

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

**Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

## **Μεταπτυχιακή Διατριβή** **Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας**



**Διαδικασίες Προσέγγισης Αεροδρομίων μέσω GNSS και  
Δημιουργία Μοντέλου Επίγειου Σταθμού GBAS**

**Μιλτιάδης Μπινέλας**

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια**  
**Αδαμαντίνη Περατικού**

**Μάιος 2019**

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

## **Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

### **Διαδικασίες Προσέγγισης Αεροδρομίων μέσω GNSS και Δημιουργία Μοντέλου Επίγειου Σταθμού GBAS**

**Μιλτιάδης Μπινέλας**

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια  
Αδαμαντίνη Περατικού**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε  
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών  
στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών  
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

**Μάιος 2019**

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται ζητήματα εναέριας κυκλοφορίας που σχετίζονται με το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GNSS). Οι νέες διαδικασίες αεροναυτιλίας, όπως διαδικασίες πλοήγησης και προσέγγισης αεροδρομίου με βάση GNSS συστήματα, αποτελούν κύριο τομέα της ερευνητικής δραστηριότητας της παγκόσμιας πολιτικής αεροπορίας, με σκοπό τη βελτίωση της χωρητικότητας και της αποτελεσματικότητας του εναέριου χώρου, αλλά με γνώμονα πάντα την ασφάλεια των πτήσεων. Το GNSS αποτελείται κατά βάση από τους αυτόνομους δορυφορικούς αστερισμούς όπως το GPS, οι οποίοι όμως δεν επαρκούν για τις ανάγκες της εναέριας κυκλοφορίας. Για το λόγο αυτό αναπτύσσονται συστήματα βελτίωσης τους, όπως το GBAS, το SBAS και το ABAS.

Το GBAS (Ground Based Augmentation System), αποτελεί το σύστημα βελτίωσης GNSS σε επίπεδο έκτασης περιοχής προσέγγισης αεροδρομίου και επί του παρόντος είναι πιστοποιημένο κατά ICAO, για την παροχή υπηρεσιών προσέγγισης ακριβείας CAT-I, με χρήση των αστερισμών GPS ή GLONASS. Πρόκειται για το εναλλακτικό σύστημα του ILS και αναμένεται τα επόμενα χρόνια, μετά την πιστοποίηση υπηρεσιών προσέγγισης ακριβείας GBAS CAT-III, να το αντικαταστήσει.

Ο κύριος στόχος αυτής της διατριβής είναι να μελετηθούν οι επιμέρους τεχνολογίες που απαιτούνται για την εφαρμογή και υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος GBAS, ώστε να σχεδιαστεί ένα μοντέλο (framework) επίγειου σταθμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στον αερολιμένα Καστοριάς, όσο και σε άλλα αεροδρόμια της Ελλάδας. Από τη μελέτη αυτού του μοντέλου διαπιστώθηκε ότι η υλοποίηση του είναι πιο εύκολη από την αντίστοιχη ενός ILS και εφικτή για αεροδρόμια της κατηγορίας του Αερολιμένα Καστοριάς.

## Summary

This paper addresses air traffic issues related to the Global Navigation Satellite System (GNSS). New air navigation procedures, such as navigation and airport approach procedures based on GNSS systems, are a major field of the research activity of the global civil aviation authorities, to improve airspace capacity and efficiency but with regard to flight safety. GNSS consists essentially of the autonomous satellite constellations such as GPS, which are not sufficient for air traffic needs. For this reason, systems for improving it are being developed, such as GBAS, SBAS and ABAS.

The GBAS (Ground Based Augmentation System) is the GNSS augmentation system at the aerodrome extension area level and is currently ICAO certified to provide CAT-I precision approach services using the GPS or GLONASS constellations. This is the alternative ILS system and is expected to replace it in the coming years, after the GBAS CAT-III precision approach certification service.

The main objective of this dissertation is to study the individual technologies needed for installing an integrated GBAS system, resulting in the design of a ground station framework that can be used both at Kastoria Airport and at other airports in Greece. From the study of this model, it was found that its siting and installation is easier than an ILS and is feasible for airports in the same category with Kastoria Airport.

## Ευχαριστίες

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου Αδαμαντίνη Περατικού για την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω και να αναπτύξω ένα σύγχρονο θέμα σχετικό με το πεδίο του επαγγέλματος μου και για την συμβουλευτική της καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της συγγραφής του.

Κατά κύριο λόγο ευχαριστώ τη σύζυγο και σύντροφο μου Δέσποινα, η οποία στην ευαίσθητη και πολύ απαιτητική περίοδο της εγκυμοσύνης και της γέννησης του τρίτου μας παιδιού, παράλληλα με την ανατροφή των άλλων δύο, εκτός από την παρούσα εργασία, για τρία χρόνια με υποστήριξε, αναλαμβάνοντας καθήκοντα που δεν της αναλογούσαν και πέρα από τις δυνάμεις της, ώστε εγώ να ανταπεξέλθω στις απαιτήσεις του μεταπτυχιακού προγράμματος. Μακάρι να σταθώ και εγώ δίπλα της με τον ίδιο τρόπο όταν το χρειαστεί...

Τέλος αφιερώνω την παρούσα εργασία εκτός από τη σύζυγο μου, στα τρία μου παιδιά, την Γεωργία, τον Θανάση και τον Ιωάννη, τα οποία και αυτά με τη σειρά τους έκαναν υπομονή περιμένοντας τον μπαμπά τους να τους δώσει τον χρόνο που η προσπάθεια για την εκπλήρωση του μεταπτυχιακού προγράμματος τους στέρησε.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>1</b>
1.1	Εισαγωγή .....	1
1.2	Σκοπός και Βασικά Ερευνητικά Ερωτήματα .....	2
1.3	Αναγκαιότητα της Έρευνας .....	3
1.4	Δομή της Εργασίας – Διαμόρφωση Κεφαλαίων .....	4
<b>2</b>	<b>Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</b> .....	<b>6</b>
2.1	Ιστορική αναδρομή .....	6
2.2	Παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης – GNSS .....	9
2.3	Συστήματα Διόρθωσης Θέσης - Augmentation Systems .....	11
2.4	GBAS .....	13
<b>3</b>	<b>Αεροναυτιλία και Εναέρια Κυκλοφορία</b> .....	<b>16</b>
3.1	Οργανισμός ICAO .....	16
3.2	Οργανισμοί FAA, EASA και Eurocontrol .....	17
3.3	Ραδιοβοηθήματα – Nav aids .....	18
3.4	FAA’s NextGen .....	20
3.5	Πρόγραμμα SESAR και Ενιαίος Ευρωπαϊκός Ουρανός – SES .....	21
3.6	Πρόγραμμα EGNOS .....	22
<b>4</b>	<b>GNSS</b> .....	<b>23</b>
4.1	Αρχές λειτουργίας .....	23
4.2	Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης .....	26
4.2.1	Global Positioning System – GPS .....	26
4.2.2	Global Navigation Satellite System – GLONASS .....	31
4.2.3	Galileo .....	32
4.3	Συστήματα Διόρθωσης GNSS – GNSS Augmentation Systems .....	33
4.3.1	Aircraft Based Augmentation System – ABAS .....	34
4.3.2	Satellite Based Augmentation System – SBAS .....	35
4.3.3	Ground Based Augmentation System – GBAS .....	36
4.4	Πηγές Σφαλμάτων .....	37
4.4.1	Κύριες Πηγές σφαλμάτων .....	38

4.4.2	Δευτερεύουσες Πηγές σφαλμάτων .....	39
4.5	Φάσεις Πτήσης .....	41
4.5.1	Κατηγορίες φάσεων πτήσης .....	41
4.5.2	Κατηγορίες Προσέγγισης .....	42
4.6	Απαιτούμενη απόδοση πλοήγηση RNP .....	43
<b>5</b>	<b>Διαφορική Διόρθωση .....</b>	<b>46</b>
5.1	Αρχή διαφορισμού .....	47
5.2	Υπολογισμός Διόρθωσης Ψευδοαπόστασης PRC .....	48
5.3	Εφαρμογή Διόρθωσης Ψευδοαπόστασης .....	52
<b>6</b>	<b>GBAS .....</b>	<b>55</b>
6.1	Το σύστημα GBAS και τα πλεονεκτήματα του έναντι του ILS .....	55
6.2	Τεχνολογίες και Υπηρεσίες GBAS .....	57
6.3	Αρχιτεκτονική Συστήματος .....	58
6.4	Προσέγγιση Ακριβείας GBAS .....	60
6.4.1	Κατηγορίες Προσεγγίσεων Ακριβείας .....	60
6.4.2	Ορισμός Τελικού Τμήματος Προσέγγισης FAS .....	60
6.4.3	Απαιτήσεις Υποσυστήματος Εδάφους .....	61
6.4.4	Διαδικασία .....	62
6.4.5	Αποκλίσεις (Deviations) .....	63
6.4.6	Επίπεδα προστασίας (Protection Levels) .....	64
6.4.7	Όρια Ειδοποίησης (Alert Limits) .....	64
6.5	Υπηρεσία Εντοπισμού Θέσης .....	66
6.5.1	Απαιτήσεις Υποσυστήματος Εδάφους .....	66
6.5.2	Διαδικασία .....	66
6.5.3	Αποκλίσεις (Deviations) .....	66
6.5.4	Επίπεδα προστασίας (Protection Levels) .....	67
6.5.5	Όρια Ειδοποίησης (Alert Limits) .....	67
6.6	Επίδοση συστήματος και έλεγχος Ακεραιότητας .....	67
<b>7</b>	<b>Μοντέλο Επίγειου Σταθμού GBAS .....</b>	<b>70</b>
7.1	Γενική Αρχιτεκτονική Αεροδρομίων .....	70
7.2	Κρατικός Αερολιμένας Καστοριάς .....	72

7.3	Αρχιτεκτονική Επίγειου Σταθμού GBAS .....	74
7.4	Siting και Εγκατάσταση Επίγειου Σταθμού GBAS .....	78
7.4.1	Διαδικασία Τοποθέτησης - Siting Process .....	79
7.4.2	Κριτήρια Siting Υποσυστήματος Εδάφους GBAS .....	82
7.4.3	Υποσύστημα λήψης GNSS .....	87
7.4.4	Υποσύστημα VDB .....	96
7.4.5	Κεντρικός Σταθμός GBAS .....	102
7.4.6	Έλεγχος και κατάσταση εξοπλισμού .....	104
<b>8</b>	<b>Επίλογος</b> .....	<b>109</b>
8.1	Συμπεράσματα .....	109
8.2	Στόχοι - Μελλοντικές επεκτάσεις .....	111
	<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>114</b>
<b>A</b>	<b>Στοιχεία Αερολιμένα Καστοριάς</b> .....	<b>A-1</b>
A.1	AIP GREECE / LGKA .....	A-2
A.2	Ραδιοκαλύψεις .....	A-6



## Ευρετήριο Συντμήσεων – Ακρωνυμίων

AAD	Aircraft Accuracy Designator
AAIM	Aircraft Autonomous Integrity Monitoring
ABAS	Airborne-Based Augmentation System
AIP	Aeronautical Information Publication
APV	Approach with Vertical Guidance
ANSP	Air Navigation Service Provider
ATC	Air Traffic Control
ATSEP	Air Traffic Safety Electronic Personnel
ATSU	Air Traffic Status Unit
ATCO	Air Traffic Controller
ATM	Air Traffic Management
CNS	Communication Navigation Surveillance
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
DF/MC	Dual Frequency/ Multi Constellation
DH	Decision Height
DLR	German Aerospace Center
DME	Distance Measuring Equipment
EASA	European Aviation Safety Agency
ERP	Effective Radiated Power
FAA	Federal Aviation Administration
FAS	Final Approach Segment
FPAP	Flight Path Alignment Point
FTP	Fictitious Threshold Point
FMS	Flight Management System
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GAD	Ground Accuracy Designator
GAST	GBAS Approach Service Type
GBAS	Ground Based Augmentation System
GLS	GBAS Landing System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPA	Glide Path Angle
GPIP	Glide Path Intersection Point
GPS	Global Positioning System
GP	Glide Path
HAL/HPL	Horizontal Alert Limit/ Horizontal Protection Level
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Authority
IFR	Instrumental Flight Rules
IGWG	International GBAS Working Group
ILS	Instrumental Landing system
INS	Inertial Navigation System
LAL/LPL	Lateral Alert Limit/ Lateral Protection Level
LCSU	Local Control Status Unit

LMDT	Local Maintenance Data Terminal
LOCA	Local Object Consideration Area
LTP	Landing Threshold Point
MEO	Medium Earth Orbit
MLA	Multipath Limiting Antenna
MLS	Military Landing System
MMR	Multi Mode Receiver
NDB	Non-Directional Beacon
NM	Nautical Mile
OFZ	Obstacle Free Zone
OLS	Obstacle Limitation surface
PAR	Precision Approach Radar
PRC	Pseudorange Correction
PRN	Pseudorandom Noise Code
PPS	Precise Positioning System
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RCSU	Remote Control Status Unit
RFI	Radio Frequency Interference
RIMS	Reference and Integrity Monitoring Station
RMDT	Remote Maintenance Data Terminal
RNAV	Area Navigation
RNP	Required Navigation Performance
RRC	Range Rate Correction
RR/RRA	Reference Receiver/ Reference Receiver Antenna
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
RVR	Runway Visual Range
RWY	Runway
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SES	Single European Sky
SARPS	Standards and Recommended Practices
SIS	Signal In Space
SPS	Standard Positioning System
TCH	Threshold Crossing Height
TCP	Threshold Crossing Point
TMA	Terminal
VAL/VPL	Vertical Alert Limit/ Vertical Protection Level
VDB	VHF Data Broadcast
VFR	Visual Flight Rules
VHF	Very High Frequency
VOR	VHF Omni Range
WGS84	World Geodetic System 84

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή

Η διαρκώς αυξανόμενη εναέρια κυκλοφορία απαιτεί νέους τρόπους και διαδικασίες πλοήγησης αεροσκαφών και προσέγγισης αεροδρομίων, έτσι ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα του εναέριου χώρου και των τερματικών περιοχών των αεροδρομίων, χωρίς όμως να μειωθεί η ασφάλεια των πτήσεων. Τα συμβατικά ραδιοβοηθήματα αεροναυτιλίας που για χρόνια υπηρετούσαν και συνεχίζουν να υπηρετούν τις διάφορες φάσεις των πτήσεων οριακά πλέον μπορούν να ανταπεξέλθουν στις αυξανόμενες ανάγκες της εναέριας κυκλοφορίας.

Παράλληλα η δορυφορική πλοήγηση έχει γίνει μία βασική και απαραίτητη εν γένει τεχνολογία για την κοινωνία. Οι εφαρμογές της κυμαίνονται από τα συστήματα μεταφοράς έως τη γεωργία και την αλιεία, υποστηρίζοντας συνάμα και άλλες επιστήμες, προσφέροντας αναρίθμητα οφέλη στην κοινωνία. Το κύριο σύστημα αυτής της τεχνολογίας είναι το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS) των Ηνωμένων Πολιτειών, το οποίο είναι διαθέσιμο σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ η Ευρώπη τελειοποιεί το δικό της δορυφορικό σύστημα πλοήγησης, το Galileo.

Η πολιτική αεροπορία είναι ένας από τους τομείς της κοινωνίας που επωφελείται πολύ από αυτά τα συστήματα. Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) έχει αναπτύξει το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GNSS) ως το σύστημα προσδιορισμού παγκόσμιας θέσης και χρόνου για τις ανάγκες της αεροπλοΐας και έχει ως στόχο οι τεχνολογίες του GNSS να αποτελούν τα κύρια συστήματα πλοήγησης για τον 21ο αιώνα [03].

Ωστόσο οι αυτόνομοι αστερισμοί, όπως το GPS, δεν καλύπτουν τις ελάχιστες απαιτήσεις των SARPS που ορίζει ο ICAO [01] για τις διαδικασίες προσέγγισης ακριβείας ενός αεροδρομίου, ως προς την ακρίβεια και την ακεραιότητα. Για να συμβεί αυτό αναπτύχθηκαν συστήματα βελτίωσης των αστερισμών GNSS, που διορθώνουν τα σφάλματα των μετρικών ποιότητας και έτσι καλύπτουν τις ελάχιστες απαιτήσεις του ICAO. Συστήματα βελτίωσης GNSS υπάρχουν στα αεροσκάφη (ABAS), στο έδαφος (GBAS) αλλά και σε συνδυασμό με δορυφόρους (SBAS).

Το σύστημα που βελτιώνει την απόδοση του αστερισμού GPS και θα απασχολήσει την παρούσα εργασία, είναι το GBAS (Ground Based Augmentation System). Ένα ολοκληρωμένο σύστημα GBAS εφαρμόζεται στο χώρο του αεροδρομίου όπου με τρεις ή τέσσερις δέκτες αναφοράς συλλέγει τις πληροφορίες θέσης από τον αστερισμό GPS, τις συγκρίνει με τη δική του ακριβή θέση αναφοράς μέσω ενός κεντρικού υπολογιστή, και εκπέμπει την διαφορική διόρθωση μαζί με άλλες πληροφορίες μέσω ενός VDB σήματος δεδομένων από έναν πομπό στην μπάντα συχνοτήτων VHF. Το αεροσκάφος, λαμβάνει αυτό το σήμα και διορθώνει με αυτό, την πληροφορία θέσης που παίρνει από τον δικό του δέκτη GPS. Έτσι γνωρίζει την ακριβή του θέση και εφαρμόζει διαδικασία προσέγγισης ακριβείας GBAS[14].

## **1.2 Σκοπός και Βασικά Ερευνητικά Ερωτήματα**

Η παρούσα διατριβή θα μελετήσει τις επιμέρους τεχνολογίες που απαιτούνται για την εφαρμογή και υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος GBAS σε ένα αεροδρόμιο. Σκοπός της ερευνάς είναι να ερευνηθούν και να σχεδιαστούν οι τεχνολογίες και οι προδιαγραφές που απαιτούνται για την υλοποίηση ενός επίγειου σταθμού GBAS, με προδιαγραφές για την επιλογή των θέσεων των στοιχείων της εγκατάστασης με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, ώστε να εφαρμοσθεί στο μέλλον στον Αερολιμένα Καστοριάς. Στόχος είναι να αναγνωριστούν οι διαδικασίες που χρειάζονται και να προταθεί ένα μοντέλο (framework) το οποίο θα μπορεί επιτυχώς να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση του GBAS και σε άλλα αεροδρόμια της Ελλάδας.

