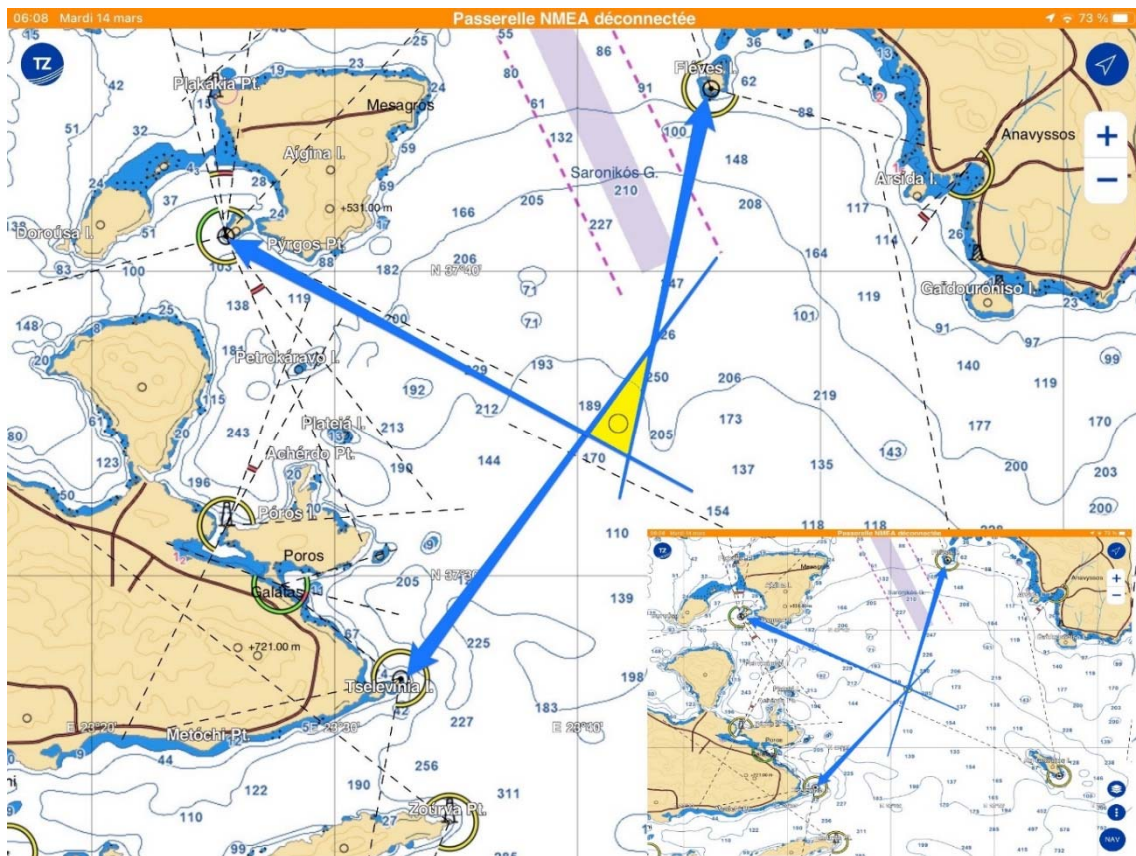


## Μα που είμαστε ;

Γιάννης Καρυωτάκης  
I/Φ Mimosa  
Μάρτιος 2023

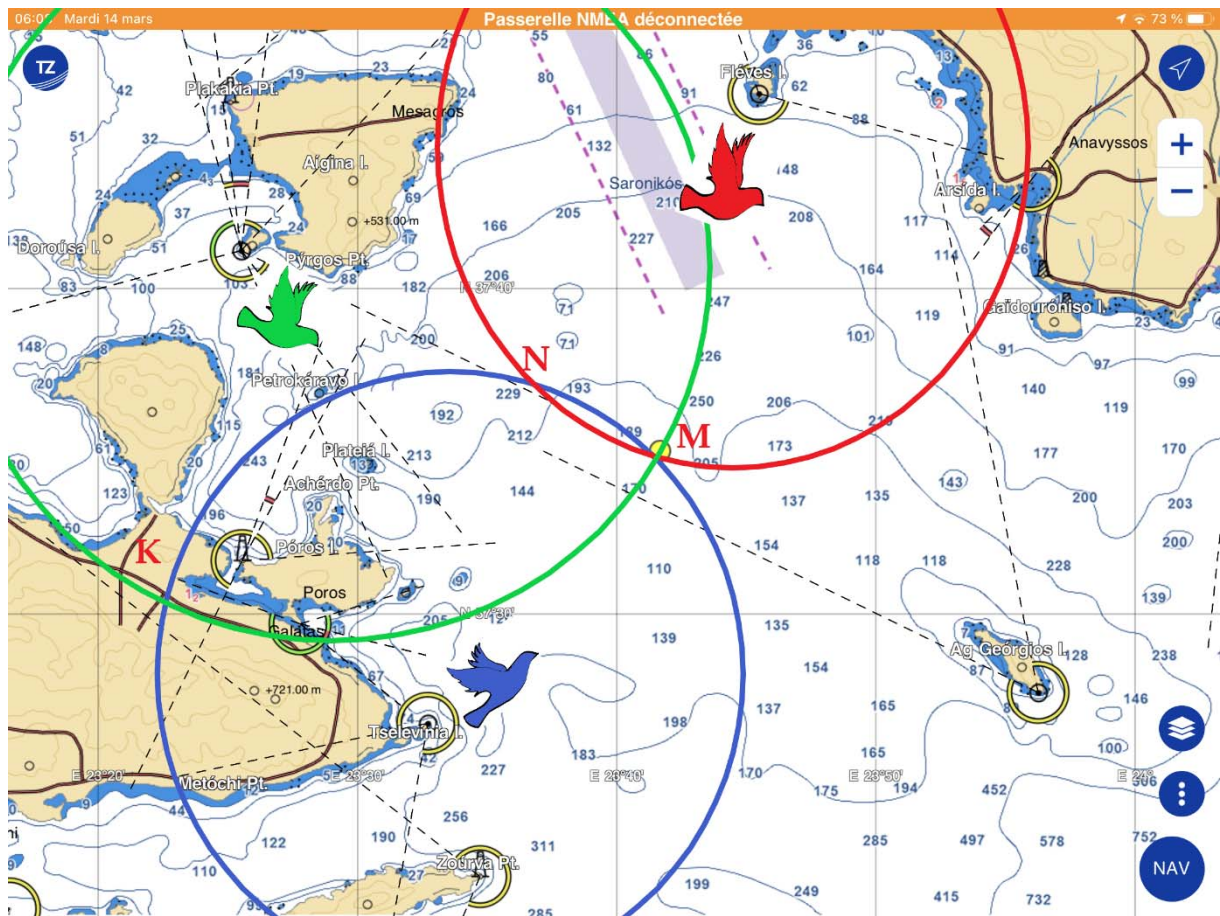
Περάσαμε την ημέρα στην Ύδρα. Περιηγούμεστε στο νησί με τα πόδια. Ιστιοπλοΐα σημαίνει ποδαρόδρομος. Με το που νυχτώνει ανταμείβουμε τους εαυτούς μας με βραδινό σε μια καλή ταβέρνα. Δεν έχει τσίπουρα, ούζα αλλά ούτε και κρασάκι. Μετά το φαγητό αντί να πάμε για ύπνο, λύνουμε, και πλώρη για Αθήνα. Νύχτα χωρίς φεγγάρι, και αποφασίζουμε να θυμηθούμε τα παλιά. Κλείνουμε τα κινητά, το GPS, τον plotter. Ανοίγουμε τον έντυπο χάρτη στο τραπέζι. Περνάνε καμμιά δύο ώρες, σκοτάδι. Μα που είμαστε ; Στο logbook, έχουμε σημειώσει την ώρα που φύγαμε, την ταχύτητα μας, την πορεία μας. Σε κάθε task ή τσίμα, θα βάλουμε ένα σταυρό στον έντυπο