

ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΕΜΠ DEPARTMENT OF SURVEYING NTUA

ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ (DGPS)

Α. ΖΗΣΟΠΟΥΛΟΣ - Δ. ΠΑΡΑΔΕΙΣΗΣ



ΑΘΗΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2006

Πρόλογος

Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού NAVSTAR/GPS είναι ένα δορυφορικό σύστημα που αναπτύσσεται από το Υπουργείο Αμυνας των ΗΠΑ για στρατιωτική κυρίως χρήση. Βασίζεται σε ένα δορυφορικό σχηματισμό 24 δορυφόρων που περιστρέφονται γύρω από τη γη εκπέμποντας σήματα σε δύο συχνότητες. Ο χρήστης του συστήματος, εφοδιασμένος με έναν κατάλληλο δέκτη λαμβάνει τα δορυφορικά σήματα και προσδιορίζει τη θέση, την ταχύτητα και το χρόνο του σε οποιοδήποτε σημείο της γης, οποιαδήποτε ώρα και κάτω από οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες.

Σκοπός των σημειώσεων αυτών είναι η παρουσίαση του διαφορικού εντοπισμού με χρήση του συστήματος GPS (**Differential GPS - DGPS**). Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει στο χρήστη την επίτευξη ιδιαίτερα υψηλών ακριβειών εντοπισμού, της τάξης των 1-2 m, και ταχύτητας της τάξης των 0.1 m/sec, σε πραγματικό χρόνο, εξαρτώμενων βεβαίως από την απόσταση σταθμού αναφοράς και χρήστη.

1. Εισαγωγή

Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού NAVSTAR/GPS σχεδιάστηκε και έχει αναπτυχθεί για να παρέχει δύο τύπους υπηρεσιών εντοπισμού από πλευράς ακριβείας: τις Υπηρεσίες Εντοπισμού Συνήθους Ακριβείας (**Standard Positioning Service - SPS**) για γενική χρήση προς όλους ανεξάρτητα τους χρήστες του συστήματος και τις Υπηρεσίες Εντοπισμού Υψηλής Ακριβείας (**Precise Positioning Service - PPS**) για τους εξουσιοδοτημένους από το Υπουργείο Αμυνας των ΗΠΑ χρήστες.

Οι χρήστες της υπηρεσίας SPS έχουν ελεύθερη πρόσβαση στα δεδομένα που μεταδίδονται στη συχνότητα L_1 και συγκεκριμένα στον κώδικα ευρείας λήψης C/A και στο μήνυμα ναυσιπλοΐας. Το επίπεδο ακριβείας της καθορίζεται από το Υπουργείο Αμυνας των ΗΠΑ. Οι χρήστες της υπηρεσίας PPS έχουν πρόσβαση στα δεδομένα που μεταδίδονται και στις δύο συχνότητες L_1 και L_2 και συγκεκριμένα στους κώδικες ευρείας λήψης C/A και ακριβείας P, καθώς και στο μήνυμα ναυσιπλοΐας. Η προβλεπόμενη ακρίβειά της είναι της τάξης των 18 m (2drms) στο οριζόντιο και 28 m (2σ) στο κατακόρυφο επίπεδο.

Το Κέντρο Ελέγχου του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιήσει δύο ανεξάρτητες τεχνικές υποβάθμισης ακριβείας / ελέγχου πρόσβασης στο σύστημα: την επιλεκτική διαθεσιμότητα (**Selective Availability - SA**) και την τεχνική κρυπτογράφησης (**Anti-Spoofing - A-S**).

Η τεχνική A-S τροποποιεί τον κώδικα P μετασχηματίζοντάς τον στον κρυπτογραφημένο κώδικα Y, ελέγχοντας έτσι την πρόσβαση στον κώδικα ακριβείας (χωρίς αυτό να επηρεάζει τον κώδικα C/A). Η επιλεκτική διαθεσιμότητα (SA) αποτελεί τεχνική σκόπιμης υποβάθμισης της ακριβείας του συστήματος και επιτυγχάνεται με δύο τρόπους.

Με την μείωση της ακριβείας των προβλεπόμενων τροχιακών στοιχείων, που περιέχονται στο μήνυμα (εφημερίδα των δορυφόρων), μέσω της αποκοπής σημαντικών ψηφίων και με την εισαγωγή θορύβου στο εκπεμπόμενο σήμα, ώστε να μειωθεί η ακρίβεια με την οποία γίνονται οι μετρήσεις επάνω σ' αυτό.

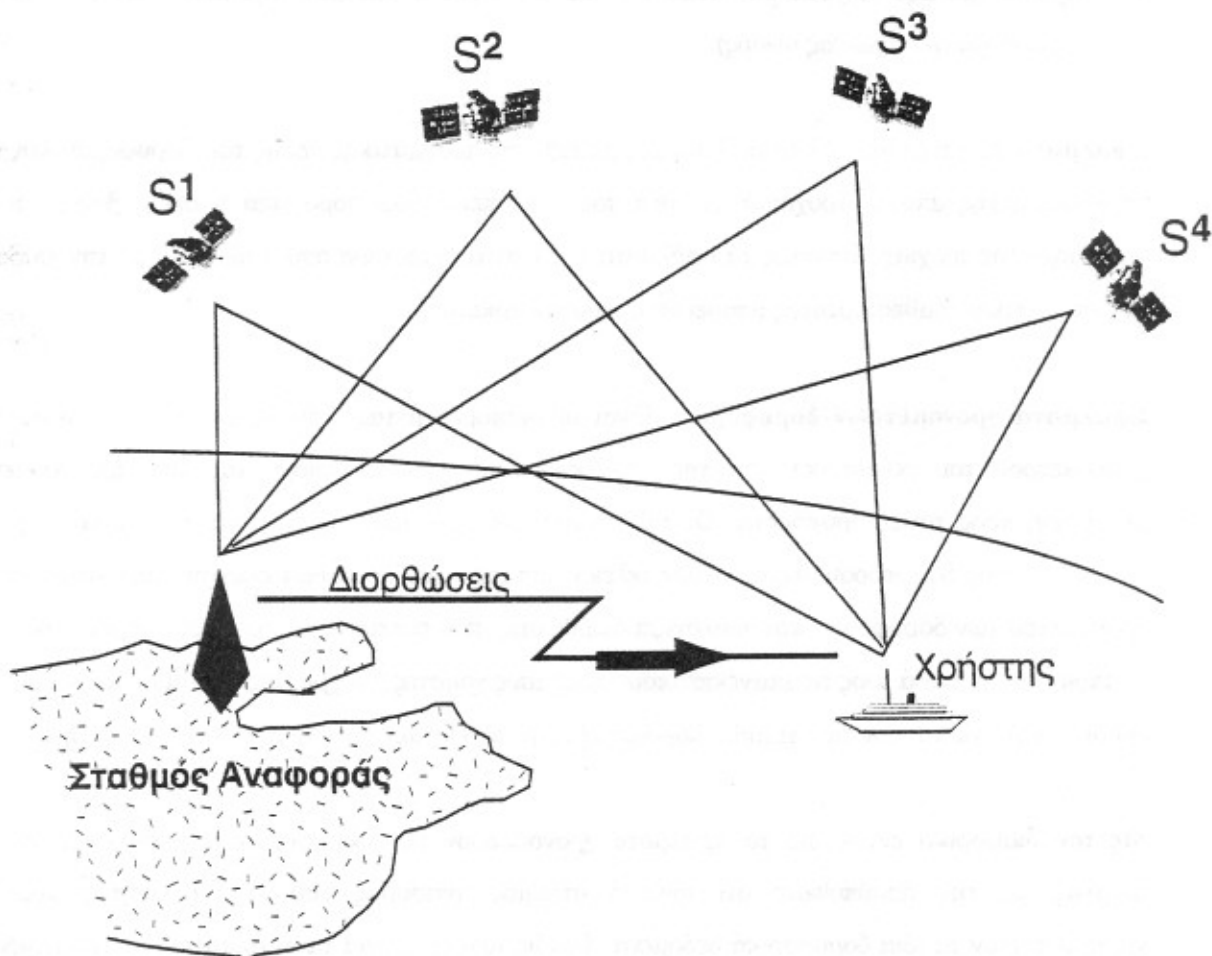
Το Υπουργείο Αμυνας των ΗΠΑ εισάγει τα παραπάνω σφάλματα χρησιμοποιώντας απόρρητους αλγορίθμους κρυπτογράφησης. Οι εξουσιοδοτημένοι χρήστες μπορούν να αντιμετωπίσουν τα σφάλματα αυτά χρησιμοποιώντας ειδικούς δέκτες εφοδιασμένους με αποκρυπτογραφικά κλειδιά. Οι υπόλοιποι όμως χρήστες πρέπει να αρκεστούν στην μειωμένης ακρίβειας υπηρεσία SPS.

