

ΤΟΜΕΑΣ
ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΝ. & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Η ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ ΚΑΛΜΑΝ
ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΘΕΣΗΣ
ΜΕ ΤΟ GPS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΙΧΑΛΗΣ ΓΙΑΝΝΙΟΥ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 1992

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συνεχής ανάπτυξη των δορυφορικών συστημάτων έχει επηρεάσει πολύ έντονα την επιστήμη της Γεωδαισίας, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Η ανάγκη διαρκούς ενημέρωσης του Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού πάνω στις πρόσφατες εξελίξεις και στις νέες πρακτικές που αυτές συνεπάγονται αποτελεί μια παγκόσμια πραγματικότητα. Ο Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας του ΑΠΘ παρακολουθεί με ενδιαφέρον την καθημερινά αναπτυσσόμενη θεωρία και πρακτική και σκοπεύει στην παραπέρα ανάπτυξη των σχετικών δραστηριοτήτων του. Σε αυτό το πλαίσιο εντάσσεται και η παρούσα διπλωματική εργασία, που αποτελεί και την πρώτη προσπάθεια επεξεργασίας δεδομένων μετρήσεων του δορυφορικού συστήματος GPS στον Τομέα. Το GPS αποτελεί το πιο σύγχρονο και αξιόπιστο δορυφορικό σύστημα παγκόσμιου προσδιορισμού θέσης, που προβλέπεται ότι θα κυριαρχήσει στο προσεχές μέλλον.

Πιο συγκεκριμένα σκοπός της εργασίας είναι η σύνταξη δύο προγραμμάτων για ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το πρώτο αφορά τον υπολογισμό των συντεταγμένων του δέκτη στο σύστημα WGS 84 από μετρήσεις ψευδοαποστάσεων με τον P- κώδικα του συστήματος. Το δεύτερο ασχολείται με την εφαρμογή του φίλτρου Kalman στο ναυτιλιακό εντοπισμό θέσης με το σύστημα GPS. Για την ορθότερη αντιμετώπιση του δεύτερου ζητήματος κρίθηκε σκόπιμη η σύνταξη και ενός τρίτου προγράμματος, το οποίο αναλύει τα δεδομένα των μετρήσεων και υπολογίζει συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης για τις συνιστώσες της ταχύτητας του πλοίου.

Στις σελίδες που ακολουθούν γίνεται η περιγραφή των αλγορίθμων που υλοποιούν τα παραπάνω προγράμματα και παρατίθεται επίσης το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο αυτοί στηρίζονται.

Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 1992

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της εργασίας αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω κύρια τους δύο διδάσκοντες στο ΤΑΤΜ ΑΠΘ, τους αναπληρωτές καθηγητές κ. Κ. Κατσάμπαλο και κ. Η. Τζιαβό, οι οποίοι πρότειναν την παρούσα διπλωματική εργασία και την επέβλεπαν σε όλα τα στάδια της εξέλιξής της. Η συμβολή τους ήταν καθοριστική για την ορθή και κατά το δυνατό πληρέστερη αντιμετώπιση του αντικειμένου της εργασίας. Η συνεργασία μου μαζί τους ήταν ευχάριστη και ιδιαίτερα αποδοτική.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Δ. Ρωσσικόπουλο και τον καθηγητή κ. Δ. Αραμπέλο για τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους σε θέματα της αρμοδιότητάς τους. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον καθηγητή κ. Α. Δερμάνη για τις πολύτιμες συμβουλές του σε δύσκολα και λεπτά θεωρητικά ζητήματα σχετικά με το φίλτρο Kalman.

Καθοριστική για την ποιότητα της εργασίας αυτής ήταν η ευγενική παραχώρηση από τον διδάκτορα του ΤΑΤΜ ΕΜΠ κ. Χ. Λιαπάκη μιας σειράς δεδομένων μετρήσεων με ένα δέκτη ναυσιπλοΐας GPS. Πολύ σημαντικές επίσης ήταν οι συμβουλές του σε θέματα που αφορούσαν το σύνολο της εργασίας μου. Έντονα υποχρεωμένος νοιώθω απέναντι στον επίκουρο καθηγητή του ΕΜΠ κ. Δ. Παραδείση, ο οποίος με υποδειγματική προθυμία έλυσε τις πολλές μου απορίες σε θέματα GPS και επιπλέον μου παρείχε πολύτιμο βιβλιογραφικό υλικό.