χάρτη στο σημείο που νομίζουμε ότι είμαστε κατ' εκτίμηση. Αλλά τώρα μπορούμε να κάνουμε κάτι καλύτερο. Γύρω μας τρεις φάροι αναβοσβήνουν. Τους αναγνωρίζουμε με το βιβλίο των φάρων, τον φαροδείκτη. Φλέβες, Μονή, Τσελεβίνα. Με την πυξίδα διόπτρευσης τους βλέπουμε στις  $12^\circ$ ,  $216^\circ$  και  $291^\circ$  μοίρες. Με το διπαράλληλο χαράζουμε 3 ευθείες στον χάρτη, που εάν η διόπτρευση δεν είχε κανένα λάθος θα τέμνονταν σε ένα σημείο. Τώρα όμως σχηματίζουν ένα τρίγωνο, και είμαστε κάπου εκεί μέσα. Γνωρίζουμε το στίγμα μας με ακρίβεια 200-300 μέτρα και αυτό εξαρτάται από την θέση των φάρων (ή άλλων αναγνωρίσιμων σημείων την ημέρα) και την ποιότητα της διόπτρευσης. Η ακρίβεια που επιτυγχάνουμε με αυτόν τον τρόπο είναι τάξης μεγέθους χειρότερη με αυτή ενός απλού GPS !