Οι ΗΠΑ, επικαλούμενες λόγους εθνικής ασφαλείας, είχαν ενεργοποιήσει από την 1η Ιουλίου 1991 την τεχνική SA και από την 30η Ιανουαρίου 1994 έχουν την τεχνική A-S. Έτσι η παρεχόμενη ακρίβεια εντοπισμού του συστήματος GPS ήταν ονομαστικά της τάξης των 100 m (2drms) στο οριζόντιο και 156 m (2σ) στο κατακόρυφο επίπεδο για το 95% του χρόνου (επίπεδο εμπιστοσύνης 95%) και γύρω στα 300 m για το 99% του χρόνου. Αν και η τεχνική SA έχει διακοπεί, η παρεχόμενη ακρίβεια σήμερα (13 m οριζοντιογραφικά και 22 m υψομετρικά) μπορεί να είναι ικανοποιητική για ένα μεγάλο ποσοστό χρηστών, που χρησιμοποιούν το GPS σε εργασίες μειωμένων απαιτήσεων ακριβείας. Υπάρχει ωστόσο σημαντικός αριθμός ειδικών εφαρμογών, που απαιτούν πολύ υψηλότερες ακρίβειες εντοπισμού. Για να μπορέσει ο χρήστης να πετύχει ακρίβειες της τάξης των 1 - 2 m (και ιδιαίτερα σε πραγματικό χρόνο) πρέπει να εφαρμόσει τις τεχνικές του διαφορικού εντοπισμού.

2. Αρχές λειτουργίας

Η αρχή του διαφορικού GPS (DGPS) βασίζεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα σφάλματα στην μέτρηση ψευδοαποστάσεων, χρησιμοποιώντας δέκτες GPS, είναι σε μεγάλο βαθμό κοινά για όλους τους χρήστες που βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή και παρακολουθούν ταυτόχρονα τους ίδιους δορυφόρους. Αυτό συμβαίνει διότι το μεγαλύτερο μέρος των σφαλμάτων οφείλεται στο τμήμα ελέγχου, στο τμήμα διαστήματος και στην επίδραση της ατμόσφαιρας.

Αν λοιπόν τοποθετηθεί ένας δέκτης GPS σε ένα σταθερό σημείο, με γνωστές εκ των προτέρων συντεταγμένες, είναι δυνατόν με βάση τις γνωστές από την εκπεμπόμενη εφημερίδα θέσεις των δορυφόρων, να υπολογισθούν οι αποστάσεις που θα έπρεπε να μετρά ο δέκτης προς κάθε δορυφόρο του συστήματος. Αυτές οι υπολογισμένες αποστάσεις συγκρίνονται με τις αποστάσεις που πραγματικά μετρά ο δέκτης προς τους ίδιους δορυφόρους και η διαφορά τους είναι τα σφάλματα στη μέτρηση των ψευδοαποστάσεων. Τα σφάλματα αυτά μεταδίδονται σε πραγματικό χρόνο ως διορθώσεις ψευδοαποστάσεων προς τους άλλους (κινούμενους) δέκτες GPS που βρίσκονται στην ίδια περιοχή. Αν οι δέκτες αυτοί χρησιμοποιούν τους ίδιους ή τουλάχιστον τέσσερις από τους δορυφόρους που παρατηρεί ο σταθμός αναφοράς, ταυτόχρονα, μπορούν να τις χρησιμοποιήσουν για να διορθώσουν τις δικές τους μετρήσεις ψευδοαποστάσεων και να βελτιώσουν την ακρίβεια εντοπισμού (σχήμα 1).



Σχήμα 1: Αρχή λειτουργίας του διαφορικού GPS

Οι κυριότερες πηγές σφαλμάτων είναι:

Σφάλματα επιλεκτικής διαθεσιμότητας. Τα σφάλματα που εισάγονται στη μέτρηση της ψευδοαπόστασης είναι της τάξης των 30 m (1σ).

Σφάλματα ιονόσφαιρας. Η καθυστέρηση διάδοσης του σήματος λόγω της επίδρασης της ιονόσφαιρας κυμαίνεται από 20 - 30 m κατά τη διάρκεια της ημέρας μέχρι 3 - 6 m κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Σφάλματα τροπόσφαιρας. Η καθυστέρηση διάδοσης του σήματος λόγω των χαμηλότερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας μπορεί να φτάσει τα 30 m για δορυφόρους σε χαμηλές γωνίες ύψους. Τα σφάλματα αυτά είναι αρκετά σταθερά και μπορούν να προσεγγισθούν με χρήση μοντέλων. (Αποκλίσεις στο δείκτη διάθλασης μπορούν να προξενήσουν διαφορές στις καθυστερήσεις διάδοσης του σήματος (μεταξύ του σταθμού αναφοράς και του κινητού σταθμού) της τάξης των 1 - 3 m για δορυφόρους χαμηλής γωνίας ύψους).

Σφάλματα εφημερίδων. Είναι οι διαφορές μεταξύ της πραγματικής θέσης του δορυφόρου και της υπολογιζόμενης από τα τροχιακά στοιχεία που εκπέμπει ο δορυφόρος και η οποία βασίζεται σε πρόβλεψη της τροχιάς. Συνήθως τα σφάλματα αυτά είναι μικρότερα από 3 m, αλλά με την επιβολή της επιλεκτικής διαθεσιμότητας μπορεί να αυξηθούν αρκετά.

Σφάλματα χρονομέτρων δορυφόρων. Είναι οι διαφορές μεταξύ της πραγματικής πορείας του χρονομέτρου του δορυφόρου και της προβλεπόμενης, που προσδιορίζεται από προηγούμενες μετρήσεις προς τους δορυφόρους. Οι ταλαντωτές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του σήματος στους δορυφόρους λειτουργούν τελείως ανεξάρτητα. Το τμήμα ελέγχου παρακολουθεί τα χρονόμετρα των δορυφόρων και υπολογίζει διορθώσεις, που εκτέμονται προς τους δορυφόρους και οι οποίοι με τη σειρά τους τις επανεκπέμπουν προς τους χρήστες. Οι χρήστες χρησιμοποιούν αυτά τα δεδομένα για να κάνουν τις σχετικές διορθώσεις στην πορεία των χρονομέτρων των δορυφόρων.

Με τον διαφορικό εντοπισμό τα σφάλματα χρονομέτρων των δορυφόρων απαλείφονται σχεδόν πλήρως, με την προϋπόθεση ότι τόσο ο σταθμός αναφοράς όσο και ο κινητός σταθμός χρησιμοποιούν τα ίδια δορυφορικά δεδομένα. Το ίδιο ισχύει και για τα σφάλματα των εφημερίδων, με την προϋπόθεση ότι αυτά είναι μικρά (λιγότερο από 30 m). Εκείνα από τα σφάλματα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας, που επηρεάζουν την παραγωγή του σήματος, μειώνονται με τον

διαφορικό εντοπισμό, αλλά οι διορθώσεις χάνουν την αξιοπιστία τους μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.

Για τους χρήστες που βρίσκονται κοντά στο σταθμό αναφοράς, οι διαδρομές του σήματος από τους δορυφόρους προς τον σταθμό αναφοράς και τους χρήστες είναι σχεδόν όμοιες και επομένως τα σφάλματα λόγω τροπόσφαιρας και ιονόσφαιρας μειώνονται πάρα πολύ. Όσο η απόσταση χρήστη - σταθμού αναφοράς αυξάνεται, οι διαδρομές του σήματος μέσα από την τροπόσφαιρα και την ιονόσφαιρα αρχίζουν να διαφοροποιούνται λόγω της ανομοιογένειας της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα οι καθυστερήσεις στον κινητό σταθμό και το σταθμό αναφοράς να διαφέρουν, εισάγοντας έτσι ένα σφάλμα στις διαφορικές μετρήσεις GPS. Το σφάλμα αυτό μεγαλώνει ανάλογα με την απόσταση κινητού σταθμού - σταθμού αναφοράς.

Είναι λοιπόν φανερό ότι η τεχνική του διαφορικού εντοπισμού μπορεί να μειώσει πάρα πολύ εκείνα τα σφάλματα που οφείλονται στο τμήμα ελέγχου, στο τμήμα διαστήματος και στην επίδραση της ατμόσφαιρας. Ωστόσο το DGPS δε μπορεί να συνεισφέρει στην αντιμετώπιση των σφαλμάτων εκείνων που οφείλονται στο δέκτη.

Οι πηγές σφαλμάτων του δέκτη είναι:

Σφάλματα χρονομέτρου. Το μέγεθος του σφάλματος του χρονομέτρου εξαρτάται από την ποιότητα του ταλαντωτή του δέκτη και λόγω της μεταβολής του αντιμετωπίζεται ως άγνωστη ποσότητα (τέταρτος άγνωστος κατά την επίλυση για τον προσδιορισμό τριδιάστατης θέσης).

Σφάλματα λόγω σταθερότητας του ηλεκτρονικού κέντρου της κεραίας του δέκτη. Αυτά μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με προσεκτική σχεδίαση και κατασκευή της κεραίας.

Σφάλματα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του δέκτη. Τα σφάλματα που εισάγουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα έχουν μέγεθος της τάξης του 1% του μήκους κύματος της μέτρησης για δέκτες σχετικά υψηλής ποιότητας. Το μέγεθος τους είναι της τάξης των 3 m για μέτρηση ψευδοαποστάσεων στον κώδικα C/A και των 30 cm για μέτρηση ψευδοαποστάσεων στον κώδικα P.

