALS) IS UNAVAILABLE SINCE 2014-05-27 BEGINNING 12:30 UTC UNTIL FURTHER NOTICE.

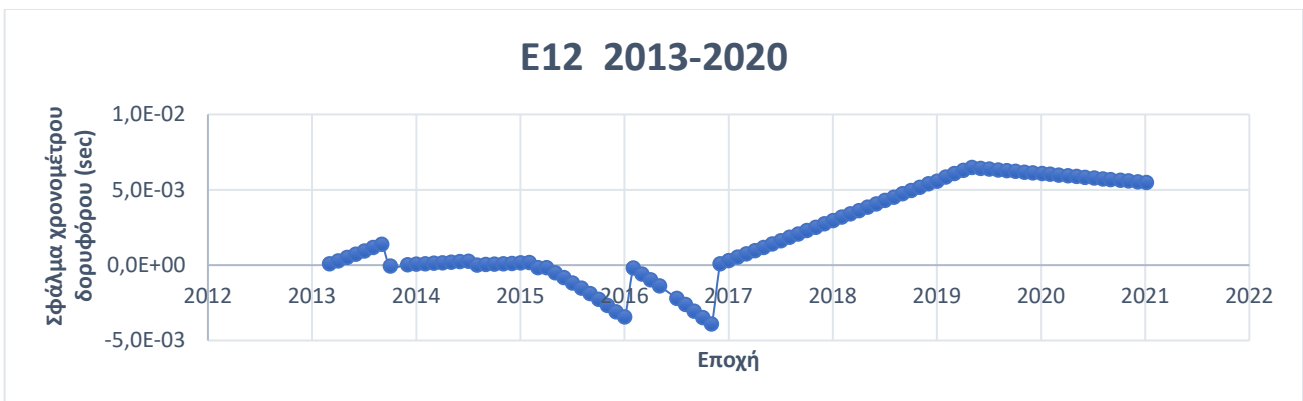
Εικόνα 4-88: Ανακοίνωση για E20

Στο διάγραμμα του δορυφόρου με E22 (Διάγραμμα 4-89) εμφανίζεται απότομη μείωση του σφάλματος στις αρχές του 2016, η οποία δεν δικαιολογείται από κάποια επίσημη ανακοίνωση, οπότε θα μπορούσε κανείς να υποθέσει ότι το χρονόμετρο έχει υποστεί reset για να μην αυξηθεί το drift. Το καλοκαίρι του 2016 εμφανίζεται πάλι απότομη μείωση του σφάλματος, η οποία δικαιολογείται από την εναλλαγή σε χρονόμετρο ρουβιδίου. Δεν υπάρχουν πληροφορίες για τον Δεκέμβρη του 2017. Αυτό δικαιολογείται με επίσημη ανακοίνωση προς τους χρήστες Galileo από την ESA, η οποία αναφέρει «GALILEO SATELLITE GSAT0204 NOT CONTRIBUTING TO SERVICE PROVISION (ALL SIGNALS) FROM 2017-12-08 UNTIL FURTHER NOTICE».



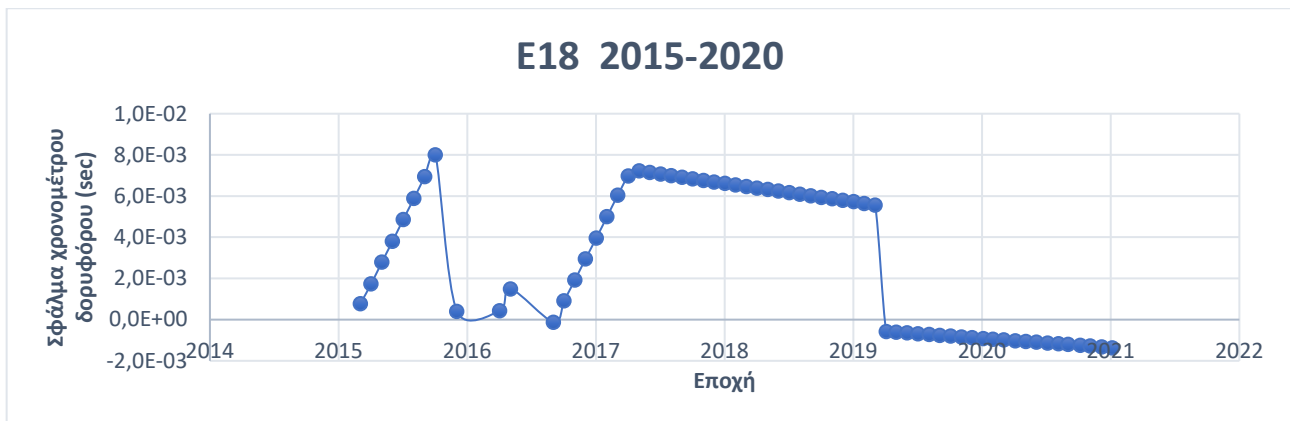
Διάγραμμα 4-89: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E22.

Ο δορυφόρος E12 (διάγραμμα 4-90) χρησιμοποιεί χρονόμετρο υδρογόνου (PHM) και ανήκει στους IOV (Initial Operation Validation). Η συμπεριφορά του απεικονίζεται στο διάγραμμα 4-90. Παρατηρούνται απότομες αλλαγές στην τιμή του σφάλματος στα τέλη του 2013, όπως επίσης και αλλαγή της συμπεριφοράς του χρονομέτρου από τις αρχές του 2017 και μετά. Εφόσον δεν έχει υπάρξει κάποια ανακοίνωση που να προαναγγέλλει τις αλλαγές αυτές, θα μπορούσε κανείς να υποθέσει ότι, στα τέλη του 2013 και στις αρχές του 2017, μάλλον έχει γίνει reset του χρονομέτρου για να περιοριστεί το ήδη μεγάλο drift. Η συμπεριφορά καθ' όλη τη διάρκεια του 2016 είναι παράξενη και παρατηρείται και σε άλλους δορυφόρους – για το θέμα αυτό, θα γίνει σχετικός σχολιασμός στο τέλος του υπο-κεφαλαίου.



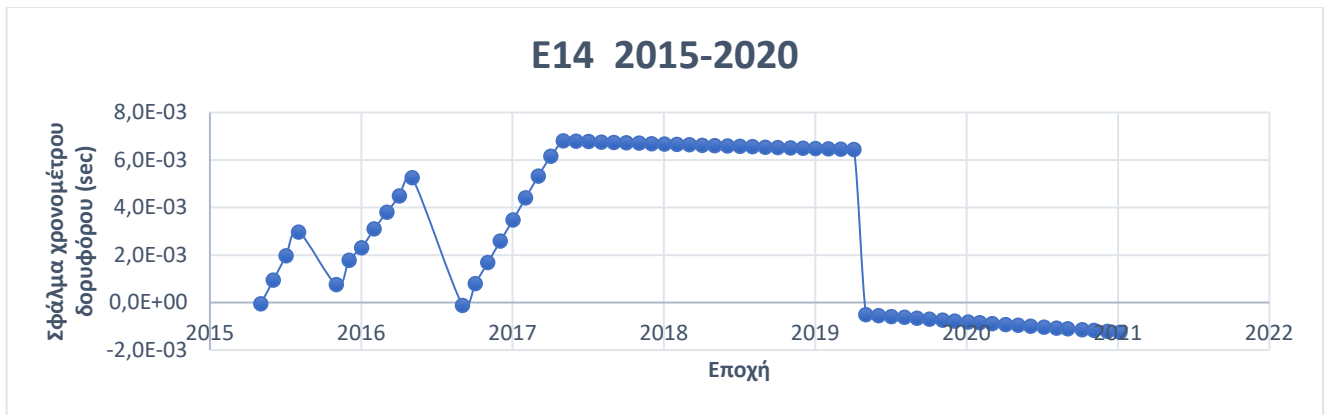
Διάγραμμα 4-90: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E12.

Ο δορυφόρος με E18 εκτοξεύτηκε στις 22/08/2014, εξ' ου και τα ελλιπή δεδομένα. Σύμφωνα με τη European Union Agency for Space Program (EUSPA), χρησιμοποιείται χρονόμετρο υδρογόνου. Η συμπεριφορά του απεικονίζεται στο διάγραμμα 4-91: παρατηρείται έντονο drift στις αρχές του 2015, το οποίο μειώνεται απότομα στις αρχές του 2016, συμπεριφορά η οποία μοιάζει με reset χρονομέτρου. Δεδομένου ότι το 2016 έχει ελλιπή δεδομένα, θα μπορούσε κανείς να υποθέσει ότι εάν είχε πλήρη δεδομένα θα εμφάνιζε την ίδια συμπεριφορά με τους δορυφόρους E14, E2, E30, E08, E09, E18. Η απότομη μείωση το 2019 δεν μπορεί να εξηγηθεί.



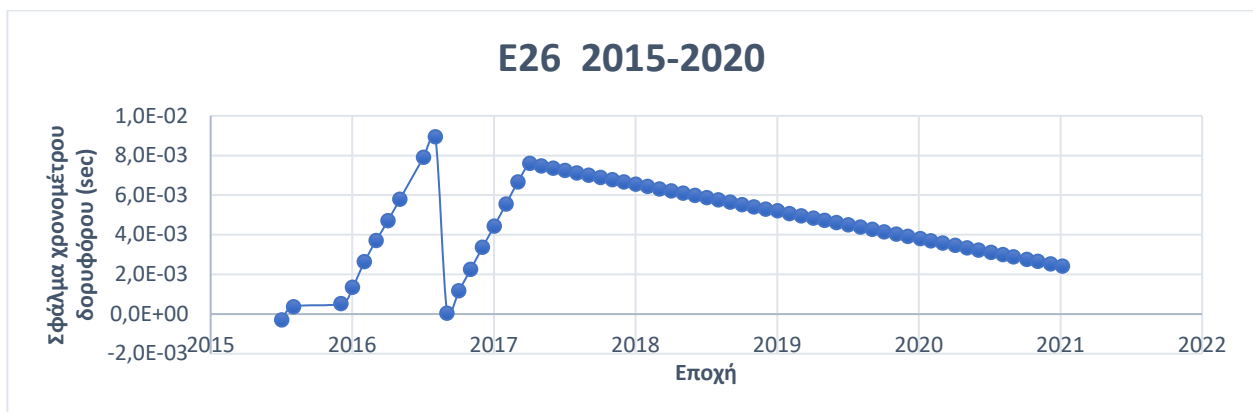
Διάγραμμα 4-91: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E18.

Η εκτόξευση του δορυφόρου με E14 έγινε στις 22/08/2014, οπότε και τα δεδομένα ξεκινούν από το 2015, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4-92. Παρατηρείται απότομη μείωση του σφάλματος (κοντά στο μηδέν) στα τέλη του 2016. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται και σε άλλους δορυφόρους και θα σχολιαστεί στο τέλος του υπο-κεφαλαίου. Παρατηρείται και εδώ απότομη μείωση του σφάλματος στα μέσα του 2019, όπως στον δορυφόρο E18, συμπεριφορά η οποία δεν μπορεί να δικαιολογηθεί με τα υπάρχοντα δεδομένα.



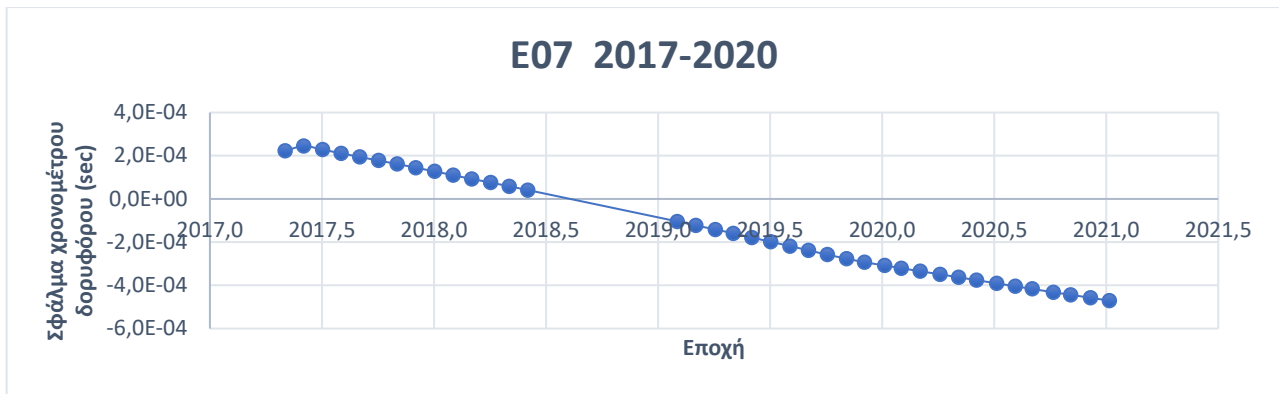
Διάγραμμα 4-92: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E14.

Η εκτόξευση του δορυφόρου με E26 έγινε στις 27/03/2015, οπότε και τα δεδομένα ξεκινούν από τα μέσα του 2015, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4-93. Η συμπεριφορά του χρονομέτρου το 2016 παρατηρείται και σε άλλους δορυφόρους και θα σχολιαστεί στο τέλος του υπο-κεφαλαίου.

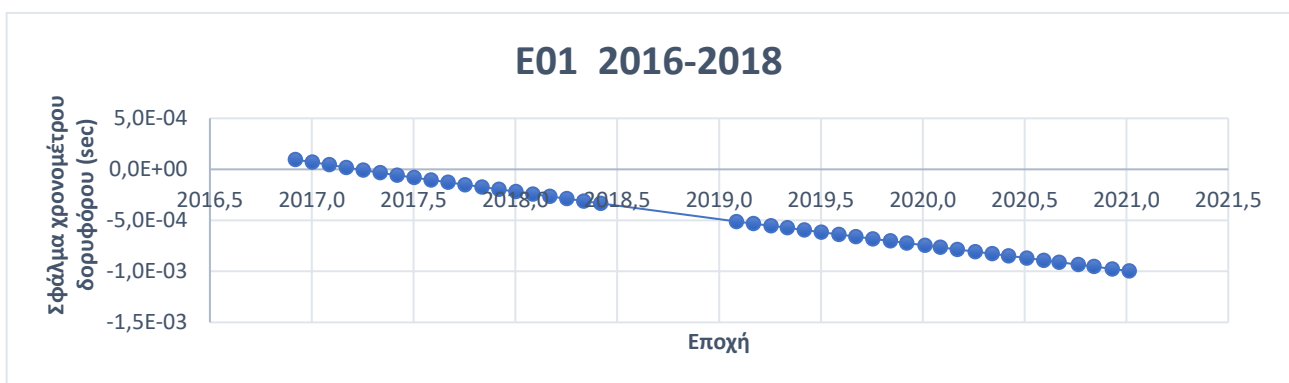


Διάγραμμα 4-92: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E26.

Οι δορυφόροι με E07, E01, E03, E04, E27, E13 και E15 χρησιμοποιούν χρονόμετρο υδρογόνου (PHM), όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του υπο-κεφαλαίου, ενώ στα διαγράμματά τους (Διάγραμμα 4-93, 4-94, 4-95, 4-96, 4-97, 4-98, 4-99) εμφανίζουν drift.



Διάγραμμα 4-93: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E07.