Για τον προσδιορισμό των ερευνητικών ερωτημάτων αναγνωρίστηκαν οι ακόλουθες ερευνητικές υποθέσεις.

H1 : Η διόρθωση της πληροφορίας του GPS από το GBAS είναι επαρκής για την ακρίβεια και την ακεραιότητα της διαδικασίας προσέγγισης ακριβείας και της προσγείωσης των αεροσκαφών σε ένα αεροδρόμιο.

H2 : Τα πλεονεκτήματα του GBAS έναντι του ILS καθιστούν την αντικατάσταση του δεύτερου από το πρώτο αναγκαίο μελλοντικό στόχο.

H3 : Η εγκατάσταση ενός επίγειου σταθμού GBAS είναι εφικτό να υλοποιηθεί στον Αερολιμένα της Καστοριάς με βάση τους περιορισμούς λόγω της μορφολογίας του εδάφους και των υπάρχουσών υποδομών.

Ερευνητικά ερωτήματα

Μπορεί το σύστημα GBAS να θεωρηθεί σαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαδικασίας προσέγγισης αεροδρομίων στην Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση του αεροδρομίου Καστοριάς;

Είναι τόσο σημαντικά τα πλεονεκτήματα του συστήματος GBAS σε σχέση με το ILS, ώστε να θεωρείται αναγκαία η αντικατάσταση του δεύτερου από το πρώτο;

Τι μετρά πρέπει να ληφθούν για την ορθή υλοποίηση του συστήματος GBAS σε ένα αεροδρόμιο, ώστε να μη τεθούν θέματα δυσλειτουργίας και παρεμβολών από τις υπάρχουσες υποδομές του;

Είναι αναγκαίο και εφικτό παράλληλα να αναπτυχθεί η αυτόματη προσγείωση στον Αερολιμένα της Καστοριάς μέσω διαδικασιών GBAS;

### **1.3 Αναγκαιότητα της Έρευνας**

Το GBAS αυτή τη στιγμή αποτελεί το εναλλακτικό σύστημα του ILS (Instrumental Landing System) και στόχος είναι στο εγγύς μέλλον με την περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη του, να το αντικαταστήσει. Η εγκατάσταση ενός ή δύο συστημάτων ILS σε κάθε αεροδρόμιο θα έλυne θέματα προβληματικών προσεγγίσεων λόγω προβληματικής γεωγραφικής θέσης και δύσκολων

καιρικών συνθηκών, αλλά λόγω του ιδιαίτερα υψηλού κόστους, αυτό καθίσταται ανέφικτο, ειδικά με τις παρούσες οικονομικές συνθήκες. Μάλιστα θεωρείται επιτακτική ανάγκη να λυθεί το ζήτημα των προβληματικών προσεγγίσεων καθώς η εναέρια κυκλοφορία και οι πτήσεις τα τελευταία χρόνια αυξάνονται με ραγδαίους ρυθμούς και η ζήτηση για νέες προσεγγίσεις είναι πολύ μεγάλη και αναμένεται να μη μπορεί να καλυφθεί με τον υπάρχον εξοπλισμό. Αυτό μπορεί να λυθεί με το εναλλακτικό σύστημα GBAS καθώς το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του είναι πολύ μικρότερο ενός ILS, ενώ σαν σύστημα το GBAS θεωρείται πολύ ευέλικτο στην εγκατάσταση του και με καλύτερη απόδοση από το ILS.

Αυτή τη στιγμή αν και υπάρχει μία γενική συζήτηση στην Ελληνική Πολιτική Αεροπορία για τα οφέλη μίας ενδεχόμενης χρήσης της τεχνολογίας του GBAS στα Ελληνικά Αεροδρόμια, δεν υπάρχει κάποια εγχώρια μελέτη του συγκεκριμένου συστήματος ώστε να δημιουργηθεί η απαραίτητη τεχνογνωσία για την υλοποίησή του. Η παρούσα διατριβή έρχεται να συμπληρώσει αυτό το κενό καθώς αποτελεί μία ολοκληρωμένη μελέτη εγκατάστασης επίγειου σταθμού GBAS, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη και την υλοποίηση του συστήματος τα αμέσως επόμενα χρόνια στην Ελλάδα.

## **1.4 Δομή της Εργασίας – Διαμόρφωση Κεφαλαίων**

Ύστερα από το εισαγωγικό κεφάλαιο 1, όπου μετά την εισαγωγή, αναφέρονται ο σκοπός και η αναγκαιότητα της εργασίας και τίθενται τα αντίστοιχα ερευνητικά ερωτήματα, ακολουθεί η ανάπτυξη της όπως φαίνεται παρακάτω.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση σε σχέση με τα δορυφορικά συστήματα GNSS και τα συστήματα διόρθωσης της ακρίβειας τους με ιδιαίτερη έμφαση στο σύστημα διόρθωσης ψευδοαπόστασης GBAS.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται παρουσίαση των οργανισμών που διέπουν την παγκόσμια εναέρια κυκλοφορία, κυρίως για την Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Επίσης γίνεται αναφορά και εξήγηση της λειτουργίας των συμβατικών ραδιοβοηθημάτων που υπηρετούν την αεροναυτιλία και παρουσιάζονται τα προγράμματα ανάπτυξης της στο εγγύς μέλλον.

Το κεφάλαιο 4 κάνει εκτενή αναφορά στο παγκόσμιο σύστημα δορυφορικής πλοήγησης GNSS περιγράφοντας την αρχή λειτουργίας του και παρουσιάζοντας τους κυριότερους δορυφορικούς

αστερισμούς, όπως το GPS και το Galileo. Παράλληλα αναπτύσσονται οι κυριότερες πηγές σφαλμάτων που πως αυτές υποβαθμίζουν την ακρίβεια των συστημάτων GNSS, ενώ αναφέρεται η απαιτούμενη απόδοση πλοήγησης RNP και οι μετρικές ποιότητας που την ορίζουν.

Το κεφάλαιο 5 ασχολείται κατά κύριο λόγο με τη βασική αρχή λειτουργίας των συστημάτων GBAS που είναι η διαφορική διόρθωση. Γίνεται εξήγηση της λειτουργίας της και αναγωγή στο πως διορθώνονται διαφορικά οι μετρήσεις ψευδοαπόστασης ενός δορυφόρου. Παρουσιάζονται οι προϋποθέσεις και οι τρόποι εφαρμογής της διαφορικής διόρθωσης στις μετρήσεις ψευδοαπόστασης και αναλύεται το μοντέλο υπολογισμού της μέσω του αλγόριθμου διόρθωσης ψευδοαπόστασης PRC.

Στο κεφάλαιο 6 αναπτύσσεται το σύστημα GBAS και η λειτουργία του στα αεροδρόμια. Αναλύονται οι τεχνολογίες που το αποτελούν, η αρχιτεκτονική του στο έδαφος και το αεροσκάφος και αναφέρονται οι λειτουργίες GBAS που εφαρμόζονται ανάλογα, όπως η GAST-C και η GAST-D. Μελετώνται οι δύο υπηρεσίες που προσφέρει, της προσέγγισης ακριβείας PA και του προσδιορισμού θέσης, ενώ επιπροσθέτως αναφέρονται οι επιδόσεις του συστήματος και ο έλεγχος της ακεραιότητας του.

Το κεφάλαιο 7 μελετάει πιο διεξοδικά τις επιμέρους τεχνολογίες που απαιτούνται για την εφαρμογή και την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου επίγειου υποσυστήματος GBAS και προχωρά στον σχεδιασμό και τις προδιαγραφές ενός πρότυπου επίγειου σταθμού, ως μοντέλο (framework) για αεροδρόμια όπως αυτό της Καστοριάς. Επίσης γίνεται παρουσίαση ορισμένων χρήσιμων στοιχείων της δομής και της λειτουργίας του αερολιμένα Καστοριάς που μπορεί να βοηθήσουν στην μελλοντική εγκατάσταση ενός υποσυστήματος εδάφους GBAS.

Τέλος το κεφάλαιο 8 αποτελεί τον επίλογο της παρούσας εργασίας, όπου παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τη μελέτη και γίνεται αναφορά σε μελλοντικά σχέδια ανάπτυξης του GBAS συνυφασμένα με το άμεσο μέλλον της εναέριας κυκλοφορίας.

# Κεφάλαιο 2

## Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο 2 θα δοθεί μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης, μια πρώτη εικόνα των συστημάτων GNSS και των συστημάτων διόρθωσης και βελτίωσης τους, όπως του GBAS. Η αρχή θα γίνει μέσω μίας ιστορικής αναδρομής στο GNSS και το σύστημα GBAS τα οποία αναμένεται να αντιπροσωπεύσουν το μέλλον της πλοήγησης της παγκόσμιας πολιτικής αεροπορίας. Στη συνέχεια θα γίνει πλήρη εισαγωγή τόσο του GNSS όσο και των συστημάτων διόρθωσης και βελτίωσης του, με ιδιαίτερη έμφαση στο GBAS (Ground-Based Augmentation System).

### 2.1 Ιστορική Αναδρομή

Στις αρχές της δεκαετίας του '80, η πολιτική αεροπορία εισήχθη σε μια περίοδο σταθερής ανάπτυξης με αύξηση των πτήσεων και των επιβατών της, με προβλέψεις μάλιστα ότι ο ρυθμός της ανάπτυξης αυτής θα αυξανόταν με γεωμετρική πρόοδο στο εγγύς μέλλον. Αυτοί οι παράγοντες οδήγησαν το Συμβούλιο της Διεθνούς Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) να εξετάσει τις μελλοντικές απαιτήσεις της αεροναυτιλίας ως προς την αξιοπιστία και την ασφάλεια. Ο ICAO κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα συμβατικά συστήματα και οι διαδικασίες που υποστηρίζουν την πολιτική αεροπορία είχαν φθάσει στα μέγιστα όρια τους και αποφάσισαν τη συγκρότηση ειδικής επιτροπής για τα μελλοντικά συστήματα αεροναυτιλίας (FANS) επιφορτισμένη με τη



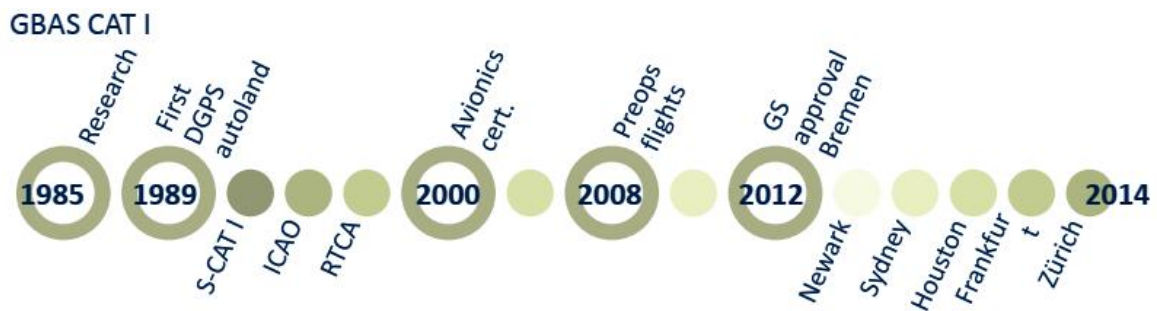
μελέτη, τον εντοπισμό και την αξιολόγηση νέων τεχνολογιών και δημιουργίας προτάσεων για τη μελλοντική ανάπτυξη της αεροναυτιλίας ως πυλώνα της πολιτικής αεροπορίας νέας γενιάς.

Η επιτροπή FANS σε συνεργασία με τους κλάδους CNS/ ATM (εποπτεία πλοήγησης επικοινωνίας / διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας) της πολιτικής αεροπορίας παρουσίασε τις τελικές εκτιμήσεις και τα συμπεράσματά της οκταετούς μελέτης της, στο δέκατο συνέδριο αεροναυτιλίας το 1991, όπου κατέληξε ότι ήταν απαραίτητο να αναπτυχθούν νέες τεχνολογίες που θα μπορούσαν να ξεπεράσουν τους περιορισμούς των συμβατικών συστημάτων. Τα μελλοντικά συστήματα θα έπρεπε να ανταποκρίνονται περισσότερο στις ανάγκες των χρηστών και να είναι πιο οικονομικά, ώστε να προσφέρονται σε όλους.

Η επιτροπή FANS κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η δορυφορική τεχνολογία προσφέρει μια βιώσιμη λύση για να ξεπεραστούν οι ελλείψεις των συμβατικών επίγειων συστημάτων και να καλυφθούν οι μελλοντικές ανάγκες της πολιτικής αεροπορίας. Έτσι η έννοια του Παγκόσμιου Δορυφορικού Συστήματος Πλοήγησης (GNSS) εισήχθη και αναπτύχθηκε από τον ICAO και την FANS, μέχρι την επιχειρησιακή έγκριση του το 2003. Από τότε παραμένει επιχειρησιακό και αναπτύσσεται σε όλο τον κόσμο.

Ωστόσο η ανάγκη για ασφαλή πλοήγηση με υψηλή ακρίβεια θέσης, ειδικά σε διαδικασίες προσέγγισης και προσγείωσης ενός αεροσκάφους σε ένα αεροδρόμιο, οδήγησε στην ανάπτυξη συστημάτων βελτίωσης των αστερισμών GNSS, ώστε να καλυφθούν οι ελάχιστες απαιτήσεις που ορίζει ο ICAO [17]. Ένα τέτοιο σύστημα αύξησης της απόδοσης του αστερισμού GPS, σε επίπεδο περιοχής προσέγγισης αεροδρομίου, αποτελεί το σύστημα GBAS.

Από το 1998 στις ΗΠΑ έγιναν οι πρώτες σοβαρές προσπάθειες προσέγγισης και προσγείωσης μέσω υπηρεσιών GBAS, με αρχιτεκτονική περίπου όπως την γνωρίζουμε σήμερα. Ανακαλύπτοντας πολλά προβλήματα με την ακεραιότητα και δημιουργώντας διάφορα μοντέλα για να τα αντιμετωπίσουν, η FAA σε συνεργασία με τις εταιρίες Boeing και Honeywell κατάφεραν το 2009 να τυποποιήσουν και να πιστοποιήσουν τον πρώτο σταθμό GBAS για υπηρεσία προσέγγισης τύπου C (GAST-C) και κατηγορίας PA CAT-I.



Σχήμα 2.1 Πορεία GBAS CAT I στον χρόνο [16]

Δεδομένου ότι η τυποποίηση του GBAS από τον ICAO βασίστηκε εξαρχής σε πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν στις ΗΠΑ, οδήγησε τον Ευρωπαϊκό φορέα Eurocontrol να διεξάγει αντίστοιχες μετρήσεις και στην Ευρώπη. Έτσι σε συνεργασία με τον πάροχο υπηρεσιών Αεροναυτιλίας της Γερμανίας DFS διεξήχθησαν μετρήσεις στο αεροδρόμιο της Φρανκφούρτης, για την τυποποίηση του συστήματος στην Ευρώπη [19]. Το Γερμανικό ινστιτούτο αεροπορικής έρευνας DLR το 2008 εγκατέστησε ένα σύστημα GBAS της Thales στο ερευνητικό αεροδρόμιο του Braunschweig-Wolfsburg. Από τότε πολλοί διαφορετικοί σχεδιασμοί και αναβαθμίσεις του συστήματος δοκιμάστηκαν και ελέχθησαν για πολλαπλά συμπεράσματα, που θα βοηθήσουν στην ολοκλήρωση του GAST-D, που είναι το GBAS CAT II/III [22]. Σύμφωνα με τον Michael Felux του ινστιτούτου DLR, διαπιστώθηκε ότι το GBAS ανταποκρίθηκε σε όλες τις προδιαγραφές και είχε πλήρη διαθεσιμότητα καθ' όλη τη διάρκεια των πτήσεων [23]. Έτσι η πρώτη πιστοποίηση και μάλιστα κατά ICAO ήρθε το 2012 για το αεροδρόμιο της Βρέμης και ακολούθησαν το 2014 τα αεροδρόμια της Φρανκφούρτης και της Ζυρίχης.

Το σύστημα GBAS πλέον αριθμεί πολλούς επίγειους σταθμούς σε πολλά αεροδρόμια παγκοσμίως, στα περισσότερα των οποίων πραγματοποιούνται διαδικασίες προσεγγίσεων ακριβείας CAT-I, οι οποίες είναι επισήμως δημοσιευμένες για το κάθε ένα αεροδρόμιο. Παράλληλα υπάρχουν εγκατεστημένοι και πολλοί σταθμοί GBAS που βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, ή σε στάδιο επικύρωσης.

Οι περισσότερες ημερήσιες διαδικασίες προσέγγισης παγκοσμίως πραγματοποιούνται στα δύο διεθνή αεροδρόμια της Αυστραλίας, του Σύδνεϋ και της Μελβούρνης, καθώς ο ANSP της Αυστραλίας σκοπεύει να καταστήσει στο άμεσο μέλλον το GBAS σαν το κύριο εργαλείο υπηρεσίας προσεγγίσεων ακριβείας. Από την άλλη η Ρώσικη Ομοσπονδία έχει επενδύσει πάνω στο σύστημα GBAS, καθώς πάνω από 100 αεροδρόμια της χώρας διαθέτουν σε επιχειρησιακή λειτουργία το σύστημα.

Οι FAA και το Eurocontrol είναι από κοινού οι κύριοι οργανισμοί που στηρίζουν τη Διεθνή ομάδα εργασίας του GBAS, την IGWG. Η IGWG είναι ένα διεθνές φόρουμ ανταλλαγής τεχνογνωσίας και επιχειρησιακής εμπειρίας σχετικά με το σύστημα GBAS. Σ' αυτό συμμετέχουν κυβερνήσεις, πάροχοι αεροναυτιλίας, αεροπορικές εταιρίες, αεροδρόμια και η αεροπορική βιομηχανία. Η IGWG από το 2004 μέχρι σήμερα, έχει πραγματοποιήσει 19 συνέδρια, τουλάχιστον από ένα κάθε χρόνο, με το τελευταίο να λαμβάνει χώρα στην Κρακοβία της Πολωνίας. Εκεί συζητήθηκαν, η ανάπτυξη του GBAS από τους διεθνείς οργανισμούς, οι ενέργειες που πραγματοποιούνται από τους παρόχους και οι εξελίξεις και αναβαθμίσεις στα υποσυστήματα αεροσκαφών από τις αεροπορικές εταιρίες και την βιομηχανία.