Όλους τους παραπάνω τους ευχαριστώ για την καλή διάθεσή τους απέναντι μου και για τη συνεισφορά τους σε μία ολοκληρωμένη και αποδοτική για μένα διπλωματική εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	i
Ευχαριστίες	ii
Περιεχόμενα	iii
Περίληψη	iv
Summary	v
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΤΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ GPS	
2.1 Εισαγωγή	8
2.2 Κινηματικός προσδιορισμός στίγματος με μετρήσεις GPS	11
2.3 Αλγόριθμος προσδιορισμού διανύσματος θέσης	22
2.4 Παράδειγμα επεξεργασίας μετρήσεων	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΟ ΦΙΛΤΡΟ KALMAN	
3.1 Εισαγωγή	45
3.1.1 Παράδειγμα	47
3.2 Γενικά στοιχεία	51
3.3 Χρήση του φίλτρου Kalman στο GPS	60
3.4 Αλγόριθμος προσδιορισμού του διανύσματος κατάστασης	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΕΦΑΡΜΟΓΗ	
4.1 Δεδομένα	79
4.2 Περιγραφή προγράμματος	86
4.3 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	
5.1 Συμπεράσματα	103
5.2 Προτάσεις	108
Βιβλιογραφία	111

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή ασχολείται με τη μελέτη του προσδιορισμού θέσης με το σύστημα GPS (Global Positioning System) με μετρήσεις ψευδοαποστάσεων και με την εφαρμογή του φίλτρου Kalman στον υδρογραφικό εντοπισμό θέσης με τη βοήθεια του GPS. Αρχίζει με μια παρουσίαση του συστήματος, στην οποία περιλαμβάνονται μια σύντομη αναφορά στις κινηματικές εφαρμογές του GPS και μια αναλυτική περιγραφή (με τη μορφή παραδείγματος) του αλγόριθμου προσδιορισμού θέσης από παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων. Στη συνέχεια ακολουθεί η εκτενής θεωρητική παρουσίαση του φίλτρου Kalman. Τέλος περιγράφεται η δομή του προγράμματος σε HY, που υλοποιεί το μοντέλο σταθερής ταχύτητας του φίλτρου και δίνονται τα αποτελέσματα και τα αντίστοιχα σχόλια. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί πραγματικά δεδομένα μετρήσεων από ένα δέκτη ναυσιπλοΐας GPS.

Η εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Το πρώτο περιλαμβάνει την εισαγωγή.

Το δεύτερο απαρτίζεται από τέσσερα υποκεφάλαια. Σε αυτά δίνονται κάποια γενικά στοιχεία για το GPS και τον κινηματικό προσδιορισμό στίγματος με αυτό. Επίσης δίνονται οι εξισώσεις προσδιορισμού θέσης υπό μορφή αλγόριθμου και τέλος ένα αριθμητικό παράδειγμα υλοποίησης του αλγόριθμου.

Το τρίτο κεφάλαιο συνίσταται από τέσσερα υποκεφάλαια. Πρώτο είναι η εισαγωγή και ακολουθεί ένα θεωρητικό παράδειγμα που εισάγει τον αναγνώστη πιο ομαλά στο επόμενο, όπου γίνεται η αυστηρή θεωρητική περιγραφή του φίλτρου Kalman. Το τρίτο υποκεφάλαιο περιγράφει την εφαρμογή του φίλτρου σε παρατηρήσεις από GPS και στο τέταρτο δίνεται μία περίληψη των παραπάνω υπό μορφή αλγόριθμου για το μοντέλο σταθερής ταχύτητας.

Στο τέταρτο περιέχονται τρία υποκεφάλαια. Στο πρώτο γίνεται η περιγραφή και μια αξιολόγηση των δεδομένων του δέκτη. Στο δεύτερο περιγράφεται η δομή του προγράμματος και αιτιολογούνται οι τιμές των παραμέτρων του. Στο τελευταίο γίνεται η παρουσίαση και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Σ' αυτό γίνονται επίσης και οι σχετικές προτάσεις.

THE USE OF KALMAN FILTERING IN THE HYDROGRAPHIC POSITIONING USING GPS.

By Michalis Gianniou

Diploma thesis submitted for the degree "Diploma of Rural and Surveying Engineering"

Department of Geodesy and Surveying, School of Rural and Surveying Engineering, University of Thessaloniki - Faculty of Engineering.

SUMMARY

This diploma thesis deals with the study of positioning at sea using the satellite-based radio navigation system NAVSTAR/GPS. It refers to the hydrographic and navigation applications of it implementing the Kalman filtering technique for precise positioning of a moving vessel taking into account its dynamics and the corresponding error sources.

Pseudorange GPS measurements collected at sea are used for the design and development of various Kalman filtering models for GPS. These models are developed according to the speed and acceleration of the vessel and introducing into the computation the geometry of satellites as an additional information.

The thesis is divided in four main parts: The first part is an introductory chapter concerning hydrography and its marine applications related to geodesy and other geosciences.