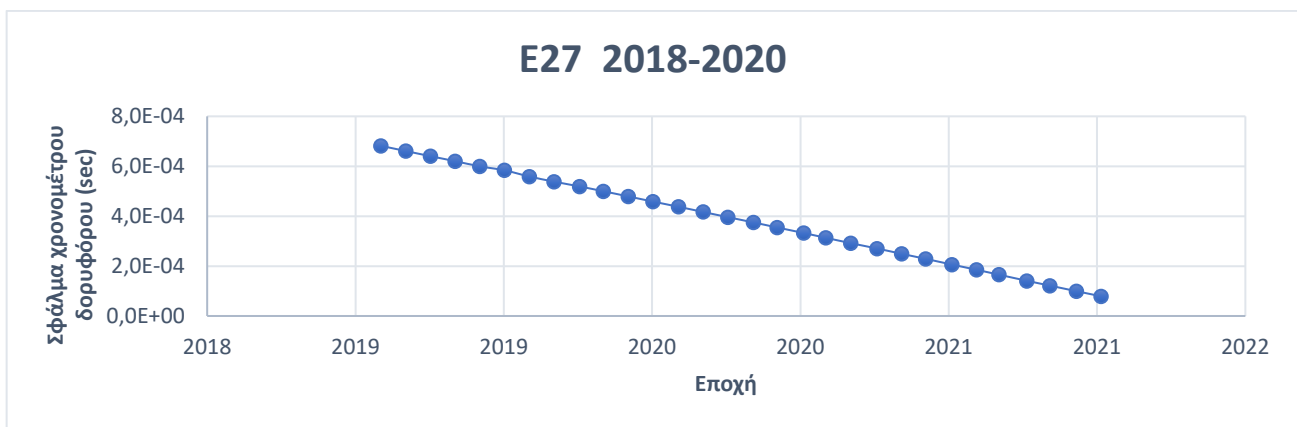
Διάγραμμα 4-94: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E01.



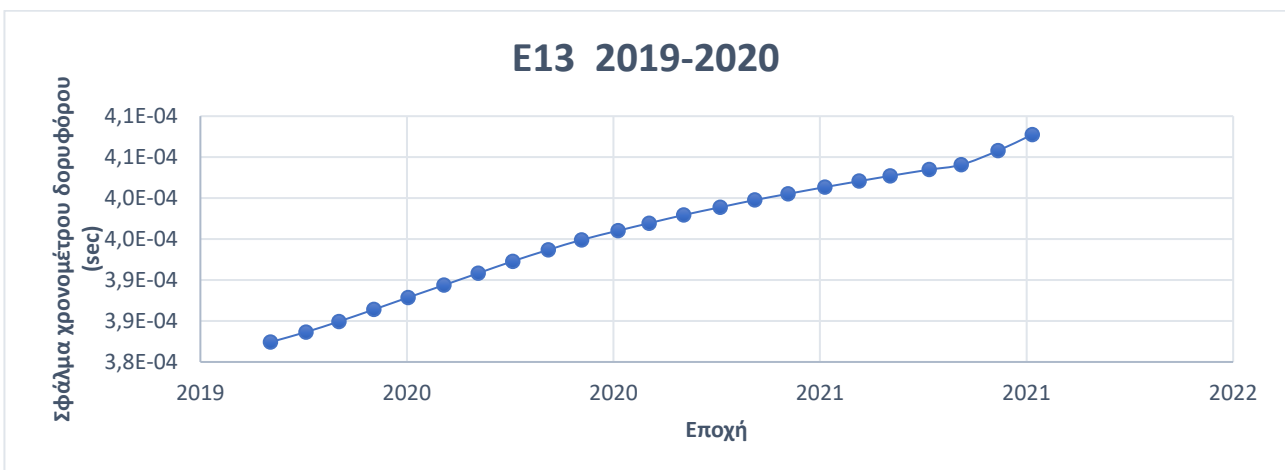
Διάγραμμα 4-95: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E03.



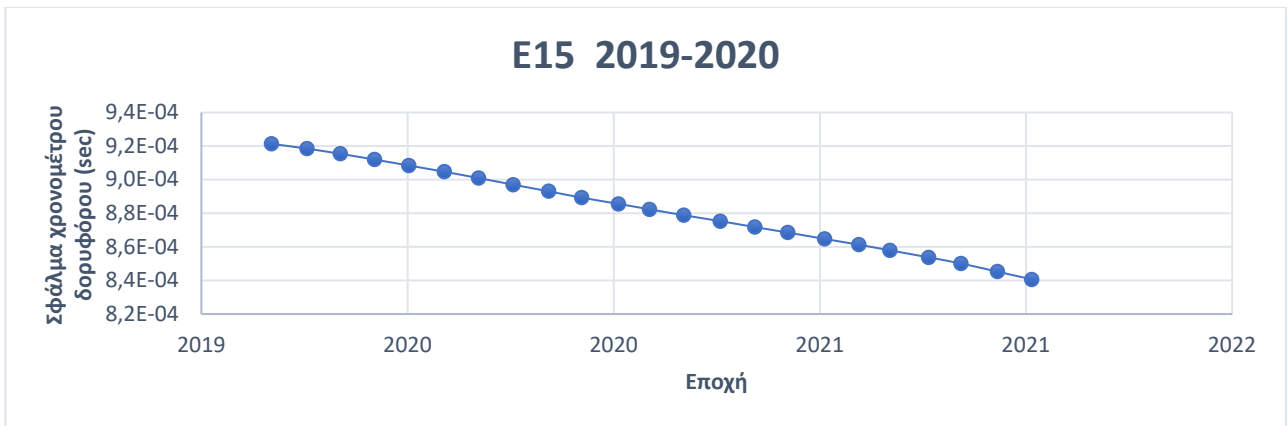
Διάγραμμα 4-96: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E04.



Διάγραμμα 4-97: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E27.

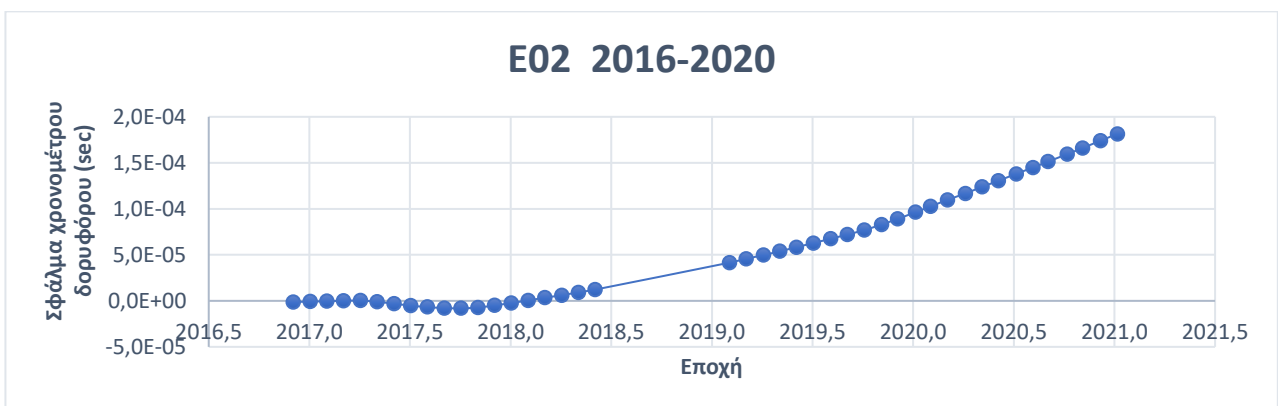


Διάγραμμα 4-98: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E13.



Διάγραμμα 4-99: Σφάλμα χρονόμετρων δορυφόρου με E15.

Στα διαγράμματα των δορυφόρων με E02, E33 (Διάγραμμα 4-100, 4-101) παρατηρείται aging των χρονόμετρων (PHM). Αλλάζει το drift τους με το πέρασμα του χρόνου.

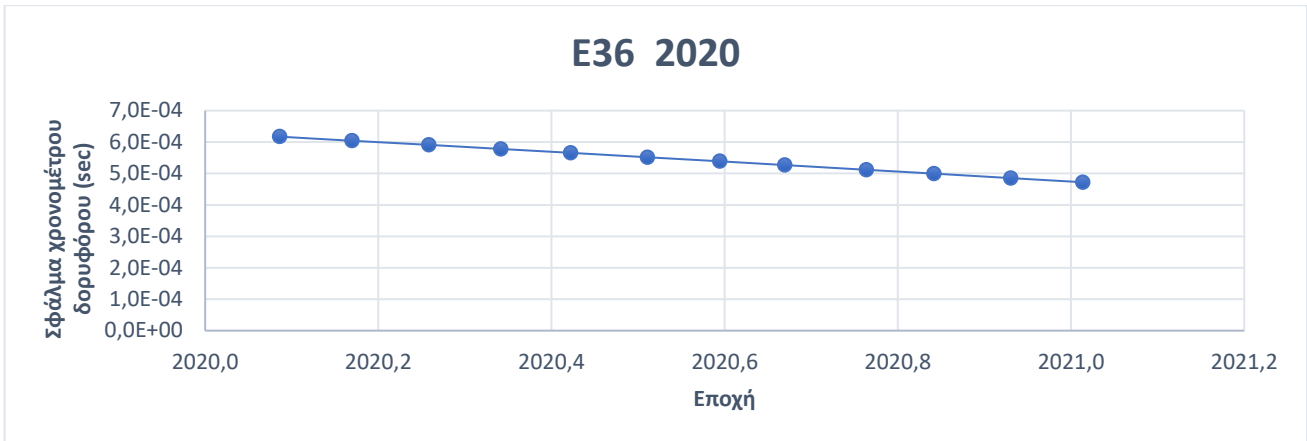


Διάγραμμα 4-100: Σφάλμα χρονόμετρων δορυφόρου με E02.

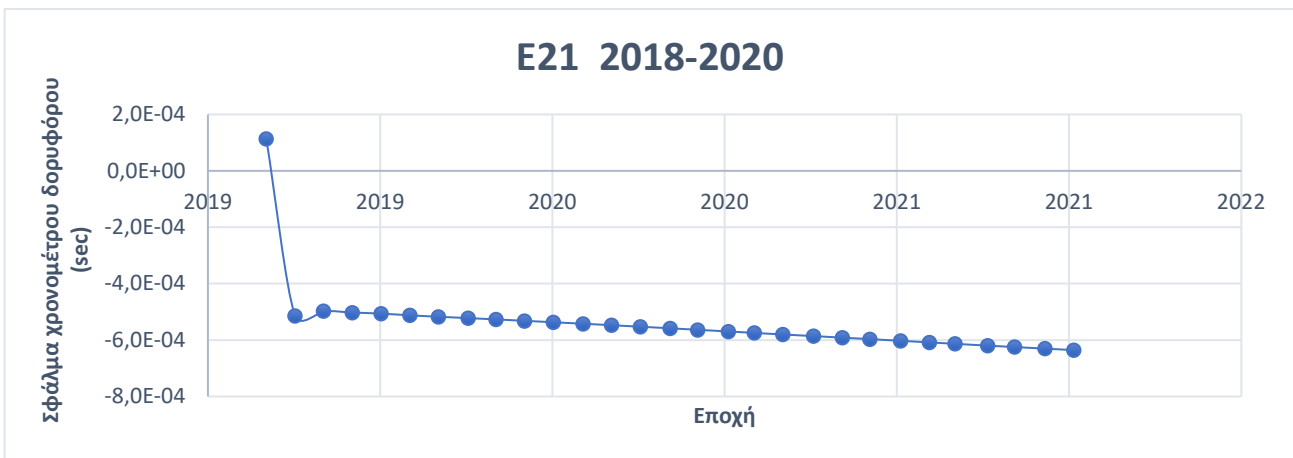


Διάγραμμα 4-101: Σφάλμα χρονόμετρων δορυφόρου με E33.

Τα διαγράμματα των δορυφόρων με PRN E36, E21 χρησιμοποιούν χρονόμετρο υδρογόνου (PHM), όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του υποκεφαλαίου και από τα διαγράμματά τους 4-102, 4-103 φαίνεται πως το χρονόμετρό τους έχει ομαλή συμπεριφορά.

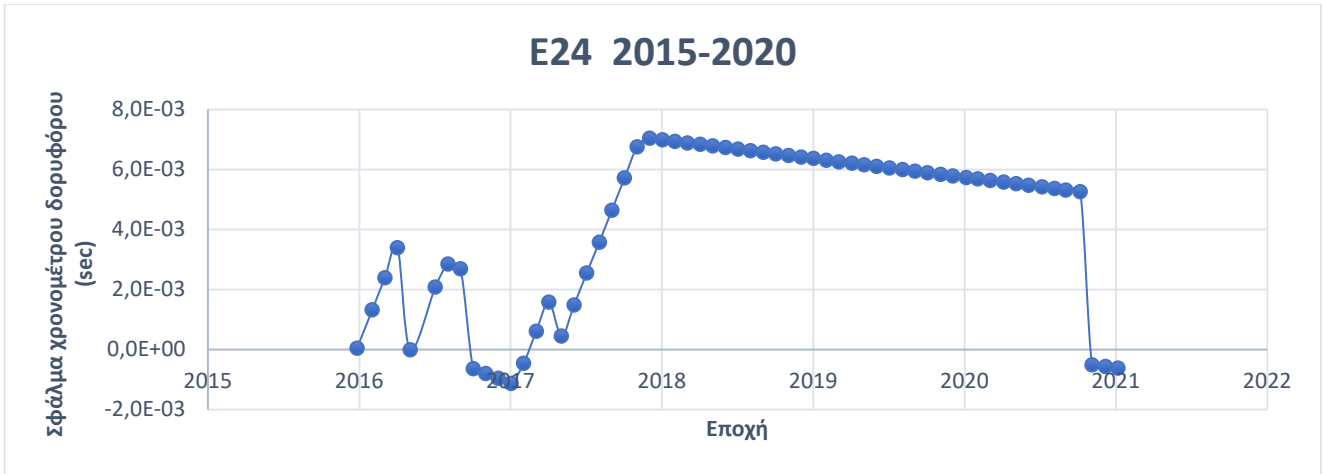


Διάγραμμα 4-102: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με PRN E36.

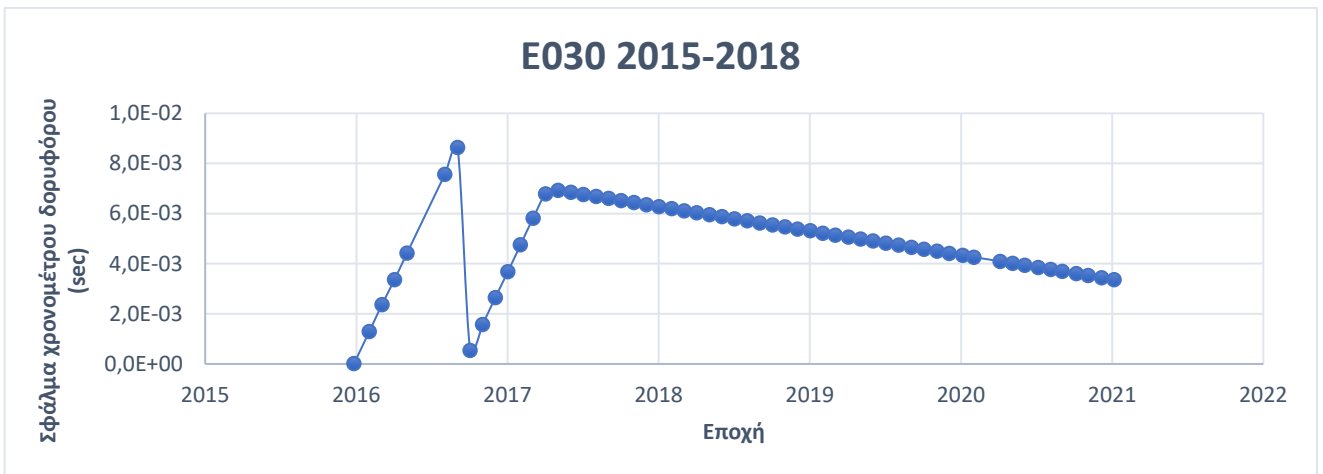


Διάγραμμα 4-103: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E21.