## **2.2 Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης - GNSS**

Το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GNSS) είναι μια έννοια που αναπτύχθηκε από τον ICAO (Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας) και πιο συγκεκριμένα από την επιτροπή FANS (Future Air Navigation Systems). Η δορυφορική πλοήγηση (GNSS) είναι μια παγκόσμια διαθέσιμη τεχνολογία που αντιπροσωπεύει μια πλήρη γκάμα ευκαιριών και αποτελεί για την πολιτική αεροπορία τη νέα γενιά των συστημάτων πλοήγησης.

Το GNSS σύμφωνα με το Annex 10 του ICAO, ορίζεται ως ένα σύστημα προσδιορισμού παγκόσμιας θέσης και χρόνου, το οποίο περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους δορυφορικούς σχηματισμούς, δέκτες αεροσκαφών και συστήματα παρακολούθησης της ακεραιότητας του όλου συστήματος, με τιμές τέτοιες ώστε να υποστηρίζεται η απαιτούμενη απόδοση πλοήγησης για την εκάστοτε διαδικασία. Πρόκειται για ένα σύστημα προσδιορισμού θέσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την καθοδήγηση των χρηστών του, ώστε να θεωρείται ως ένα σύστημα πλοήγησης.

Εκτός από τη θέση, το GNSS χρησιμοποιείται για τον καθορισμό και άλλων πληροφοριών, αναλόγως της εφαρμογής, όπως του χρόνου και της ταχύτητας. Ωστόσο ως σύστημα πλοήγησης, διαφέρει θεμελιωδώς από τα παραδοσιακά συστήματα αεροναυτιλίας (navaids). Έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει όλες τις φάσεις της πτήσης ενός αεροσκάφους, από την απογείωση μέχρι και την προσγείωση, ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών με σχεδόν πλήρη κάλυψη παγκοσμίως, που είναι πολύ σημαντικό, καθώς μπορεί να παρέχει ακριβή καθοδήγηση σε απομακρυσμένες, ωκεάνιες και ορεινές περιοχές όπου είναι πολύ δαπανηρή ή αδύνατη η παροχή αξιόπιστης και ακριβούς καθοδήγησης μέσω παραδοσιακών συστημάτων αεροναυτιλίας. Το

GNSS μπορεί επίσης να παρέχει υπηρεσίες όπου δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση συμβατικών βοηθημάτων προσέγγισης, όπως για διαδρόμους αεροδρομίων σε νησιά.

Όπως αναφέρεται στον ορισμό του GNSS του ICAO, το σύστημα περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους δορυφορικούς σχηματισμούς, καθένας από τους οποίους υποστηρίζει το δικό του δορυφορικό σύστημα πλοήγησης. Τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης που βρίσκονται σε πλήρη και πιστοποιημένη από τον ICAO λειτουργία σήμερα ( με βάση τα ανεπτυγμένα SARPs) είναι το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS), το οποίο λειτουργεί από τις Ηνωμένες Πολιτείες και το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης της Ρωσικής Ομοσπονδίας (GLONASS). Η ανάπτυξη του ICAO GNSS εμπνεύστηκε από αυτούς τους δύο σχηματισμούς όπως και η εξέλιξη του βασίστηκε σε αυτά τα δύο συστήματα. Δύο άλλοι σχηματισμοί είναι ήδη σε εφαρμογή αλλά δεν είναι πιστοποιημένοι κατά ICAO, ο Beidou από την Κίνα και ο Galileo από τον Ευρωπαϊκό φορέα Δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (GSA), που θα είναι πλήρως λειτουργικός το 2020. Καθένα από αυτά τα τέσσερα συστήματα παρέχει ανεξάρτητες δυνατότητες, αλλά αναμένεται ότι στο εγγύς μέλλον, θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό μεταξύ τους ώστε να βελτιωθεί η ευρωστία του GNSS.

Τα οφέλη από την λειτουργία και την εκμετάλλευση του GNSS είναι σημαντικά, τόσο για τους Παρόχους Υπηρεσιών Αεροναυτιλίας (ATSP) όσο και για τις αεροπορικές εταιρείες. Τα κυριότερα από αυτά είναι :

- Η μείωση της εξάρτησης από τα παραδοσιακά ραδιοβοηθήματα πλοήγησης, τα οποία είναι μεγάλης ηλικίας και έχουν μεγάλο κόστος επιτήρησης και επισκευής.
- Κοινή αναφορά πλοήγησης και κοινή πηγή χρόνου παγκοσμίως.
- Βελτίωση της αξιοποίησης των αεροδρομίων με χαμηλότερο κόστος.
- Διαδικασίες προσέγγισης και ικανότητα προσγείωσης με χαμηλή ορατότητα και στις περισσότερες καιρικές συνθήκες, ειδικά σε περιφερειακά αεροδρόμια χωρίς συστήματα προσγείωσης.

Ωστόσο, τα σημερινά πιστοποιημένα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GPS και GLONASS), δεν είναι, από μόνα τους, σε θέση να ικανοποιήσουν τις ελάχιστες απαιτούμενες τιμές επιδόσεων που ορίζει ο ICAO για την αεροναυτιλία, όπως της ακρίβειας, της ακεραιότητας, της συνέχειας και της διαθεσιμότητας. Ως εκ τούτου απαιτούν στήριξη για να μπορέσουν να ανταποκριθούν, η οποία επιτυγχάνεται μέσω των συστημάτων παρακολούθησης και αύξησης της ακεραιότητας της δορυφορικής πλοήγησης, μέσω διόρθωσης θέσης.

## 2.3 Συστήματα Διόρθωσης Θέσης - Augmentation Systems

Τα συστήματα διόρθωσης GNSS βελτιώνουν την απόδοση των δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης προκειμένου να ξεπεράσουν ορισμένους από τους εγγενείς περιορισμούς και να τους βοηθήσουν να ανταποκριθούν στις απαιτούμενες από τον ICAO επιδόσεις για τις αερομεταφορές. Τρία συστήματα αύξησης έχουν αναπτυχθεί στο πλαίσιο της πολιτικής αεροπορίας:

- Aircraft-Based Augmentation Systems (ABAS)  
Συστήματα διόρθωσης που διενεργούνται στα αεροσκάφη
- Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)  
Συστήματα διόρθωσης ευρείας περιοχής μέσω δορυφόρων
- Ground-Based Augmentation Systems (GBAS)  
Συστήματα διόρθωσης που διενεργούνται τοπικά στο έδαφος

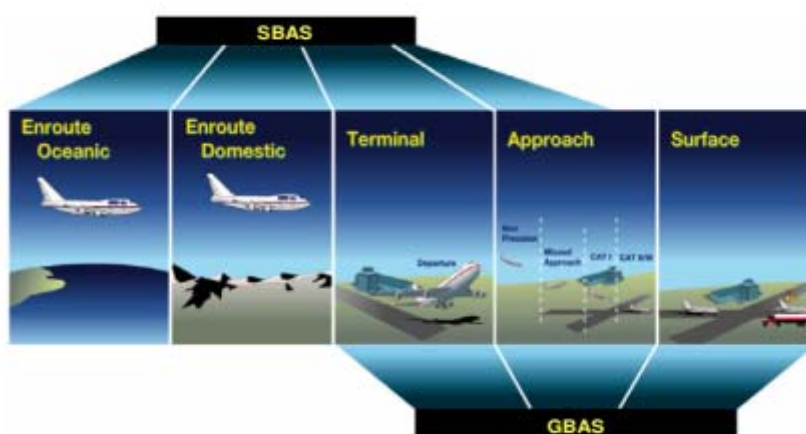
Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων όπως προαναφέρθηκε, είναι η παρακολούθηση και παροχή δεδομένων ακεραιότητας, που είναι απαραίτητα για την πλοήγηση στην αεροναυτιλία και δεν παρέχονται από τα αυτόνομα δορυφορικά συστήματα. Αυτά τα δεδομένα επιτρέπουν στους χρήστες να ελέγχουν την αξιοπιστία της θέσης του GNSS, μέσω πολλών υπολογισμών διόρθωσης θέσης, στην περίπτωση του ABAS, ή με τον συνεχή και ακριβή έλεγχο συγκεκριμένων ορίων στο σφάλμα θέσης, στην περίπτωση των συστημάτων GBAS και SBAS.

Το σύστημα ABAS βασίζεται αποκλειστικά στον εξοπλισμό του αεροσκάφους και χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει την αξιοπιστία των δεδομένων πλοήγησης που παρέχονται από το δέκτη GNSS. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την διόρθωση ή την ενσωμάτωση των δεδομένων GNSS από δεδομένα που προέρχονται από αισθητήρες επί του αεροσκάφους. Είναι πολύ σημαντικό ότι ο τρόπος που το σύστημα ABAS διορθώνει τα δεδομένα πλοήγησης, το καθιστά διαθέσιμο για αξιοποίηση σε οποιαδήποτε φάση μίας πτήσης.

Σε αντίθεση με το ABAS, στο σύστημα GBAS εμπλέκονται υποδομές εδάφους ενώ στο SBAS χρησιμοποιούνται γεωστατικοί δορυφόροι. Το σύστημα GBAS παρέχει υπηρεσίες σε τοπικό

σχετικά επίπεδο, συνήθως περιμετρικά ενός αεροδρομίου, μέσω ενός επίγειου σταθμού που συλλέγει δεδομένα από ένα δορυφορικό σύστημα πλοήγησης, όπως το GPS και μεταδίδει διορθώσεις και άλλα δεδομένα στους χρήστες που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μέσω ενός VHF σταθμού. Τα συστήματα SBAS περιλαμβάνουν τη χρήση ενός μεγάλου αριθμού επίγειων σταθμών, καταναμημένων σε πολύ μεγάλη περιοχή, εκτάσεως μεγαλύτερης της μίας ηπείρου. Όπως και με το GBAS, οι σταθμοί συλλέγουν δεδομένα από το αντίστοιχο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης, και αφού υπολογιστούν οι κατάλληλες διορθώσεις, μαζί με άλλα δεδομένα μεταφορτώνονται σε γεωστατικούς δορυφόρους από όπου μεταδίδονται στις περιοχές κάλυψής τους.

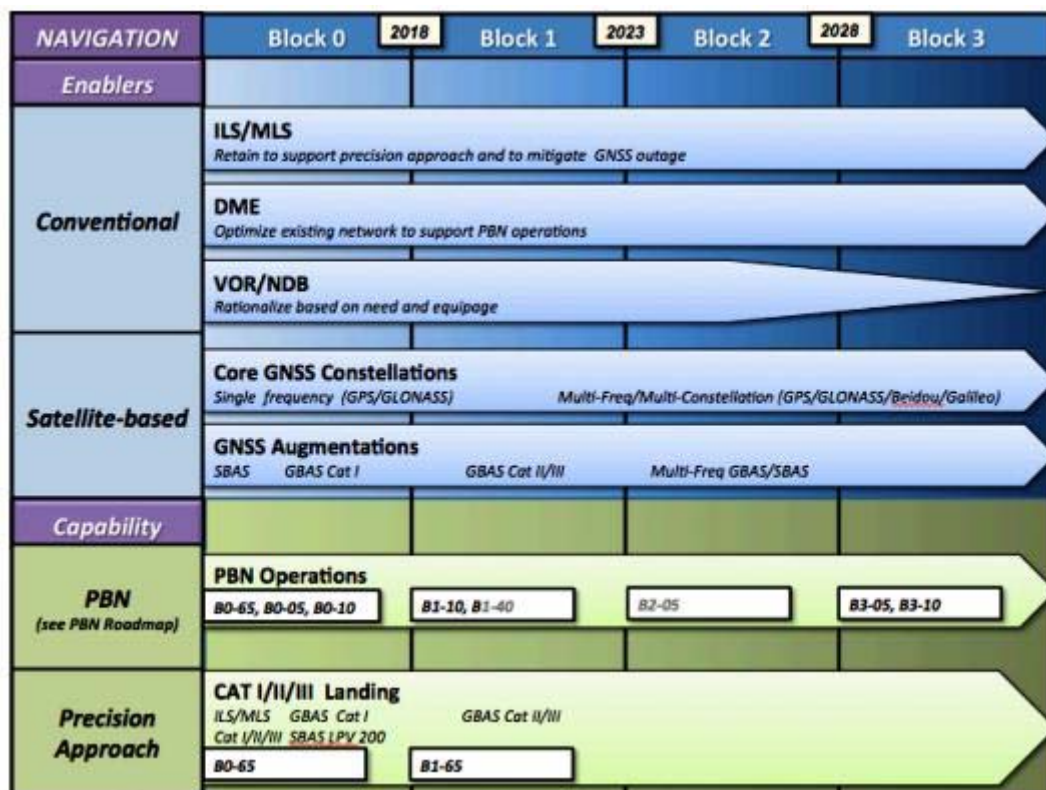
Λόγω της διαφορετικής λειτουργίας τους, το GBAS και το SBAS υποστηρίζουν διαφορετικά στάδια μίας ολοκληρωμένης πτήσης. Τα συστήματα SBAS προορίζονται για υποστήριξη των φάσεων μίας πτήσης όπου δεν απαιτείται η κάλυψη αυστηρών κριτηρίων, όπως είναι η διαδρομή (enroute) μίας πτήσης, διαδικασίες απογείωσης, διαδικασίες μη ακριβούς (Non-Precision) προσέγγισης αεροδρομίου και ενδεχομένως προσεγγίσεις ακρίβειας κατηγορίας I (CAT-I). Τα συστήματα GBAS από την άλλη σχεδιάστηκαν κατά κύριο λόγο για να υποστηρίξουν διαδικασίες αυστηρότερων απαιτήσεων, όπως προσεγγίσεις ακρίβειας (Precision approaches) από κατηγορίας I (CAT-I) έως και κατηγορίας III (CAT-III) καθώς επίσης για προσγείωση (landing) και αναχώρηση (departure) αλλά και λειτουργίες επιφανείας (surface).



Σχήμα 2.2. Φάσεις πτήσεως υποστηριζόμενης από SBAS και GBAS [48]

Η εισαγωγή των συστημάτων GBAS και SBAS στην πολιτική αεροπορία είναι μια χρονοβόρα διαδικασία με σταδιακή προσέγγιση, καθώς η ασφάλεια των πτήσεων απαιτεί τον ενδελεχή έλεγχο κάθε νέου συστήματος που την επηρεάζει. Ο διακρατικός οργανισμός ECAC (European Civil Aviation Conference) έχει εκπονήσει ένα χάρτη (Σχήμα 2.3) για τη στρατηγική

εκμετάλλευσης των συστημάτων πλοήγησης στις αντίστοιχες διαδικασίες, της επόμενης δεκαετίας στις οποίες την αρχή βρισκόμαστε. Εκεί φαίνεται η εισαγωγή των GNSS συστημάτων στις διαδικασίες μίας ολοκληρωμένης πτήσης, αλλά και η διακοπή παραδοσιακών διαδικασιών λόγω του παροπλισμού ορισμένων συμβατικών ραδιοβοηθημάτων πλοήγησης.

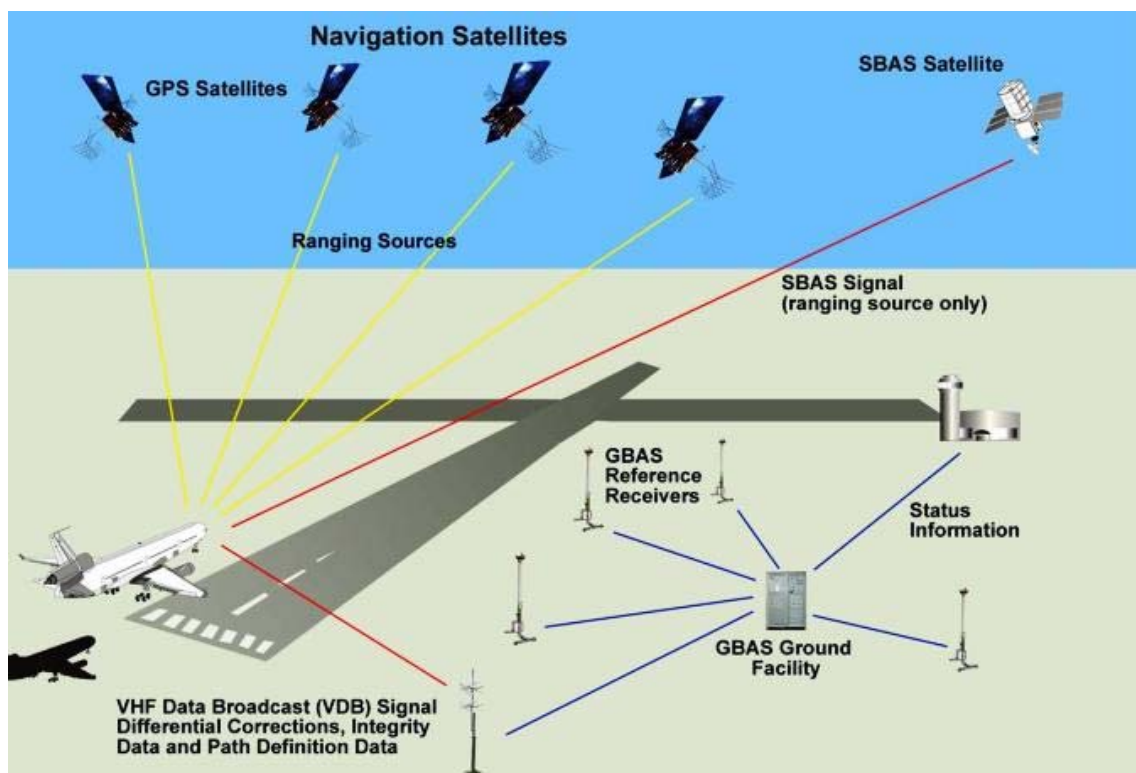


Σχήμα 2.3 Χάρτης Μελλοντικής Πορείας Πλοήγησης [03]

## 2.4 GBAS

Ο μελλοντικός και βασικότερος στόχος του GNSS, είναι να λειτουργεί ως μοναδικό σύστημα πλοήγησης για όλα τα στάδια μίας πτήσης, από την απογείωση του αεροσκάφους, μέχρι την προσγείωση και την τροχοδρόμηση του, υπό όλες τις καιρικές συνθήκες. Το σύστημα GBAS πρόκειται να διαδραματίσει τον βασικότερο και πιο νευραλγικό ρόλο στην επίτευξη αυτού του στόχου, καθώς προορίζεται για διαδικασίες προσεγγίσεων ακρίβειας (CAT-I/II/III) και αυτόματης προσγείωσης (Auto landing), οι οποίες είναι από τις πιο απαιτητικές διαδικασίες στον τομέα της αεροναυτιλίας. Επιπλέον, το GBAS μέσω της βελτίωσης της ακρίβειας εντοπισμού θέσης που παρέχει στα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GPS), αναμένεται στο μέλλον να παρέχει μια δωρεάν υπηρεσία περιοχής σε χρήστες που θα διαθέτουν τους κατάλληλους δέκτες.