The second part contains four chapters. In the first two chapters the necessary background and basic principles concerning GPS are presented as well as its kinematic applications to navigation problems. The last two chapters describe the algorithm employed for precise positioning at sea using GPS pseudoranges and include a detailed description of the corresponding equations. Finally, a numerical example is given in order to make clear the structure of the computer programs designed.

The third part consists also from four chapters. The first of them is an introduction concerning the fundamental Kalman filtering theory and its applications to navigation. In the second chapter a theoretical example of the use of Kalman filtering is presented in order to demonstrate its application to navigation and generally to marine integrated navigation systems. The objective of the third chapter is the presentation of the use of Kalman filtering in GPS measurements and the last one regards the identification of the interactions of the system and the filter in order to meet the specified requirements in accuracy and reliability.

The fourth part contains three chapters. In the first chapter a discussion is given regarding the equality and reliability of the measurements selected at sea and several conclusions and proposals are drawn. In the second chapter the structure of the computer program using the Kalman filtering technique is presented and in the last chapter the results from the evaluation of a numerical experiment are carried out.

In the fifth part the main conclusions are drawn according to the performed analysis and the obtained results and some recommendations and suggestions are proposed for further investigation.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θάλασσα προσέλκυε από τα αρχαία χρόνια το έντονο ενδιαφέρον του ανθρώπου. Αρχικά αποτελούσε κάτι άγνωστο και προκαλούσε το φόβο αλλά και την περιέργεια. Πολύ νωρίς όμως έγιναν αντιληπτά τα οφέλη και οι δυνατότητες που προσφέρει. Έτσι από την εποχή που αποτελούσε καθαρά θεοποιημένο στοιχείο, περνάμε σε μία άλλη, όπου γίνονται οι πρώτες προσπάθειες εξοικείωσης του ανθρώπου μαζί της. Η αλιεία είναι πια πραγματικότητα και τα σκάφη που κατασκευάζονται επιτρέπουν ολοένα και μεγαλύτερα ταξίδια. Οι πρόοδοι που επιτυγχάνονται στον τομέα της εκμετάλλευσης και της εξερεύνησης της θάλασσας έχουν επιταχυνόμενους ρυθμούς. Μια ριζική αλλαγή συμβαίνει όταν τα ατμόπλοια αντικαθιστούνται από πετρελαιοκίνητα πλοία. Αυτό σηματοδοτεί μία νέα εποχή στις σχέσεις του ανθρώπου με τη θάλασσα. Όλες οι δραστηριότητες που σχετίζονται με αυτή αυξάνονται ραγδαία.

Αυτή η αυξητική τάση υπάρχει και σήμερα, όπου η σημασία της θάλασσας είναι μεγαλύτερη από ποτέ. Αποτελεί μία τεράστια πηγή πλούτου, έχει πολύπλευρο επιστημονικό ενδιαφέρον, εξυπηρετεί τις συγκοινωνίες, έχει μεγάλη στρατηγική σημασία, απασχολεί επαγγελματικά μεγάλο αριθμό ανθρώπων και τέλος είναι ένας πολύ ευαίσθητος και σημαντικός παράγοντας για την οικολογική ισορροπία του πλανήτη μας.

Τη μεγαλύτερη εκμετάλλευση της θάλασσας αποτελεί η αλιεία. Εκτός όμως από αυτή σημαντικές προσπάθειες γίνονται για την μεγαλύτερη ανάπτυξη μεθόδων αξιοποίησης και άλλων θαλάσσιων φυσικών πόρων. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι οι υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.α.) και τα μεταλλευτικά κοιτάσματα. Από όσο είναι σήμερα γνωστό, κάτω από τους ωκεάνιους πυθμένες υπάρχουν μεγαλύτερες ποσότητες μαγκανίου, χαλκού, νικέλιου και κοβάλτιου από ότι σε όλα τα κοιτάσματα των ηπειρωτικών εκτάσεων (Seeber, 1975).

Οι επιστήμες που σχετίζονται έμμεσα ή άμεσα με τη θάλασσα είναι πάρα πολλές. Κατ' εξοχή σχετικές είναι οι γεωεπιστήμες, όπως γεωδαισία, υδρογραφία, ωκεανογραφία, γεωφυσική, γεωλογία, γεωδυναμική, σεισμολογία κ. α.. Προχωρώντας παραπέρα, άλλες επιστήμες με παρόμοιο ενδιαφέρον εκτείνονται από την περιβαλλοντολογία, τη θαλάσσια βιολογία μέχρι τη νομική (ναυτικό δίκαιο, νομικό καθεστώς παράκτιων περιοχών) και την ιστορία και αρχαιολογία (εξερεύνηση ναυαγίων).