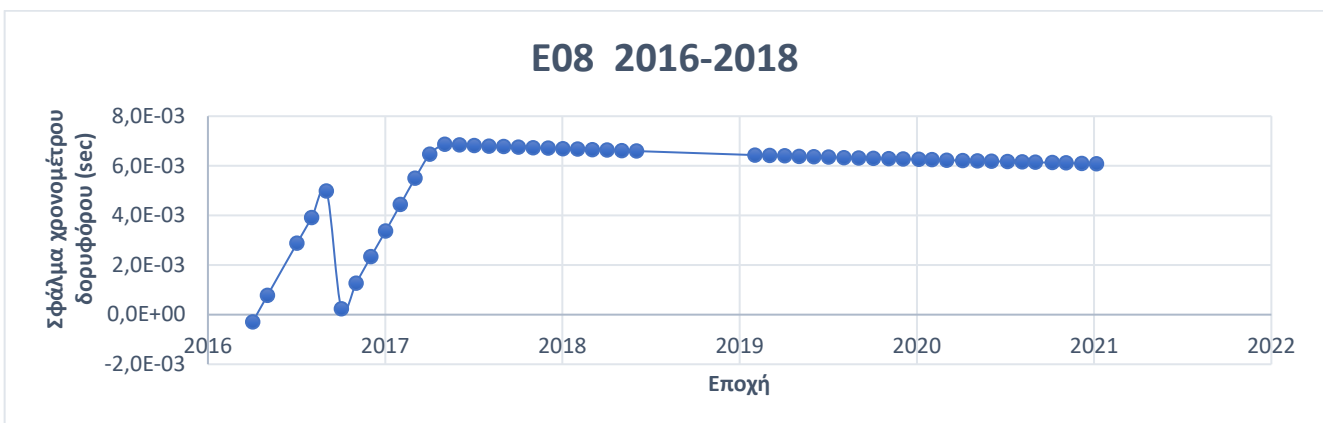
Στα διαγράμματα των δορυφόρων με PRN E24, E30, E08, E09 (Διάγραμμα 4-104, 4-105, 4-106, 4-107) που δίνονται στην συνέχεια, εμφανίζεται πάλι η παράξενη συμπεριφορά με ίδιο συστηματικό πρότυπο, όπως στα χρονόμετρα των δορυφόρων E14, E26, E18. Η συμπεριφορά αυτή κατά τη διάρκεια του έτους 2016, δεν μπορεί να εξηγηθεί και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.



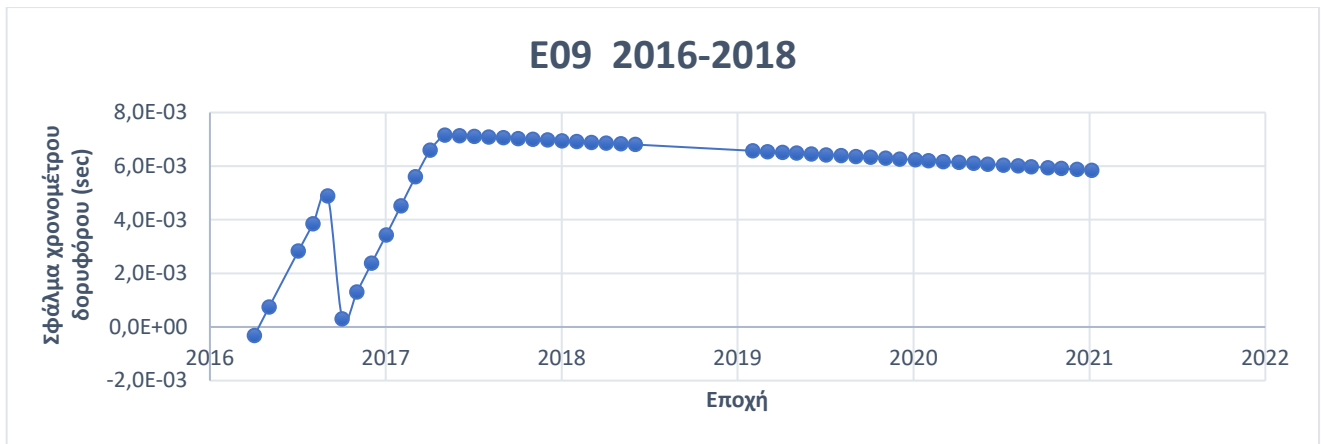
Διάγραμμα 4-104: Σφάλμα χρονόμετρων δορυφόρου με E24.



Διάγραμμα 4-105: Σφάλμα χρονόμετρων δορυφόρου με E30.



Διάγραμμα 4-106: Σφάλμα χρονόμετρων δορυφόρου με E08.

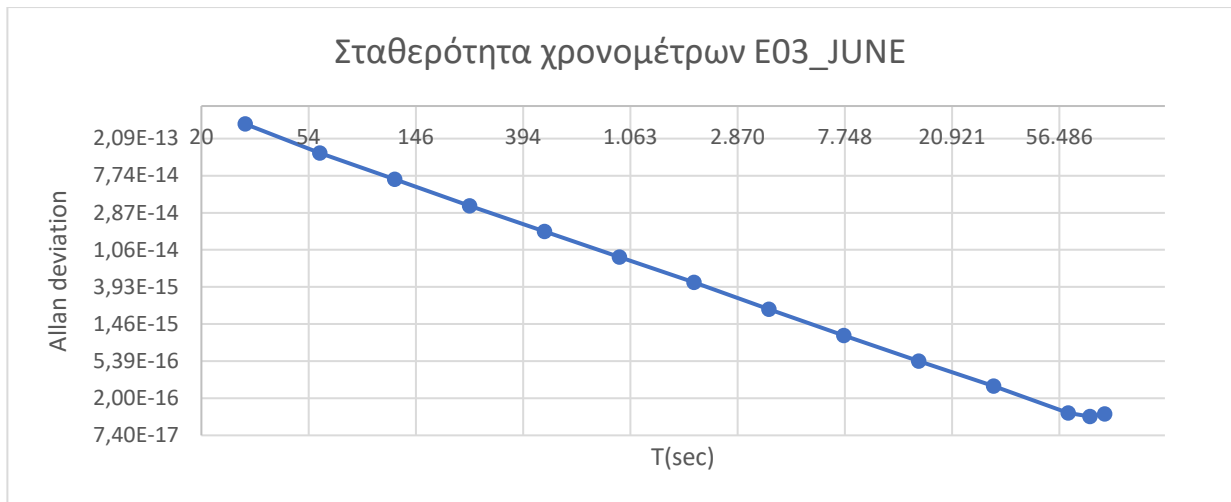


Διάγραμμα 4-107: Σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου με E09.

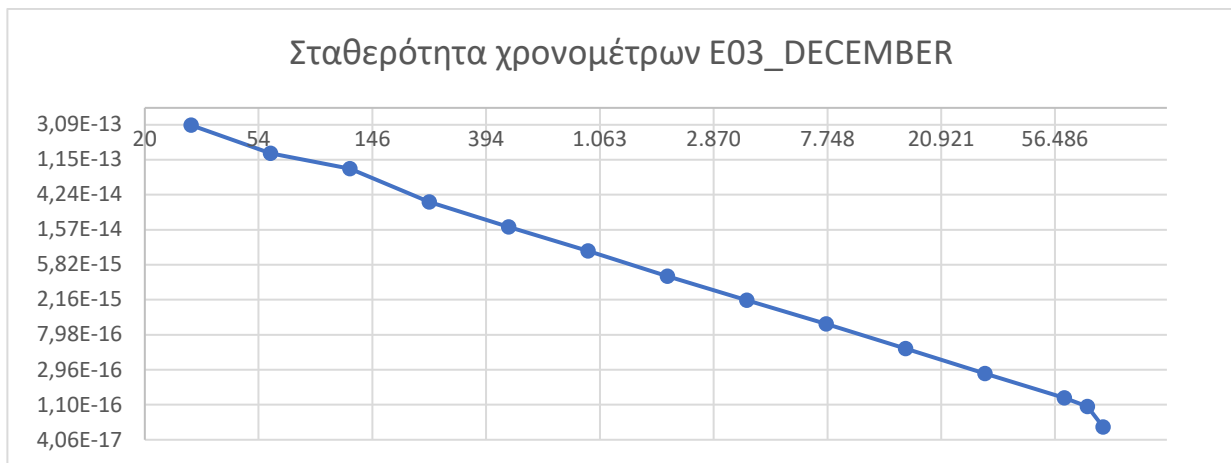
4.2.2 Galileo Allan variance

Σε αυτό το υπο-κεφάλαιο, εξετάζεται η σταθερότητα των δορυφόρων Galileo με τη βοήθεια της μεταβλητότητας Allan (Allan Variance), προκειμένου να συγκριθεί με αυτή των δορυφόρων GPS. Τα δεδομένα που επεξεργαστήκαν, προήλθαν από το κέντρο CODE και τη French Space Agency. Το έτος προς εξέταση είναι το 2017, ίδιο με αυτό που εξετάστηκε το σύστημα GPS.

Όπως έγινε και για τους δορυφόρους GPS, για την επιλογή του μηνός έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων του Ιουνίου (Διάγραμμα 4-108) και του Δεκεμβρίου (Διάγραμμα 4-109) για τρεις δορυφόρους και, αφού διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει διαφορά στα αποτελέσματα, επιλέχθηκε τυχαία ο μήνας Ιούνιος. Αποφασίστηκε ότι το δείγμα των τριών δορυφόρων είναι επαρκές για να βγει ένα αξιόπιστο συμπέρασμα για τη συμπεριφορά της σταθερότητας με το πέρασμα των μηνών. Λόγω οικονομίας χώρου, παρατίθενται τα αποτελέσματα του ενός μόνο δορυφόρου.

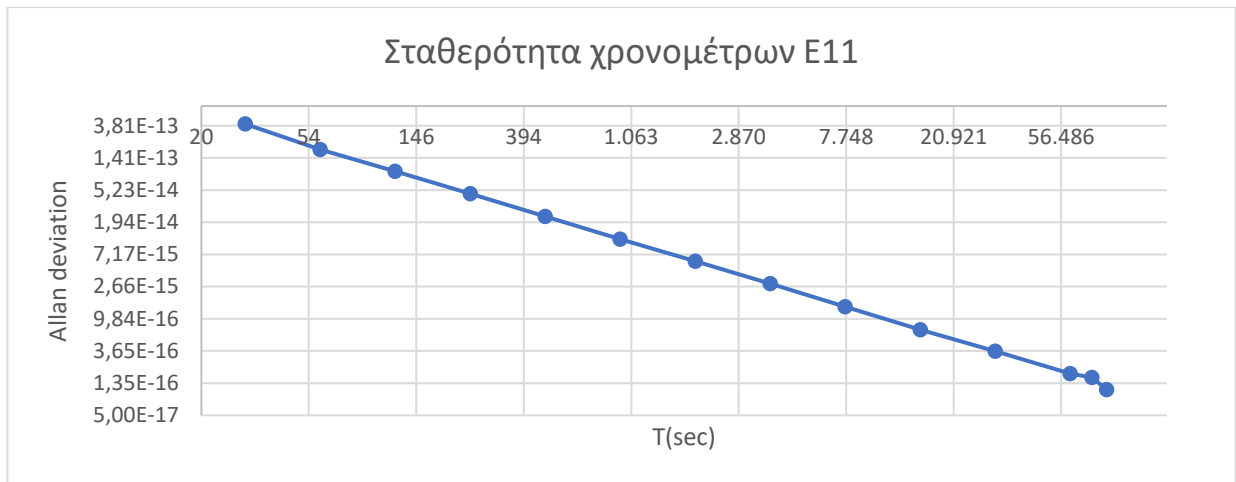


Διάγραμμα 4-108: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E03 για τον μήνα Ιούνιο.

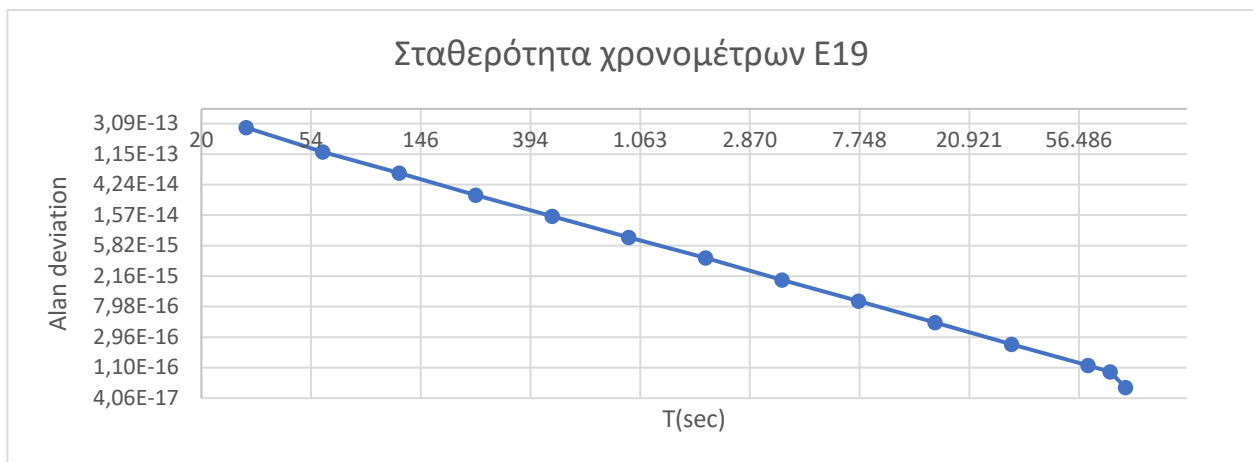


Διάγραμμα 4-109: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E03 για τον μήνα Δεκέμβριο.

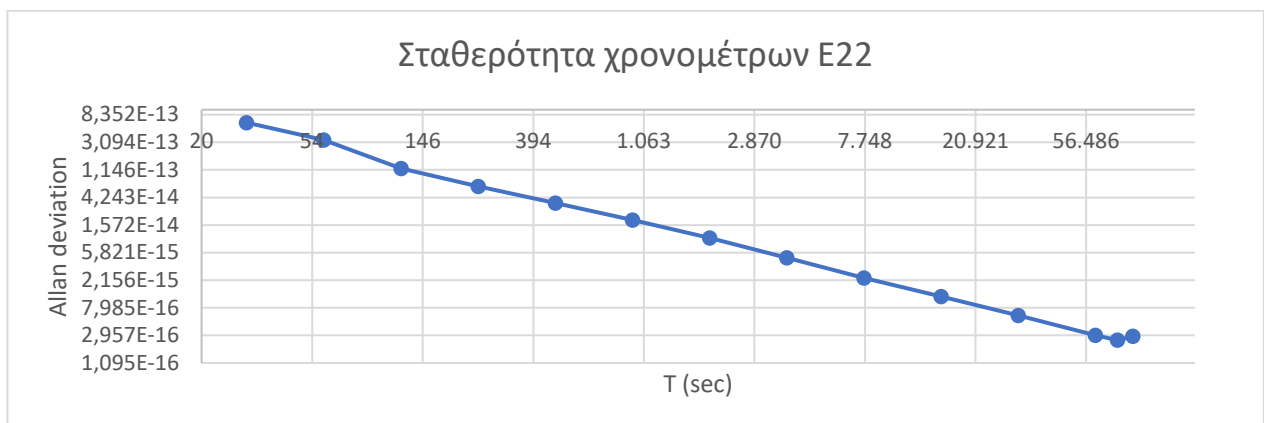
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα δορυφόρων: όλοι οι δορυφόροι Galileo έχουν χρονόμετρα υδρογόνου για το έτος 2017, εκτός από τους E11, E22.