Σε πρώτη φάση, εισήχθησαν οι ελάχιστες απαιτήσεις (SARPs) του ICAO που θα έπρεπε να έχει η απόδοση ενός συστήματος GBAS ώστε η λειτουργία του να μπορεί να υποστηρίξει προσεγγίσεις ακρίβειας CAT-I αλλά και για υπηρεσία εντοπισμού θέσης. Στη συνέχεια και αφού εκπονήθηκαν και εγκρίθηκαν οι προδιαγραφές ενός ολοκληρωμένου συστήματος GBAS, συστήματα εγκαταστάθηκαν σε διάφορα αεροδρόμια παγκοσμίως και μετά από κάποιο διάστημα δοκιμαστικής λειτουργίας, εγκρίθηκε η λειτουργία τους για διαδικασίες προσέγγισης ακρίβειας CAT-I, τις οποίες εφαρμόζουν μέχρι και σήμερα. Προς το παρόν το GBAS CAT-I αποτελεί μία εναλλακτική λύση της υπηρεσίας ILS (Instrumental Landing System) CAT-I, αν και μετά από τόσα χρόνια λειτουργίας του το GBAS αποδεικνύεται καλύτερο, πιο ανθεκτικό και με πολλά πλεονεκτήματα έναντι του ILS. Ο λόγος που το καθιστά εναλλακτικό, είναι ότι τα περισσότερα αεροσκάφη δεν διαθέτουν τον δέκτη για την εκμετάλλευση της υπηρεσίας GBAS, αλλά αυτό μεταβάλλεται τα τελευταία χρόνια με τον εκσυγχρονισμό του αεροπορικού στόλου των εταιριών. Οπότε στο άμεσο μέλλον αναμένεται η σταδιακή αντικατάσταση του ILS από το GBAS και η αλλαγή του ILS από πρωτεύων σε εφεδρικό. Μάλιστα οι ελάχιστες απαιτήσεις (GNSS ICAO SARPs) για GBAS CAT II – III έχουν ήδη γραφτεί εδώ και χρόνια, πειραματικοί σταθμοί GBAS υπάρχουν επίσης σε διάφορα αεροδρόμια του κόσμου και αναμένεται προσεχώς η έγκριση διαδικασιών GBAS CAT II-III ή αλλιώς υπηρεσιών προσέγγισης GAST-D.



Σχήμα 2.4 Το Σύστημα GBAS [04]



Ένα σύστημα GBAS χωρίζεται σε τρία υποσυστήματα: το υποσύστημα των δορυφόρων, του εδάφους και του αεροσκάφους. Το υποσύστημα του εδάφους, περιλαμβάνει ένα σύνολο σταθερών δεκτών αναφοράς, που συλλέγει συνεχώς πλήθος δεδομένων από τους δορυφόρους GNSS που βρίσκονται σε οπτική επαφή, οι οποίοι αποτελούν το δορυφορικό υποσύστημα. Αυτά τα δεδομένα στη συνέχεια μεταφέρονται στον κεντρικό σταθμό GBAS, όπου γίνεται ο διαφορικός υπολογισμός των διορθώσεων μέσω κεντρικού υπολογιστή, οι οποίες κατόπιν με τη μορφή ειδικών μηνυμάτων VDB (VHF Data Broadcast) μεταδίδονται στα αεροσκάφη μέσω ενός VHF πομπού. Το υποσύστημα του αεροσκάφους αποκωδικοποιεί το σήμα VDB και αφού το συγκρίνει με τα σήματα που προέρχονται από το απλό δορυφορικό σύστημα πλοήγησης, το ενσωματώνει σε αυτά, διορθώνοντας τα. Έτσι οι χρήστες του συστήματος έχουν πλέον μια διορθωμένη υπηρεσία εντοπισμού θέσης GNSS με μεγαλύτερη ακρίβεια θέσης που δίνει τη δυνατότητα καθοδήγησης για λειτουργίες προσέγγισης και πλοήγησης περιοχής (RNAV). Τέλος εκτός από τα τρία υποσυστήματα, το GBAS ενσωματώνει ένα υποσύστημα παρακολούθησης, που ελέγχει σε εικοσιτετράωρη βάση όλες τις παραμέτρους του συστήματος GBAS, τις μετρήσεις, τα δεδομένα και το σήμα VDB για να εξασφαλίσει ότι δεν υπάρχουν σφάλματα στην υπηρεσία, αλλιώς στην αντίθετη περίπτωση τη διακόπτει.

Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα του GBAS είναι ότι με ένα σταθμό εγκατεστημένο σε ένα αεροδρόμιο μπορούν να καλυφθούν όλοι οι διάδρομοι του καθώς μπορούν να εφαρμοσθούν μέσω ενός συστήματος GBAS μέχρι και 48 διαδικασίες προσέγγισης από πολλές διευθύνσεις. Μάλιστα το GBAS μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από κοντινά αεροδρόμια ή ελικοδρόμια αρκεί να βρίσκονται εντός εμβελείας του. Αντίθετα το ILS έχει περιορισμούς εγκατάστασης, καθώς καλύπτει διαδικασίες προσέγγισης μόνο για το διάδρομο στο άκρο του οποίου είναι εγκατεστημένο. Μάλιστα τα αποτελέσματα μίας έρευνας του γερμανικού ινστιτούτου αεροπορικών ερευνών DLR, δείχνουν ότι οι διαδικασίες αυτόματης προσγείωσης μέσω GBAS CAT III μπορούν να πραγματοποιηθούν ευκολότερα από ότι στο ILS/MLS. Μέσα από ένα μοντέλο προσομοίωσης, αντίστοιχο αυτού του ILS διαπιστώθηκε ότι η αυτόματη προσγείωση μέσω του GBAS κάλυψε τα όρια λάθους και μάλιστα σε δυσκολότερες συνθήκες (μεγαλύτεροι πλευρικοί άνεμοι) από το ILS. [28]

# Κεφάλαιο 3

## Αεροναυτιλία και Εναέρια Κυκλοφορία

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι βασικοί οργανισμοί που διέπουν την Αεροναυτιλία και την διαχείριση της Εναέριας Κυκλοφορίας παγκοσμίως και κυρίως για την Ευρωπαϊκή Ένωση και τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Η αεροναυτιλία είναι συνυφασμένη με την ασφάλεια, οπότε και οι τομείς ευθύνης των οργανισμών της στοχεύουν σε αυτή. Εργαλεία για την επίτευξη της ασφάλειας έως σήμερα αποτελούν τα συμβατικά ραδιοβοηθήματα. Ωστόσο οι απαιτήσεις που γεννιούνται από την ραγδαία αύξηση της εναέριας κυκλοφορίας οδηγούν τους φορείς αεροναυτιλίας σε προγράμματα και πρωτοβουλίες για τον εκσυγχρονισμό και την ανάπτυξη της.

### 3.1 Οργανισμός ICAO

Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) είναι ένας εξειδικευμένος οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών, ο οποίος ιδρύθηκε από τα κράτη το 1944 για να διαχειριστεί τη διοίκηση και τη διακυβέρνηση της Σύμβασης για τη Διεθνή Πολιτική Αεροπορία (Σύμβαση του Σικάγο). Ο

ICAO επεξεργάζεται όλες τις έννοιες και τις τεχνικές της διεθνούς αεροναυτιλίας, και αναπτύσσει πρότυπα και συνιστώμενες πρακτικές για τη Διεθνή Πολιτική Αεροπορία (SARP).

Οργανώνει τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη των διεθνών αεροπορικών μεταφορών με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλιστεί ότι θα είναι ασφαλείς, αξιόπιστες και οικονομικά βιώσιμες, πάντα σε περιβαλλοντικά πλαίσια. Το συμβούλιο του επικυρώνει πρότυπα (SARPs) σχετικά με την αεροναυτιλία, την πρόληψη των παράνομων παρεμβολών και τη διευκόλυνση των διαδικασιών διέλευσης των συνόρων για τη διεθνή πολιτική αεροπορία. Επίσης παρακολουθεί και υποβάλλει εκθέσεις σχετικά με τις μετρήσεις απόδοσης του τομέα των αερομεταφορών και ελέγχει τις δυνατότητες των κρατών να εποπτεύουν την πολιτική αεροπορία στους τομείς της ασφάλειας και της προστασίας (safety and security).

Επιπλέον, κύριος ρόλος του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) είναι η καθιέρωση προτύπων για τα βοηθήματα αεροναυτιλίας, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αφορούν τα Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (GNSS). Τα πρότυπα αυτά ορίζονται στο annex 10 της σύμβασης για τη διεθνή πολιτική αεροπορία.

## 3.2 Οργανισμοί FAA, EASA και Eurocontrol

Η **FAA** (Federal Aviation Administration) είναι η εθνική υπηρεσία πολιτικής αεροπορίας των ΗΠΑ, η οποία είναι υπεύθυνη για τη ρύθμιση και την εποπτεία παντός θέματος της πολιτικής αεροπορίας εντός του εθνικού εναέριου χώρου των ΗΠΑ. Κύριος στόχος της είναι η ασφάλεια των αεροπορικών μεταφορών και για το λόγο αυτό εκδίδει αεροπορικούς κανονισμούς ασφαλείας, πρότυπα ελέγχου πτήσεων και αναπτύσσει συστήματα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας.

Η αντίστοιχη ευρωπαϊκή εθνική υπηρεσία πολιτικής αεροπορίας χωρίζεται σε δύο οργανισμούς, τον EASA και το Eurocontrol, οι οποίοι αλληλοσυμπληρώνονται. Ο οργανισμός **EASA** (European Aviation Safety Agency) αποτελεί τον πυλώνα της στρατηγικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ασφάλεια των αερομεταφορών. Αποστολή του είναι να προωθήσει τα υψηλότερα κοινά πρότυπα ασφαλείας και προστασίας του περιβάλλοντος στην πολιτική αεροπορία σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Παρακολουθεί την εφαρμογή των προτύπων μέσω επιθεωρήσεων στους παρόχους αεροναυτιλίας των κρατών μελών του, τους πιστοποιεί και παρέχει την απαιτούμενη τεχνική εμπειρογνωμοσύνη, κατάρτιση και έρευνα.

Ο οργανισμός **Eurocontrol** είναι υπεύθυνος για την ασφάλεια της Αεροναυτιλίας και εργάζεται για την επίτευξη ασφαλούς και απρόσκοπτης διαχείρισης της εναέριας κυκλοφορίας σε ολόκληρη την Ευρώπη. Διαχειρίζεται την αεροναυτιλία στην Ευρώπη και υποστηρίζει όλους τους παρόχους αεροναυτιλίας των κρατών μελών του. Η επιτυχημένη σύνδεση όλων των παρόχων αεροναυτιλίας, υπό μία ενιαία διαχείριση, κατέστησε το Eurocontrol παράγοντα υλοποίησης του Ενιαίου Ευρωπαϊκού Ουρανού SES (Single European Sky) αλλά και του έδωσε ενεργό ρόλο στην έρευνα, την ανάπτυξη και την επικύρωση του προγράμματος SESAR.

### **3.3 Ραδιοβοηθήματα – Nav aids**

Από τα πρώτα χρόνια της αεροναυτιλίας η πολιτική αεροπορία για να εξυπηρετήσει την πλοήγηση των αεροσκαφών χρησιμοποιεί ραδιοβοηθήματα εδάφους. Ανάλογα με τη λειτουργία και τη φάση της πτήσης που εξυπηρετούν, τα ραδιοβοηθήματα παρέχουν πληροφορίες αζιμούθιου ή απόστασης στα αεροσκάφη και τα βοηθούν κατά την πλοήγηση τους. Τα ραδιοβοηθήματα που χρησιμοποιεί η πολιτική αεροπορία αναπτύσσονται παρακάτω:

#### **NDB**

Το NDB είναι το πρώτο επίγειο Ραδιοναυτιλιακό Σύστημα, το οποίο χρησιμοποιείται για ραδιοβοήθημα διαδρομής (En-Route) αλλά και Terminal για προσεγγίσεις μη ακριβείας (Non Precision Approach). Ο πομπός του εκπέμπει ένα αδιαμόρφωτο σήμα (CW) στην περιοχή LF (30 KHz-300 KHz) MF (300 KHz-1750 KHz).

#### **DME**

Το DME παρέχει συνεχώς πληροφορία απόστασης προς τα αεροσκάφη. Πρόκειται για σύνθετο σύστημα, αποτελούμενο από έναν πομπό/δέκτη (Interrogator) στο αεροσκάφος και ένα δέκτη/πομπό στο έδαφος (Transponder). Το αεροσκάφος εκπέμπει παλμούς ερώτησης προς το έδαφος το οποίο ακολούθως εκπέμπει παλμούς απάντησης και από την χρονική διαφορά μεταξύ των δύο αυτών παλμών υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ τους. Ένας Transponder μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι 100 αεροσκάφη και εκπέμπει στην μπάντα των UHF σε 126 κανάλια (X mode) από 962 έως 1214 MHz.

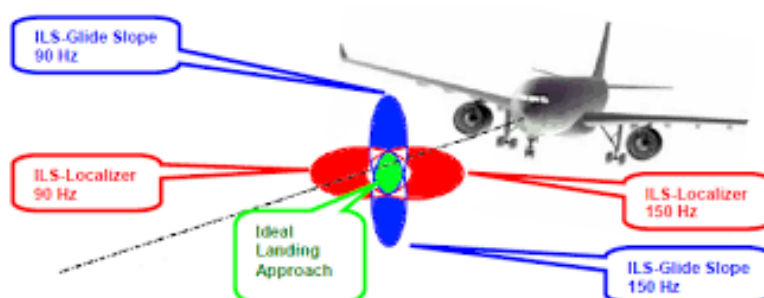
## VOR

Τα προβλήματα που παρουσίαζαν τα NDB οδήγησαν στην ανάπτυξη ενός νέου ραδιοβοηθήματος που ονομάστηκε VOR (VHF Omni Range) και παρέχει ένδειξη αζιμούθιου στα αεροσκάφη. Χωρίζεται σε ραδιοβοήθημα διαδρομής (En-Route) αλλά και Terminal για προσεγγίσεις μη ακριβείας (Non Precision Approach). Σε συνδυασμό με το DME, παρέχει στο αεροπλάνο την πληροφορία της θέσης του, καθώς γνωρίζει το αζιμούθιο και την απόσταση από το σταθμό εδάφους. Εκπέμπει στην μπάντα VHF με συχνότητες από 108 έως 118 MHz και μέσω του υπολογισμού της διαφοράς φάσης δύο σημάτων 30 Hz, βρίσκει το αζιμούθιο.

## ILS

Το ILS ( Instrumental Landing System) είναι ένα ενόργανο σύστημα προσέγγισης το οποίο παρέχει καθοδήγηση ακριβείας σε ένα αεροσκάφος για την προσέγγιση ενός διαδρόμου προσγείωσης και σε ορισμένες περιπτώσεις και κατά την τροχοδρόμηση του. Μπορεί να υποστηρίξει διαδικασίες προσέγγισης ακριβείας από CAT I έως CAT III υπό εξαιρετικά δύσκολες συνθήκες ορατότητας. Αποτελείται από δύο ανεξάρτητα υποσυστήματα, το localizer (LOC) για καθοδήγηση στο οριζόντιο επίπεδο (Lateral Guidance) και το Glide Path (GP) για καθοδήγηση στο κατακόρυφο (Vertical Guidance).

Οι κεραίες του Localizer είναι κατευθυντικές και συνήθως 8 - 14 από αυτές εγκαθίστανται 300μ από το κατώφλι του διαδρόμου. Δύο σήματα των 90 και 150 MHz ελαφρώς δεξιά και αριστερά του διαδρόμου, από μία φέρουσα συχνότητα στην περιοχή των VHF μεταξύ 108 και 112 MHz. Ο δέκτης του αεροσκάφους μετρά τη διαφορά στο βάθος διαμόρφωσης των δύο σημάτων και όταν είναι 0, η κεραία του δέκτη είναι στο κέντρο του LOC και κατ' επέκταση στο κέντρο του διαδρόμου.



Εικόνα 3.1 Διαδικασία προσέγγισης ILS [49]

Οι κεραίες εκπομπής του Glide Path εγκαθίστανται στην μία πλευρά του διαδρόμου κοντά στο κατώφλι προσγείωσης. Όπως και στο LOC, δύο σήματα των 90 και 150 MHz εκπέμπονται σε μία στενή δέσμη το καθένα, ελαφρώς πάνω και κάτω από την επιθυμητή γωνία καθόδου (συνήθως 3°), από μία φέρουσα συχνότητα στην μπάντα των UHF μεταξύ 328.6 MHz και 335.4 MHz. Ο δέκτης του αεροσκάφους μετρά τη διαφορά στο βάθος διαμόρφωσης των δύο σημάτων και όταν είναι 0, η κεραία του δέκτη είναι στο κέντρο του GP και κατ' επέκταση στο κέντρο του κεκλιμένου επιπέδου των 3°.