Σχέδιο 1 Διόπτρευση τριών σημείων

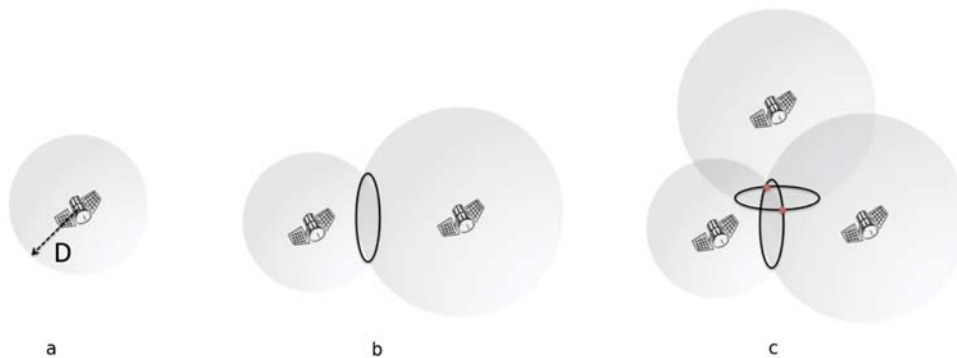
Πως λοιπόν δουλεύει το αμερικανικό GPS (Global Positioning System), το ρωσικό GLONASS (ГЛОНАСС, **γ**λο**β**α**λ**η**ν**α**ι**α **η**να**υ**γ**α**τι**ο**ν**ο**ν**α** **σ**π**υ**τ**η**κ**ο**ν**ο**ν**α** **σ**υσ**τ**η**μ**α, **g**lobal**n**a**i**a **n**avigat**s** **i**onna**i**a **s**proutnikova**i**a **s**ist**e**ma), το ευρωπαϊκό GALILEO, ή το κινέζικο Beidou και κατορθώνει να μας εντοπίζει με ακρίβεια 3-50 μέτρα ;