Η ναυτιλία είναι σήμερα εξαιρετικά αναπτυγμένη και εξυπηρετεί τόσο τη διακίνηση εμπορευμάτων όσο και ανθρώπων. Προσφέρει ένα ασφαλή, μαζικό και οικονομικό τρόπο μεταφοράς με ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Σημαντική είναι και η στρατηγική σημασία της θάλασσας. Είναι κάτι που επηρεάζει έντονα τη ζωή και τις διεθνείς σχέσεις μιας χώρας. Η Ελλάδα λόγω της θέσης της και της νησιωτικής της διαμόρφωσης έχει μία εξέχουσα στρατηγική σημασία για την περιοχή της Μεσογείου.

Όλες οι παραπάνω δραστηριότητες συνεπάγονται και το αντίστοιχο ανθρώπινο δυναμικό, το οποίο ασχολείται επαγγελματικά με αυτές. Δεν είναι ανάγκη να διαθέτει κανείς στατιστικά στοιχεία για να αντιληφθεί το πόσο μεγάλο είναι αυτό και ποιες είναι οι οικονομικοκοινωνικές ωφέλειες της υφιστάμενης κατάστασης.

Τέλος ένα θέμα που έχει ιδιαίτερη σημασία στις μέρες μας, ενώ πριν λίγες δεκαετίες ήταν κάτι ουσιαστικά ανύπαρκτο, είναι η σημασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος στη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας της Γης. Η αλόγιστη εκμετάλλευση της θάλασσας, η συνεχιζόμενη διοχέτευση αποβλήτων σ' αυτή, τα συχνά ατυχήματα των πετρελαιοφόρων πλοίων, καθώς και άλλοι παράγοντες που την επηρεάζουν εγκυμονούν τεράστιους κινδύνους όχι μόνο για την ισορροπία της ίδιας αλλά και γι' αυτή ολόκληρου του πλανήτη μας. Η ανάγκη λοιπόν για μία συστηματική και επιστημονική αντιμετώπιση των σχετικών προβλημάτων είναι επιτακτική.

Η με επιταχυνόμενο ρυθμό αξιοποίηση και έρευνα της θάλασσας εμπλέκεται με την επιστημονική γνώση και την τεχνολογική υποδομή καθώς εξαρτάται άμεσα από αυτές, αλλά αποτελεί ταυτόχρονα και αιτία ανάπτυξής τους. Το σύνολο των παραπάνω δραστηριοτήτων στηρίζεται στη βοήθεια της υδρογραφίας και της θαλάσσιας γεωδαισίας οι οποίες παρέχουν λύση στο πρόβλημα του προσδιορισμού θέσης και βάθους στη θάλασσα και κατασκευάζουν ναυτικούς χάρτες. Τα δύο αυτά λοιπόν γνωστικά αντικείμενα είναι απαραίτητα καθώς οποιοδήποτε πλοίο πρέπει να μπορεί να προσδιορίζει με ακρίβεια τη θέση του πάνω σε κάποιο αξιόπιστο χάρτη. Επιπλέον, η περίπλοκη ισχύουσα νομοθεσία σχετικά με θέματα ιδιοκτησίας και εκμετάλλευσης των παράκτιων περιοχών επιβάλλει για λόγους εθνικούς την πολύ καλή αποτύπωση και τον έλεγχο αυτών των περιοχών. Η συμβολή του Αγρονόμου και Τοπογράφου

Μηχανικού στο θαλάσσιο εντοπισμό θέσης και στην παραγωγή υδρογραφικών χαρτών είναι μεγάλη.

Μερικές απο τις εργασίες στις οποίες είναι απαραίτητη η ακριβής εύρεση στίγμα-τος είναι (Τζιαβός, 1988): απεικόνιση της τοπογραφίας του θαλάσσιου πυθμένα, απεικόνιση γεωλογικών και γεωφυσικών πληροφοριών, θαλάσσια βαρυτημετρία, τοποθέτηση οργάνων για την ανεύρεση φυσικών πηγών ενέργειας, λιμενικά έργα, προγράμματα περιβαλλοντολογικής προστασίας, καθορισμός χωρικών και διεθνών υδάτων.