Σφάλματα πολλαπλών ηλεκτρονικών διαδρομών. Είναι τυχαία σφάλματα τα οποία οφείλονται σε πολλαπλές ηλεκτρονικές διαδρομές [λόγω της ανάκλασης του σήματος σε διάφορες επιφάνειες πριν φτάσει στο δέκτη (**multipath**)]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μέτρηση να γίνεται και στο ανακλώμενο

σήμα, αντί μόνο σε αυτό που έρχεται κατευθείαν από το δορυφόρο. Η επίδραση τους μπορεί να περιορισθεί σημαντικά με σωστή επιλογή της θέσης, που θα τοποθετηθεί η κεραία.

3. Περιγραφή του συστήματος

Για τη λειτουργία του DGPS απαιτούνται δύο δορυφορικοί δέκτες GPS, οι οποίοι πρέπει να συνδέονται με μία **τηλεπικοινωνιακή γραμμή μεταφοράς δεδομένων (data communication link)**. Ο ακίνητος δέκτης που τοποθετείται σε σημείο με γνωστές συντεταγμένες και υπολογίζει τις διαφορικές διορθώσεις ονομάζεται σταθμός αναφοράς (**reference station**). Ο κινούμενος δέκτης ο οποίος λαμβάνει τις διορθώσεις και τις χρησιμοποιεί για να βελτιώσει την ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης του, ονομάζεται γενικά χρήστης (**remote user**). Στις επόμενες παραγράφους γίνεται περιγραφή των επιμέρους τμημάτων του συστήματος, με έμφαση στα χαρακτηριστικά της γραμμής επικοινωνίας.

3.1. Ο σταθμός αναφοράς

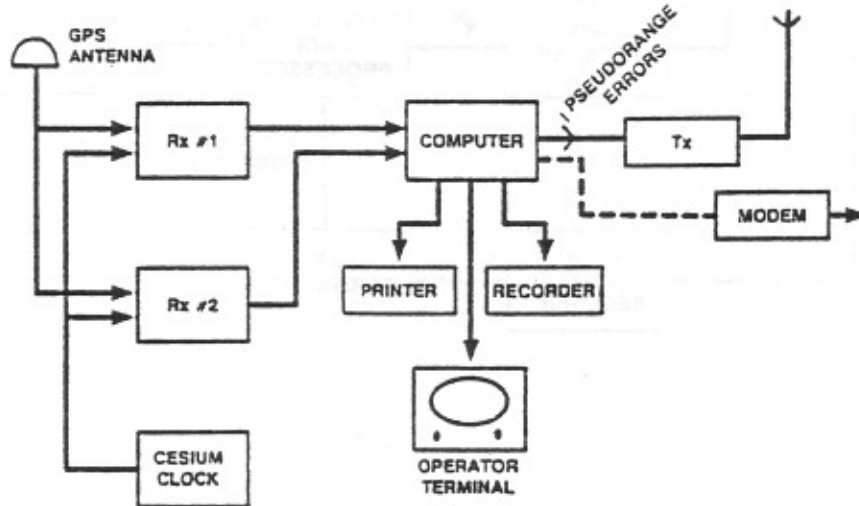
Ο σταθμός αναφοράς αποτελείται από ένα δέκτη GPS, έναν πομπό ραδιοζεύξης και ίσως έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η κεραία του δέκτη είναι εγκατεστημένη σε σημείο του οποίου οι συντεταγμένες έχουν υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια. Οι κεραίες του δέκτη και του πομπού ραδιοζεύξης είναι τοποθετημένες σε σημεία με το μέγιστο δυνατό ελεύθερο οπτικό πεδίο.

Ο ιδανικός τύπος δέκτη είναι ο πολυκάναλος, έτσι ώστε να παρακολουθεί με ανεξάρτητα κανάλια συνεχώς όλους τους ορατούς δορυφόρους. Με το σημερινό δορυφορικό σχηματισμό των 30 δορυφόρων (Δεκέμβριος 2006) είναι συνεχώς ορατοί από οποιοδήποτε σημείο της γης, τουλάχιστον τέσσερις και μέχρι δέκα δορυφόροι για το 99% του χρόνου. Επομένως ένας δωδεκακάναλος δέκτης είναι επαρκής. Σε μόνιμους σταθμούς αναφοράς είναι πιθανή η χρήση δύο δεκτών GPS για λόγους ασφαλείας.

Ο δέκτης μετρά ψευδοαποστάσεις, το φαινόμενο doppler και αν η εφαρμογή το απαιτεί, φάσεις φέροντος κύματος. Οι υπολογισμοί των διαφορικών διορθώσεων και η μορφοποίηση του μηνύματος μπορεί να γίνεται στον ίδιο το δέκτη ή / και στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και μέσω του πομπού να εκπέμπεται προς τους χρήστες.

Στο σχήμα 2 φαίνεται η σχηματική παράσταση ενός πλήρως εξοπλισμένου (μόνιμα εγκατεστημένου) σταθμού αναφοράς. Η εφαρμογή βέβαια μπορεί να απαιτεί λιγότερο περίπλοκο

εξοπλισμό (χωρίς δευτέρο δέκτη, εξωτερικό χρονόμετρο και περιφερειακά), ο οποίος να μπορεί να μεταφερθεί εύκολα, να εγκατασταθεί γρήγορα και να λειτουργεί χωρίς παρατηρητή.

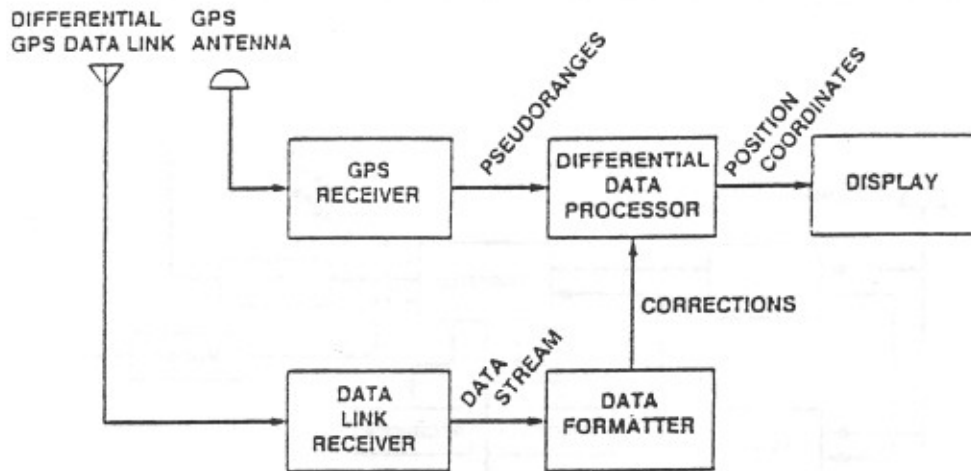


Σχήμα 2: Λειτουργικό διάγραμμα εξοπλισμού μόνιμου σταθμού αναφοράς

3.2. Ο χρήστης

Ο ελάχιστος εξοπλισμός του χρήστη, περιλαμβάνει ένα δέκτη GPS και ένα δέκτη λήψης ραδιοζεύξης. Είναι δυνατό να συμπληρωθεί όμως και με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για καταγραφή δεδομένων και παροχή δυνατότητας πλοήγησης. Θεωρητικά, ένας καλά σχεδιασμένος σταθμός αναφοράς που εκπέμπει τις διαφορικές διορθώσεις σύμφωνα με τα τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας, μπορεί να εξυπηρετήσει όλους τους τύπους δεκτών που κυκλοφορούν σήμερα στο εμπόριο και έχουν τη δυνατότητα διαφορικής λειτουργίας. Ωστόσο θα ήταν προτιμότερο, εφόσον είναι δυνατό, ο σταθμός αναφοράς και ο χρήστης να είναι εφοδιασμένοι με πανομοιότυπους δέκτες, ώστε να αυξηθεί λίγο η παρεχόμενη ακρίβεια.

Ο δέκτης μετρά ψευδοαποστάσεις, το φαινόμενο doppler και αν η εφαρμογή το απαιτεί, φάσεις φέροντος κύματος. Οι διαφορικές διορθώσεις λαμβάνονται μέσω του δέκτη ραδιοζεύξης και εφαρμόζονται στις μετρήσεις του δέκτη GPS για να υπολογιστεί τελικά η διορθωμένη θέση του χρήστη. Στο σχήμα 3 φαίνεται η σχηματική παράσταση του εξοπλισμού του χρήστη.