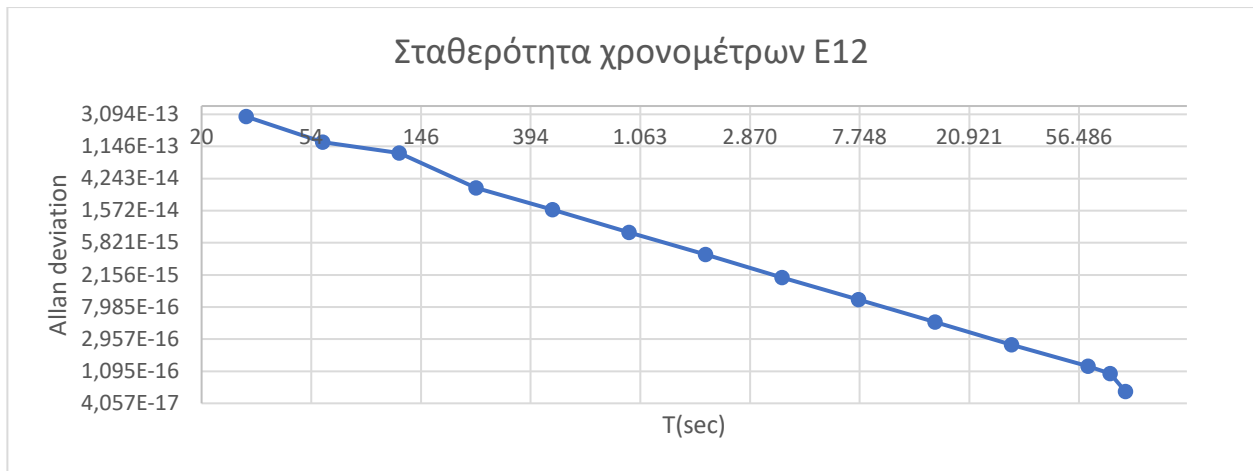
Διάγραμμα 4-110: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E11.



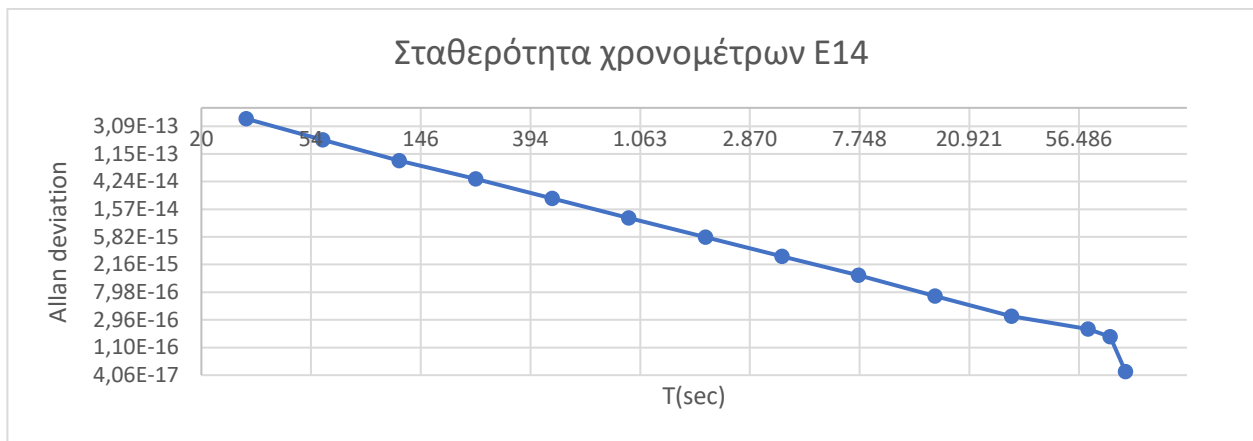
Διάγραμμα 4-111: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E19.



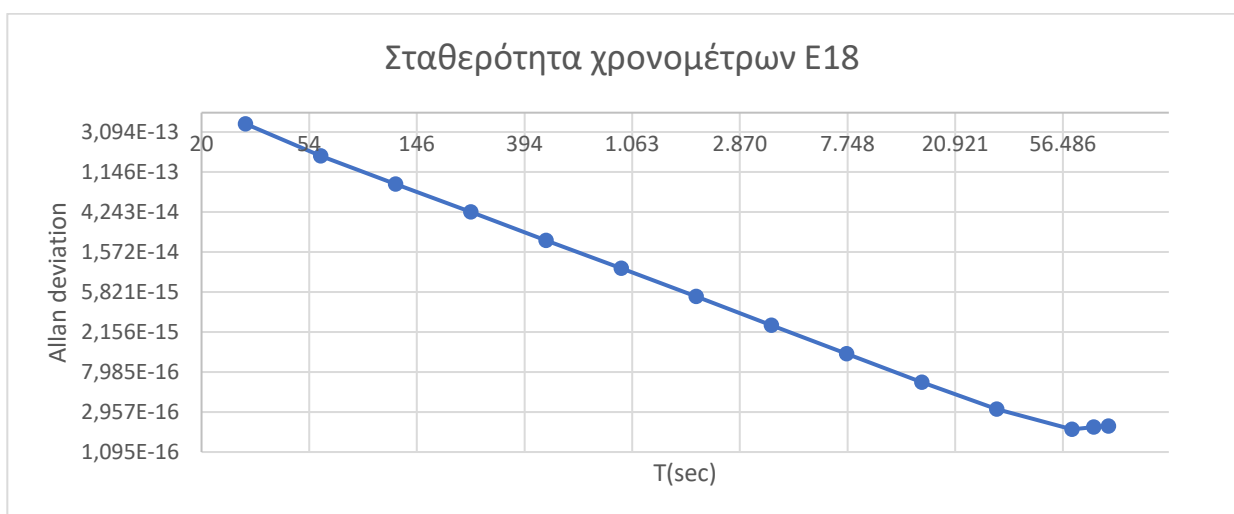
Διάγραμμα 4-112: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E22.



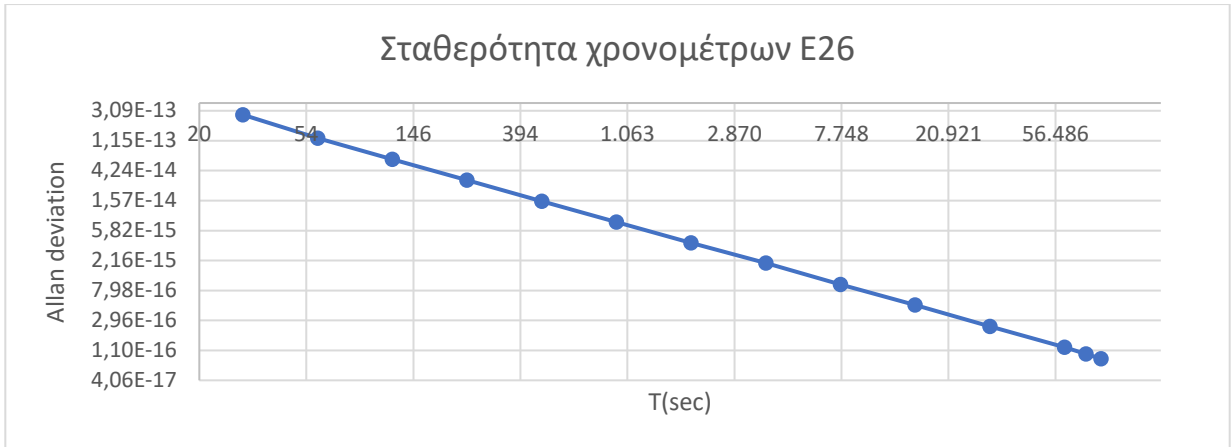
Διάγραμμα 4-113: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E12.



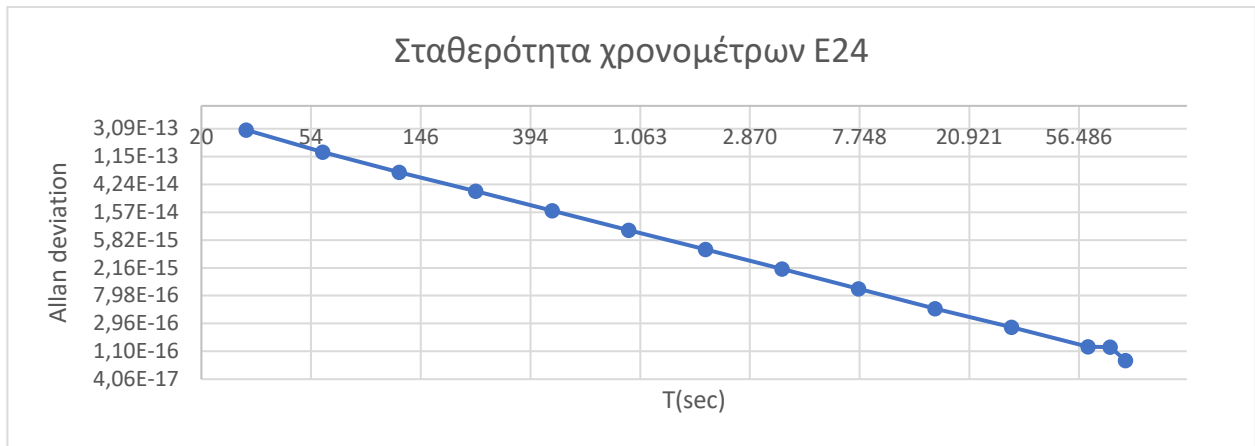
Διάγραμμα 4-114: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E14.



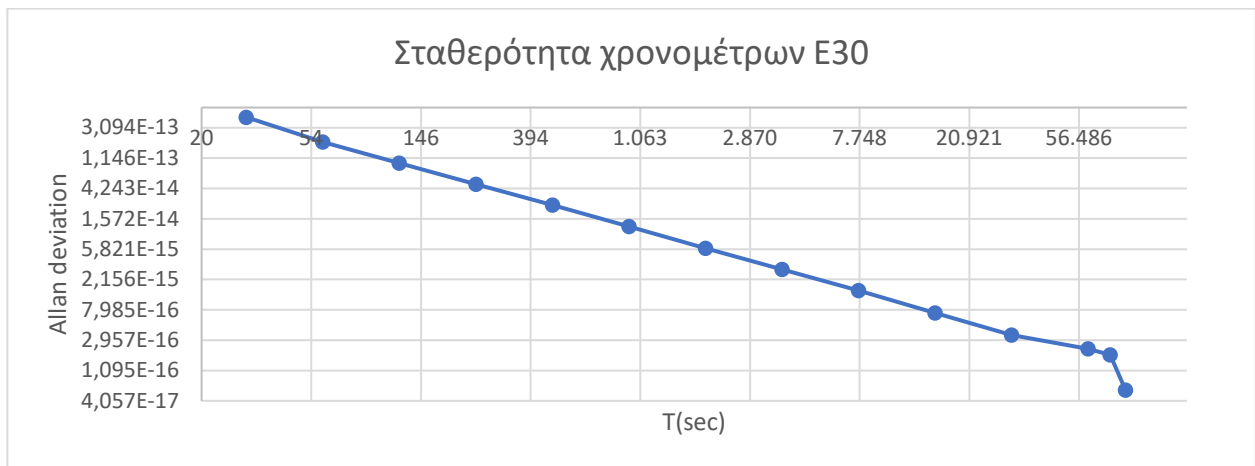
Διάγραμμα 4-115: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E18.



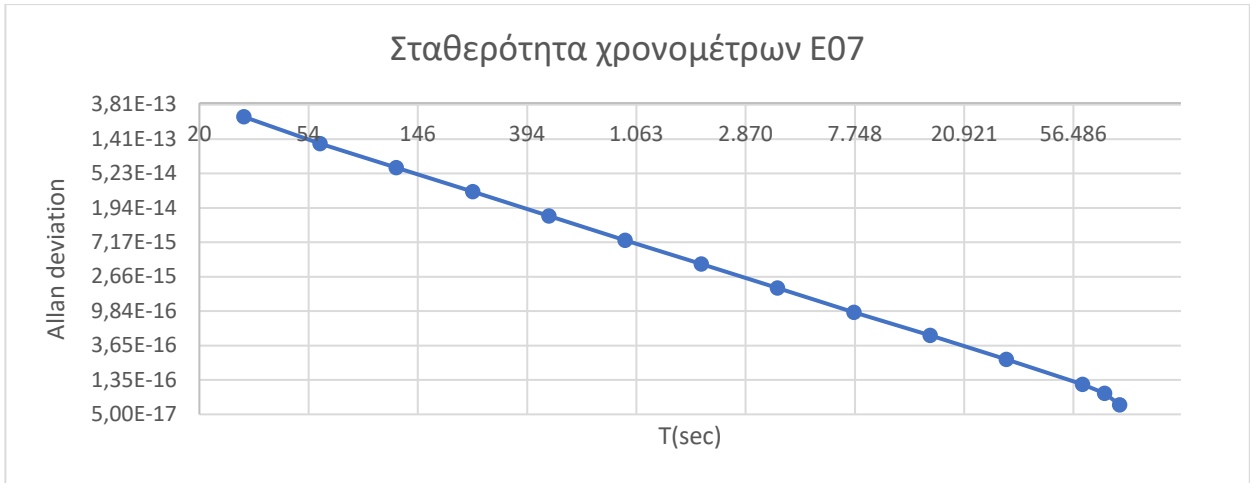
Διάγραμμα 4-116: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E26.



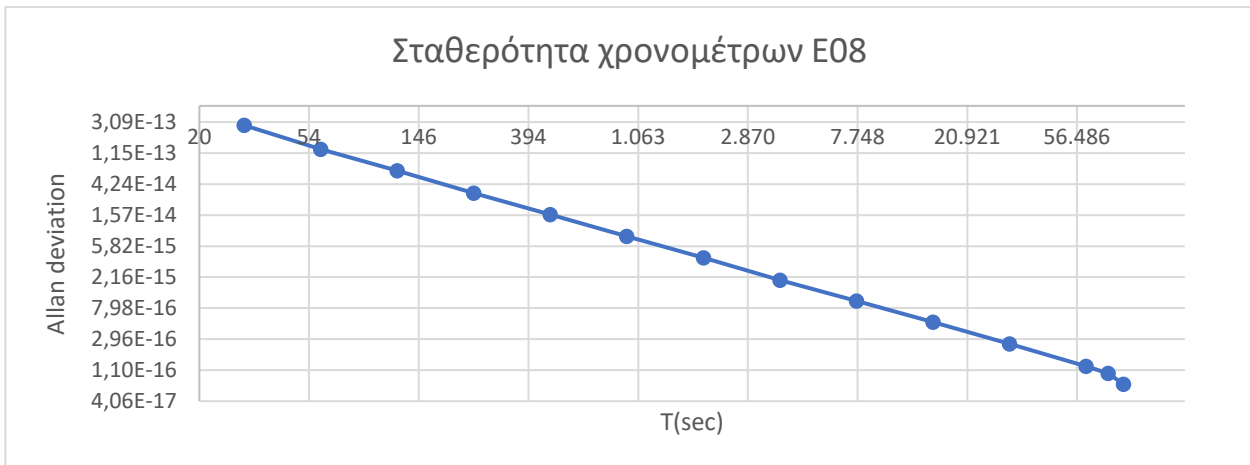
Διάγραμμα 4-117: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E24.