Είναι γνωστό πως ο καθορισμός της θέσης ενός σημείου στη θάλασσα είναι από τη φύση του πολύ διαφορετικός από τον αντίστοιχο στην ξηρά. Η βασική τους διαφορά είναι ότι ο θαλάσσιος εντοπισμός είναι δυναμικός, με άλλα λόγια η θέση ενός πλοίου είναι διαφορετική για κάθε χρονική στιγμή. Αυτό συμβαίνει και για την περίπτωση αγκυροβολημένου πλοίου που εκτελεί εργασίες, εξαιτίας της συνεχούς κίνησης της επιφάνειας της θάλασσας αλλά και των βαθύτερων στρωμάτων της. Η σημασία του γεγονότος αυτού είναι μεγάλη, γιατί μας στερεί τη δυνατότητα να επαναλάβουμε τις παρατηρήσεις για προσδιορισμό θέσης σε κάποια άλλη χρονική στιγμή, όπως γίνεται στη γεωδαισία και την τοπογραφία και να αυξήσουμε έτσι την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Εκτός από αυτό όμως, στη θάλασσα δεν υπάρχουν κατά κανόνα φυσικά εδαφικά ανυψώματα με τη βοήθεια των οποίων θα μπορούσαν να περιοριστούν τα προβλήματα που εισάγει η γήινη καμπυλότητα. Έτσι τα συστήματα θαλάσσιου εντοπισμού σχεδιάζονται αρκετά διαφορετικά από τα επίγεια συστήματα μετρήσεων, έχοντας ως ένα από τους στόχους τους, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που χρησιμοποιούν να μπορούν κατά τη διάδοσή τους να ακολουθούν την καμπύλη θαλάσσια επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η εμβέλειά τους. Όμως τα κύματα που έχουν τέτοιες ιδιότητες είναι αυτά των μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων και η ακρίβεια των μετρήσεων με αυτά είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των κυμάτων υψηλών συχνοτήτων. Το συμπέρασμα δηλαδή είναι ότι εμβέλεια και η ακρίβεια των συστημάτων εντοπισμού στη θάλασσα είναι μεταξύ τους αντιστρόφως ανάλογα. Στον προσδιορισμό θέσης με τη βοήθεια κυμάτων πρέπει να είναι γνωστές οι ιδιότητες της μετάδοσης του σήματος, γιατί η θαλάσσια επιφάνεια τις επηρεάζει σημαντικά. Τέλος η κίνηση του πλοίου πάνω σε μία συγκεκριμένη πορεία περιλαμβάνει ανεπιθύμητες παραμέτρους όπως είναι οι τρεις γωνίες στροφής γύρω από τους άξονες ενός τρισσορθογώνιου συστήματος αναφοράς συνδεδεμένου με το πλοίο και οι αντίστοιχες ανεπιθύμητες ταχύτητες ή επιταχύνσεις σε αυτές τις διευθύνσεις.

Γενικά ο θαλάσσιος καθορισμός στίγματος επιτυγχάνεται με δύο ειδών συστήματα: τα επίγεια και τα δορυφορικά. Τα πρώτα περιλαμβάνουν τις εξής κατηγορίες (Τζιαβός, 1988): τα οπτικά, τα ηλεκτρομαγνητικά (EDM), τα ραδιοσυστήματα, τα ακουστικά και τα αδρανειακά συστήματα.

Τα οπτικά συστήματα σπάνια χρησιμοποιούνται σήμερα, καθώς τα ηλεκτρονικά όργανα τα έχουν ολοκληρωτικά σχεδόν αντικαταστήσει. Τα κυριότερα οπτικά όργανα είναι το θεοδόλιχο και ο εξάντας. Το πρώτο ως γνωστό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για σκόπευση του πλοίου από την ξηρά. Αντίθετα ο εξάντας έχει κατασκευαστεί για χρήση πάνω στο σκάφος. Είναι ένα πολύ παλιό όργανο αλλά υπάρχουν και εξε-

λιγμένες ψηφιακές μορφές του. Γενικά τα οπτικά όργανα έχουν πολλούς περιορισμούς στη λειτουργία τους, όπως για παράδειγμα ο απαραίτητος φωτισμός των στόχων, η μικρή απόσταση λειτουργίας από τις ακτές και η αναγκαιότητα της ύπαρξης στόχων γνωστών συντεταγμένων. Εκτός αυτού όμως η ακρίβεια που επιτυγχάνεται δεν είναι μεγάλη.

Τα ηλεκτρικά-ηλεκτρομαγνητικά συστήματα χρησιμοποιούν συχνότητες στην περιοχή των μικροκυμάτων αλλά και σε μικρότερες (μέσης συχνότητας MF, χαμηλής συχνότητας LF και πολύ χαμηλής συχνότητας VLF). Τα ραδιοσυστήματα μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα κυκλικά και τα υπερβολικά. Τα πρώτα προσδιορίζουν τη θέση ενός δέκτη ως τομή δύο γεωμετρικών τόπων που είναι κύκλοι. Στα υπερβολικά αντί για κύκλους έχουμε υπερβολές. Υπάρχουν και κάποια άλλα συστήματα, όπου οι δύο γεωμετρικοί τόποι είναι μία ευθεία και ένας κύκλος, αλλά δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα. Συνήθως η λειτουργία των ραδιοσυστημάτων στηρίζεται στην ύπαρξη σταθμών εκπομπής στην ξηρά και ενός δέκτη στο πλοίο. Υπάρχουν όμως και ορισμένες κατηγορίες συστημάτων (Rho-Rho) στα οποία ο πομπός βρίσκεται πάνω στο πλοίο. Τα ραδιοσυστήματα είναι σήμερα ο πιο συνηθισμένος τρόπος πλοήγησης. Τα γνωστότερα από αυτά είναι τα Omega, Loran-C, Decca και Syledis.