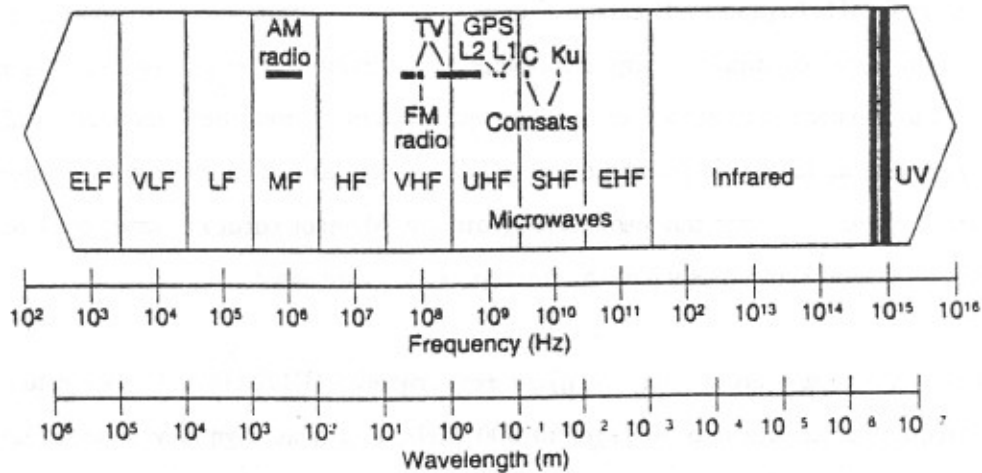


Σχήμα 3: Λειτουργικό διάγραμμα εξοπλισμού χρήστη

3.3. Η ραδιοξεύξη

Η τηλεπικοινωνιακή γραμμή μεταφοράς δεδομένων DGPS μπορεί να λειτουργεί σχεδόν σε οποιαδήποτε συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πρακτικά όμως για τη λειτουργία μιας τέτοιας επικοινωνίας θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη διάφορες παράμετροι όπως το εύρος φάσματος του σήματος, οι τεχνικές διαμόρφωσης, η εμβέλεια εκπομπής και σαν συνάρτηση της ισχύος του πομπού, ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων (baud rate), ο ρυθμός ανανέωσης των διαφορικών διορθώσεων και η απαιτούμενη υποδομή. Στις επόμενες παραγράφους σχολιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα λειτουργίας σε συγκεκριμένες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Περιοχή χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων (LF/MF). Η περιοχή χαμηλών συχνοτήτων (LF) εκτείνεται από τα 30 μέχρι τα 300 kHz, ενώ η περιοχή μεσαίων συχνοτήτων (MF) από τα 300 kHz μέχρι τα 3 MHz (σχήμα 4). Σε αυτό το φάσμα εκπέμπουν οι ραδιοφωνικοί σταθμοί (AM), οι ραδιοφωνικοί πομποί μεγάλου μήκους κύματος και οι ραδιοφάροι ναυτιλίας και αεροναυτιλίας. Οι αεροναυτιλιακοί ραδιοφάροι χρησιμοποιούν τις συχνότητες 190 - 415 kHz και 510 - 535 kHz, ενώ οι ναυτιλιακοί τις συχνότητες 275 - 335 kHz.



Σχήμα 4: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Η έκταση της περιοχής κάλυψης των ραδιοφάρων εξαρτάται από την εμβέλεια του επιφανειακού κύματος εδάφους (έρπον κύμα λόγω χαμηλών συχνοτήτων) και από το λόγο σήματος προς θόρυβο του λαμβανόμενου σήματος. Γενικά η ακτίνα κάλυψης είναι μεγαλύτερη από 150 km για διαδρομές του σήματος πάνω από θαλάσσιες μάζες και μεταξύ 20 - 100 km για διαδρομές πάνω από χερσαίες μάζες, χωρίς πολλές «νεκρές» περιοχές - περιοχές χωρίς κάλυψη.

Η αμερικανική και η канаδική ακτοφυλακή εκπέμπουν διορθώσεις DGPS από ναυτιλιακούς ραδιοφάρους. Αντίστοιχες εργασίες γίνονται και στην Ευρώπη. Στην Γερμανία ένας σταθμός ισχύος 50 KW, εκπέμπει στα ~ 140 KHz διαφορικές διορθώσεις σε μορφή RDS (Radio Data System) με ρυθμό μετάδοσης (λόγω χαμηλής συχνότητας) 300 bits/sec και ανανέωση των διαφορικών διορθώσεων κάθε 3 sec. Ο σταθμός αυτός με εμβέλεια μεγαλύτερη από 600 km καλύπτει όλη τη χώρα.

Αρκετοί κατασκευαστές διαθέτουν σήμερα στην αγορά συστήματα ραδιοξεύξης, που λειτουργούν στο ανώτερο τμήμα του φάσματος των μεσαίων συχνοτήτων, στην περιοχή των 2 MHz. Η εμβέλεια του επιφανειακού κύματος εδάφους σ'αυτές τις συχνότητες είναι γύρω στα 400 km πάνω από θάλασσα και γύρω στα 50 km πάνω από στεριά. Η εμβέλεια αυξάνεται σημαντικά αν χρησιμοποιηθούν ουράνια κύματα ή κύματα από ανάκλαση στα κατώτερα τμήματα της ιονόσφαιρας και μπορεί να φτάσει τα 2000 km. Ωστόσο, η μετάδοση του σήματος με ουράνια κύματα δημιουργεί συχνά, λόγω της φύσης της, σφάλματα στη μετάδοση των δεδομένων.

Περιοχή υψηλών συχνοτήτων (HF). Η περιοχή υψηλών συχνοτήτων (HF) εκτείνεται από τα 3 μέχρι τα 30 MHz (σχήμα 4). Η επικοινωνία σε αυτό το τμήμα του φάσματος βασίζεται αποκλειστικά στην ανάκλαση του σήματος στην ιονόσφαιρα. Η εμβέλεια αυτών των εκπομπών ξεπερνά τα 1000 km. Τα μειονεκτήματα της εκπομπής σε αυτήν την περιοχή του φάσματος είναι η εξασθένηση του σήματος (signal fading) λόγω του τρόπου διάδοσης και το φαινόμενο των παρεμβολών, λόγω της ιδιαίτερα ευρείας χρήσης των υψηλών συχνοτήτων. Μερικοί κατασκευαστές διαθέτουν συστήματα ραδιοζεύξης που λειτουργούν σ'αυτήν την περιοχή του φάσματος.

Περιοχή πολύ υψηλών και υπερυψηλών συχνοτήτων (VHF/UHF). Η περιοχή των πολύ υψηλών συχνοτήτων εκτείνεται από 30 μέχρι τα 300 MHz, ενώ η περιοχή των υπερυψηλών συχνοτήτων εκτείνεται από τα 300 MHz μέχρι τα 3 GHz (σχήμα 4). Η εμβέλεια αυτών των εκπομπών περιορίζεται στην απόσταση οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Στην πραγματικότητα, η πορεία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δεν είναι ευθεία γραμμή, αλλά καμπύλη λόγω της επίδρασης της τροπόσφαιρας. Έτσι τα σήματα φτάνουν λίγο μακρύτερα από τον οπτικό ορίζοντα σε αποστάσεις που δίνονται από την σχέση:

$$D = 4.1 * (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$$

όπου D είναι η εμβέλεια (σε km), και h_t , h_r τα υψόμετρα του πομπού και του δέκτη πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας αντίστοιχα (σε m).

Η εμβέλεια για διαδρομές επάνω από στεριά μπορεί στην πραγματικότητα να είναι μικρότερη αν παρεμβάλλονται εμπόδια (λόφοι, κτίρια), που δημιουργούν "νεκρούς" τομείς διάδοσης του σήματος. Η εμβέλεια αξιόπιστης επικοινωνίας μπορεί να μειωθεί και εξαιτίας του φαινομένου των πολλαπλών ηλεκτρονικών διαδρομών του σήματος. Ωστόσο η εμβέλεια ενός συστήματος μετάδοσης διαφορικών διορθώσεων GPS σ'αυτήν την περιοχή συχνοτήτων μπορεί να αυξηθεί με χρήση δικτύου σταθμών-επαναληπτών.

Ενας πομπός, που εκπέμπει στά ~ 140 MHz με ισχύ 5W έχει εμβέλεια με κεραία πλήρους ορίζοντα ~40 km και με κατευθυντική ~70 km με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 1200 –2400 bits/sec και ρυθμό ανανέωσης διορθώσεων 1 sec. Ενας πομπός ισχύος 25W έχει εμβέλεια με κεραία πλήρους ορίζοντα ~ 80 km και με κατευθυντική ~ 120 km. Ενας πομπός ισχύος 5W με συχνότητα εκπομπής μεγαλύτερη από 300 MHz έχει εμβέλεια μόνο ~ 20 km, αλλά ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 9600 bits/sec και ρυθμό ανανέωσης διαφορικών διορθώσεων 0.5 sec.

Μια ιδέα που έχει αρχίσει επίσης να εφαρμόζεται, είναι η χρήση των υφισταμένων τηλεπικοινωνιακών δικτύων (τηλεφωνίας και ραδιοφωνίας) για τη μετάδοση διαφορικών διορθώσεων GPS. Η χρήση του εμπορικού δικτύου της κινητής τηλεφωνίας πέρα από τα προβλήματα, που εμφανίζουν οι επικοινωνίες στις συχνότητες UHF έχει ορισμένα επιπλέον μειονεκτήματα, όπως το σχετικά υψηλό κόστος χρήσης, η έλλειψη γραμμών επικοινωνίας σε ώρες συμφόρησης του δικτύου και η περιορισμένη κάλυψη εκτός αστικών περιοχών. Οι ραδιοφωνικοί σταθμοί FM μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και για εκπομπή ειδικών κωδικοποιημένων προγραμμάτων διαφορικών διορθώσεων GPS, η αποκωδικοποίηση των οποίων γίνεται με χρήση ειδικών δεκτών.