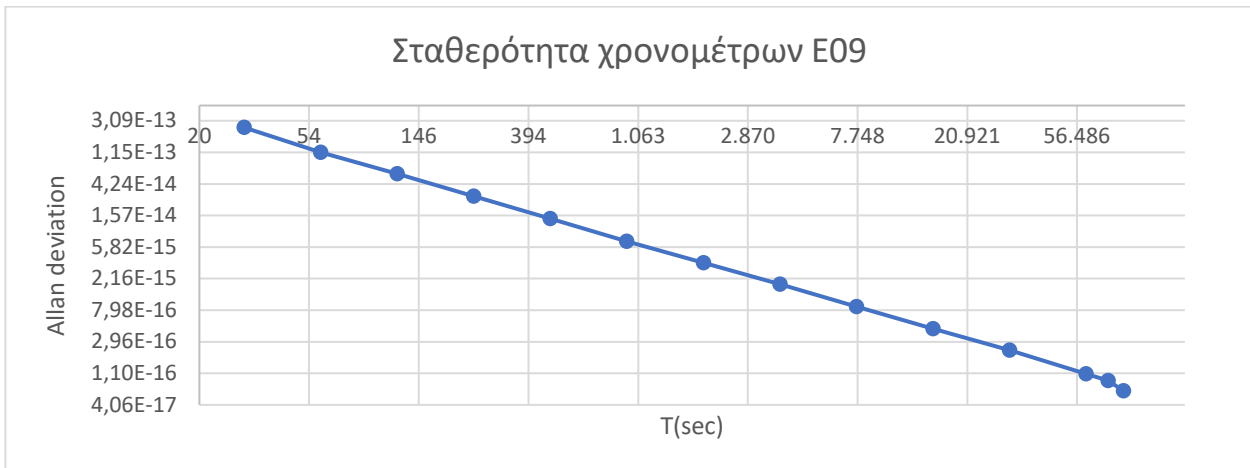
Διάγραμμα 4-118: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E30.



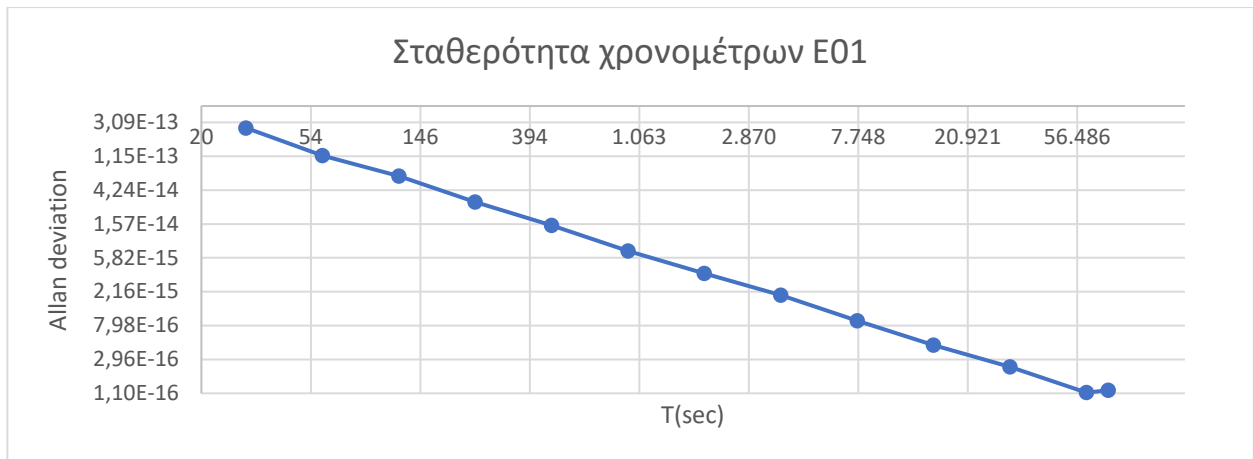
Διάγραμμα 4-119: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E07.



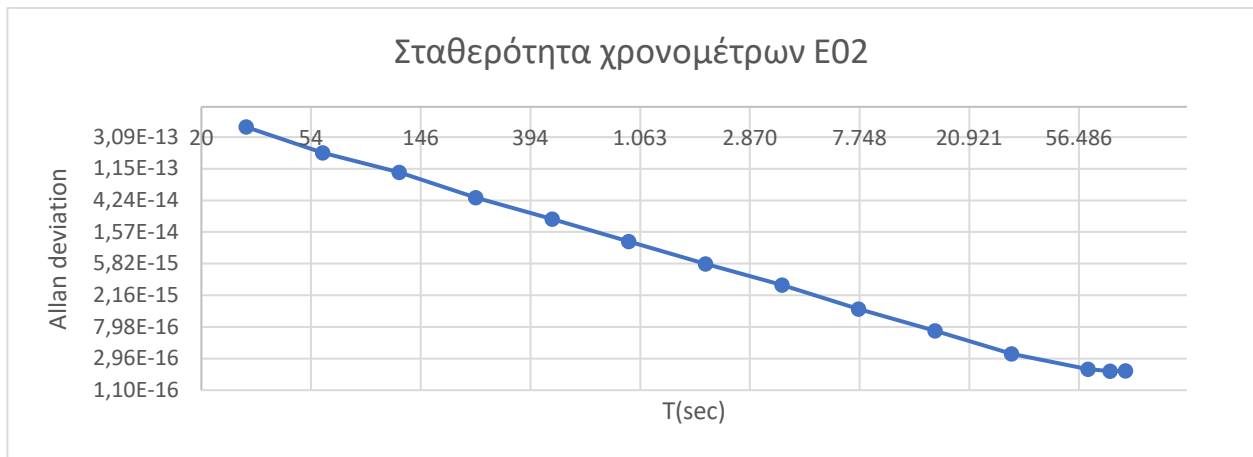
Διάγραμμα 4-120: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E08.



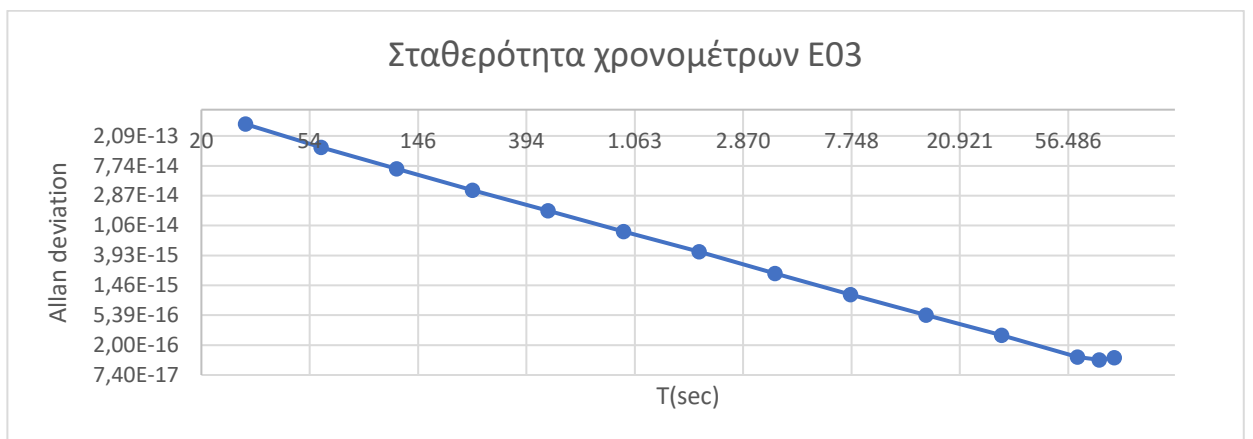
Διάγραμμα 4-121: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E09.



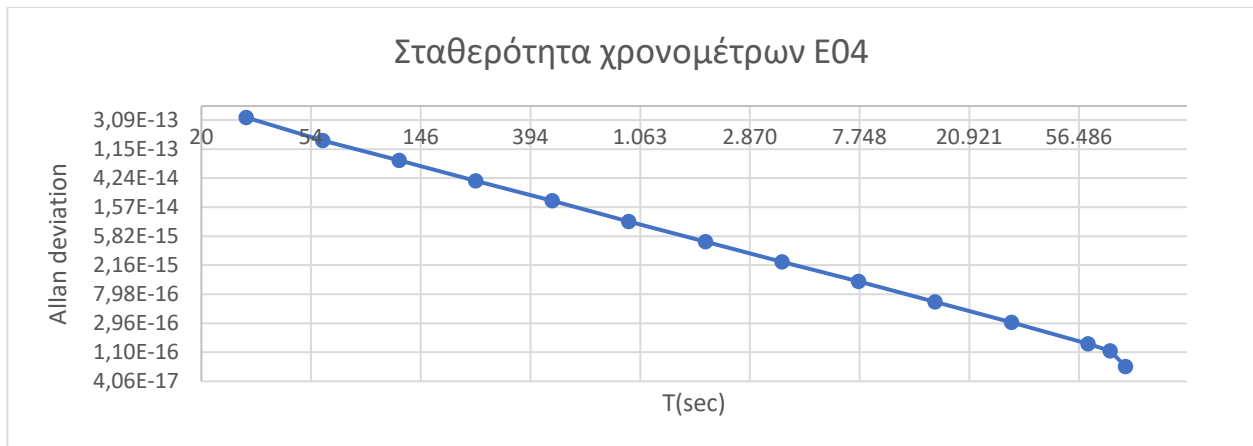
Διάγραμμα 4-122: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E01.



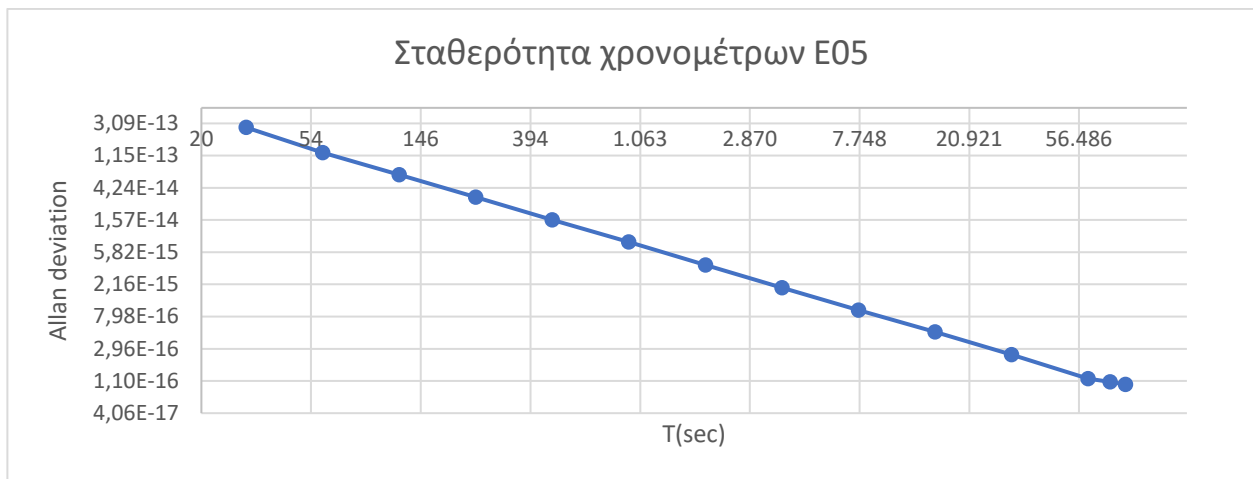
Διάγραμμα 4-123: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E02.



Διάγραμμα 4-124: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E03.



Διάγραμμα 4-125: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E04.



Διάγραμμα 4-126: Σταθερότητα χρονομέτρων δορυφόρου με E05.

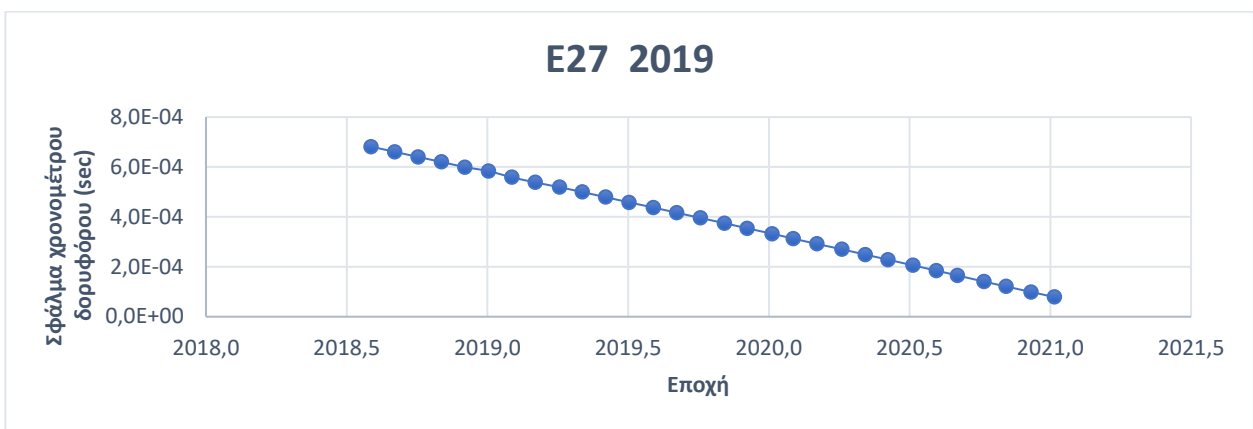
Παρατηρήθηκε ότι η σταθερότητα των δορυφόρων με χρονόμετρο υδρογόνου κυμαίνεται περί τα $3,09 \cdot 10^{-13}$ έως περίπου $4,05 \cdot 10^{-17}$, ενώ η σταθερότητα των χρονομέτρων με ρουβίδιο κυμαίνεται περί τα $3,85 \cdot 10^{-13}$ έως $5 \cdot 10^{-17}$ για τον δορυφόρο E11 και $8,35 \cdot 10^{-13}$ έως $5 \cdot 10^{-17}$ για τον δορυφόρο E22.

4.2.3 Galileo Drift

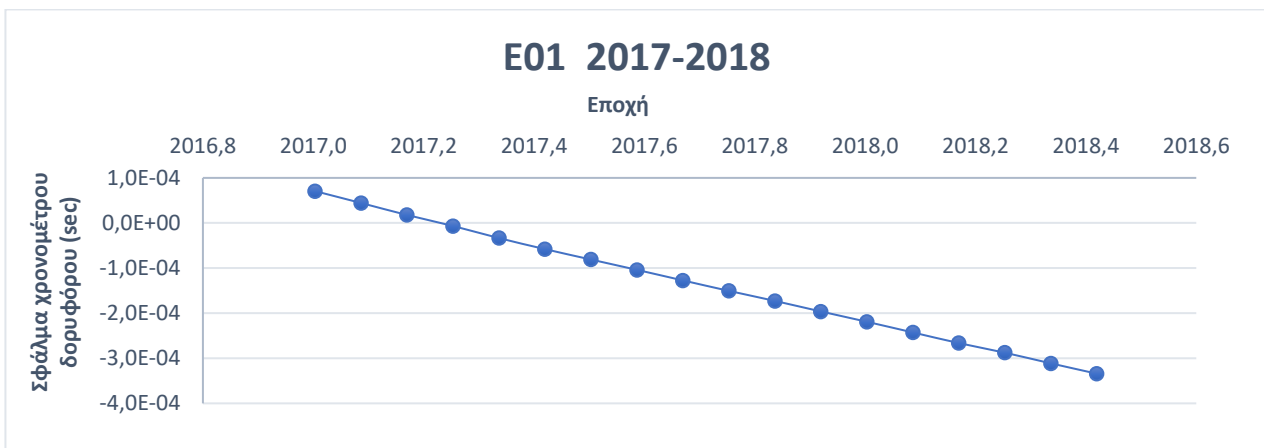
Προκειμένου να γίνει η σύγκριση της σταθερότητας με τους δορυφόρους GPS, πρέπει να υπολογιστεί η ολίσθηση (drift) και στους δορυφόρους Galileo. Στο παρόν υπο-κεφάλαιο, παρατίθενται τα διαγράμματα (Διάγραμμα 4-127, 4-128, 4-129, 4-130, 4-131, 4-132, 4-133, 4-144) της απεικόνισης του μέσου drift των δορυφόρων Galileo ανά έτος, όπως επίσης και η τιμή του drift για τα

συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και το είδος ρολογιού που χρησιμοποιείται. Για την απεικόνιση του drift επιλέχθηκαν τα PRN των οποίων τα διαγράμματα στο υπο-κεφάλαιο 4.2.1 είχαν έντονη εμφάνιση γραμμικού drift (E04, E02, E15, E07, E27, E01, E30, E26).