Υπάρχουν και ραδιοβοηθήματα που χρησιμοποιεί η πολεμική αεροπορία όπως :

### **MLS**

Το MLS όπως και το ILS είναι ραδιοβοήθημα προσγείωσης ακριβείας με εκπομπή στην μικροκυμματική ζώνη συχνοτήτων.

### **TACAN**

Το TACAN μπορεί να θεωρηθεί ως η στρατιωτική έκδοση ενός συστήματος VOR/DME που παρέχει ταυτόχρονα πληροφορίες αζιμούθιου και απόστασης.

### **PAR**

Το PAR (Precision Approach Radar) είναι ένα βοήθημα για προσγείωση ακριβείας και προορίζεται για στρατιωτική χρήση

## **3.4 FAA's NextGen**

Το NextGen είναι το πρόγραμμα εκσυγχρονισμού των συστημάτων που σχετίζονται με τις αεροπορικές μεταφορές των ΗΠΑ, εκπονείται από την FAA και θεωρείται ως ένα από τα πιο φιλόδοξα έργα υποδομής στην ιστορία της. Ξεκίνησε το 2007 και στόχος του είναι να ολοκληρωθεί μέχρι το 2025. Σκοπός του είναι να αυξήσει την ασφάλεια, την αποτελεσματικότητα, την ικανότητα, την προβλεψιμότητα και την ανθεκτικότητα της πολιτικής αεροπορίας των ΗΠΑ. Αυτός ο εκσυγχρονισμός αφορά κυρίως την βελτίωση του τρόπου πτήσης από την αναχώρηση μέχρι την άφιξη, συνδυάζοντας καινοτόμες τεχνολογίες, δυνατότητες και διαδικασίες.

Όσον αφορά στον εκσυγχρονισμό της πλοήγησης, η FAA βρίσκεται σε στάδιο μετάβασης από τα παραδοσιακά βοηθήματα πλοήγησης εδάφους σε ένα ακριβέστερο. σύστημα πλοήγησης με GNSS, μέσω των συστημάτων GBAS και WAAS( FAA's SBAS) που επιτρέπουν στην FAA να δημιουργεί βέλτιστες διαδρομές στον εθνικό εναέριο χώρο σε όλες τις φάσεις μίας πτήσης.

## **3.5 Πρόγραμμα SESAR και Ενιαίος Ευρωπαϊκός Ουρανός - SES**

Ο Ενιαίος Ευρωπαϊκός Ουρανός (**SES**) είναι μια φιλόδοξη πρωτοβουλία που δρομολογήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2004, για τη βελτίωση του τρόπου διαχείρισης της εναέριας κυκλοφορίας ATM στον εναέριο χώρο της Ευρώπης, λόγω της ραγδαίας αύξησης των πτήσεων που γέννησε την ανάγκη για πρόσθετη χωρητικότητα. Ο σχεδιασμός του είναι να οργανωθεί ο εναέριος χώρος σε λειτουργικά τμήματα, ανάλογα με τις ροές κυκλοφορίας και όχι με τα εθνικά σύνορα, κάτι εφικτό μόνο με κοινούς κανόνες και διαδικασίες σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Σκοπός του SES είναι ο εκσυγχρονισμός της εναέριας κυκλοφορίας και των τεχνολογιών διαχείρισης της, ώστε να διασφαλιστεί η ασφαλής και βιώσιμη ανάπτυξη της. Πλέον στην Ευρώπη τρέχει το πρόγραμμα SES II που εκτός από τη χωρητικότητα της εναέριας κυκλοφορίας, εστιάζει περισσότερο στη μείωση του κόστους βελτιώνοντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιδόσεις.

Ως τεχνολογικός πυλώνας υλοποίησης του Ενιαίου Ευρωπαϊκού Ουρανού (SES), το πρόγραμμα **SESAR** είναι υπεύθυνο του τομέα έρευνας και ανάπτυξης της ATM. Θεωρείται ως ένα από τα πιο καινοτόμα έργα υποδομής που έχει δρομολογηθεί ποτέ από την Ευρωπαϊκή Ένωση και στόχος του είναι η οικοδόμηση ενός ευφυούς συστήματος αεροπορικών μεταφορών στην Ευρώπη. Παρέχει προηγμένες τεχνολογίες και διαμορφώνει νέες διαδικασίες στηριζόμενες σε δορυφορικές υπηρεσίες πλοήγησης, όπως είναι το σύστημα EGNOS, που αποτελεί το ευρωπαϊκό σύστημα διόρθωσης αστερισμών GNSS και θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Μία ιδιαίτερα εποικοδομητική συνέργεια που είναι μέρος του ευρωπαϊκού προγράμματος SESAR και βρίσκεται στο τελικό στάδιο της επικύρωσης του, είναι η συνεργασία των δύο συστημάτων επέκτασης GNSS, του GBAS με το SBAS. Συγκεκριμένα αν οι δέκτες αναφοράς ενός συστήματος GBAS μπορούν να δεχτούν εκτός από τα σήματα του αστερισμού GPS και τα σήματα από τους δορυφόρους ενός συστήματος SBAS, όπως του EGNOS ή του WAAS, η ακεραιότητα της τελικής πληροφορίας αυξάνεται και είναι σε θέση να καλύψει τα απαιτούμενα SARPS του ICAO για

προσεγγίσεις ακριβείας CAT-II. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η παρεχόμενη υπηρεσία του GAST-C να αναβαθμιστεί από CAT-I σε CAT-II.

### 3.6 Πρόγραμμα EGNOS

Η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Γεωστατικής Πλοήγησης **EGNOS** (European Geostationary Navigation Overlay Service) είναι το πρώτο πανευρωπαϊκό σύστημα δορυφορικής πλοήγησης. Αποτελείται από τρεις γεωστατικούς δορυφόρους και ένα πλεονάζων δίκτυο τριάντα τεσσάρων επίγειων σταθμών (RIMS) και τεσσάρων κέντρων ελέγχου και εκπομπής. Μόνο ένα από τα τέσσερα κέντρα ελέγχου είναι ενεργό και λειτουργικό, ενώ τα υπόλοιπα τρία ενεργοποιούνται επικουρικά σε περίπτωση κάποιου προβλήματος. Οι σταθμοί RIMS λαμβάνουν τα σήματα GPS και τα αποστέλλουν στο κέντρο ελέγχου, που τα επεξεργάζεται και δημιουργεί μηνύματα διαφορικής διόρθωσης ευρείας περιοχής και μηνύματα ακεραιότητας, που τα αποστέλλει με τη σειρά του σε κάθε δορυφόρο. Μέσω των δορυφόρων πλέον οι πληροφορίες είναι διαθέσιμες προς μετάδοση στους χρήστες. Το EGNOS βελτιώνει το δορυφορικό σύστημα δορυφορικής πλοήγησης GPS επιτρέποντας στους χρήστες να καθορίσουν τη θέση τους με απόκλιση μικρότερη του ενάμισι (1,5) μέτρου και το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές σε τομείς όπως η αεροναυτιλία όπου η ασφάλεια είναι κρίσιμης σημασίας.

Το EGNOS αποτελεί κοινό σχέδιο της ESA (European Satellite Agency), της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και του Ευρωπαϊκού Οργανισμού για την Ασφάλεια της Αεροναυτιλίας (Eurocontrol). Είναι η πρώτη δραστηριότητα της Ευρώπης στον τομέα των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (GNSS) και σε συνδυασμό με το Galileo στο μέλλον θα αποτελεί ολοκληρωμένο σύστημα δορυφορικής πλοήγησης. Η υπηρεσία EGNOS έχει πιστοποιηθεί για χρήση από την πολιτική αεροπορία το 2011 και υπάρχουν στην Ευρώπη επίσημες διαδικασίες ακριβείας APV προσεγγίσεων από το 2016. Πλέον τη κεντρική διαχείριση του έχει αναλάβει ο ευρωπαϊκός φορέας ESSP (European Satellite Service Provider), ο οποίος έχει συνάψει με τους παρόχους αεροναυτιλίας πάνω από εβδομήντα συμφωνίες παροχής της υπηρεσίας EGNOS, οι οποίες περιλαμβάνουν πάνω από εξακόσιες επικυρωμένες διαδικασίες προσέγγισης.



# Κεφάλαιο 4

## GNSS

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί εκτενώς το σύστημα GNSS, ξεκινώντας από την αρχή λειτουργίας του και θα περιγραφούν τα κυριότερα συστήματα που υπάρχουν ανά τον κόσμο, δίδοντας ιδιαίτερη προσοχή στον αστερισμό του GPS (Global Positioning System) αλλά και στο ρωσικό Glonass και το ευρωπαϊκό Galileo. Επίσης θα εισαχθούν οι κύριες πηγές σφαλμάτων που επηρεάζουν την ακρίβεια των συστημάτων GNSS και πώς αυτές μεταφράζονται σε σφάλματα τοποθέτησης. Το κεφάλαιο θα λήξει με την εισαγωγή των απαιτήσεων RNP για τις λειτουργίες του GNSS και με λεπτομερή περιγραφή καθεμιάς από αυτές.

### 4.1 Αρχές Λειτουργίας

Παρόλο που η δορυφορική πλοήγηση είναι μια σχετικά πρόσφατη και πολύπλοκη τεχνολογία, η μαθηματική έννοια στην οποία βασίζεται, εφαρμόστηκε στην αρχαία εποχή και είναι σχετικά απλή. Ο καθορισμός ενός σημείου μέσω δορυφορικού σχηματισμού βασίζεται στον Τριγωνισμό μέσω αποστάσεων (Trilateration), ο οποίος σαν μέθοδος μπορεί να εντοπιστεί ακόμα και στους αρχαίους Αιγυπτίους, για το χτίσιμο των πυραμίδων. [38]. Η κύρια ιδέα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1, για την περίπτωση καθορισμού θέσης σε δύο διαστάσεις (2D).



Σχήμα 4.1 Τριγωνισμός αποστάσεων στο επίπεδο

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, με τη μέτρηση της απόστασης ενός σημείου από τουλάχιστον τρεις δορυφόρους μπορεί να καθοριστεί η θέση αυτού του σημείου. Σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης ο καθορισμός ενός σημείου στο επίπεδο δεν είναι αρκετός, αφού είναι απαραίτητη και η πληροφορία ύψους. Για να υπολογιστεί θα ήταν απαραίτητο να μετρηθεί η απόσταση από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους, καθώς οι τρεις δορυφόροι δίνουν δύο πιθανά στοιχεία ύψους, άρα και δύο πιθανές τρισδιάστατες (3D) θέσεις. Ωστόσο η μία από αυτές μπορεί να εξαιρεθεί, καθώς είναι συνήθως πολύ μακριά από την επιφάνεια της Γης. Βέβαια, σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης απαιτείται και ένα τέταρτος δορυφόρος για την διόρθωση του σφάλματος χρόνου του συστήματος ώστε το συνολικό αποτέλεσμα να μην είναι εσφαλμένο.

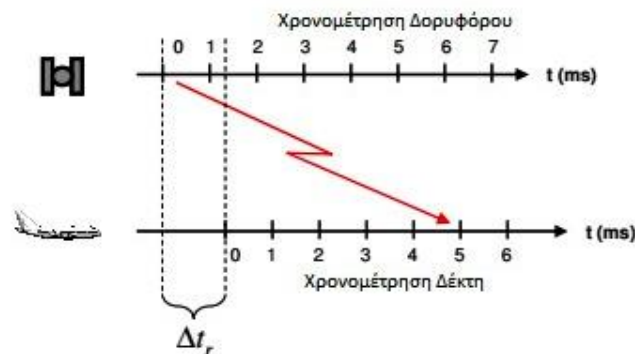
Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη ως  $(x_i, y_i, z_i)$  τις συντεταγμένες του δορυφόρου  $i$  σε ένα 3D καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων και  $r_i$  την απόσταση του από τον χρήστη, οι συντεταγμένες της θέσης του χρήστη,  $(x_u, y_u, z_u)$ , που εκφράζεται στο ίδιο καρτεσιανό σύστημα, προσδιορίζονται από την ευκλείδεια γεωμετρία ως [39]:

$$\begin{aligned}
 r_1 &= \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} \\
 r_2 &= \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} \\
 r_3 &= \sqrt{(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 + (z_3 - z_u)^2} \\
 r_4 &= \sqrt{(x_4 - x_u)^2 + (y_4 - y_u)^2 + (z_4 - z_u)^2}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Οι εξισώσεις (4.1) είναι γνωστές ως εξισώσεις πλοήγησης [39]. Οι όροι εφαρμογής των εξισώσεων πλοήγησης είναι ότι πρέπει να είναι γνωστή η θέση των δορυφόρων και η απόσταση τους από τον χρήστη. Ο προσδιορισμός αυτής της απόστασης γίνεται μέσω της μέτρησης του χρόνου που χρειάζεται ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα να ταξιδέψει από τον δορυφόρο στον δέκτη. Ο συγκεκριμένος χρόνος  $\Delta t$ , καθορίζεται με δύο παραδοχές, ότι ο δέκτης γνωρίζει τον ακριβή χρόνο που το σήμα εκπέμφθηκε από τον δορυφόρο και ότι μπορεί επίσης να καθορίσει με ακρίβεια την ώρα άφιξης του σε αυτόν. Έτσι η απόσταση από τον δορυφόρο  $i$  με βάση τον χρόνο ισούται με [39]:

$$r_i = c \cdot \Delta t_i \quad (4.2)$$

όπου το  $c$  αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του φωτός στο κενό. Ωστόσο, οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται η εξίσωση (4.2) μπορεί να εισαγάγουν σημαντικά σφάλματα στον υπολογισμό της απόστασης. Παρόλο που ο δέκτης μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια τον χρόνο της άφιξης του σήματος, μπορεί να κάνει κάποιο σφάλμα στον καθορισμό του χρόνου κατά τον οποίο εκπέμφθηκε. Δηλαδή, λόγω της μικρής απόκλισης μεταξύ των ρολογιών του δορυφόρου και του χρήστη μπορεί να υπάρξει διαφορά στον ορισμό της ακριβούς ώρας κατά την οποία εκπέμπεται το σήμα. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Επίδραση απόκλισης μεταξύ ρολογιών δορυφόρου και χρήστη

Στο σχήμα φαίνεται πως ο μη συγχρονισμός των δύο ρολογιών προκαλεί διαφορά στον υπολογισμό της διάρκειας της μεταφοράς του εκπεμπόμενου σήματος, η οποία είναι ίση περίπου με ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου, όση είναι η χρονική απόκλιση των ρολογιών. Λόγω του ότι η καθυστέρηση  $\Delta t_r$  υφίσταται στο ρολόι του χρήστη, ο χρόνος του σήματος θα είναι μικρότερος, οπότε και η υπολογιζόμενη απόσταση με βάση την σχέση (4.2) θα είναι μικρότερη κατά περίπου 300 χιλιόμετρα. Επομένως, για να εξαλειφθεί αυτό το σφάλμα, οι εξισώσεις πλοήγησης (4.1) διαφοροποιούνται ως εξής [39]:

$$\begin{aligned}
\rho_1 &= \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r \\
\rho_2 &= \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r \\
\rho_3 &= \sqrt{(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 + (z_3 - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r \\
\rho_4 &= \sqrt{(x_4 - x_u)^2 + (y_4 - y_u)^2 + (z_4 - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r
\end{aligned}
\tag{4.3}$$

όπου πλέον, μετά την εισαγωγή της καθυστέρησης του ρολογιού του δέκτη, αντί να μιλάμε για αποστάσεις  $r$  του χρήστη από τους δορυφόρους, χρησιμοποιείται ο όρος 'ψευδοαπόσταση'  $\rho$ . Ως εκ τούτου, μετρήσεις από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους χρειάζονται για τον προσδιορισμό των 3D συντεταγμένων θέσης του χρήστη και του σφάλματος ρολογιού.

Τα εκπεμπόμενα σήματα των δορυφόρων δεν χρησιμεύουν μόνο για τον υπολογισμό της ψευδοαπόστασης αλλά περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων, γνωστό ως δεδομένα πλοήγησης, από τα οποία ένα κομμάτι χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης των δορυφόρων.

## 4.2 Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης

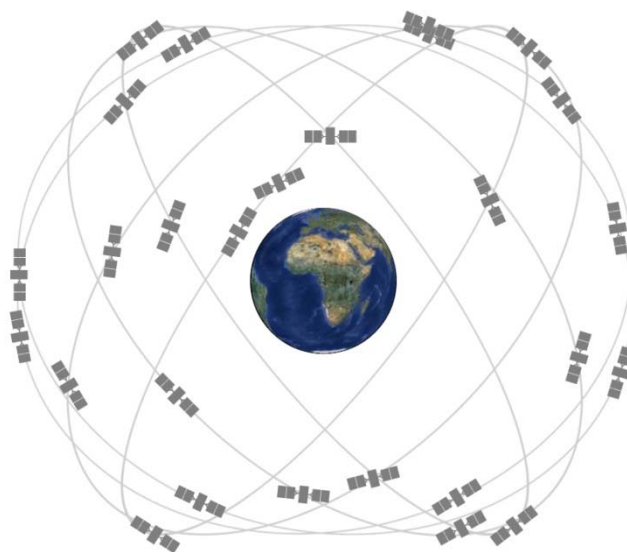
Υπάρχουν παγκοσμίως σε ανάπτυξη αρκετοί αστερισμοί δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης, από τους οποίους δύο λειτουργούν σύμφωνα με τα SARPs που ορίζονται από τον ICAO, το σύστημα GPS που παρέχεται από τις ΗΠΑ και το ρωσικό GLONASS, στα οποία και θα γίνει εκτενής αναφορά παρακάτω. Αναφορά θα γίνει όμως και στο Galileo λόγω της ευρωπαϊκής του προέλευσης, παρότι ακόμη δεν έχει πιστοποιηθεί από τον οργανισμό ICAO.