Δορυφορικές επικοινωνίες. Οι διαφορικές διορθώσεις GPS μπορούν να μεταδοθούν από συστήματα δορυφόρων σε γεωστατική τροχιά, καλύπτοντας γεωγραφικές περιοχές πολύ μεγάλης έκτασης. Ήδη οι δορυφόροι του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλιακών Δορυφόρων (International Maritime Satellite Organization - INMARSAT), που εκπέμπουν στην περιοχή L των μικροκυμάτων (UHF) χρησιμοποιούνται για την παροχή τέτοιων υπηρεσιών από βρετανική εταιρεία. Αντίστοιχες εκπομπές γίνονται και μέσω τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων που λειτουργούν στις περιοχές C και Ku των μικροκυμάτων (SHF) (σχήμα 4).

4. Μέθοδοι εφαρμογής DGPS

Η κύρια μέθοδος εφαρμογής είναι μέσω της **εκπομπής διορθώσεων ψευδοαποστάσεων**. Ο σταθμός αναφοράς εκπέμπει διορθώσεις ψευδοαποστάσεων για κάθε ορατό δορυφόρο (επάνω από τον τοπικό του ορίζοντα), τις οποίες ο χρήστης χρησιμοποιεί για να διορθώνει τις ψευδοαποστάσεις που μετρά.

Δεν χρησιμοποιείται η **εκπομπή διορθώσεων θέσης** γιατί τα σφάλματα εντοπισμού εξαρτώνται άμεσα από το ποιοί δορυφόροι έχουν χρησιμοποιηθεί για την τριδιάσταση επίλυση θέσης. Από τη στιγμή, που ο σταθμός αναφοράς δεν γνωρίζει ποιούς δορυφόρους χρησιμοποιεί ο χρήστης για εντοπισμό, θα πρέπει να υπολογίζει και να εκπέμπει διορθώσεις θέσης για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς δορυφόρων (ανά τέσσερις) και ο χρήστης να χρησιμοποιεί μόνο τέσσερις δορυφόρους.

Είναι δυνατόν επίσης ο χρήστης να εκπέμπει τα δεδομένα της θέσης του προς το σταθμό αναφοράς, όπου γίνεται η διαφορική επίλυση της θέσης του με βάση τις διορθώσεις που υπολογίζει ο σταθμός.

Μια ειδική μέθοδος εφαρμογής διαφορικού GPS, που έχει προταθεί, είναι η τεχνική του ψευδοδορυφόρου (*pseudolite*, σύντμηση του *pseudosatellite*). Στην κλασσική περίπτωση DGPS οι διαφορικές διορθώσεις μεταδίδονται από το σταθμό αναφοράς στο χρήστη με τη βοήθεια μιας εξωτερικής γραμμής επικοινωνίας, που λειτουργεί σε κάποια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στην περίπτωση του ψευδοδορυφόρου, το σήμα που εκπέμπεται από το σταθμό αναφοράς είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε να μοιάζει με το σήμα των δορυφόρων GPS. Χρησιμοποιείται η ίδια διαμόρφωση, κωδικοποίηση και συχνότητα εκπομπής, που χρησιμοποιείται για το σήμα των δορυφόρων. Η διαφορά έγκειται στο περιεχόμενο του σήματος, που για την περίπτωση του ψευδοδορυφόρου αποτελείται από τις διαφορικές διορθώσεις.

Το φανερό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι ο χρήστης δε χρειάζεται να είναι εφοδιασμένος με ειδική συσκευή λήψης των διαφορικών διορθώσεων, επειδή αυτές εκπέμπονται στην ίδια συχνότητα με αυτή των δορυφορικών σημάτων. Επιπλέον, αφού ο σταθμός αναφοράς είναι συγχρονισμένος με το χρόνο του συστήματος GPS, ο χρήστης μπορεί να κάνει μετρήσεις ψευδοαποστάσεων και προς το σταθμό εδάφους, αυξάνοντας την αξιοπιστία του συστήματος (επειδή χρειάζονται μόνο τρεις επιπλέον δορυφόροι για τον εντοπισμό) και βελτιώνοντας την ακρίβειά του λόγω καλύτερης γεωμετρίας του δορυφορικού σχηματισμού (χαμηλότερες τιμές DOP). Το γεγονός ότι οι διορθώσεις εκπέμπονται στην περιοχή L των μικροκυμάτων υπαγορεύει την ανάγκη οπτικής επαφής σταθμού αναφοράς - χρήστη. Για το λόγο αυτό, η τεχνική του ψευδοδορυφόρου παρουσιάζει περισσότερο ενδιαφέρον για εναέριες εφαρμογές και θαλάσσιες ή χερσαίες εφαρμογές περιορισμένης εμβέλειας.

Το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής του ψευδοδορυφόρου, εκτός από το εκτιμώμενο μεγάλο κόστος του σταθμού είναι το ότι, λόγω της μεγάλης ισχύος του σήματός του σε σχέση με τα σήματα που λαμβάνονται από τους δορυφόρους, μπορεί να δημιουργεί παρεμβολές στο δέκτη του χρήστη, ειδικά όταν ο χρήστης βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το ψευδοδορυφόρο. Στην περίπτωση αυτή ο χρήστης θα λαμβάνει μόνο το σήμα από τον ψευδοδορυφόρο και όχι τα σήματα από τους πραγματικούς δορυφόρους. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με εκπομπή των δεδομένων του ψευδοδορυφόρου σε βραχείς παλμούς έτσι, ώστε ο δέκτης του χρήστη να υφίσταται παρεμβολές, για πολύ μικρής διάρκειας χρονικά διαστήματα.

5. Το μήνυμα των διαφορικών διορθώσεων

Η Τεχνική Επιτροπή Ναυτικών Τηλεπικοινωνιών (**Radio Technical Commission for Maritime Services - RTCM**) ίδρυσε το Νοέμβριο του 1983 την Ειδική Επιτροπή 104 (**Special Committee 104 - SC 104**) για θέματα διαφορικού εντοπισμού με GPS. Σκοπός της SC 104 ήταν να μελετήσει και να

προτείνει μια τυποποιημένη μορφή για το μήνυμα των διαφορικών διορθώσεων, που εκπέμπονται στους χρήστες του DGPS και να καθορίσει τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ του σταθμού αναφοράς και των χρηστών. Η Επιτροπή παρουσίασε την πρώτη έκδοση των προτύπων RTCM το 1985, ενώ μια δεύτερη βελτιωμένη έκδοση δημοσιεύτηκε τον Ιανουάριο του 1990, και ισχύει μέχρι σήμερα.

Η SC 104 αποφάσισε από την αρχή, ότι οι διαφορικές διορθώσεις πρέπει να αφορούν τις μετρούμενες ψευδοαποστάσεις και όχι τη θέση που προσδιορίζει ο δέκτης του χρήστη, παρόλο που ο όγκος των εκπεμπόμενων δεδομένων είναι πολύ μεγαλύτερος. Ο λόγος που οδήγησε στη λήψη αυτής της απόφασης ήταν το ενδεχόμενο να μη χρησιμοποιούνται οι ίδιοι δορυφόροι από το σταθμό αναφοράς και το χρήστη. Ακόμη και αν τρεις από τους τέσσερις δορυφόρους που χρησιμοποιούν ο σταθμός αναφοράς και ο χρήστης είναι κοινοί, τα σφάλματα εντοπισμού που προκύπτουν λόγω του τέταρτου μη κοινού δορυφόρου, είναι πάρα πολύ μεγάλα, αν οι διορθώσεις αφορούν διαφορές θέσης (συντεταγμένων) και όχι διαφορές ψευδοαποστάσεων. Εκπέμποντας διορθώσεις ψευδοαποστάσεων, κάθε δορυφόρος που παρακολουθείται από το σταθμό αναφοράς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το χρήστη για εντοπισμό.

Η επιτροπή προσδιόρισε τα απαραίτητα δεδομένα, που απαιτούνται για να γίνουν οι διορθώσεις των σφαλμάτων του συστήματος, που είναι κοινά για τους δύο δέκτες. Τα σφάλματα αυτά είναι:

Σφάλματα πρόβλεψης των εφημερίδων των δορυφόρων.

Σφάλματα των χρονομέτρων των δορυφόρων.

Σφάλματα λόγω ιονοσφαιρικής καθυστέρησης.

Σφάλματα λόγω τροποσφαιρικής καθυστέρησης.