Η χρήση ακουστικών παλμικών κυμάτων είναι ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος τρόπος για τον προσδιορισμό του βάθους. Έχουν αναπτυχθεί όμως και ακουστικά συστήματα για τον οριζόντιο θαλάσσιο εντοπισμό. Λειτουργούν με τη βοήθεια ειδικών συσκευών που τοποθετούνται στον πυθμένα της θάλασσας (ανταποκριτές), οι οποίες λαμβάνουν και εκπέμπουν ακουστικά κύματα. Διακρίνονται σε συστήματα μικρής και μεγάλης βάσης.

Τα αδρανειακά συστήματα προϋποθέτουν για τη λειτουργία τους την ύπαρξη κίνησης. Στηρίζονται στο θεμελιώδη νόμο της μηχανικής και πραγματοποιούν διπλή ολοκλήρωση της επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για να προσδιορίσουν την απόσταση. Οι επιταχύνσεις μετρούνται από επιταχυνσιόμετρα, ενώ ο προσανατολισμός τους ελέγχεται με τη βοήθεια γυροσκοπίων. Παρέχουν εξαιρετικές ακρίβειες αλλά για μικρό χρονικό διάστημα, γι' αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως μαζί με κάποιο άλλο σύστημα εντοπισμού. Ο πιο γνωστός τέτοιος συνδυασμός είναι αυτός με το δορυφορικό σύστημα GPS.

Τα δορυφορικά συστήματα προσδιορισμού θέσης άρχισαν να αναπτύσσονται τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες. Βασίζονται στην εκπομπή σημάτων από δορυφόρους τοποθετημένους σε γνωστές τροχιές και στη λήψη αυτών των σημάτων από δέκτες στην ξηρά, στη θάλασσα ή στον αέρα. Τα γνωστότερα από αυτά είναι το TRANSIT και το GPS. Το TRANSIT είναι το πρώτο δορυφορικό σύστημα εντοπισμού θέσης, άρχισε να λειτουργεί στα μέσα της δεκαετίας του 1960 και βασίζεται στο φαινόμενο Doppler. Η κάλυψη που παρέχει δεν είναι ικανοποιητική και επιπλέον η ακρίβειά του έχει ξεπεραστεί κατά πολύ από το GPS. Το GPS έχει αποσπάσει και σχεδόν μονοπωλεί το παγκόσμιο ενδιαφέρον. Τα πλεονεκτήματά του είναι ασύγκριτα σε σχέση με το TRANSIT, αλλά και με τα επίγεια συστήματα εντοπισμού. Σε πλήρη ανάπτυξη θα παρέχει εικοσιτετράωρη κάλυψη σε οποιοδήποτε σημείο της Γης ημέρα και νύχτα

ανεξάρτητα μετεωρολογικών συνθηκών και με πολύ υψηλή ακρίβεια. Έχει χρησιμοποιηθεί ήδη με ενθαρρυντικά αποτελέσματα στη ναυσιπλοΐα και θα αποτελέσει μία πραγματική επανάσταση στον τομέα της γεωδαισίας και της τοπογραφίας. Τέλος, άλλα υπάρχοντα δορυφορικά συστήματα προσδιορισμού θέσης είναι το ρωσικό GLONASS και το γαλλικό DORIS.

Όλα τα συστήματα θαλάσσιου εντοπισμού έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Τα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους είναι η ακρίβεια, η εμβέλεια και η αυτονομία τους.

Η ακρίβεια είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες σε ένα σύστημα εντοπισμού. Τρία σημεία έχουν ενδιαφέρον εδώ: Κατά πόσο αυτή εξαρτάται από την απόσταση του πλοίου από τα σημεία εκπομπής, ποια είναι η πραγματική εξωτερική ακρίβεια των αποτελεσμάτων και ποια η εσωτερική, δηλαδή ο θόρυβος των παρατηρήσεων. Όπως είδαμε πριν, στα επίγεια ραδιοσυστήματα η ακρίβεια μειώνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση του δέκτη από τους σταθμούς εκπομπής. Αντίθετα στα δορυφορικά συστήματα η ακρίβεια εξαρτάται βασικά από τη γεωμετρία του σχηματισμού των δορυφόρων. Το GPS θα παρέχει σε πλήρη ανάπτυξη τέτοια κάλυψη, ώστε η ακρίβεια στο θαλάσσιο εντοπισμό (προσδιορισμός μόνο οριζοντίων συντεταγμένων) να μεταβάλλεται μέσα σε μικρά όρια. Η εξωτερική ακρίβεια των συντεταγμένων του GPS είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή των καλύτερων επίγειων ραδιοσυστημάτων. Αυτή η διαφορά είναι πολύ έντονη στον απόλυτο προσδιορισμό, αλλά και στο σχετικό είναι σημαντική. Η ίδια υπεροχή του GPS παρατηρείται και αναφορικά με το θόρυβο των μετρήσεων. Ανάλογα μάλιστα με την κατηγορία του δέκτη, τα ποσοστά θορύβου των οριζόντιων συντεταγμένων μπορεί να είναι πραγματικά ελάχιστα.