### 4.2.1 Global Positioning System – GPS

Το Global Positioning System (GPS) είναι το πρώτο πλήρως λειτουργικό Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GNSS) που αναπτύχθηκε στη δεκαετία του '70 από την κυβέρνηση των Ηνωμένων Πολιτειών αρχικά για στρατιωτικούς σκοπούς και εφαρμογές. Το σύστημα αργότερα το 1983, διατέθηκε για χρήση από τους πολίτες και έχει εξυπηρετήσει από τότε, πάνω από ένα δισεκατομμύριο χρήστες. Μάλιστα από το 1994 και μετά οι ΗΠΑ προσφέρουν δωρεάν τις υπηρεσίες GPS για τις ανάγκες της πολιτικής αεροπορίας, τόσο σε επίπεδο χρήσης όσο και σε επίπεδο ανάπτυξης της αεροναυτιλίας.

Η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται είναι ο προσδιορισμός θέσης μέσω της μέτρησης τεσσάρων << ψευδοαποστάσεων >> μεταξύ του χρήστη και των δορυφόρων. Για το λόγο αυτό οι τροχιές των δορυφόρων σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εφικτή η παρατήρηση τεσσάρων τουλάχιστον δορυφόρων από οποιοδήποτε σχεδόν σημείο του πλανήτη σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Ο λόγος που απαιτούνται οι αποστάσεις από τέσσερις δορυφόρους και όχι από τρεις που χρειάζεται η μέθοδος προσδιορισμού θέσης μέσω τριγωνισμού (Trilateration), είναι για να προσδιορισθεί η διαφορά ανάμεσα στο μη ακριβές χρονόμετρο της συσκευής χρήστη και το ακριβές χρονόμετρο του δορυφόρου. Η διαφορά αυτή είναι που δημιουργεί το σφάλμα στη μέτρηση της απόστασης μεταξύ χρήστη και δορυφόρου, για αυτό δίνεται και ο όρος ψευδοαπόσταση. Ένα πλήρες σύστημα GPS θεωρείται μία ολοκληρωμένη δομή συνεχούς λειτουργίας αλλά και συνεχούς παρακολούθησης, ελέγχου και διόρθωσης των δορυφόρων. Αποτελείται από τρία τμήματα: το διαστημικό τμήμα που περιλαμβάνει τους δορυφόρους, το τμήμα ελέγχου με τους επίγειους σταθμούς και το τερματικό τμήμα όπου γίνεται η εκμετάλλευση του συστήματος από τους χρήστες μέσω παντός είδους τερματικών συσκευών.

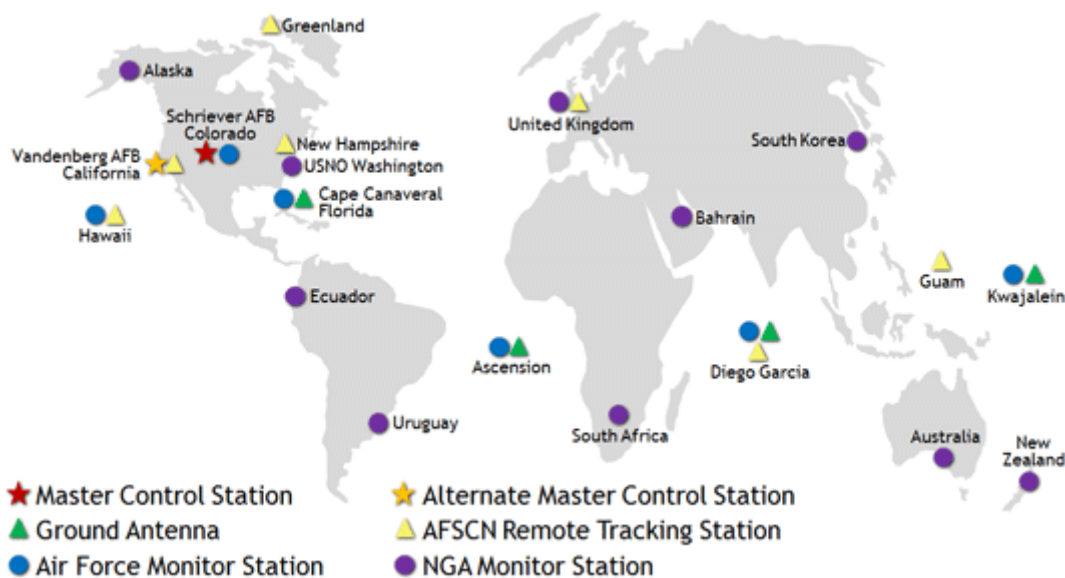
Το **διαστημικό τμήμα GPS** περιλαμβάνει μία διάταξη 24ων δορυφόρων που πετούν σε κυκλικές τροχιές μέσου ύψους (Medium Earth Orbits, MEO) σε υψόμετρο περίπου 20.200 χλμ., με γωνία κλίσης 55° μοιρών ως προς τον ισημερινό και με διάρκεια μίας πλήρους περιστροφής γύρω από τη Γη περίπου 12 ωρών. Οι δορυφόροι είναι διατεταγμένοι ανά τετράδες σε έξι ισαπέχοντα τροχιακά επίπεδα γύρω από τη γη. Ωστόσο για να διατηρηθεί η κάλυψη όταν κάποιος δορυφόρος από τους 24 συντηρείται ή παροπλίζεται, υπάρχουν και άλλοι διαθέσιμοι δορυφόροι που πετούν ταυτόχρονα, χωρίς να θεωρούνται ενεργό μέρος της βασικής διάταξης.



Σχήμα 4.3 Δορυφορικός Σχηματισμός του συστήματος GPS [50]

Τον Ιούνιο του 2011 μάλιστα, ολοκληρώθηκε με επιτυχία μία αναβάθμιση και επέκταση της διάταξης των δορυφόρων GPS, γνωστή ως διαμόρφωση "Expandable 24". Τρεις από τους 24 δορυφόρους επεκτάθηκαν και έξι επανατοποθετήθηκαν, έτσι ώστε τρεις από τους επιπλέον δορυφόρους να γίνουν μέρος της ενεργής διάταξης του συστήματος, αυξάνοντας έτσι τους ενεργούς δορυφόρους σε 27, με αποτέλεσμα τη βελτιωμένη κάλυψη στα περισσότερα μέρη του κόσμου.

Το **τμήμα ελέγχου GPS** αποτελείται από ένα δίκτυο επίγειων εγκαταστάσεων παγκόσμιας κλίμακας που παρακολουθεί τους δορυφόρους, παρακολουθεί τις μεταδόσεις τους, εκτελεί αναλύσεις και στέλνει εντολές και δεδομένα στο σύστημα. Η τροφοδότηση των δορυφόρων με πληροφορίες από τους σταθμούς ελέγχου γίνεται ανά 8 ώρες. Το τρέχον τμήμα επιχειρησιακού ελέγχου (OCS) αποτελείται από έναν κύριο σταθμό ελέγχου στο Colorado Springs των ΗΠΑ, έναν εναλλακτικό κύριο σταθμό ελέγχου στην Καλιφόρνια, 11 κεραίες εντολών και ελέγχου και 16 τοποθεσίες παρακολούθησης διασκορπισμένες ανά τον πλανήτη. Οι θέσεις αυτών των εγκαταστάσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω χάρτη



Σχήμα 4.4 Δίκτυο επίγειων εγκαταστάσεων συστήματος GPS [50]

Το **τερματικό τμήμα** περιλαμβάνει τους δέκτες GPS που λαμβάνουν τα σήματα από τους δορυφόρους, τα επεξεργάζονται και προσδιορίζουν τη θέση του χρήστη. Ένα πρότυπο μοντέλο δέκτη GPS αποτελείται από την κεραία που λαμβάνει τα σήματα και τα μηνύματα δεδομένων που μεταδίδονται από τους δορυφόρους, αφού πρώτα έχει συντονιστεί μέσω ενός ταλαντωτή κρυστάλλου στις σωστές συχνότητες και από τον επεξεργαστή, που τα επεξεργάζεται και εξάγει την πληροφορία χρόνου και θέσης. Σήμερα, οι δέκτες GPS μπορούν να συμπεριληφθούν σε

πάσης φύσεως συσκευές που χρησιμοποιούνται από τους χρήστες, από κινητά τηλέφωνα και δέκτες αυτοκινήτου, μέχρι ρολόγια χειρός, φωτογραφικές μηχανές και δοχεία μεταφοράς, με τη χρήση τους να περιορίζεται μόνο από τη φαντασία του ανθρώπου. Το GPS αποτελεί πλέον όπως και το Διαδίκτυο, βασικό στοιχείο της παγκόσμιας υποδομής πληροφοριών.

Όλοι οι δορυφόροι GPS αναμεταδίδουν συνεχώς ένα σύνθετο μήνυμα πλοήγησης. Αυτό το μήνυμα περιέχει τις βασικές πληροφορίες του δορυφόρου, όπως το ρολόι του, την τροχιά του και άλλες παραμέτρους. Το μήνυμα πλοήγησης αποστέλλεται σε πλαίσια (frames), διαμορφωμένα στα 50 bps. Κάθε μήνυμα αποτελείται από 25 frames (30 sec), ενώ κάθε frame αποτελείται από 4 subframes στα οποία περιέχονται οι παράμετροι.

Η μετάδοση αυτών των πληροφοριών γίνεται από δύο φέρουσες συχνότητες στη ζώνη L, την L<sub>1</sub> στα 1575,42 MHz και την L<sub>2</sub> στα 1227,60 MHz, οι οποίες παράγονται από την βασική συχνότητα των 10,23 MHz.

Οι φέρουσες συχνότητες διαμορφώνονται από ένα κωδικοποιημένο σήμα ψευδοθορύβου, υπό τον κώδικα PRN (Pseudo Random Noise Code) και συγκεκριμένα από τους τρεις κώδικες P, C/A και D.

Ο κώδικας **P** (Precision Code) είναι κώδικας ακριβείας που εκπέμπεται και από τις δύο φέρουσες, με συχνότητα ίση με τη βασική 10,23 MHz και επαναλαμβάνεται κάθε 267 μέρες. Πρόκειται για κρυπτογραφημένο κώδικα, στον οποίο έχουν πρόσβαση μόνο εξουσιοδοτημένοι χρήστες.

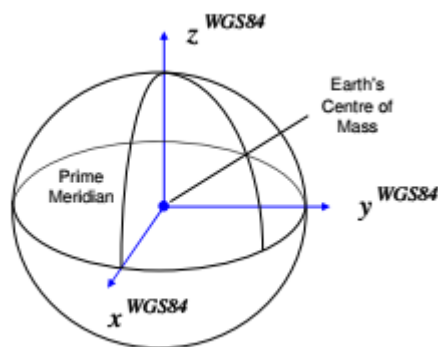
Ο κώδικας **C/A** αποτελείται από μία ροή 1023 ψηφίων που επαναλαμβάνεται κάθε 1msec. Σε κάθε δορυφόρο έχει εκχωρηθεί ένας μοναδικός κωδικός C/A, ο οποίος επιτρέπει στους δέκτες GPS να εντοπίζουν την ταυτότητα του. Ο κώδικας C/A διαμορφώνεται στη φέρουσα συχνότητα L<sub>1</sub> από την οποία και εκπέμπεται, ενώ έχει 10 φορές μικρότερη ακρίβεια από τον κώδικα P

Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται δύο φέρουσες συχνότητες είναι για την ακύρωση του σφάλματος που προέρχεται από την ιονόσφαιρα, ένα από τα κυριότερα σφάλματα στον προσδιορισμό θέσης. Έτσι βελτιώνεται σημαντικά η ακρίβεια της πληροφορίας που παρέχεται από το σύστημα, Παρόλα αυτά αν και οι δύο κωδικοί δημοσιεύονται δημοσίως, λόγω του ότι ο κώδικας P είναι κρυπτογραφημένος από την αμερικανική κυβέρνηση, η χρήση του σήματος L<sub>2</sub> που τον περιέχει είναι περιορισμένη και διαθέσιμη μόνο σε εξουσιοδοτημένους χρήστες. Με αυτόν τον τρόπο, η υπηρεσία που παρέχεται σε χρήστες με πρόσβαση μόνο στο σήμα L<sub>1</sub> είναι

γνωστή ως υπηρεσία εντοπισμού θέσης SPS (Standard Positioning System) και η υπηρεσία σε εξουσιοδοτημένους χρήστες διπλής συχνότητας  $L_1$  και  $L_2$  είναι γνωστή ως PPS (Precise Positioning System).

Ο κώδικας **D** (Data Code) περιέχει το μήνυμα πλοήγησης. Τα κυριότερα δεδομένα που περιλαμβάνονται στο μήνυμα πλοήγησης είναι οι πληροφορίες σχετικά με τη θέση των δορυφόρων και την λειτουργική τους κατάσταση. Οι πληροφορίες της θέσης των δορυφόρων είναι γνωστές ως δεδομένα Ephemeris και Almanac. Κάθε δορυφόρος εκπέμπει τα δικά του Ephemeris δεδομένα, με πληροφορίες για τον καθορισμό της θέσης του με ακρίβεια ως συνάρτηση του χρόνου. Από την άλλη, τα Almanac δεδομένα περιέχουν πληροφορίες θέσης κατά προσέγγιση για όλους τους δορυφόρους GPS και εκπέμπονται από όλους. Άλλα σημαντικά δεδομένα που περιλαμβάνονται στο μήνυμα πλοήγησης είναι δεδομένα χρονισμού, τα οποία περιλαμβάνουν το χρόνο εκπομπής του σήματος από το δορυφόρο σε κάθε χρονική στιγμή και τις διορθώσεις των ατμοσφαιρικών καθυστερήσεων των δορυφορικών χρονομέτρων.

Τέλος πολύ σημαντικό για την ερμηνεία των πληροφοριών των δορυφόρων GPS από τους δέκτες, αποτελούν οι αναφορές χρόνου και χώρου που χρησιμοποιούνται από το σύστημα. Σαν επίσημη αναφορά χρόνου, επινοήθηκε ο χρόνος GPS με ονομασία GPST, ο οποίος ξεκίνησε να μετράει από τα μεσάνυχτα μεταξύ της 5ης και 6ης Ιανουαρίου του 1980. Το επίσημο σύστημα αναφοράς χώρου στο GPS είναι το WGS84 (World Geodetic System) που αναπτύχθηκε το 1984. Πρόκειται για ένα γεωδαιτικό σύστημα που προσαρμόζεται όσο πιο βέλτιστα στο ελλειψοειδές σχήμα της γης. Όλες οι θέσεις, συμπεριλαμβανομένων των δορυφόρων και των θέσεων των χρηστών, που συμμετέχουν στο GPS δηλώνονται και υπολογίζονται σε συντεταγμένες WGS84



Σχήμα 4.5 Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα WGS84 [50]



## 4.2.2 Global Navigation Satellite System - GLONASS

Το σύστημα GLONASS παρέχει προσδιορισμό θέσης και ταχύτητας με βάση τη μέτρηση του χρόνου της διέλευσης και της μετατόπισης Doppler των RF σημάτων που μεταδίδονται από τους δορυφόρους του. Το GLONASS εκπέμπει δύο τύπους σημάτων πλοήγησης, ένα σήμα τυπικής ακριβείας (CSA) και ένα υψηλής (CHA). Το σύστημα λειτουργεί από το Υπουργείο Άμυνας της Ρωσικής Ομοσπονδίας. Το 1996, η Ρωσική Ομοσπονδία προσέφερε την υπηρεσία τυπικής ακριβείας (CSA) για τις ανάγκες της διεθνούς πολιτικής αεροπορίας και τον ICAO. Από τότε οι τυπικές υπηρεσίες εντοπισμού θέσης και χρονισμού ακριβείας είναι διαθέσιμες σε όλους τους χρήστες σε παγκόσμια βάση, όμως τα τελευταία χρόνια, λόγω των οικονομικών προβλημάτων της Ρωσικής Ομοσπονδίας υπάρχουν αρκετά προβλήματα, με αποτέλεσμα τη μη διαθεσιμότητα αρκετών δορυφόρων.

Όπως το σύστημα GPS, έτσι και το GLONASS αποτελείται από τρία τμήματα: το διαστημικό τμήμα, το τμήμα ελέγχου και το τμήμα του χρήστη.

Το **διαστημικό τμήμα** αποτελείται από 24 δορυφόρους σε επιχειρησιακή λειτουργία και δύο εναλλακτικούς. Οι δορυφόροι πετούν σε κυκλικές τροχιές μέσου ύψους (Medium Earth Orbits, MEO) σε υψόμετρο περίπου 19.100 χλμ., με γωνία κλίσης 64,8° μοιρών ως προς τον ισημερινό και τροχιακή περίοδο 11 ωρών και 15 λεπτών. Οι δορυφόροι είναι διατεταγμένοι ανά οκτάδες σε τρία ισαπέχοντα τροχιακά επίπεδα γύρω από τη γη.

Το **τμήμα ελέγχου** περιλαμβάνει έναν κύριο σταθμό ελέγχου και σταθμούς παρακολούθησης και αποστολής παραμέτρων διόρθωσης στους δορυφόρους. Εκτελεί λειτουργίες δορυφορικής παρακολούθησης και ελέγχου και καθορίζει τα δεδομένα που πρέπει να διαμορφώνονται στα κωδικοποιημένα δορυφορικά σήματα πλοήγησης. Τα δεδομένα μέτρησης που συλλέγονται από τους σταθμούς παρακολούθησης επεξεργάζονται στον κύριο σταθμό ελέγχου, αφού διορθωθούν τα δεδομένα πλοήγησης και διορθωθεί ο χρονισμός, μεταφορτώνονται στους δορυφόρους μέσω των σταθμών αποστολής.

Ο κάθε δορυφόρος εκπέμπει ένα σύνθετο μήνυμα που περιλαμβάνει δορυφορικές συντεταγμένες, διανυσματικά στοιχεία όπως ταχύτητα, διορθώσεις στο χρόνο του συστήματος και πληροφορίες της λειτουργικής του κατάστασης. Η εκπομπή όπως και στο GPS, γίνεται στη ζώνη L αλλά με την τεχνική FDMA (Frequency Division Multiple Access), όπου υπάρχει πολλαπλή πρόσβαση από τους χρήστες με διαίρεση συχνότητας. Τέλος ως γεωδαιτικό σύστημα, το

GLONASS χρησιμοποιεί το PZ-90 που δημιουργήθηκε από τη Ρωσική ομοσπονδία το 1990 για τον σκοπό αυτό.