Παρακάτω παρατίθενται κάποια ενδεικτικά διαγράμματα (Διάγραμμα 4-127, 4-128) του clock offset (σφάλμα χρονομέτρου δορυφόρου) με εμφάνιση drift. Στον πίνακα 4-129 έχουν συγκεντρωθεί όλες οι πληροφορίες των δορυφόρων με εμφάνιση drift, προκειμένου να γίνει σύγκριση μεταξύ τους.



Διάγραμμα 4-127: Drift δορυφόρου με PRN E27 για την περίοδο 2019.



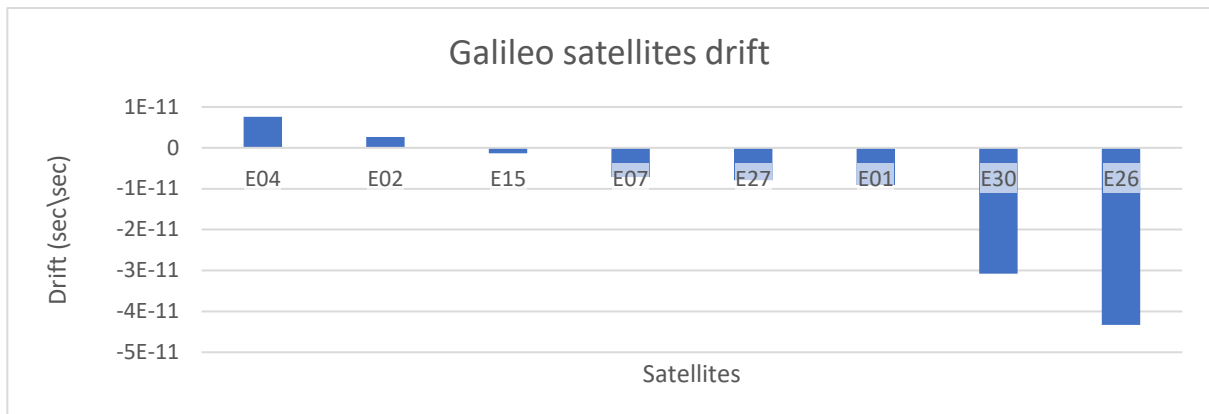
Διάγραμμα 4-128: Drift δορυφόρου με E01 για την περίοδο 2017-2018.

Πίνακας 4-129

Drift, χρονομέτρων δορυφόρου για τα ID των δορυφόρων με drift.

ID	Μέσο Drift (sec/sec)	Clock	Year
E04	7,62543E-12	PHM	2015
E02	2,68859E-12	PHM	2020
E15	-1,35006E-12	PHM	2019
E07	-7,16768E-12	PHM	2019
E27	-7,90278E-12	PHM	2019
E01	-9,06184E-12	PHM	2017-2018
E30	-3,07847E-11	PHM	2019-2020
E26	-4,3343E-11	PHM	2018

Το καλύτερο drift δορυφόρου είναι αυτό που πλησιάζει περισσότερο στο μηδέν. Προκειμένου να γίνει ευκολότερα αντιληπτό ποιο ID από τον πίνακα 4-129 έχει το καλύτερο drift, δημιουργήθηκε το διάγραμμα 4-130.



Διάγραμμα 4-130: Drift δορυφόρων Galileo.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα 4-130, ο δορυφόρος E15 έχει το χρονόμετρο (PHM) με το καλύτερο drift και ο δορυφόρος E26 έχει το χειρότερο. Τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να ομαδοποιηθούν σε αυτά που κυμαίνονται από περίπου $-1 \cdot E-12$ έως $3 \cdot E-12$ (E15, E02), από περίπου $-4 \cdot E-11$ έως $-3 \cdot E-11$ (E26, E30) και από περίπου $-7,17 \cdot E-12$ έως $9,06 \cdot E-12$ (E07, E27, E01).

5. Σύγκριση GPS – Galileo

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η σύγκριση των χρονομέτρων Galileo και GPS, η οποία μπορεί πλέον να γίνει, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία δεδομένων και παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Η σύγκρισή τους θα γίνει στα αποτελέσματα που προέκυψαν για το σφάλμα χρονομέτρων δορυφόρου, το drift και τη μεταβλητότητα Allan (Allan variance).

5.1 Σύγκριση μεγίστου σφάλματος χρονομέτρων για τους δορυφόρους GPS και Galileo.

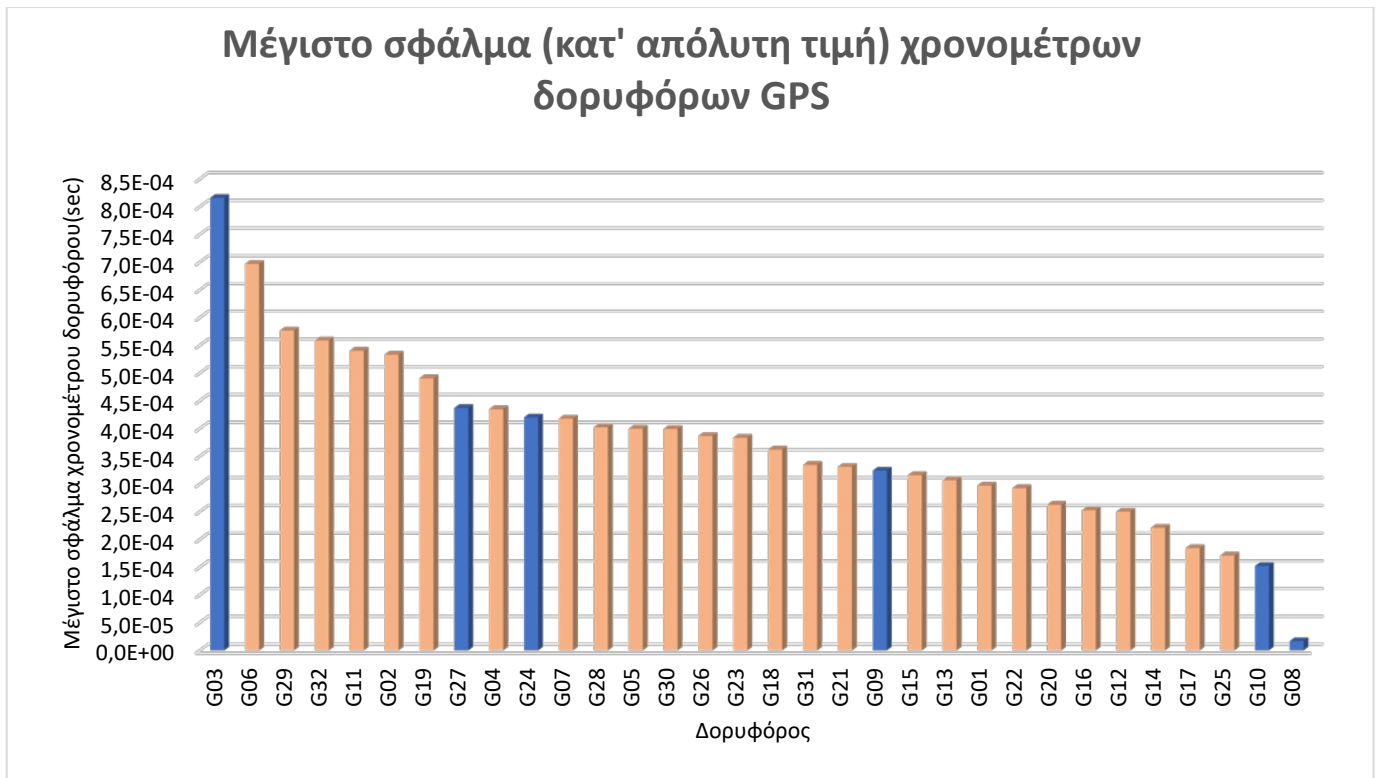
Αποφασίστηκε η σύγκριση μόνο του μεγίστου σφάλματος κατ' απόλυτη τιμή, γιατί το ελάχιστο σφάλμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ημερομηνία εκτόξευσης και δεν θα απέδιδε αξιόπιστα αποτελέσματα. Μετά από έρευνα στο αρχείο atx της IGS και τα Operational Advisory αρχεία με το GPS Status, δημιουργήθηκε ο πίνακας 5-1 με το Block του εκάστοτε δορυφόρου και το είδος του χρονομέτρου που χρησιμοποιούσε, όπως επίσης και το μέγιστο σφάλμα του κάθε δορυφόρου (PRN) κατ' απόλυτη τιμή.

Προκειμένου να γίνουν καλύτερα κατανοητά τα αποτελέσματα, δημιουργήθηκε το διάγραμμα 5-2, όπου απεικονίζονται τα μέγιστα σφάλματα χρονομέτρου ρουβιδίου (Rb) με πορτοκαλί χρώμα και τα μέγιστα σφάλματα χρονομέτρου καισίου (Cs) με μπλε χρώμα.

Πίνακας 5-1

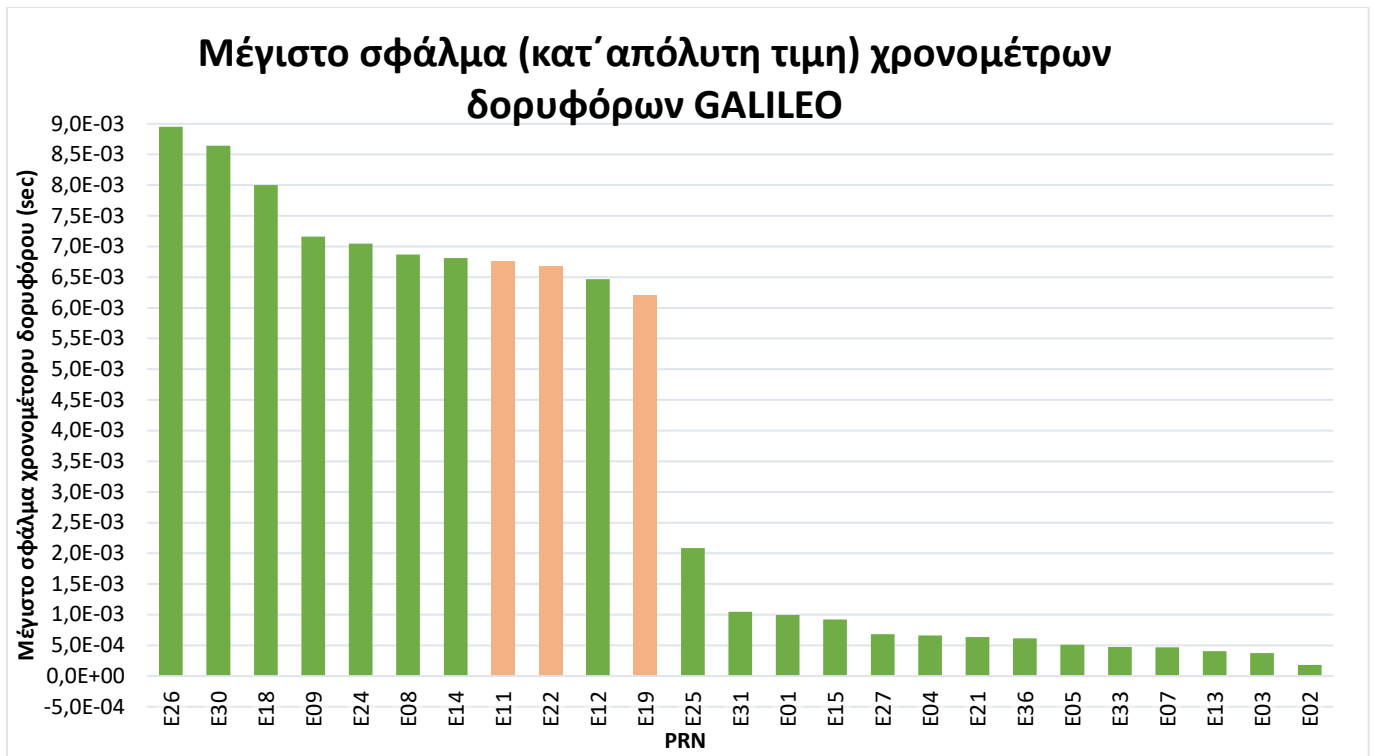
Μέγιστο σφάλμα χρονομέτρου για όλους τους δορυφόρους GPS.

PRN	Μέγιστο	Έτος	Block	Χρονόμετρο
G01	2,97E-04	2013	IIF	Rb
G02	5,33E-04	2014	IIR-B	Rb
G03	8,16E-04	2012	IIA	Cs
G04	4,35E-04	2010	IIA	Rb
G05	4,00E-04	2013	IIR-M	Rb
G06	6,97E-04	2010	IIA	Rb
G07	4,18E-04	2014	IIR-M	Rb
G08	1,65E-05	2014	IIA	Cs
G09	3,24E-04	2014	IIF	Cs
G10	1,52E-04	2014	IIA	Cs
G11	5,40E-04	2014	IIR-A	Rb
G12	2,50E-04	2014	IIR-M	Rb
G13	3,07E-04	2010	IIR-A	Rb
G14	2,21E-04	2013	IIR-A	Rb
G15	3,16E-04	2010	IIR-M	Rb
G16	2,53E-04	2013	IIR-A	Rb
G17	1,84E-04	2011	IIR-M	Rb
G18	3,62E-04	2014	IIR-A	Rb
G19	4,90E-04	2014	IIR-B	Rb
G20	2,62E-04	2014	IIR-A	Rb
G21	3,31E-04	2013	IIR-A	Rb
G22	2,92E-04	2014	IIR-B	Rb
G23	3,83E-04	2010	IIR-B	Rb
G24	4,20E-04	2011	IIA	Cs
G25	1,71E-04	2013	IIF	Rb
G26	3,87E-04	2012	IIA	Rb
G27	4,37E-04	2012	IIA	Cs
G28	4,02E-04	2014	IIR-A	Rb
G29	5,77E-04	2014	IIR-M	Rb
G30	3,99E-04	2012	IIA	Rb
G31	3,34E-04	2014	IIR-M	Rb
G32	5,59E-04	2013	IIA	Rb



Διάγραμμα 5-2: Μέγιστο σφάλμα κατ' απόλυτη τιμή δορυφόρων GPS (καίσινο: μπλε χρώμα, ρουβίδιο: πορτοκαλί χρώμα).