Όσον αφορά την εμβέλεια των συστημάτων, εδώ η υπεροχή του GPS είναι απόλυτη. Είναι ένα σύστημα που καλύπτει πλήρως τη Γη, ενώ τα επίγεια συστήματα έχουν περιορισμούς στην ακτίνα λειτουργίας τους. Εκτός αυτού τα δεύτερα προϋποθέτουν την ύπαρξη και τη λειτουργία των αντίστοιχων σταθμών εκπομπής. Αυτό είναι ένα μειονέκτημα, γιατί αν και στις περιοχές που υπάρχει συχνή διέλευση πλοίων υπάρχει κατάλληλο δίκτυο σταθμών, σε απομακρυσμένες περιοχές η κάλυψη δεν επαρκεί. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι πολιτικές περιοχές οι οποίες παρουσιάζουν επιστημονικό ενδιαφέρον.

Τέλος η αυτονομία είναι ένας παράγοντας που μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στη χρήση ενός συστήματος. Είναι ευνόητο ότι ένα σύστημα είναι ουσιαστικά άχρηστο αν δε μπορεί να παρέχει συνεχή κάλυψη, έστω και αν όταν παρέχει στίγμα χαρακτηρίζεται από υψηλή ακρίβεια. Στο σημείο αυτό, με τις σημερινές συνθήκες τα επίγεια συστήματα υπερέχουν, αφού δεν έχουν ακόμα τεθεί σε τροχιά όλοι οι δορυφόροι του GPS και γι' αυτό υπάρχουν διαστήματα κατά τα οποία δεν παρέχεται στίγμα. Όταν όμως το GPS θα είναι επιχειρησιακά έτοιμο (προβλέπεται μέσα στο 1993), θα ανταποκρίνεται πλήρως σε αυτή την απαίτηση. Ακόμα και για τις περιπτώσεις δυσλειτουργίας κάποιων δορυφόρων, έχει προβλεφθεί η τοποθέτηση σε τροχιά και επεδροικών δορυφόρων.

Το γενικό συμπέρασμα από την παραπάνω σύγκριση είναι ότι τα δορυφορικά συστήματα ανταποκρίνονται πληρέστερα στις απαιτήσεις της σύγχρονης ναυσιπλοΐας,

σε σχέση με τα επίγεια ραδιοσυστήματα. Αυτό αποτελεί διεθνή παραδοχή και προβλέπεται ότι μετά την ολοκλήρωση του GPS τα τελευταία θα σταματήσουν σταδιακά να λειτουργούν.

Πάντως όσο και αν έχουν βελτιωθεί τα συστήματα εντοπισμού, δεν είναι ούτε σήμερα τέλεια. Έχουν βέβαια τη δυνατότητα να παρέχουν για απλές εφαρμογές ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά σε πιο εξειδικευμένες εργασίες, όπως είναι οι επιστημονικές έρευνες, παρουσιάζουν κάποιες αδυναμίες. Ένας τρόπος συνολικής αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η ανάπτυξη Ολοκληρωμένων Συστημάτων Πλοήγησης (Λιαπάκης 1991). Πρόκειται για συνδυασμένη χρήση πολλών συστημάτων με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση δεδομένων.

Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι για μεμονωμένη αντιμετώπιση κάποιας αδυναμίας είναι οι εξής: Για το πρόβλημα της αυτονομίας η χρήση περισσότερων του ενός αλληλοκαλυπτόμενων συστημάτων. Στην περίπτωση που η εξωτερική ακρίβεια δεν επαρκεί, εφαρμόζεται η μέθοδος της ταυτόχρονης χρήσης ενός δεύτερου δέκτη που βρίσκεται σε σημείο γνωστών συντεταγμένων στην ξηρά (σχετικός προσδιορισμός).