Ας φανταστούμε ότι από τους τρεις φάρους φεύγουν τρία ταχυδρομικά περιστέρια. Ένα κόκκινο από τις Φλέβες, ένα πράσινο από την Μονή και ένα μπλέ από τα Τσελεβίνια. Το καθένα έχει ένα μήνυμα για μας, έφυγα την τάδε ώρα,  $t_1$ . Όταν το περιστέρι μας φτάσει και δούμε το μήνυμα, σημειώνουμε την ώρα,  $t_2$ . Τα ταχυδρομικά περιστέρια είναι πράγματι αθλητές μεγάλων αποστάσεων και πετάνε με ταχύτητα κοντά στα 100 Km/h. Ας θυμηθούμε λίγο την φυσική του γυμνασίου και το ορισμό της ταχύτητας,  $v = s / \Delta t$ , όπου  $s$  είναι η απόσταση που διανύσαμε και  $\Delta t = t_2 - t_1$  ο χρόνος που κάναμε. Έτσι με το μήνυμα του 1<sup>ου</sup> περιστεριού ξέρουμε ότι είμαστε κάπου πάνω σε έναν κύκλο, τον κόκκινο στο σχήμα μας, με κέντρο τις Φλέβες και ακτίνα ίση με  $100 \text{ km/h} \times (t_2 - t_1)$ . Είναι φανερό ότι ένα περιστέρι δεν επαρκεί. Όταν φτάσει και το 2<sup>ο</sup> από τα Τσελεβίνια χαράζουμε τον μπλέ κύκλο που τέμνει τον 1<sup>ο</sup> σε δυο σημεία, M και N. Καλλίτερα τώρα αλλά ακόμα δεν ξέρουμε που είμαστε, στο M ή στο N ; και θα χρειαστεί και το 3<sup>ο</sup> περιστέρι και ο πράσινος κύκλος για να πούμε που ακριβώς είναι το σκάφος μας. Στο σημείο που τέμνονται και οι τρεις κύκλοι, το M. Το κλειδί λοιπόν για να εντοπίσουμε με ακρίβεια το σκάφος μας είναι η μέτρηση του χρόνου  $\Delta t$  με μεγάλη ακρίβεια και η θέση των φάρων.

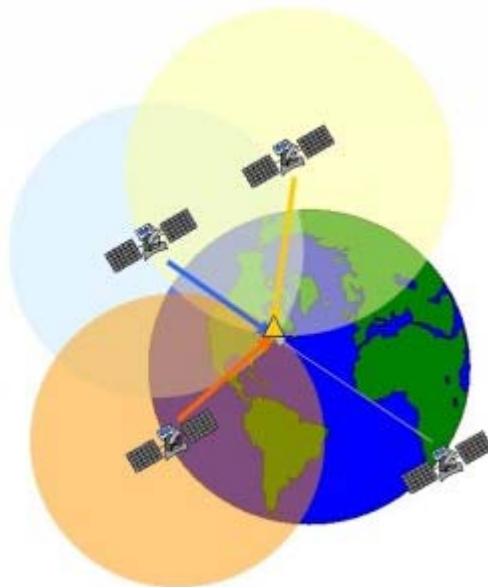


Σχέδιο 2 Εντοπισμός με μέτρηση του χρόνου

Έτσι δουλεύει και το κάθε GPS, είτε αμερικάνικο είναι, είτε ρωσικό, είτε ευρωπαϊκό, είτε κινέζικο. Μόνο που αντί για φάρους έχουμε 24 δορυφόρους για το GPS, και αντί για περιστέρια ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα που ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός  $v = 299\,792\,458 \text{ Km/s}$ . Οι 24 δορυφόροι κάνουν τον γύρο της Γης δύο φορές την ημέρα (κάθε 11 h 58 min 2 s), βρίσκονται σε ύψος περίπου 20200 Km, και περιστρέφονται με ταχύτητα 14000 Km/h. Ενώ οι φάροι παραμένουν σταθεροί, οι δορυφόροι είναι εν κινήσει, και θα χρειαστεί ένα επίγειο σύστημα που επικοινωνεί με τους δορυφόρους και καταγράφει με ακρίβεια την θέση τους ανά πάσα στιγμή. Και για να ολοκληρώσουμε το σύστημα, στο σκάφος μας έχουμε έναν δέκτη των σημάτων από τους δορυφόρους, σήματα που περιέχουν όλη την πληροφορία ώστε το όργανο που συχνά αποκαλούμε το GPS, να μπορέσει, εκτελώντας έναν ειδικό αλγόριθμο, να μας εντοπίσει στην θάλασσα. Δεν είμαστε πλέον σε δυο διαστάσεις όπως με τον έντυπο χάρτη, αλλά σε τρεις, στον χώρο δηλαδή, και οι κύκλοι μας θα γίνουν σφαίρες και θα χρειαστούν τέσσερις δορυφόροι το ελάχιστον για να εντοπίσουμε ένα σημείο στην Γη σε τρεις διαστάσεις, γεωγραφικό μήκος, πλάτος και υψόμετρο. Τρεις δορυφόροι αρκούν για τον εντοπισμό στην θάλασσα μια και το υψόμετρο είναι μηδέν.