### 4.2.3 Galileo

Το 2016 το Galileo το ευρωπαϊκό δορυφορικό σύστημα πλοήγησης εγκαινίασε τις αρχικές υπηρεσίες του. Πρόκειται για ένα προηγμένο σύστημα που προσφέρει εγγυημένο και πολύ ακριβές στίγμα παγκοσμίως καθώς και χρονικό προσδιορισμό μεγάλης ακρίβειας. Μόλις αναπτυχθεί πλήρως το 2020 θα αποτελείται από 24 λειτουργικούς δορυφόρους καθώς και από 6 εφεδρικούς σε τρία τροχιακά επίπεδα με ύψος 23.000 χλμ. πάνω από την επιφάνεια της γης και με κλίση σε γωνία 56° μοιρών με τον ισημερινό. Το σύστημα υποστηρίζεται από διάφορους επίγειους σταθμούς αισθητήρων και κέντρα ελέγχου σε όλο τον κόσμο.

Το Galileo είναι αυτόνομο αλλά συνεργάζεται και με άλλα υπάρχοντα συστήματα πλοήγησης και πολλές συσκευές μάλιστα συνδυάζουν δύο ή τρεις αστερισμούς δορυφόρων ώστε να αυξήσουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία. Το Galileo είναι το μοναδικό δορυφορικό σύστημα πλοήγησης υπό μη στρατιωτικό έλεγχο όταν όλα τα άλλα συστήματα τα χειρίζεται ο στρατός και έτσι προσφέρει στην Ευρώπη και στους πολίτες της ανεξαρτησία και κυριαρχία, καθώς η λειτουργία του και οι δυνατότητες του είναι ανεξάρτητες από μία ενδεχόμενη απενεργοποίηση ή υποβάθμιση των άλλων συστημάτων πλοήγησης.

Εκπέμπει σε τρεις μπάντες, την E<sub>1</sub>, την E<sub>5</sub> και την E<sub>6</sub>, κάτι το οποίο δίνει υψηλή ακρίβεια εντοπισμού στίγματος και βελτίωση της διαθεσιμότητας του ακόμα και υπό τις πιο ακραίες συνθήκες. Παρέχει επίσης νέες υπηρεσίες όπως έρευνα και διάσωση και μία ασφαλή υπηρεσία κρατικών εφαρμογών την PRS. Επίσης μπορεί να καλύψει εμπορικές εφαρμογές.

Εκτός από τα GNSS συστήματα που αναπτύχθηκαν παραπάνω, υπάρχουν και άλλα, που λειτουργούν από διάφορες χώρες, τα κυριότερα των οποίων είναι τα παρακάτω:

- Δορυφορικό σύστημα πλοήγησης **BeiDou** (BDS). Το BeiDou, ονομαζόμενο παλαιότερα ως Compass, ανήκει και λειτουργεί από τη Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας. Η Κίνα επεκτείνει αυτήν την περίοδο το σύστημα για να παρέχει παγκόσμια κάλυψη με 35 δορυφόρους μέχρι το 2020.

- **IRNSS** (Indian Regional Navigation Satellite System). Το IRNSS ανήκει και λειτουργεί από την κυβέρνηση της Ινδίας, ενώ είναι ένα αυτόνομο σύστημα 7 δορυφόρων, σχεδιασμένο να καλύπτει την περιοχή της Ινδίας και 1500 χλμ. γύρω από την ενδοχώρα της.
- **QZSS** (Quasi-Zenith Satellite System). Το QZSS ανήκει στην κυβέρνηση της Ιαπωνίας και λειτουργεί από την QZS System Service Inc. (QSS). Το QZSS είναι συμπληρωματικό του GPS για τη βελτίωση της κάλυψης στην Ανατολική Ασία και την Ωκεανία. Ωστόσο η Ιαπωνία σχεδιάζει το 2023 να επεκτείνει το σύστημα με 7 δορυφόρους ώστε να παρέχει αυτόνομη υπηρεσία.

### 4.3 Συστήματα Διόρθωσης GNSS – GNSS Augmentation Systems

Τα συστήματα επέκτασης GNSS βελτιώνουν τη λειτουργία των δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης ώστε αυτά να μπορέσουν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις ασφαλείας που ορίζει ο ICAO για την αεροναυτιλία.

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι απαιτήσεις του ICAO για να επιτευχθούν διαδικασίες ακριβείας (PA) CAT I με GNSS, σε αντιπαράβολή με τις συνήθεις αποδόσεις του αστερισμού GPS, όπου φαίνεται πως δεν τις καλύπτει χωρίς διόρθωση [14].

PA CAT I	Μετρικές	GPS
Οριζόντια 16 m Κάθετα 4 m	Ακρίβεια (95%)	Οριζόντια 13 m Κάθετα 23 m
99 %	Διαθεσιμότητα	99 % (με ABAS)
$1 - 2 \times 10^{-7}$ ανά προσέγγιση	Ακεραιότητα	Καθόλου
$1 - 8 \times 10^{-7}$	Συνέχεια	Καθόλου

Πίνακας 4.1 Απαιτήσεις για PA CAT I με GNSS και επιδόσεις GPS

Τα συστήματα επέκτασης ταξινομούνται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες: Στην κατηγορία αεροσκάφους, στην κατηγορία δορυφόρου και στην κατηγορία εδάφους. Το κύριο

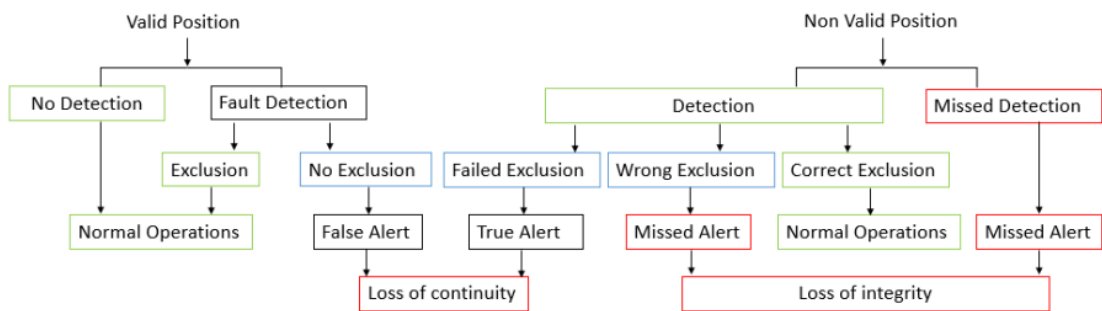
χαρακτηριστικό τους είναι η εξασφάλιση της ακεραιότητας στο GNSS. Το SBAS και το GBAS βελτιώνουν επίσης και την ακρίβεια του GNSS καθώς παρέχουν διορθώσεις ψευδοαπόστασης, μία πηγή σφάλματος που θα παρουσιασθεί σε επόμενη ενότητα.

### **4.3.1 Aircraft Based Augmentation System – ABAS**

Το ABAS είναι ένα σύστημα επέκτασης που χρησιμοποιεί αποκλειστικά τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες στο αεροσκάφος. Μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο πληροφορίες GNSS ή μια υβριδική λύση πλοήγησης που ενσωματώνει άλλους αισθητήρες όπως βαρομετρικά αλτίμετρα ή συστήματα αδρανειακής πλοήγησης (INS).

Το ABAS μέσω της διαδικασίας RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring), παρακολουθεί την ακεραιότητα της θέσης, χρησιμοποιώντας περιττές πληροφορίες που αποστέλλονται από τον GNSS σχηματισμό. Σε αντίθεση με τα άλλα συστήματα επέκτασης, GBAS και SBAS, το ABAS δεν βελτιώνει την ακρίβεια της θέσης χωρίς τη χρήση πρόσθετων συστημάτων όπως αδρανειακών αισθητήρων. Η παρακολούθηση της ακεραιότητας στο ABAS [40], πραγματοποιείται εντός του αεροσκάφους μέσω μηχανισμών ανίχνευσης και αποκλεισμού σφαλμάτων.

Η ανίχνευση και ο αποκλεισμός σφαλμάτων FDE (Fault Detection and Exclusion) είναι ένας μηχανισμός ελέγχου και επεξεργασίας εισερχόμενων δεδομένων που παρέχει στο ABAS αυτόνομη παρακολούθηση της ακεραιότητας της θέσης. Το FDE αποτελείται από δύο διαφορετικά μέρη: το κομμάτι της ανίχνευσης σφαλμάτων και το κομμάτι του αποκλεισμού τους. Το τμήμα ανίχνευσης σφάλματος FD (Fault Detection) ανιχνεύει την ύπαρξη μεγάλης απόκλισης θέσης που δεν θα είναι αποδεκτή για μία δεδομένη φάση πτήσης και έτσι διασφαλίζει την ακεραιότητα των λαμβανόμενων σημάτων. Μόλις επιτευχθεί η ανίχνευση, το τμήμα αποκλεισμού σφάλματος αποκλείει την πηγή του μη αποδεκτού σφάλματος θέσης, επιτρέποντας την επιστροφή της πλοήγησης σε κανονική λειτουργία χωρίς καμία διακοπή της υπηρεσίας. Η διαδικασία FDE αναλύεται λεπτομερώς στο παρακάτω σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6 Διαδικασία ελέγχου Συνέχειας και Ακεραιότητας [11]

Εκτός από τη λειτουργία RAIM, όπου χρησιμοποιούνται αποκλειστικά οι πληροφορίες GNSS, υφίσταται και η λειτουργία AAIM (Aircraft Autonomous Integrity Monitoring) όπου χρησιμοποιούνται και αισθητήρες επί του αεροσκάφους (βαρομετρικά αλτίμετρα και συστήματα αδρανειακής πλοήγησης INS). Για την αξιολόγηση της ακεραιότητας της θέσης και τον καθορισμό των επιπέδων ασφαλείας, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος, ο οποίος ανατροφοδοτείται από τη συσσώρευση συστηματικών σφαλμάτων και τη μελέτη της κατανομής τους.

#### 4.3.2 Satellite Based Augmentation System – SBAS

Τα συστήματα SBAS παρέχουν επέκταση GNSS σε μια ευρεία περιοχή και έχουν την ικανότητα να υποστηρίζουν πολλές από τις φάσεις των πτήσεων, όπως κατά τη διάρκεια της διαδρομής, της απογείωσης, αλλά και προσέγγισης σε ένα αεροδρόμιο. Εκτός από την παροχή πληροφοριών ακεραιότητας, το SBAS παρέχει διορθώσεις ψευδοαπόστασης, μέσω εφαρμογής διαφορικής διόρθωσης.

Ένα σύστημα SBAS αποτελείται από το τμήμα εδάφους και το τμήμα δορυφόρων. Το δίκτυο εδάφους περιλαμβάνει ένα γεωγραφικά καταναμημένο σύνολο επίγειων σταθμών αναφοράς, που παρακολουθούν συνεχώς μέσω δεκτών τους δορυφόρους GNSS. Ανάλογα με την αρχιτεκτονική του συστήματος και το απαιτούμενο επίπεδο απόδοσης, χρειάζονται 20 με 35 σταθμοί αναφοράς για να καλύψουν μια ήπειρο. Στη συνέχεια, οι μετρήσεις αποστέλλονται σε περιττούς κεντρικούς σταθμούς, οι οποίοι επεξεργάζονται τα δεδομένα και προχωρούν σε διαφορικές διορθώσεις ρολογιού και τροχιάς, διορθώσεις ιονοσφαιρικών επιδράσεων και σε υπολογισμούς παραμέτρων ακεραιότητας του δορυφόρου. Όλες οι διορθώσεις και τα δεδομένα ακεραιότητας στη συνέχεια συσκευάζονται σε ένα μήνυμα που μεταδίδεται από γεωστατικούς δορυφόρους στους εναέριους χρήστες. Με βάση τον αριθμό των σταθμών ελέγχου και την

οικονομική ευρωστία του κάθε συστήματος, το SBAS σήμερα μπορεί να εξυπηρετήσει διαδικασίες προσέγγισης μέχρι και APV I ή II [41].

Υπάρχουν αρκετά συστήματα SBAS ανά τον πλανήτη, από τα οποία τα κυριότερα είναι:

- Το **WAAS** (Wide Area Augmentation System) το οποίο λειτουργεί από την FAA των ΗΠΑ
- Το **EGNOS** (European Geostationary Navigation Overlay Service) που λειτουργεί υπό την ESA και τον ESSP, για το οποίο έγινε εκτενής αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο και
- Το **MSAS** (Multi-functional Satellite Augmentation System), το οποίο λειτουργεί από το Γραφείο Πολιτικής Αεροπορίας της Ιαπωνίας (JCAB)

Αυτή τη στιγμή τα παραπάνω συστήματα SBAS επεκτείνουν μόνο το GPS. Με την προσθήκη νέων αστερισμών GNSS, όπως το GLONASS και το GALILEO και καθώς τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα είναι διαλειτουργικά, τα αποτελέσματα θα βελτιωθούν σε μεγάλο βαθμό. Ήδη η έννοια της Διπλής Συχνότητας (Dual Frequency) / Πολύ-Αστερισμών (Multi-Constellation) DF /MC έχει εισαχθεί και βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης[42]. Μάλιστα το DF /MC SBAS αναμένεται να τυποποιηθεί το 2022, με τους αντίστοιχους δέκτες να πιστοποιούνται στην Ευρώπη μετά το 2025 [43]

### 4.3.3 Ground Based Augmentation System - GBAS

Τα συστήματα GBAS παρέχουν επέκταση GNSS τοπικής εμβέλειας αρκετών ναυτικών μιλίων, ικανή να καλύψει την περιοχή ενός αεροδρομίου και να υποστηρίξει τις αεροπορικές διαδικασίες σε αυτό. Μπορεί να καλύψει όλες τις δύσκολες φάσεις μίας πτήσης όπως της απογείωσης, της προσγείωσης, τους ελιγμούς επιφανείας και της προσέγγισης. Στόχος του GBAS είναι να παρέχει διαδικασίες όλων των τύπων προσέγγισης ακριβείας, από CAT-I έως CAT-II/III, αλλά αυτή τη στιγμή καλύπτει μόνο την κατηγορία I. Εκτός από τις διαδικασίες πλοήγησης το GBAS προσφέρει υπηρεσίες εντοπισμού θέσης, παρέχοντας βελτιωμένη ακρίβεια θέσης GNSS [03]. Η αρχιτεκτονική ενός συστήματος GBAS χωρίζεται στο δορυφορικό τμήμα, την δομή εδάφους και το υποσύστημα του αεροσκάφους.

Η αρχή στην οποία βασίζονται τα συστήματα GBAS είναι η Διαφορική διόρθωση. Ένας GNSS χρήστης θα καθορίσει τη θέση του μετρώντας την απόσταση του από τους διαθέσιμους

δορυφόρους του αστερισμού (GPS). Ωστόσο, λόγω των διαφόρων πηγών σφαλμάτων που επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα των δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης, η θέση που λαμβάνεται από τις εξισώσεις δεν θα είναι παρά μια τυχαία εκτίμηση της πραγματικής θέσης του χρήστη. Η Διαφορική διόρθωση που χρησιμοποιεί το σύστημα GBAS έρχεται να εξαλείψει αυτή την απόκλιση μεταξύ τυχαίας και πραγματικής θέσης.

Οι σταθμοί αναφοράς που υπάρχουν στο αεροδρόμιο γνωρίζουν επακριβώς την πραγματική τους θέση (αναφορά) οπότε λαμβάνοντας τα σήματα των δορυφόρων του αστερισμού, μπορούν να συγκρίνουν τα δύο δεδομένα και να εκτιμήσουν το σφάλμα θέσης ανά πάσα στιγμή. Υποθέτοντας ότι οι χρήστες σε μία δεδομένη περιοχή γύρω από το αεροδρόμιο επηρεάζονται περίπου από τις ίδιες πηγές σφαλμάτων, μπορούν να διορθώσουν τη θέση τους κάνοντας χρήση της εκτίμησης σφάλματος των σταθμών αναφοράς του GBAS.

Μαζί με τις διορθώσεις ψευδοαπόστασης, τα συστήματα GBAS παρέχουν και άλλα δεδομένα προς τους χρήστες, που βελτιώνουν την ακεραιότητα του GNSS. Το σύνολο αυτών των διορθώσεων, που γίνεται διαθέσιμο στους χρήστες μέσω μετάδοσης VDB μηνυμάτων, επεκτείνει το σύστημα GNSS, καλύπτοντας έτσι τις απαιτήσεις SARPs των διαδικασιών που είναι απαραίτητες για μία ασφαλή πλοήγηση.

## 4.4 Πηγές Σφαλμάτων

Η ακρίβεια θέσης που επιτυγχάνεται με τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης είναι ευαίσθητη σε διάφορες συνθήκες και από πολλαπλούς παράγοντες. Αυτοί οι παράγοντες θεωρούνται ως πηγές σφαλμάτων που επηρεάζουν την μέτρηση της ψευδοαπόστασης μεταξύ χρήστη και δορυφόρων. Επομένως επηρεάζουν τον προσδιορισμό της θέσης των χρηστών εισάγοντας σφάλματα στις εξισώσεις πλοήγησης (4.3), που θα οδηγήσουν όχι μόνο σε μια λανθασμένη θέση χρήστη αλλά και σε σφάλμα απόκλισης ρολογιού. Ανάλογα του πως επηρεάζουν τους χρήστες, οι πηγές σφαλμάτων ταξινομούνται σε κύριες και σε δευτερεύουσες. Κύριες πηγές σφαλμάτων είναι αυτές που επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο σχεδόν τις μετρήσεις ψευδοαπόστασης εντός της ίδιας περιοχής και δευτερεύουσες είναι εκείνες που δεν έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά επιρροής μεταξύ των χρηστών [06].

#### **4.4.1 Κύριες Πηγές σφαλμάτων**

Όπως αναφέρθηκε, οι κύριες πηγές σφαλμάτων είναι εκείνες που επηρεάζουν τη μέτρηση της ψευδοαπόστασης χρηστών της ίδιας περιοχής περίπου με το ίδιο μέγεθος. Υπάρχουν μερικά σφάλματα που επηρεάζουν ακριβώς με τον ίδιο τρόπο τις κοντινές μετρήσεις, όπως η απόκλιση ρολογιού του δορυφόρου ή τα τροχιακά σφάλματα. Υπάρχουν και σφάλματα όμως που μπορεί να διαφέρουν λίγο από τοποθεσία σε τοποθεσία, όπως τα σφάλματα που οφείλονται στις επιδράσεις της ατμόσφαιρας.