Το πρόβλημα του θορύβου των παρατηρήσεων στον κινηματικό προσδιορισμό απαιτεί ένα διαφορετικό τρόπο αντιμετώπισης που δε σχετίζεται, όπως οι προηγούμενοι, με την τεχνική των μετρήσεων. Η απομάκρυνση της επίδρασης του θορύβου γίνεται με τεχνικές που είναι γνωστές ως φιλτράρισμα και ομαλοποίηση. Πρόκειται για αλγόριθμους που εφαρμόζονται είτε στα παρατηρούμενα μεγέθη είτε στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Η ομαλοποίηση δεν παρέχει αποτελέσματα ταυτόχρονα με το σύστημα εντοπισμού, αλλά μόνο για προηγούμενες χρονικές στιγμές. Είναι ακατάλληλη για την περίπτωση ενός κινητού που θέλει να γνωρίζει τη θέση του χωρίς την επίδραση του θορύβου σε κάθε στιγμή. Αυτή την ανάγκη μπορούν να την αντιμετωπίσουν οι τεχνικές φιλτραρίσματος.

Η πιο συνηθισμένη και αποδοτική τεχνική είναι αυτή του φίλτρου Kalman. Πρόκειται για μία μέθοδο που παρέχει αποτελέσματα αμέσως μετά από τις μετρήσεις. Το προσόν της είναι ότι εκτός από κάποια στοιχεία που χρησιμοποιεί για το μέγεθος του θορύβου, λαμβάνει ταυτόχρονα υπόψη (με τη μορφή κάποιων παραμέτρων) και τη δυναμική του συγκεκριμένου κινητού. Η εφαρμογή της απαιτεί κάποια προσοχή στον καθορισμό των παραπάνω παραμέτρων, αλλά με την προϋπόθεση ότι αυτές είναι σωστές τα παρεχόμενα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά σε σχέση με άλλες τεχνικές φιλτραρίσματος.

Η εισαγωγή αυτών των παραμέτρων αποτελεί μέρος της μοντελοποίησης της κίνησης, κάτι που είναι πολύ δυσκολότερο από την ανάλυση της συμπεριφοράς του θορύβου των μετρήσεων. Αυτό είναι ευνόητο για την περίπτωση ενός πλοίου, αφού στη θάλασσα οι αστάθμητοι παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση είναι πάρα πολλοί. Ένα πλοίο που εκτελεί απότομους ελιγμούς, όπως συμβαίνει συχνά στις επιστημονικές εργασίες, παρουσιάζει μία πολύ ετερογενή κινηματική συμπεριφορά, η οποία δυσκολεύει ιδιαίτερα τη μοντελοποίηση. Εξαιτίας λοιπόν των απρόβλεπτων ελιγμών η μοντελοποίηση δε μπορεί να είναι βέλτιστη (Huer, 1986). Επιπλέον οι μετρήσεις επηρεάζονται από την επίδραση των κυμάτων, αλλά γι' αυτό υπάρχουν κατάλληλοι αλγόριθμοι που περιορίζουν το πρόβλημα.

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι το σύστημα εντοπισμού που προβλέπεται να κυριαρχήσει στη ναυσιπλοΐα -και όχι μόνο- στο προσεχές μέλλον είναι το GPS. Επίσης ένας δοκιμασμένος και αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης του θορύβου των μετρήσεων είναι η τεχνική του φίλτρου Kalman. Η εργασία αυτή ασχολείται με τα δύο παραπάνω αντικείμενα. Αρχικά γίνεται μία παρουσίαση του κινηματικού εντοπισμού με το GPS και μία αναλυτική μελέτη της μεθόδου προσδιορισμού θέσης με αυτό το σύστημα με μέτρηση ψευδοαποστάσεων, χρησιμοποιώντας δεδομένα μετρήσεων. Στη συνέχεια εξετάζεται ο τρόπος εφαρμογής του φίλτρου Kalman σε μετρήσεις GPS, γίνεται μία εφαρμογή του κατάλληλου αλγορίθμου σε πραγματικά δεδομένα μετρήσεων και μία ανάλυση των αποτελεσμάτων, ώστε να προκύψουν στο τέλος αντίστοιχα συμπεράσματα και προτάσεις.

Το όλο αντικείμενο της εργασίας έχει εκτός από το θεωρητικό του ενδιαφέρον και ανάλογο πρακτικό. Ασχολείται με προβλήματα που αντιμετωπίζονται συχνά στις θαλάσσιες εργασίες και παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα. Εξάλλου πρέπει να γίνει αντιληπτή σε όλη της την έκταση η μεγάλη σημασία της θάλασσας στη σημερινή ζωή. Η έρευνα λοιπόν σε σχετικά θέματα αποτελεί εκτός από σύγχρονη αναγκαιότητα και μία σημαντική επένδυση, ιδιαίτερα για μία χώρα σαν την Ελλάδα. Τέλος δεν πρέπει να παραβλέπουμε το γεγονός ότι αν και οι γνώσεις που έχουμε για τη θάλασσα είναι τεράστιες σε σχέση με μερικές δεκαετίες πριν, ακόμα εξακολουθούμε να γνωρίζουμε ελάχιστα πράγματα γι' αυτή.