Για τα στοιχεία των δορυφόρων Galileo (Πίνακας 5-4) χρησιμοποιήθηκαν τα αρχεία NAGU που περιέχουν πληροφορίες για το είδος του χρησιμοποιούμενου ρολογιού, όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 4.2.1, καθώς και τα μέγιστα σφάλματα κατ' απόλυτη τιμή των δορυφόρων, όπως έχουν αποτυπωθεί στο ίδιο κεφάλαιο. Προκειμένου να γίνουν καλύτερα κατανοητά τα αποτελέσματα, δημιουργήθηκε το διάγραμμα 5-3, όπου απεικονίζονται τα μέγιστα σφάλματα χρονομέτρου ρουβιδίου (Rb) με πορτοκαλί χρώμα και τα μέγιστα σφάλματα χρονομέτρου υδρογόνου (PHM) με πράσινο χρώμα.



Διάγραμμα 5-3: Μέγιστο σφάλμα κατ' απόλυτη τιμή δορυφόρων Galileo (ρουβίδιο: πορτοκαλί χρώμα, καίσιο: πράσινο χρώμα).

Πίνακας 5-4

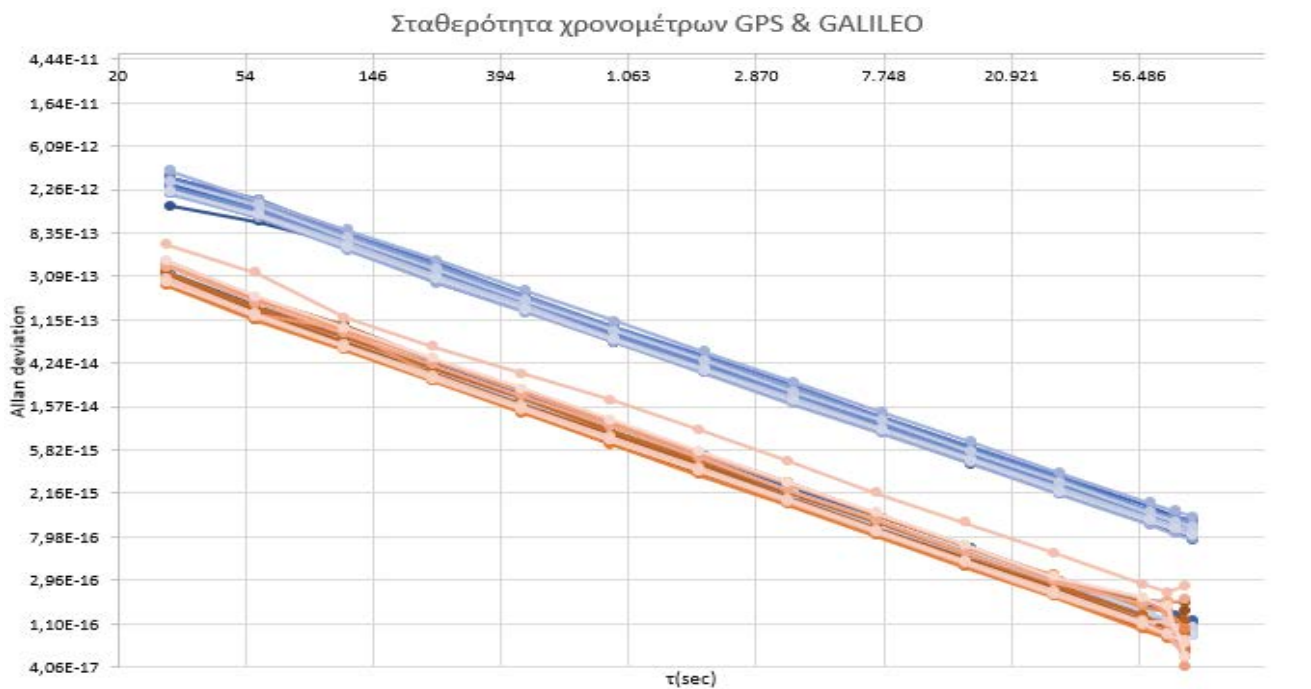
Μέγιστο σφάλμα χρονομέτρου για όλους τους δορυφόρους Galileo.

PRN	Μέγιστο	Χρονόμετρο	Έτος
E01	9,97E-04	PHM	2020
E02	1,81E-04	PHM	2020
E03	3,72E-04	PHM	2020
E04	6,61E-04	PHM	2020
E05	5,10E-04	PHM	2017
E07	4,71E-04	PHM	2020
E08	6,87E-03	PHM	2017
E09	7,16E-03	PHM	2017
E11	6,76E-03	Rb	2020
E12	6,47E-03	PHM	2019
E13	4,08E-04	PHM	2020
E14	6,81E-03	PHM	2017
E15	9,21E-04	PHM	2019
E18	8,00E-03	PHM	2015
E19	6,21E-03	Rb	2013
E21	6,36E-04	PHM	2020
E22	6,68E-03	Rb	2017
E24	7,05E-03	PHM	2017
E25	2,09E-03	PHM	2018
E26	8,95E-03	PHM	2016
E27	6,82E-04	PHM	2018
E30	8,64E-03	PHM	2016
E31	1,05E-03	PHM	2018
E33	4,71E-04	PHM	2020
E36	6,17E-04	PHM	2020

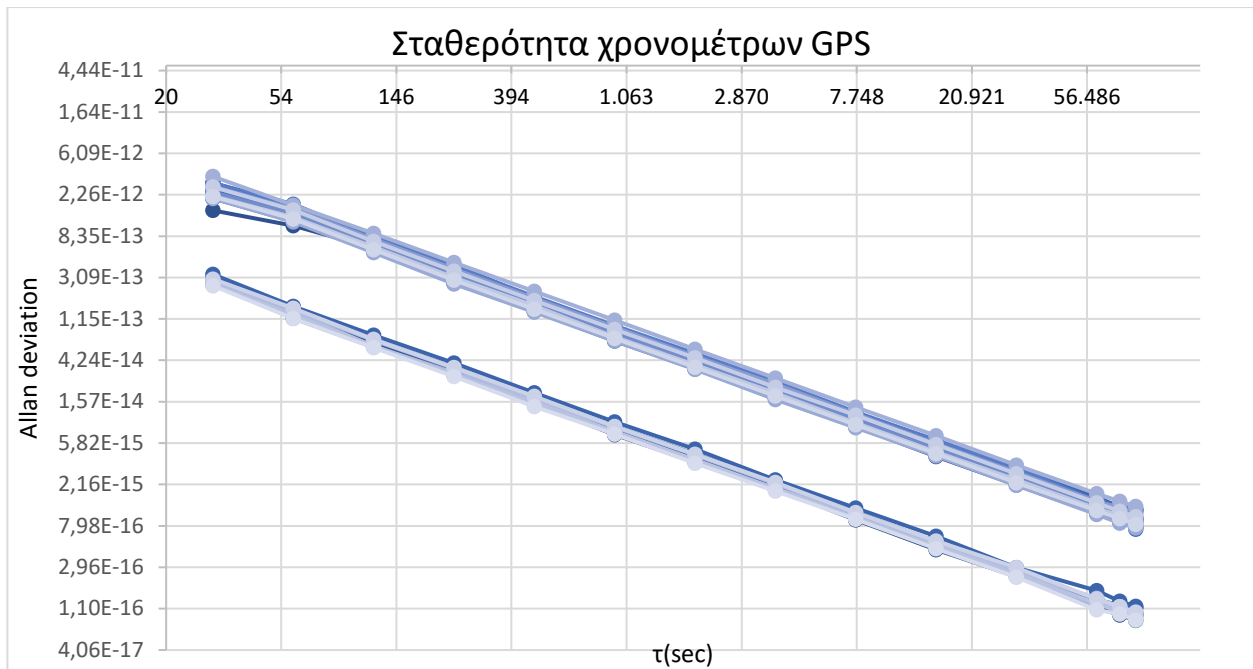
Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων 5-1 και 5-3, προκύπτει ότι 15 από τους 25 εξεταζόμενους δορυφόρους Galileo έχουν μεγαλύτερο offset της τάξεως του 10^{-3} sec, δηλαδή κατά μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερο από όλους τους δορυφόρους GPS (32 PRN), από τους οποίους κανένας δεν παρουσιάζει σφάλμα μεγαλύτερο από 10^{-4} sec. Η χρήσιμη πληροφορία που προκύπτει από αυτή τη σύγκριση είναι ότι όλοι οι δορυφόροι Galileo με χρονόμετρο ρουβιδίου έχουν μεγαλύτερο μέγιστο offset από όλους τους δορυφόρους GPS, τόσο αυτούς που χρησιμοποιούν καίσιο όσο και αυτούς που χρησιμοποιούν ρουβίδιο, ενώ κάποιιοι από τους δορυφόρους Galileo με χρονόμετρο υδρογόνου έχουν κοντινό μέγιστο σφάλμα με αυτούς του συστήματος GPS που χρησιμοποιούν χρονόμετρο καισίου ή ρουβιδίου.

5.2 Σύγκριση Allan Variance GPS – Galileo

Στα κεφάλαια 4.1.6 και 4.2.2 παρουσιάστηκαν οι τιμές της μεταβλητότητας Allan (Allan Variance) για όλους τους ενεργούς δορυφόρους GPS και Galileo για το έτος 2017, με σκοπό την τελική τους σύγκριση σε αυτό το κεφάλαιο. Προκειμένου να γίνει ευκολότερα κατανοητή η διαφορά σταθερότητας των χρονομέτρων στα δύο συστήματα πλοήγησης, δημιουργήθηκε το διάγραμμα 5-5 που περιλαμβάνει όλα τα διαγράμματα σταθερότητας χρονομέτρων GPS και Galileo που υπάρχουν στα υπο-κεφάλαια 4.1.6 και 4.2.2. Παρατηρώντας προσεκτικά το διάγραμμα διακρίνεται ότι ανάμεσα στις πορτοκαλί καμπύλες των δορυφόρων Galileo υπάρχουν κάποιες μπλε καμπύλες των δορυφόρων GPS. Για την καλύτερη κατανόηση του διαγράμματος 5-5, δηλαδή για να αναγνωρίζονται ευκολότερα οι καμπύλες των δορυφόρων που αλληλοκαλύπτονται, δημιουργήθηκε το διάγραμμα 5-6 που απεικονίζει όλα τα διαγράμματα σταθερότητας μόνο για το σύστημα GPS.



Διάγραμμα 5-5: Σταθερότητα χρονομέτρων Galileo και GPS (GPS: μπλε χρώμα, Galileo: πορτοκαλί χρώμα).



Διάγραμμα 5-6: Σταθερότητα χρονόμετρων GPS.

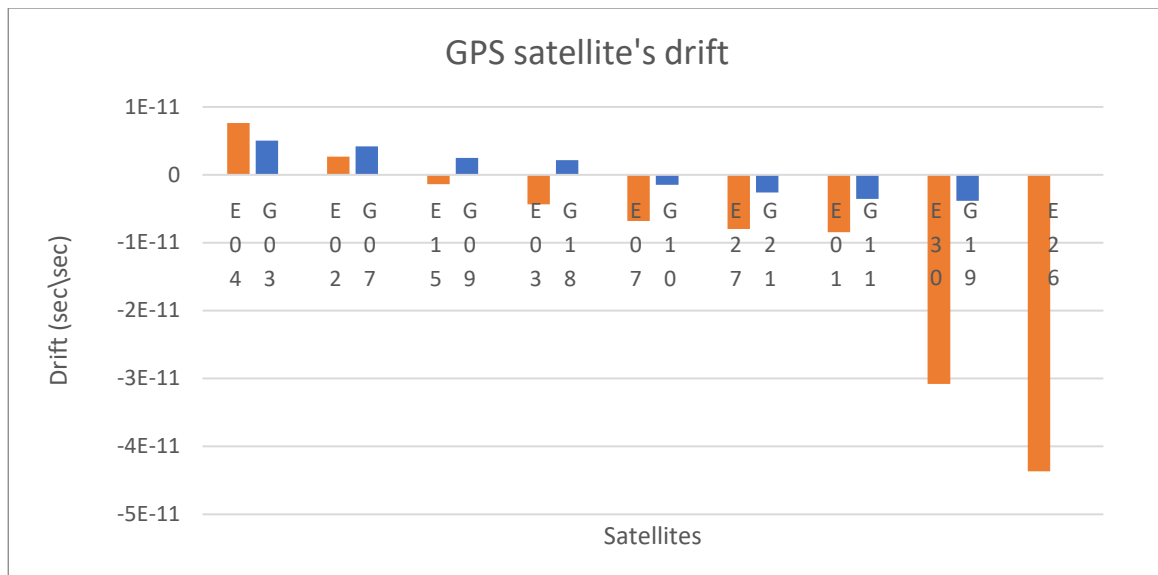
Όπως προκύπτει από το διάγραμμα 5-6, η σταθερότητα των δορυφόρων GPS χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Στην κατηγορία με την καλύτερη σταθερότητα, ανήκουν οι δορυφόροι G01, G03, G06, G09, G10, G25, G26, G27, G30 και G32, οι οποίοι σύμφωνα με τα αρχεία atx και advisory, ανήκουν στο Block IIF και χρησιμοποιούν χρονόμετρα ρουβιδίου. Στην δεύτερη κατηγορία που έχει όχι τόσο καλή σταθερότητα, ανήκουν οι υπόλοιποι δορυφόροι με Block IIA, IIR-A, IIR-B, IIR-M. Έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι σε αυτή την κατηγορία με την όχι και τόσο καλή σταθερότητα, ανήκουν και οι δορυφόροι με PRN G08 και G24, οι οποίοι ανήκουν στο Block IIF και τον Ιούνιο του 2017 χρησιμοποιούσαν χρονόμετρο καισίου (Cs). Η κατηγορία των δορυφόρων με Block IIF και χρησιμοποιούμενο χρονόμετρο αυτό του ρουβιδίου, φαίνεται από το διάγραμμα 5-5 ότι έχει σχεδόν ίδια σταθερότητα με όλους τους δορυφόρους Galileo.

Αξίζει να αναφερθεί ότι το διάγραμμα του δορυφόρου Galileo που φαίνεται να ξεχωρίζει από τη συγκέντρωση των υπολοίπων ανήκει στο E22 (RAFS), το οποίο, σύμφωνα με επίσημη ανακοίνωση (NAGU) που έχει αναφερθεί στο υπο-κεφάλαιο 4.2.2, τέθηκε εκτός λειτουργίας στις 08/12/2017. Εν κατακλείδι, από τη σύγκριση της σταθερότητας (Allan variance) των συστημάτων GPS και Galileo, προκύπτει ότι οι δορυφόροι του συστήματος GPS που ανήκουν στο Block IIF και χρησιμοποιούν

χρονομέτρο ρουβιδίου, έχουν σχεδόν ίδια σταθερότητα με αυτούς του συστήματος Galileo που χρησιμοποιούν χρονομέτρο maser υδρογόνου (PHM). Εν αντιθέσει, οι δορυφόροι GPS του Block IIF με χρησιμοποιούμενο χρονομέτρο αυτό του καισίου αλλά και οι δορυφόροι των υπολοίπων Block (IIA, IIR-A, IIR-B, IIR-M) με χρησιμοποιούμενα χρονόμετρα ρουβιδίου, έχουν μικρότερη σταθερότητα από αυτούς του συστήματος Galileo, οι οποίοι χρησιμοποιούν χρονόμετρα maser υδρογόνου (PHM).

5.3 Σύγκριση drift GPS - Galileo.

Προκειμένου η γίνει ολοκληρωμένη σύγκριση της σταθερότητας των χρονομέτρων, πρέπει να συγκριθεί και η ολίσθησή τους. Με τη βοήθεια των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 4.1.7 και 4.2.3, δημιουργήθηκε το διάγραμμα 5-7 για την ευκολότερη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Είναι φανερό ότι οι δορυφόροι του συστήματος GPS έχουν καλύτερο drift από αυτούς του συστήματος Galileo. Τα αποτελέσματα συνηγορούν στο ότι το drift των χρονομέτρων ρουβιδίου και καισίου από τα Block IIA, IIR-A, IIR-B, IIR-M είναι καλύτερο από αυτό των χρονομέτρων maser υδρογόνου του συστήματος Galileo.