Σχέδιο 3 Εντοπισμός στον χώρο. Τρεις δορυφόροι δεν επαρκούν για να βρούμε την θέση μας



Σχέδιο 4 Με 4 δορυφόρους βρίσκουμε το γεωγραφικό πλάτος, μήκος και το υψόμετρο





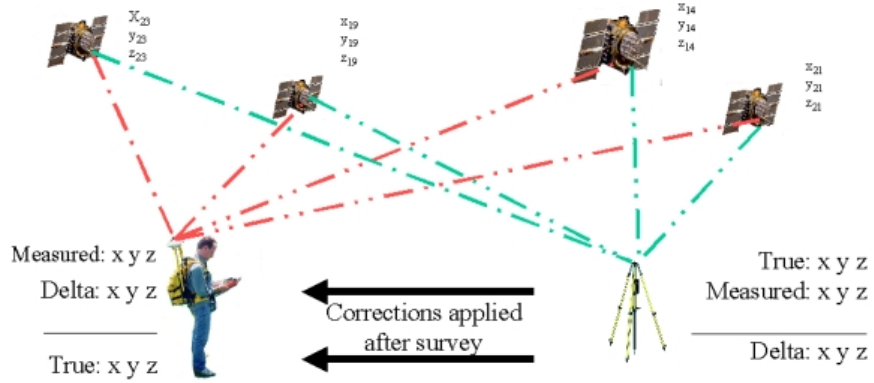
Και ας έρθουμε τώρα στην πολύ πιο δύσκολη μέτρηση του χρόνου  $\Delta t$ . Το φως διανύει ένα μέτρο σε τρία nanoseconds (ns), δηλαδή ένα χιλιοστό του χιλιοστού του χιλιοστού του δευτερολέπτου, 0,000000001 δευτερόλεπτα. Από τον δορυφόρο μέχρι το σκάφος μας θα κάνει 0,067 δευτερόλεπτα (67 ns = 67 nanoseconds), και μέχρι να έρθει, εμείς θα έχουμε κουνηθεί 0,17 χιλιοστά (mm millimeters) !!! . Εάν κάνουμε ένα λάθος ενός εκατομμυριοστού του δευτερολέπτου (1μs, 1 microsecond) στην μέτρηση του χρόνου  $\Delta t$ , τότε η θέση μας θα είναι λανθασμένη κατά 300 μέτρα ! καλλίτερα να πάρουμε την πυξίδα διόπτρευσης. Βλέπουμε λοιπόν ότι εάν θέλουμε 30 μέτρα ακρίβεια στον εντοπισμό μας, θα χρειαστεί να μετρήσουμε τον χρόνο με ακρίβεια καλλίτερη από 10 ns. Δεν είναι εύκολη δουλειά ! Και εδώ έρχεται η κβαντική μηχανική, μια θεωρία φυσικής της αρχής του 20<sup>ου</sup> αιώνα να μας βοηθήσει. Χάριν σε αυτήν όλοι οι δορυφόροι έχουν ένα ατομικό ρολόι που μετράει τον χρόνο  $t_1$  με τεράστια ακρίβεια. Για τον χρόνο  $t_2$ , το GPS μας δεν έχει ατομικό ρολόι φυσικά, αλλά με τους χρόνους από 4 και πλέον δορυφόρους, είναι δυνατόν να εξαλείψουμε το λάθος που κάνει.