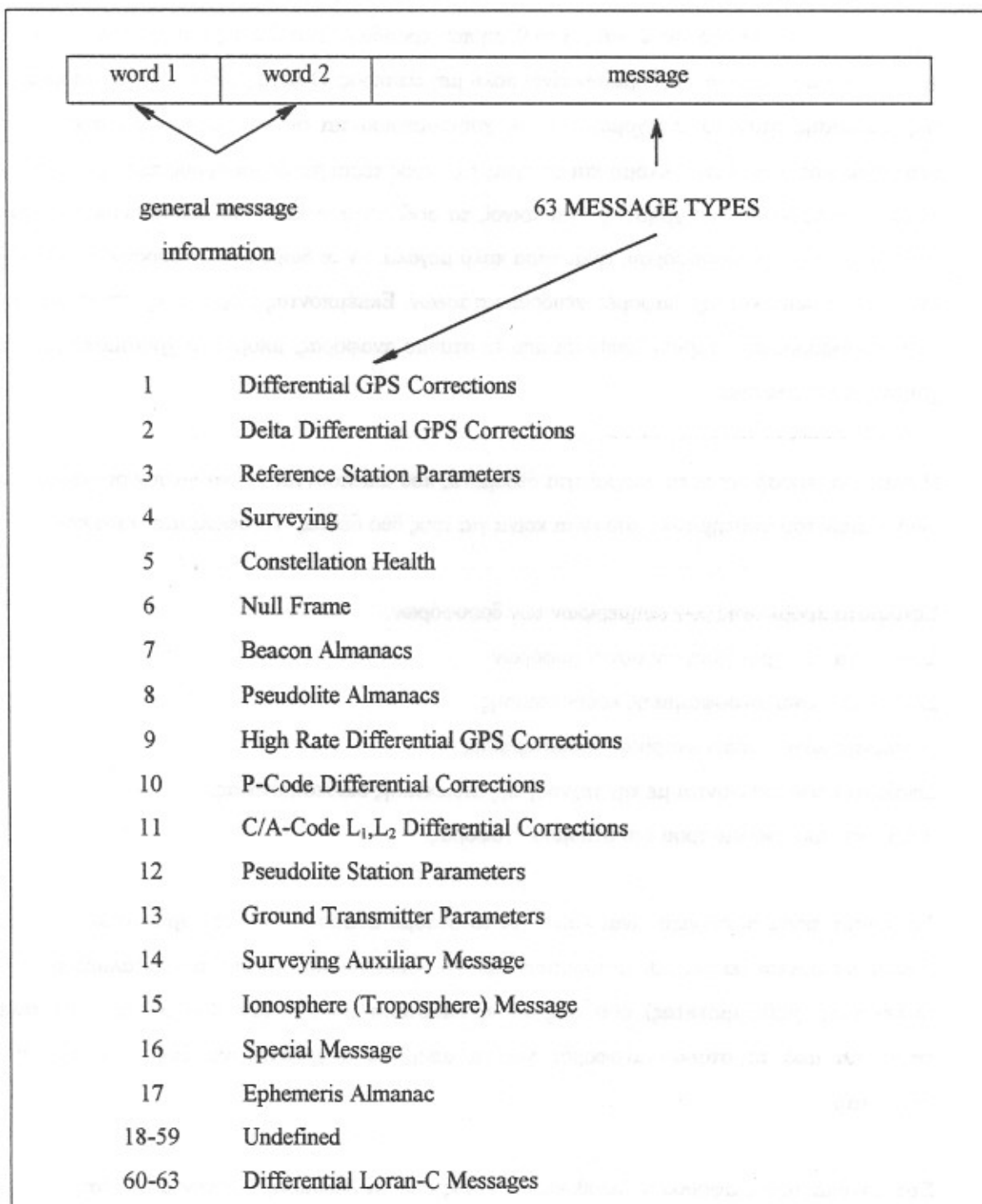
Σφάλματα που εισάγονται με την τεχνική της επιλεκτικής διαθεσιμότητας.

Απόκλιση του χρονομέτρου του σταθμού αναφοράς.

Τα πρώτα πέντε σφάλματα είναι κοινά για το σταθμό αναφοράς και τον χρήστη και αρχίζουν να διαφοροποιούνται (εκτός των σφαλμάτων των χρονομέτρων και μέρους των σφαλμάτων λόγω της επιλεκτικής διαθεσιμότητας) όσο αυξάνει η απόσταση μεταξύ των δύο δεκτών. Το τελευταίο παρέχεται από το σταθμό αναφοράς για να μπορέσει ο χρήστης να διορθώσει τα μη κοινά σφάλματα.

Στο μήνυμα των διαφορικών διορθώσεων, εκτός από τα δεδομένα για την διόρθωση σφαλμάτων, παρέχονται επίσης τροχιακά στοιχεία (almanac) και δεδομένα αξιοπιστίας - κατάστασης λειτουργίας (health) των δορυφόρων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι δεδομένων, που διαφοροποιούνται ανάλογα με

τον χρήστη στον οποίο απευθύνονται, ανάλογα με το πόσο συχνά πρέπει να εκπέμπονται ή ανάλογα με το αν είναι δεδομένα για τη διόρθωση σφαλμάτων ή τροχιακά. Οι τύποι αυτοί ονομάζονται τύποι μηνύματος και στον κάθε τύπο αντιστοιχεί ένας μοναδικός αριθμός αναγνώρισης (από το 1 έως το 63). Από τους 63 προβλεπόμενους τύπους μηνύματος έχουν μέχρι σήμερα καθορισθεί οι 21, σε δοκιμαστική (πειραματική) ή στην τελική τους μορφή.



Σχήμα 5: Η δομή του μηνύματος των διαφορικών διορθώσεων.

Κάθε εκπομπή του μηνύματος των διαφορικών διορθώσεων αποτελείται από δύο αρχικές λέξεις οι οποίες ακολουθούνται από το πραγματικό μήνυμα, το οποίο μπορεί να είναι οποιουδήποτε τύπου από τους 63 προαναφερθέντες (σχήμα 5). Οι δύο αρχικές λέξεις είναι κοινές για όλους τους τύπους μηνύματος. Η πρώτη λέξη περιέχει πληροφορίες για τον τύπο του μηνύματος που ακολουθεί και για την αναγνώριση του σταθμού αναφοράς. Η δεύτερη λέξη περιέχει πληροφορία για το μήκος του μηνύματος (το οποίο διαφέρει όχι μόνο για διαφορετικού τύπου, αλλά ακόμη και για ίδιου τύπου μηνύματα) και για την κατάσταση λειτουργίας του σταθμού αναφοράς.

Ο χαμηλότερος ρυθμός εκπομπής του μηνύματος των διαφορικών διορθώσεων απαιτείται να είναι 50 bits/sec (ίδιος με το ρυθμό εκπομπής του μηνύματος ναυσιπλοίας των δορυφόρων GPS). Ο ρυθμός αυτός καθορίζεται από τις αναμενόμενες διακυμάνσεις των σφαλμάτων και ιδιαίτερα αυτών που εισάγονται με την τεχνική της επιλεκτικής διαθεσιμότητας.

Στα επόμενα περιγράφεται συνοπτικά το περιεχόμενο των 63 τύπων μηνύματος.

Τύπος μηνύματος 1

Είναι ο βασικός τύπος μηνύματος. Περιέχει τις διορθώσεις των ψευδοαποστάσεων και του ρυθμού μεταβολής τους για όλους τους ορατούς από το σταθμό αναφοράς δορυφόρους. Η μετρημένη ψευδοαπόσταση διορθώνεται χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του μηνύματος με βάση την σχέση:

$$PR(t) = PR_{\text{meas}}(t) + \delta PR(t_0) + \dot{\delta PR}(t_0) * (t - t_0)$$

όπου $PR_{\text{meas}}(t)$ είναι η μετρημένη ψευδοαπόσταση τη χρονική στιγμή t , $\delta PR(t_0)$ και $\dot{\delta PR}(t_0)$ είναι αντίστοιχα η διόρθωση της ψευδοαπόστασης και του ρυθμού μεταβολής της τη χρονική στιγμή t_0 και $PR(t)$ είναι η διορθωμένη ψευδοαπόσταση.

Στο μήνυμα επίσης περιέχεται ο αριθμός αναγνώρισης των δορυφόρων στους οποίους αναφέρονται οι διορθώσεις, η εκτίμηση του διαφορικού σφάλματος (1σ) όπως αυτή υπολογίζεται από το σταθμό αναφοράς και η "ηλικία" των δεδομένων, που δείχνει στον χρήστη αν ο σταθμός αναφοράς υπολογίζει τις διορθώσεις βάσει των πιο σύγχρονων δορυφορικών δεδομένων.

Τύπος μηνύματος 2

Περιέχει μια δεύτερη ομάδα διορθώσεων ψευδοαποστάσεων και του ρυθμού μεταβολής τους που

ονομάζονται "διαφορές διαφορικών διορθώσεων" (Delta Differential Corrections). Αυτές επιτρέπουν στο χρήστη να τροποποιήσει τις λαμβανόμενες διορθώσεις, όταν τα δορυφορικά δεδομένα ναυσιπλοίας (δεδομένα εφημερίδων και χρονομέτρων των δορυφόρων) που χρησιμοποιεί, είναι προγενέστερα αυτών που χρησιμοποιεί ο σταθμός αναφοράς.