Διάγραμμα 5-7: Drift δορυφόρων GPS και Galileo.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την επεξεργασία των δεδομένων στο τέταρτο κεφάλαιο, προέκυψαν χρήσιμα στοιχεία για την απόδοση των χρονομέτρων των δύο συστημάτων πλοήγησης GPS και Galileo. Η σύγκριση των στοιχείων αυτών στο πέμπτο κεφάλαιο οδήγησε σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση των χρονομέτρων των δύο συστημάτων, τα οποία παρατίθενται παρακάτω.

Από το υπο-κεφάλαιο 5.1 προέκυψε ότι όλοι οι δορυφόροι (PRN) GPS, ανεξαρτήτως Block, έχουν μικρότερο μέγιστο σφάλμα (κατ' απόλυτη τιμή) από τους δορυφόρους Galileo, είτε αυτοί χρησιμοποιούν χρονόμετρο ρουβιδίου είτε υδρογόνου.

Από το υπο-κεφάλαιο 5.2 προέκυψε ότι οι δορυφόροι GPS που ανήκουν στο Block IIF και έχουν χρονόμετρο ρουβιδίου, έχουν σχεδόν την ίδια σταθερότητα με τους δορυφόρους του συστήματος Galileo που χρησιμοποιούν maser υδρογόνου. Αντίθετα, οι δορυφόροι GPS των Block IIA, IIR-A, IIR-B, IIR-M και οι δορυφόροι του Block IIF που χρησιμοποιούν χρονόμετρο καισίου έχουν εμφανώς μικρότερη σταθερότητα από αυτούς του συστήματος Galileo.

Τέλος, από το κεφάλαιο 5.3 προέκυψε ότι οι δορυφόροι GPS έχουν κατά μέσο όρο καλύτερο drift από σχεδόν όλους τους δορυφόρους Galileo.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα αποτελέσματα, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι το μεγαλύτερο προτέρημα των χρονομέτρων maser υδρογόνου (PHM) του συστήματος Galileo είναι η καλή τους βραχυπρόθεσμη σταθερότητα (Allan variance). Αντίθετα, η μακροπρόθεσμη σταθερότητα (drift) των χρονομέτρων υδρογόνου του συστήματος Galileo, δεν είναι τόσο καλή όσο αυτή των χρονομέτρων ρουβιδίου και καισίου (Block IIA, IIR-A, IIR-B, IIR-M) του συστήματος GPS. Παράλληλα, προέκυψε ότι τα εξελιγμένα χρονόμετρα ρουβιδίου (Block IIF) των δορυφόρων GPS έχουν τόσο καλή βραχυπρόθεσμη σταθερότητα όσο τα χρονόμετρα υδρογόνου.

Η αξιολόγηση των ατομικών χρονομέτρων των δορυφόρων GNSS είναι ένα εκτενές θέμα που δεν μπορεί να εξαντληθεί στο πλαίσιο μιας πτυχιακής εργασίας. Επιπλέον θέματα που θα είχε ενδιαφέρον να βελτιωθούν είναι:

- η αξιολόγηση χρονομέτρων των δορυφόρων τρίτης γενιάς GPS (Block III)
- η αξιολόγηση των χρονομέτρων των συστημάτων GLONASS και BeiDou
- η επίδραση της σταθερότητας δορυφορικών χρονομέτρων στην ακρίβεια εντοπισμού των συστημάτων GNSS.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ

Φωτίου, Α. Πικριδάς, Χ. GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές β έκδοση, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2012.

Κορακίτης Ρ. (2008): «Συστήματα Χρόνου», Πανεπιστημιακές σημειώσεις για το μάθημα « Γεωδαιτική Αστρονομία», Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ Πολυτεχνείου.

Σαραφίδης Χ. (2007): «Το Αναβαθμισμένο Εθνικό Πρότυπο Χρόνου Και Συχνότητας Στο Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας»

Vanier, J., Tomescu, C., (2015): « The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards: Recent Developments» CRC Press, Boca Raton FL, USA

Droz, F., Mosset, P., Wang, Q., et al., (2009): « Space passive hydrogen maser - Performances and lifetime data» 2009 IEEE Int. Freq. Control Symp. Jt. with 22nd Eur. Freq. Time Forum, 393–398

Microsemi, 2020: «Cesium Clock Primary Frequency Standard», 5071A

Batori, E., Almat, N., Affolderbach, C., & Mileti, G. (2021): «GNSS-grade space atomic frequency standards: Current status and ongoing developments. *Advances in Space Research*» 68(12), 4723-4733.

Kaplan, E. D., & Hegarty, C. (Eds.). (2017): «*Understanding GPS/GNSS: principles and applications*» Artech house.

Misra P., Enge P., (2001): «Global Positioning System, Signals, Measurements, and Performance», Second Edition.

C. Audoin and J. Vanier, (1976): «Atomic frequency standards and clocks» *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 9, no. 9, p. 697, 1976.

Sturdevant, Rick W. «NAVSTAR, the Global Positioning System: a sampling of its military, civil, and commercial impact» *Societal impact of spaceflight* (2007): 331-351.

Reid, Tyler Gerald René, «*Orbital diversity for global navigation satellite systems*. Diss. Stanford University, 2017».

ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

Uscg.gov. (2022). [online] Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

<https://www.navcen.uscg.gov/?Do=gpsArchives> [Τελευταία επίσκεψη 7 Mar. 2022].

Uscg.gov. (2022). [online] Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

<https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus> [Τελευταία επίσκεψη 7 Mar. 2022].

China's BeiDou Navigation Satellite System FOREIGN LANGUAGES PRESS. (2016). [online] Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201806/P020180608525769123446.pdf> [Τελευταία επίσκεψη 7 Mar. 2022].

Wikipedia Contributors (2022). *List of Galileo satellites*. [online] Wikipedia. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Galileo_satellites [Τελευταία επίσκεψη 7 Mar. 2022].

Esa.int. (2012). *First of Galileo's next stage FOC satellites assembled*. [online] Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

https://www.esa.int/Applications/Navigation/First_of_Galileo_s_next_stage_FOC_satellites_assembled [Τελευταία επίσκεψη 7 Mar. 2022].

Esa.int. (2012). *Galileo IOV - Launch and Early Orbit Phase report*. [online] Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo_IOV_-_Launch_and_Early_Orbit_Phase_report [Τελευταία επίσκεψη 7 Mar. 2022].

Esa.int. (2022). *GIOVE-B hydrogen atomic clock ticks through three years in orbit*.

[online] Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/GIOVE-B_hydrogen_atomic_clock_ticks_through_three_years_in_orbit [Τελευταία επίσκεψη 7 Mar. 2022].

Gsc-europa.eu. (2016). *Archived user notifications | European GNSS Service Centre*.

[online] Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.gsc-europa.eu/system-status/user-notifications-archive> [Τελευταία επίσκεψη 7 Mar. 2022].

Gnssplanning.com. (2022). *Trimble GNSS Planning*. [online] Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

<https://www.gnssplanning.com/> [Τελευταία επίσκεψη 7 Mar. 2022].

Esa.int. (2022). *How the Galileo atomic clocks work*. [online] Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

https://www.esa.int/Applications/Navigation/How_the_Galileo_atomic_clocks_work#:~:text=The%20Galileo%20satellites%20carry%20two,standards%20and%20passive%20hydrogen%20masers [Τελευταία επίσκεψη 8 Mar. 2022].

Gps.gov. (2022). *GPS.gov: Space Segment*. [online] Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

<https://www.gps.gov/systems/gps/space/> [Τελευταία επίσκεψη 9 Mar. 2022].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράρτημα Α: Αρχείο RINEX

TABLE A15 CLOCK DATA FILE - HEADER SECTION DESCRIPTION		
HEADER LABEL (Columns 61-80)	DESCRIPTION	FORMAT
RINEX VERSION / TYPE	- Format version (2.00) - File type ("C" for Clock Data)	F9.2,11X, A1,39X
PGM / RUN BY / DATE	- Name of program creating current file - Name of agency creating current file - Date of file creation	A20, A20, A20
COMMENT	<p>Comment line(s)</p> <p>While comments are generally optional, they must be included for the following information:</p> <p>SATELLITE ANTENNA PHASE CENTER OFFSETS</p> <p>-----</p> <p>The vector offset used in data analysis for the separation of the satellite antenna phase centers and the satellite centers of mass must be known. A change in the Z-direction will appear as a shift in the satellite clock estimates. By agreement among the IGS Analysis Centers, the IGS Z-offsets are given below and a COMMENT record of this type should always be included:</p> <p>CLK ANT Z-OFFSET(M): II/IIA 1.023; IIR 0.000</p>	A60

	<p>* REQUIRED for data types "Ax"</p> <p>TIMESCALE RE-ALIGNMENT ----- If estimated clock values have been uniformly shifted in timescale, e.g., to GPS time, the method applied should be noted here. In addition, non-zero clock values should be reported in the clock data records for the analysis reference clock, corresponding to the alignment correction applied to all the receiver and satellite clocks. The analysis reference clock should still be listed as "ANALYSIS CLK REF" even though it will have non-zero values.</p> <p>* REQUIRED for data types "Ax", if applicable</p>	
LEAP SECONDS	<p>Number of leap seconds since 6-Jan-1980 Recommended as an aid to convert from GPS time to UTC</p>	I6
# / TYPES OF DATA	<p>- Number of different clock data types stored in the file - List of clock data types</p> <p>The following clock data types are defined in RINEX Version 2:</p> <p>"AR": Data analysis results for receiver clocks derived from a set of network receivers and satellites</p>	I6, 5(4X,A2)

	<p>wrt to a reference clock fixed in the analysis</p> <p>"AS": Data analysis results for satellite clocks derived from a set of network receivers and satellites wrt to a reference clock fixed in the analysis</p> <p>"CR": Calibration measurements for a single GPS receiver wrt an external local reference clock</p> <p>"DR": Discontinuity measurements for a single GPS receiver</p> <p>"MS": Monitor measurements for the broadcast satellite clocks wrt a standard timescale</p>	
STATION NAME / NUM	<p>- 4-character receiver name designator</p> <p>- Unique receiver identifier, preferably the DOMES number for fixed stations</p> <p>* REQUIRED for data types "CR" & "DR"</p>	A4,1X, A20,35X
STATION CLK REF	<p>Unique identifier for external reference clock being used as the standard for calibration</p> <p>* REQUIRED for data type "CR"</p>	A60
ANALYSIS CENTER	<p>Name of Analysis Center</p> <p>- 3-character IGS AC designator</p> <p>- Full name of Analysis Center</p>	A3,2X, A55

# OF CLK REF	<ul style="list-style-type: none"> - Number of analysis clock references (satellite or receiver clocks) listed under "ANALYSIS CLK REF" - Start epoch (in GPS time): year (4 digits),month,day,hour,min,second [default: blank start and stop times imply single "ANALYSIS CLK REF" applies for entire file] - Stop epoch (in GPS time): year (4 digits),month,day,hour,min,second [default: blank start and stop times imply single "ANALYSIS CLK REF" applies for entire file] <p>NOTE: Multiple groups of "# OF CLK REF" "ANALYSIS CLK REF" records can be used for changes in analysis clock reference within a single analysis file.</p> <p>* REQUIRED for data types "Ax"</p>	<p>I6,1X,</p> <p>I4,4I3, F10.6,</p> <p>1X, I4,4I3, F10.6</p>
ANALYSIS CLK REF	<p>List of the analysis clock references (repeat for each reference clock enumerated in the previous record)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Name of the receiver or satellite used as the fixed reference in data analysis - Unique identifier for reference clock (if a receiver), preferably the DOMES number for fixed stations - Optionally a non-zero value for the the apriori clock constraint can be provided (unit: seconds). 	<p>A4,1X,</p> <p>A20,15X,</p> <p>E19.12,1X</p>

	<p>NOTE: If all analysis clock estimates are re-aligned (e.g., to broadcast GPS time) then the fixed (reference) clock(s) will have non-zero values corresponding to the alignment corrections applied to all other clocks. The non-zero clock values for the reference clock must be reported in the clock data records together with the other clock values, but the reference clock should still be listed here. The method of re-alignment should be described in header comment records.</p> <p>* REQUIRED for data types "Ax"</p>	
# OF SOLN STA / TRF	<p>- Number of receivers included in the clock data records (including the analysis reference clock even if it has zero values and is not given in the data records) and listed in the following header records</p> <p>- Terrestrial reference frame or SINEX solution for the station/receiver coordinates which match the clock solution</p> <p>* REQUIRED for data types "Ax"</p>	<p>I6,4X,</p> <p>A50</p>
SOLN STA NAME / NUM	<p>For each station/receiver included in the clock data records, as well as the analysis reference clock even if it has zero values and is not included in the data records (number given in the</p>	

	<p>previous header record), include one record with the following information:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 4-character station/receiver name designator - Unique station/receiver identifier, preferably the DOMES number for fixed stations - Geocentric XYZ station coordinates corresponding to the analysis clock values reported (in millimeters!) <p>* REQUIRED for data types "Ax"</p>	<p>A4,1X, A20, I11,X, I11,X, I11</p>
# OF SOLN SATS	<p>- Number of different satellites in the clock data records and listed in following header records</p> <p>* REQUIRED for data types "AS"</p>	<p>I6,54X</p>
PRN LIST	<p>List of all satellites reported in this file. Each satellite name is a 3-character string:</p> <ul style="list-style-type: none"> - "Gnn" where nn is the PRN number for GPS satellite - "Rnn" where nn is the almanac number for GLONASS satellite <p>* REQUIRED for data types "AS"</p>	<p>15(A1,I2,1X)</p>
END OF HEADER	<p>Last record in the header section.</p>	<p>60X</p>

TABLE A16 CLOCK DATA FILE - DATA RECORD DESCRIPTION		
OBS. RECORD	DESCRIPTION	FORMAT
TYP/EPOCH/CLK	<ul style="list-style-type: none"> - Clock data type (AR, AS, CR, DR, MS) - Receiver or satellite name <ul style="list-style-type: none"> - Receiver name is the IGS 4-character designator - Satellite name is a 3-character string: <ul style="list-style-type: none"> - "Gnn" where nn is the PRN number for GPS satellite - "Rnn" where nn is the almanac number for GLONASS satellite - Epoch in GPS time (not local time!): year (4 digits), month, day, hour, min, second - Number of data values to follow - Clock data in the following sequence: <ul style="list-style-type: none"> - Clock bias (seconds) - Clock bias sigma [optional] (seconds) 	A2,1X, A4,1X, I4,4I3, F10.6, I3,3X, E19.12,X E19.12
TYP/EPOCH/CLK (CONT)	<ul style="list-style-type: none"> - Clock rate [optional] (dimensionless) - Clock rate sigma [optional] (dimensionless) - Clock acceleration [optional] (per second) - Clock acceleration sigma [optional] (per second) <p>The continuation line is necessary for more than 2 data values</p> <p>NB: For data types "Ax", "CR", and "MS", clock data are in the sense of reported station/satellite clock</p>	E19.12,X, E19.12,X, E19.12,X, E19.12
	<p>*minus* reference clock value. For data type "DR", clock data are the sense of clock value after discontinuity *minus* before.</p> <p>Clock data apart from bias values are optional. However, if any optional values are included, then all lower order values must be supplied even if optional (although zero values may be given)</p>	