Αλλά ακόμα και εάν μπορούσαμε να μετρήσουμε τον χρόνο με άπειρη ακρίβεια, το GPS εκείνη την βραδιά που το κλείσαμε, θα μας εντόπιζε πιο κοντά στην Αίγινα ή στο λιμάνι του Πόρου μετρώντας μόνο τον χρόνο !!!! Μάλλον ξεχάσαμε κάτι ! Ο χρόνος δεν κυλάει με τον ίδιο ρυθμό στην Γη που θεωρούμε ακίνητη, και στους δορυφόρους που κινούνται ! Εάν βλέπαμε τον χρόνο σε δυο σουπερ ατομικά ρολόγια το ένα στην Γη και το άλλο στον δορυφόρο, μετά από 24 ώρες, θα είχαν 7μs διαφορά στην ώρα !! Και το λάθος στην θέση μας είναι 1,45 ναυτικά μίλια ! Και ακόμα χειρότερα, ο χρόνος των δορυφόρων επηρεάζεται από την έλξη που ασκεί η Γη πάνω τους, και η διαφορά χρόνου του δορυφόρου με την Γη, εξαιτίας αυτών των δυο φαινομένων, σε 24 ώρες είναι 38 μs. Δηλαδή 6,6 ναυτικά μίλια λάθος στην θέση μας, και το GPS θα μας έλεγε είστε στις Φλέβες, και ας μην βλέπετε τα φώτα της Αθήνας ! Χάριν όμως στην ειδική και γενική σχετικότητα του Einstein, ξέρουμε ότι πρέπει να κάνουμε αυτές τις διορθώσεις στον χρόνο μας  $\Delta t$ , που δεν οφείλονται στην ποιότητα των οργάνων μας, αλλά στην ίδια την φύση. Και έτσι μια θεωρία που πρότεινε ο Einstein τις δύο πρώτες δεκαετίες του 20<sup>ου</sup> αιώνα, και δεν φανταζότανε καν ποια εφαρμογή θα μπορούσε να έχει, μετά από 60 χρόνια είναι απαραίτητη για να εντοπιστούμε στην θάλασσα και να χαρούμε το σκάφος μας, τα νησιά μας, τις θάλασσες όλου του κόσμου.

Οι μοντέρνοι δέκτες GPS, είναι ικανοί να δεχτούν και να καταλάβουν τα σήματα αν όχι από τα τέσσερα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού, αλλά σίγουρα από τα τρία. Και έτσι είμαστε σχεδόν βέβαιοι ότι πάνω από το κεφάλι μας είναι πάντα τουλάχιστον 4 δορυφόροι. Η ακρίβεια εντοπισμού εξαρτάται επίσης από την ποιότητα του σήματος που λαμβάνει ο δέκτης που μπορεί να χειροτερέψει ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, πχ την υγρασία. Εάν θέλουμε ακρίβεια στο στίγμα μας της τάξης των 1-3 μέτρων, τότε θα χρειαστούμε το DGPS, differential GPS. Το επιτυγχάνουμε εντοπίζοντας συγχρόνως με εμάς, επίγειους σταθμούς που ξέρουμε με ακρίβεια την θέση τους, και μετρώντας έτσι το λάθος που κάνουμε λόγω των συνθηκών πχ. Η διαφορά ανάμεσα από την υπολογισμένη θέση του επίγειου σταθμού μείον την πραγματική θέση, είναι το λάθος μας. Ο δέκτης μας θα λάβει τα σήματα των δορυφόρων αλλά και των επίγειων σταθμών που μας στέλνουν την διόρθωση. Πολλοί μοντέρνοι δέκτες έχουν αυτή την δυνατότητα, αρκεί να υπάρχουν κοντά επίγειοι σταθμοί.

Και έτσι σήμερα πάνω σε κάθε σκάφος υπάρχουν 4-5 δέκτες GPS, αν υπολογίσουμε αυτόν του σκάφους και όλα τα κινητά τηλέφωνα και tablets. Εμείς γυρίζοντας νύχτα από την Ύδρα, τα κλείσαμε όλα και φτάσαμε στο λιμάνι μας, στην Αθήνα, χωρίς κανένα πρόβλημα. Δεν είναι δα και δύσκολο ! Δοκιμάστε, εξασκεί το μάτι και το μυαλό !!!!

## Differential GPS



NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
National Ocean Service  
National Geodetic Survey



Positioning America for the Future

Σχέδιο 5 Λειτουργία του DGPS