Η γενική δομή του μηνύματος τύπου 2, είναι η ίδια με αυτήν του μηνύματος τύπου 1, με τη διαφορά ότι στη θέση των διορθώσεων ψευδοαποστάσεων και του ρυθμού μεταβολής τους μεταδίδονται οι αντίστοιχες διαφορές διορθώσεων, όπως αυτές υπολογίζονται στο σταθμό αναφοράς, ως διαφορές των διορθώσεων που προκύπτουν βάσει των παλαιών (old IOD) δεδομένων ναυσιπλοίας, μείον τις διορθώσεις που προκύπτουν βάσει των νέων (new IOD) δεδομένων ναυσιπλοίας (IOD - Issue Of Data: χρονική αναφορά των δεδομένων) σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\Delta \delta PR = \delta PR(\text{old IOD}) - \delta PR(\text{new IOD})$$

$$\Delta \dot{\delta PR} = \dot{\delta PR}(\text{old IOD}) - \dot{\delta PR}(\text{new IOD})$$

Ο χρήστης υπολογίζει τις διορθώσεις των ψευδοαποστάσεων χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους από το μήνυμα τύπου 1 και το μήνυμα τύπου 2 με βάση τις σχέσεις:

$$\delta PR(t) = [\delta PR(\text{new IOD}) + \quad (\text{από το μήνυμα τύπου 1})$$

$$\Delta \delta PR(\text{old IOD})] \quad (\text{από το μήνυμα τύπου 2})$$

+

$$[\dot{\delta PR}(\text{new IOD}) * (t - t_{o(\text{mes1})})] \quad (\text{από το μήνυμα τύπου 1})$$

+

$$[\Delta \dot{\delta PR}(\text{old IOD}) * (t - t_{o(\text{mes2})})] \quad (\text{από το μήνυμα τύπου 2})$$

Τύπος μηνύματος 3

Περιέχει τις καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z) του σταθμού αναφοράς στο σύστημα αναφοράς WGS84.

Τύπος μηνύματος 4

Αυτός ο τύπος μηνύματος έχει σχεδιαστεί για καθαρά γεωδαιτικές εφαρμογές και περιλαμβάνει και τις διορθώσεις ψευδοαποστάσεων του μηνύματος τύπου 1, ώστε να αποτελεί αυτοδύναμο μήνυμα διορθώσεων. Πέρα από τις διορθώσεις των ψευδοαποστάσεων, περιέχει πληροφορία για την

"ηλικία" των δεδομένων και την στιγμιαία αθροιστική κλασματική μέτρηση doppler, όπως υπολογίζεται από την μέτρηση φάσης του φέροντος κύματος στο σταθμό αναφοράς. Γνωρίζοντας επακριβώς τη θέση του σταθμού αναφοράς από τα δεδομένα του μηνύματος τύπου 3 και συγκρίνοντας την μέτρηση doppler στο δέκτη του χρήστη και στο σταθμό αναφοράς για κάποιο χρονικό διάστημα, επιτυγχάνονται σχετικές ακρίβειες της τάξης των λίγων εκατοστών.

Το μήνυμα τύπου 4 θα εκπέμπεται μόνο από σταθμούς αναφοράς που έχουν ιδρυθεί για να παρέχουν υποστήριξη σε χρήστες προερχόμενους από τη γεωδαιτική κοινότητα, γιατί η εκπομπή του μειώνει το ρυθμό ανανέωσης του μηνύματος τύπου 1, που απευθύνεται στο γενικό χρήστη. Το μήνυμα αυτό (σε συνδυασμό με τα μηνύματα τύπου 2, 3 και 5) αποτελεί το βασικό μήνυμα για γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές.

Τύπος μηνύματος 5

Εκπέμπεται περιοδικά και περιέχει στοιχεία για την κατάσταση λειτουργίας ενός μόνο δορυφόρου, που μπορεί και να μην είναι ορατός από το σταθμό αναφοράς.

Τύπος μηνύματος 6

Ο τύπος αυτός δεν περιέχει παραμέτρους και χρησιμοποιείται μόνο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, όταν ο σταθμός αναφοράς δεν έχει έτοιμο κάποιο άλλο μήνυμα προς εκπομπή ή για συγχρονισμό της αρχής ενός μηνύματος σε κάποια (μη καθορισμένη) εποχή.

Τύπος μηνύματος 7

Η ναυτική κοινότητα προβλέπεται να αποτελέσει το βασικό χρήστη του DGPS. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε ο τύπος μηνύματος 7, που έχει ως σκοπό να διευκολύνει το χρήστη στην παράκτια ναυσιπλοΐα, δίνοντάς του την δυνατότητα αυτόματης επιλογής του βέλτιστου ραδιοφάρου και αυτόματης αλλαγής από σταθμό σε σταθμό καθώς το πλοίο ταξιδεύει κατά μήκος των ακτών. Το μήνυμα περιέχει δεδομένα για την θέση, την συχνότητα, την εμβέλεια και την κατάσταση λειτουργίας ενός δικτύου ραδιοφάρων, που εκπέμπουν διαφορικές διορθώσεις καθώς και τον κωδικό αναγνώρισης του σταθμού αναφοράς, που χρησιμοποιείται από κάθε ραδιοφάρο.

Τύπος μηνύματος 8

Περιέχει πληροφορίες "τροχιακών" στοιχείων (almanac) των ψευδοδορυφόρων. Είναι παρεμφερές με το μήνυμα τύπου 7 και εκπέμπεται μόνο όταν χρησιμοποιούνται ψευδοδορυφόροι. Δίνει στοιχεία για την θέση, τον κωδικό αναγνώρισης και για την κατάσταση λειτουργίας ενός αριθμού ψευδοδορυφόρων.

Τύπος μηνύματος 9

Παρέχει διαφορικές διορθώσεις για την ειδική εκείνη περίπτωση που οι διορθώσεις ψευδοαπόστασης ή του ρυθμού μεταβολής της είναι πολύ μεγάλες για κάποιο(-ους) δορυφόρο(-ους). Περιέχει διορθώσεις (με τη μορφή του μηνύματος τύπου 1) μόνο για τον (τους) συγκεκριμένο(-ους) δορυφόρο(-ους) και μπορεί να επαναληφθεί με υψηλότερο ρυθμό από όσο το μήνυμα τύπου 1.

Στην περίπτωση των ναυτικών ραδιοφάρων η Διεθνής Ομοσπονδία των Υπηρεσιών Φάρων (International Association of Lighthouse Authorities), έχει προετοιμάσει ένα πρότυπο (standard) σύμφωνα με το οποίο οι ραδιοφάροι πρέπει να εκπέμπουν τα μηνύματα 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 16.

Φαίνεται πάντως ότι ο τύπος μηνύματος 9 είναι πιο αποδοτικός, επειδή επιτρέπει διορθώσεις και για μεγάλες αλλαγές των ψευδοαποστάσεων, γι' αυτό και η Αμερικανική Ακτοφυλακή εκπέμπει μέσω των ραδιοφάρων κυρίως τον τύπο 9 και όχι τον τύπο 1.

Τύπος μηνύματος 10

Απευθύνεται μόνο σε εξουσιοδοτημένους χρήστες που έχουν πρόσβαση στον κώδικα P. Το περιεχόμενο και η δομή του δεν έχουν ακόμη καθορισθεί.

Τύπος μηνύματος 11

Θα χρησιμοποιηθεί σε πιθανές μελλοντικές εφαρμογές, αν κάποτε ο κώδικας C/A αρχίσει να μεταδίδεται και στη συχνότητα L_2 . Το περιεχόμενο και η δομή του δεν έχουν ακόμη καθορισθεί, αλλά αναμένεται να είναι παρεμφερές με το μήνυμα τύπου 1.

Τύπος μηνύματος 12

Θα παρέχει στοιχεία για την απόκλιση του χρονομέτρου και την θέση του κέντρου φάσης της

κεραίας εκπομπής ενός ψευδοδορυφόρου. Επίσης θα δίνει πληροφορία για τη θέση της κεραίας GPS του σταθμού αναφοράς. Η δομή και το περιεχόμενό του δεν έχουν ακόμη καθορισθεί.

Τύπος μηνύματος 13

Περιέχει στοιχεία θέσης (φ,λ στο WGS84) και εμβέλειας του πομπού εκπομπής των διαφορικών διορθώσεων. Τα στοιχεία αυτά στην πρώτη έκδοση του προτύπου RTCM περιέχοντο στο μήνυμα τύπου 3.

Τύπος μηνύματος 14

Θα περιέχει επιπλέον βοηθητικά στοιχεία για καθαρά γεωδαιτικές εφαρμογές. Η δομή και το περιεχόμενό του δεν έχουν ακόμη καθορισθεί.

Τύπος μηνύματος 15

Θα περιέχει παραμέτρους μοντέλων για την επίδραση της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας. Η δομή και το περιεχόμενό του δεν έχουν ακόμη καθορισθεί.

Τύπος μηνύματος 16

Είναι ένα μήνυμα ειδικού τύπου σε μορφή ASCII, που αν απαιτείται εμφανίζεται στο δέκτη του χρήστη ή σε μία περιφερειακή μονάδα (οθόνη υπολογιστή ή εκτυπωτή), με την οποία είναι εφοδιασμένος ο χρήστης. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται ήδη και σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται για να ελέγχεται η σωστή επικοινωνία μεταξύ του σταθμού αναφοράς και του δέκτη του χρήστη.

Τύπος μηνύματος 17

Περιέχει στοιχεία εφημερίδων των δορυφόρων. Εκπέμπεται όταν ο σταθμός αναφοράς χρησιμοποιεί παλαιότερα δεδομένα εφημερίδων για να υπολογίσει τις διαφορικές διορθώσεις. Στην περίπτωση αυτή, εκπέμπονται και οι παλαιές εφημερίδες, ώστε να μπορεί ο χρήστης να χρησιμοποιήσει τις διορθώσεις, που αναφέρονται στις εφημερίδες αυτές.

Τύποι μηνύματος 18 - 59

Αυτοί οι τύποι μηνύματος δεν έχουν καθορισθεί. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν για ειδικές χρήσεις όπως στην περίπτωση που μία εταιρεία ελέγχει έναν αριθμό σταθμών αναφοράς και δεκτών-χρηστών με σκοπό την παροχή εμπορικών υπηρεσιών ή τη διεξαγωγή πειραμάτων. Οι τύποι αυτοί θα καθορισθούν στο μέλλον καθώς προκύπτουν νέες απαιτήσεις από τη χρήση του συστήματος.

Τύποι μηνύματος 60 - 63

Οι τύποι μηνύματος 60, 61, 62 και 63 θα χρησιμοποιηθούν, τουλάχιστον προσωρινά, από την αμερικανική ακτοφυλακή για να διερευνηθεί η σκοπιμότητα λειτουργίας γραμμών μεταφοράς δεδομένων πολλαπλών χρήσεων. Από τη στιγμή που οι ραδιοφάροι θα αρχίσουν να εκπέμπουν επιχειρησιακά και εφόσον τα πρότυπα εκπομπής έχουν καθορισθεί από την ειδική επιτροπή SC 104, οι ραδιοφάροι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εκπομπή και άλλων τύπων μηνύματος, πέραν των διαφορικών διορθώσεων GPS, όπως διαφορικές διορθώσεις Logan-C, διαφορικές διορθώσεις Omega, δελτία πρόγνωσης καιρού και δελτία προαγγελιών προς τους ναυτιλομένους.

6. Ακρίβειες

Το σύστημα GPS (με χρήση του κώδικα C/A) χωρίς την επίδραση της επιλεκτικής διαθεσιμότητας παρέχει ακρίβεια στην θέση της τάξης των 15m και ταχύτητας 0.1m/sec (0.2 knots). Υπό την επίδραση της επιλεκτικής διαθεσιμότητας παρέχει ακρίβειες στην θέση 100m (2drms) οριζοντιογραφικά, 156m (2σ) υψομετρικά και την ταχύτητα της τάξης 1m/sec (2knots). Η τελικά παρεχόμενη ακρίβεια εξαρτάται βεβαίως από το επίπεδο ακρίβειας της επιλεκτικής διαθεσιμότητας και την δυναμική κατάσταση του χρήστη.

Ένα σύστημα DGPS παρέχει ακρίβεια θέσης 2-5m (2drms=HDOP*5) και ταχύτητας 0.1 m/sec (0.2 knots) σε αποστάσεις της τάξης των 500km. Όργανα καλής ποιότητας όμως μπορούν να δώσουν ακρίβεια θέσης καλύτερη από 0.5 m και ταχύτητας 0.02 m/sec (0.04 knots) σε αποστάσεις περίπου 100 km. Η τελικά παρεχόμενη ακρίβεια εξαρτάται από την απόσταση σταθμού αναφοράς και χρήστη και από την δυναμική κατάσταση του χρήστη.

Οι ακρίβειες που δόθηκαν παραπάνω αφορούν τον εντοπισμό πραγματικού χρόνου (μία μέτρηση, μία λύση) στατικό ή κινηματικό. Στην περίπτωση στατικού εντοπισμού με δυνατότητα πολλών μετρήσεων η ακρίβεια προφανώς βελτιώνεται.

7. Εφαρμογές

Η εφαρμογή του υποβιβασμού της ακριβείας του συστήματος GPS με την τεχνική της επιλεκτικής διαθεσιμότητας είχε ως αποτέλεσμα τη στροφή των πολιτών-χρηστών στις τεχνικές του διαφορικού εντοπισμού και κατ' επέκταση την ραγδαία ανάπτυξη των εφαρμογών της τεχνικής για εντοπισμό και πλοήγηση υψηλής ακριβείας. Σήμερα το DGPS χρησιμοποιείται με ιδιαίτερη επιτυχία σε πλήθος θαλάσσιων, εναέριων και χερσαίων εφαρμογών.

Το σύστημα DGPS χρησιμοποιείται ήδη σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα εφαρμογών, οι οποίες αναφέρονται επιγραμματικά στα επόμενα :

Θαλάσσιες εφαρμογές

Πελάγια έρευνα υδρογονανθράκων

- Γεωτεχνική μελέτη

- Γεωφυσική μελέτη

- Κινήσεις γεωτροπάνων

- Κατασκευαστικές δραστηριότητες

 - Τοποθέτηση πλατφόρμας άντλησης πετρελαίου

 - Τοποθέτηση υποβρυχίων αγωγών

Μελέτη και πόντιση υποβρυχίων καλωδίων ρεύματος και τηλεφωνίας

Υδρογραφία

- Αποτυπώσεις λιμανιών και κόλπων

- Παράκτια και πελάγια υδρογραφία

Ελικτικές δοκιμές πλοίων

Ναυσιπλοία

- Διάπλους διαύλων

- Προσέγγιση λιμένων

Διαχείριση στόλου

Χερσαίες εφαρμογές

Χερσαίες σεισμικές εργασίες

Αναγνώριση για τοπογραφικές και γεωδαιτικές εργασίες

Έλεγχος ποιότητας εργασιών

Τοπογραφία - γεωδαισία

Γρήγορη πύκνωση δικτύου σε απομακρυσμένες περιοχές

Αποτυπώσεις οδικού δικτύου

Κτηματολογικές αποτυπώσεις

Διαχείριση στόλου

Εναέριες εφαρμογές

Αεροπλοία

Προσγείωση και απογείωση αεροσκαφών

Γεωργικές εργασίες (ψεκασμός καλλιεργειών)

Διαχείριση στόλου

8. Επίλογος

Οι τεχνικές του διαφορικού εντοπισμού μπορούν να βελτιώσουν τις ακρίβειες του συστήματος GPS, επειδή είναι δυνατή η επίτευξη ακόμα καλύτερων ακριβειών από εκείνες που παρέχει ένας δέκτης στρατιωτικής χρήσης, χρησιμοποιώντας έναν κοινό δέκτη, που λειτουργεί διαφορετικά.

Το μόνο μειονέκτημα της μεθόδου DGPS είναι η ανάγκη λειτουργίας μίας γραμμής επικοινωνίας μεταξύ του σταθμού αναφοράς και του χρήστη, που συνήθως απαιτεί επιπρόσθετο τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό. Ωστόσο, η ευρεία χρήση του DGPS σε πολιτικές εφαρμογές μετά την επαβολή της υποβάθμισης της ακριβείας του συστήματος, έχει οδηγήσει στην εύρεση ποικίλων λύσεων. Ο χρήστης σήμερα μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε πλήθος εναλλακτικών λύσεων, που προσφέρονται

στο εμπόριο, με κριτήριο τις γενικότερες απαιτήσεις της εφαρμογής, που θα αναπτύξει και την οικονομική δαπάνη.

9. Βιβλιογραφία

Kalafus R.M., A.J. van Dierendonck, N.A. Pealer, (1986) : "Special Committee 104 Recommendations for Differential GPS Service". Navigation, Vol.33, No.1, pp 26-41.

Langley R.B., (1993) : "Communication Links for DGPS". GPS World, Vol.4, No.5, pp 47-51.

Παραδείσης Δ., (1987) : "The Global Positioning System". Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου, Τομέας Τοπογραφίας Ε.Μ.Π.

Racal Survey, (1993) : "SkyFix Positioning Service". Racal Survey Norge A/S, Norway.

Radio Technical Commission for Maritime Services, (1988) : "RTCM Recommended Standards for Differential NAVSTAR GPS Service", Revised Draft Final Report. RTCM, Washington D.C.

Radio Technical Commission for Maritime Services, (1990) : "RTCM Recommended Standards for Differential NAVSTAR GPS Service", Version 2.0. RTCM, Washington D.C.

Wells D., N. Beck, D. Delikaraoglou, A. Kleusberg, E.J. Krakiwsky, G. Lachapelle, R.B. Langley, M. Nakiboglu, K.-P. Schwarz, J.M. Tranquilla, P. Vanicek, (1986) : "Guide to GPS Positioning". Canadian GPS Associates, New Brunswick, Canada.