#### **Σφάλματα Ρολογιού Δορυφόρου**

Για να διατηρηθεί ο χρόνος των δορυφόρων όσο το δυνατόν πιο κοντά στον χρόνο του συστήματος, οι δορυφόροι χρησιμοποιούν ατομικά ρολόγια, τα οποία είναι εξαιρετικά σταθερά. Ωστόσο, σε μία ημέρα ένα ατομικό ρολόι μπορεί να έχει απόκλιση της τάξης των 10 nsec που είναι σημαντική απόκλιση όταν αυτό μετατρέπεται σε μέτρηση ψευδοαπόστασης. Λόγω αυτού η συγκεκριμένη απόκλιση χρόνου λαμβάνεται υπόψη και η αντίστοιχη διόρθωση μεταδίδεται σε κάθε δορυφόρο μέσω των μηνυμάτων πλοήγησης, στα οποία έχει ενσωματωθεί [39].

#### **Τροχιακά Σφάλματα**

Για τον σωστό υπολογισμό της θέσης του χρήστη, είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης των δορυφόρων με απόλυτη ακρίβεια. Λαμβάνοντας υπόψη μαθηματικά μοντέλα που δημιουργούνται από τις συνεχείς παρατηρήσεις των τροχιών των δορυφόρων, η θέση τους έχει προβλεφθεί για ένα χρονικό ορίζοντα ενός έτους. Ωστόσο διάφορες βαρυτικές επιδράσεις από τη γη αλλά και από τον ήλιο και τη σελήνη, προκαλούν μικρές μετατοπίσεις των δορυφορικών τροχιών τους, οπότε και μικρή απόκλιση της θέσης τους, της τάξης των 2 με 5 μέτρων, που επηρεάζει ελάχιστα τη μέτρηση της ψευδοαπόστασης του δορυφόρου από τον χρήστη [39].

#### **Επιρροές Ιονόσφαιρας**

Η Ιονόσφαιρα αποτελεί το ανώτατο σημείο της ατμόσφαιρας της Γης. Εκτείνεται σε ύψος περίπου από τα 60 έως περίπου τα 1000 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της γης. Σε αυτή την περιοχή, οι υπεριώδεις ακτίνες που προέρχονται από τον ήλιο ionίζουν ένα μέρος μορίων αερίου και έτσι απελευθερώνονται ελεύθερα ηλεκτρόνια που επηρεάζουν τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπως τα GNSS σήματα. Πράγματι, μηχανισμοί όπως ανάκλαση,



διάθλαση ή και περίθλαση μπορεί να επηρεάσουν τη διάδοση του σήματος. Ωστόσο, ορισμένες συχνότητες είναι πιο ευάλωτες από άλλες. Για παράδειγμα, σήματα με συχνότητα άνω του 1 MHz διαπερνούν την ιονόσφαιρα, ενώ σήματα μικρότερης συχνότητας ανακλώνται. Ως εκ τούτου, όσον αφορά τα σήματα GNSS που βρίσκονται στην L-Band και υπερβαίνουν τη συχνότητα του 1GHz, δεν επηρεάζονται από φαινόμενα ανάκλασης, αλλά η παρουσία των ελεύθερων ηλεκτρονίων προκαλεί διάθλαση και αλλάζει την ταχύτητα διάδοσης τους. Αυτό μπορεί να προκαλέσει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της θέσης ενός χρήστη, που είναι συνήθως μεγέθους από 5 έως 15 μέτρα, αλλά σε ακραίες ηλιακές δραστηριότητες μπορεί να φτάσει και πάνω από τα 150 μέτρα [39].

Παρόλο που η Ιονόσφαιρα είναι μία από τις πιο συχνές και κύριες πηγές σφάλματος, που επηρεάζει την μέτρηση ψευδοαπόστασης, η επίδραση της μπορεί εν μέρη να αφαιρεθεί χρησιμοποιώντας δέκτες διπλής συχνότητας, καθώς η καθυστέρηση που υφίσταται ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα λόγω της ιονόσφαιρας, εξαρτάται από τη συχνότητα. Η χρήση της διπλής συχνότητας έχει ως αποτέλεσμα πολύ υψηλότερη ακρίβεια θέσης στα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης και ο κύριος λόγος είναι η εξάλειψη των σφαλμάτων που προέρχονται από την ιονόσφαιρα.

## **Επιρροές Τροπόσφαιρας**

Η τροπόσφαιρα αποτελεί το χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας, το οποίο εκτείνεται μέχρι τα 50 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της Γης. Η τροποσφαιρική διάθλαση προκαλεί αλλαγή στην κατεύθυνση του δορυφορικού σήματος με συνέπεια την χρονική καθυστέρηση του, άρα και την εσφαλμένη μέτρηση της ψευδοαπόστασης του δορυφόρου από τον χρήστη. Η τροποσφαιρική καθυστέρηση εξαρτάται από την τοπική θερμοκρασία, την πίεση και τη σχετική υγρασία. Σε αντίθεση με την περίπτωση της ιονόσφαιρας, η επιρροή της τροπόσφαιρας είναι ανεξάρτητη από την συχνότητα, οπότε δεν μπορεί να εξλειφθεί με τη χρήση δεκτών διπλής συχνότητας. Ο προσδιορισμός και η αντιμετώπιση εν μέρει του τροποσφαιρικού σφάλματος βασίζεται σε γνώση των επιπέδων της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της πίεσης της ατμόσφαιρας στην περιοχή όπου βρίσκεται ο χρήστης.

### **4.4.2 Δευτερεύουσες Πηγές σφαλμάτων**

Οι δευτερεύουσες πηγές σφαλμάτων που επηρεάζουν τη μέτρηση της ψευδοαπόστασης του δορυφόρου και του χρήστη, είναι αυτές που σχετίζονται με τον εξοπλισμό του δέκτη, όπως του

ρολογιού και του επεξεργαστή του, αλλά και την θέση του που επηρεάζει την διάδοση του δορυφορικού σήματος.

### **Σφάλματα Ρολογιού Δέκτη**

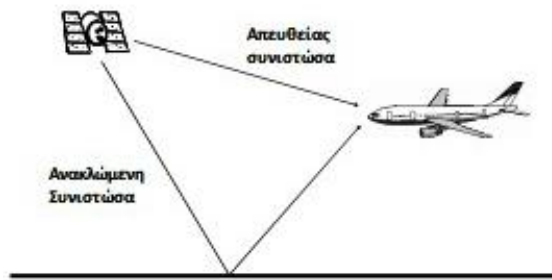
Οι δέκτες GNSS είναι εξοπλισμένοι με ρολόγια χαλαζία, τα οποία έχουν πολύ μικρότερη ακρίβεια από τα ρολόγια των δορυφόρων, οπότε και μεγαλύτερη απόκλιση χρόνου, που μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγαλύτερα σφάλματα θέσης. Σε αντίθεση με την διόρθωση των σφαλμάτων των δορυφορικών ρολογιών, η διόρθωση των σφαλμάτων για τους δέκτες γίνεται τοπικά με την εισαγωγή της απόκλισης του ρολογιού τους στις εξισώσεις πλοήγησης.

### **Σφάλμα Υπολογισμού Δέκτη**

Η ακρίβεια των υπολογισμών ενός δέκτη εξαρτάται από την ποιότητα του, την υπολογιστική του ισχύ και την δεδομένη λειτουργική κατάσταση του εξοπλισμού που τον αποτελεί. Η έκπτωση σε ένα από τα παραπάνω συστατικά μπορεί να επιφέρει σφάλμα στο συνολικό αποτέλεσμα δηλαδή σφάλμα στον υπολογισμό της θέσης του χρήστη.

### **Σφάλμα πολλαπλών Διαδρομών - multipath**

Το σφάλμα πολλαπλών διαδρομών ή αλλιώς σφάλμα από πολλές ανακλάσεις είναι μια από τις κύριες πηγές σφαλμάτων των συστημάτων GNSS που προκύπτει όταν το σήμα λαμβάνεται στον δέκτη από δευτερεύουσες διαδρομές πλην της κύριας, λόγω της ανάκλασης του στις γύρω επιφάνειες και τα εμπόδια. Αυτά τα εμπόδια μπορεί να είναι επιφάνειες κτιρίων, διάφορες μεταλλικές επιφάνειες ακόμη και το έδαφος γύρω από τον δέκτη. Συνεπώς το σφάλμα από multipath εξαρτάται από τον περιβάλλοντα χώρο στον οποίο βρίσκεται ο δέκτης και από την γεωμετρία του χώρου αυτού. Επίσης εξαρτάται και από την γωνία της θέσης του δορυφόρου με τον ορίζοντα, καθώς το σήμα δορυφόρου με μικρή γωνία είναι πιο πιθανό να ανακλαστεί σε επιφάνειες.



Σχήμα 4.7 Κύρια και Δευτερεύουσα Διαδρομή λόγω Ανάκλασης

Το δευτερεύων σήμα λόγω της ανάκλασης ακολουθεί μεγαλύτερη διαδρομή από την κανονική, φθάνοντας στον δέκτη με χρονική καθυστέρηση, το οποίο μπορεί να προκαλέσει σφάλμα πολλών μέτρων στον προσδιορισμό της θέσης GNSS του χρήστη. Για την μερική εξάλειψη αυτού του σφάλματος, εφαρμόζονται στους δέκτες τεχνικές μετριάσμού πολλαπλών διαδρομών, οι οποίες με την εξέλιξη των δεκτών γίνονται αποτελεσματικότερες.

## 4.5 Φάσεις Πτήσης

### 4.5.1 Κατηγορίες φάσεων πτήσης

Μία ολοκληρωμένη πτήση ενός πολιτικού αεροσκάφους αποτελείται από έξι κύριες φάσεις :

- Take-Off (Απογείωση)

Διαρκεί από τη στιγμή της αποκόλλησης από το διάδρομο μέχρι και 35 πόδια από το έδαφος.

- Climb (Άνοδος)

Η άνοδος του αεροσκάφους από τη φάση της απογείωσης μέχρι το επίπεδο ύψος για το οποίο έχει εξουσιοδοτηθεί από τον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας.

- Cruise (ευθεία πτήση)

Το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής πτήσης, που γίνεται σε ευθεία πορεία, αυστηρά στο επίπεδο ύψους που αναφέρθηκε προηγουμένως.

- Descent (Κάθοδος)

Η κάθοδος του αεροσκάφους σε ύψος κατάλληλο για την προσέγγιση του αεροδρομίου.

- Final Approach (Προσέγγιση)

Ευθυγράμμιση του αεροσκάφους με τον διάδρομο λίγο πριν την τελική προσγείωση. Πραγματοποιείται είτε εξ όψεως VFR (Visual Flight Rules), είτε ενόργανα IFR (Instrumental Flight rules), αναλόγως τις συνθήκες ορατότητας.

- Landing (Προσγείωση)

Το τελικό στάδιο πτήσης όπου το αεροσκάφος προσγειώνεται στο διάδρομο του αεροδρομίου και τροχοδρομεί μέχρι την πίστα του.

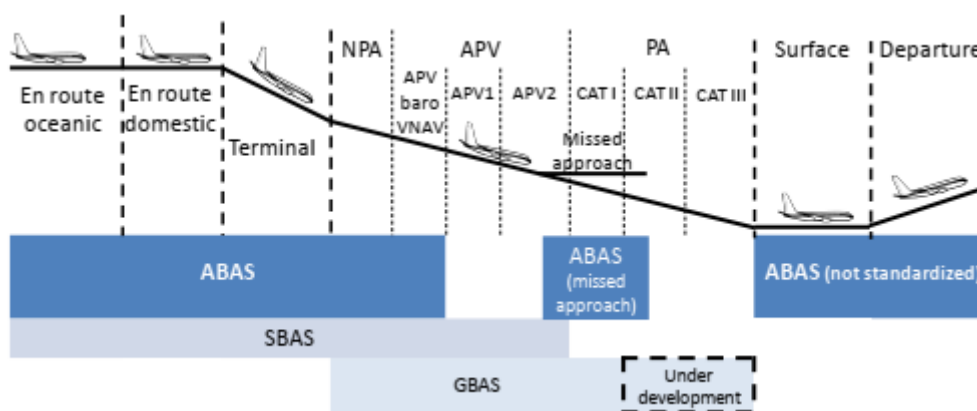
#### 4.5.2 Κατηγορίες Προσέγγισης

Οι κατηγορίες προσέγγισης ενός αεροσκάφους καθορίζονται από το επίπεδο εμπιστοσύνης που δίνει το σύστημα προσέγγισης που θα χρησιμοποιήσει ο πιλότος για να προσγειώσει το αεροπλάνο με ασφάλεια. Διαιρούνται σε δύο βασικά τμήματα: το πρώτο είναι το τμήμα του αεροσκάφους το οποίο ακολουθεί την ένδειξη που του παρέχει το σύστημα προσγείωσης και το δεύτερο είναι το τμήμα πιλότου που αναλαμβάνει να ελέγξει το αεροσκάφος στην τελική φάση χρησιμοποιώντας εξωτερικές πληροφορίες μόνο εξ όψεως. Το ύψος στο οποίο αναλαμβάνει ο πιλότος τον πλήρη έλεγχο του αεροσκάφους, μειώνεται όσο η αξιοπιστία του συστήματος προσέγγισης αυξάνεται.

Στο Annex 6 του ICAO [44] έχουν καθοριστεί τρεις κατηγορίες προσέγγισης και κατατάσσονται ως εξής:

- **Non Precision Approach (NPA):** Προσέγγιση χωρίς ακρίβεια, που γίνεται ενόργανα με χρήση οριζόντιας καθοδήγησης αλλά χωρίς τη χρήση κατακόρυφης.
- **Approach with Vertical guidance (APV):** Ενόργανη προσέγγιση με χρήση οριζόντιας και κάθετης καθοδήγησης, χωρίς όμως να πληροί τις απαιτήσεις για διαδικασία προσέγγισης ακριβείας.
- **Precision approach (PA):** Ενόργανη προσέγγιση με χρήση οριζόντιας και κάθετης καθοδήγησης που πληροί τις ελάχιστες απαιτήσεις ώστε να θεωρείται ακριβείς.

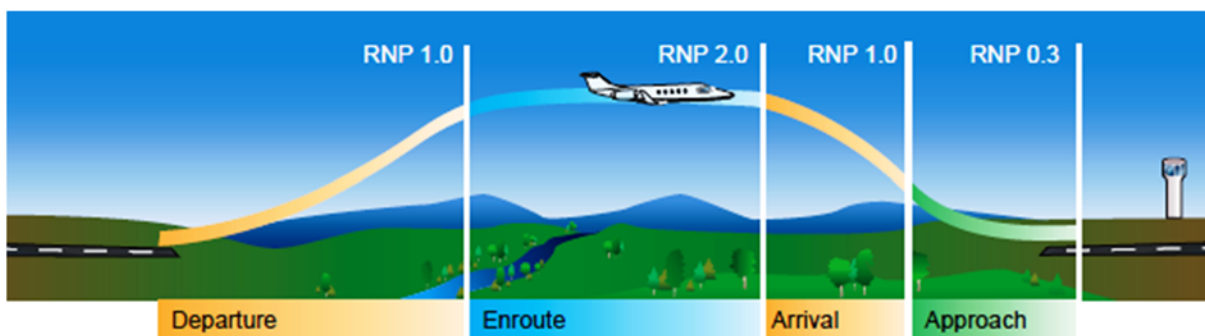
Οι διάφορες φάσεις της πτήσης και οι διαδικασίες προσέγγισης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα με τα συστήματα βελτίωσης GNSS αποτυπωμένα στην αντίστοιχη φάση της πτήσης που εφαρμόζονται.



Σχήμα 4.8 Φάσεις μίας πτήσης και συστήματα βελτίωσης GNSS [48]

## 4.6 Απαιτούμενη Απόδοση Πλοήγησης RNP

Ως απαιτούμενη απόδοση πλοήγησης RNP (Required Navigation Performance) εννοείται ένα σύνολο από ελάχιστες επιδόσεις πλοήγησης που είναι απαραίτητες, ώστε αυτή να μπορεί να πραγματοποιηθεί εντός του εναέριου χώρου.



Σχήμα 4.9 Απαιτούμενη Απόδοση Πλοήγησης RNP [48]

Τα κριτήρια τα οποία ορίζουν αυτές τις ελάχιστες επιχειρησιακές απαιτήσεις για πλοήγηση με βάση το GNSS είναι η ακρίβεια, η διαθεσιμότητα, η συνέχεια και η ακεραιότητα.

### Ακρίβεια

Η ακρίβεια αποτυπώνει το μέτρο της διαφοράς μεταξύ της εκτιμώμενης ή μετρούμενης θέσης ενός αεροσκάφους σε δεδομένο χρόνο σε σχέση με την πραγματική. Αποτυπώνει ουσιαστικά το

μέγεθος του σφάλματος στις μετρήσεις για τον προσδιορισμό της θέσης του αεροσκάφους. Ο ICAO έχει καθορίσει ως ελάχιστο βαθμό ακρίβειας το 95%.

## **Διαθεσιμότητα**

Η διαθεσιμότητα ενός συστήματος πλοήγησης είναι η ικανότητα του συστήματος να παρέχει την απαιτούμενη λειτουργία υπό επαρκείς επιδόσεις κατά την διάρκεια μίας πτήσης. Ένα σύστημα πλοήγησης θεωρείται διαθέσιμο για χρήση σε μία πτήση εάν καλύπτει τις ελάχιστες απαιτήσεις της ακρίβειας και της ακεραιότητας. Ένα σύστημα ορίζει την διαθεσιμότητα του σε ποσότητα χρόνου, σε τι διάρκεια δηλαδή είναι διαθέσιμο.

## **Συνέχεια**

Η συνέχεια ενός συστήματος είναι η ικανότητα του να είναι διαθέσιμο συνεχώς. Συγκεκριμένα να είναι σε θέση το σύστημα πλοήγησης να εκτελεί τη λειτουργία του χωρίς διακοπή, μέσα στα προβλεπόμενα όρια, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ασφαλής πλοήγηση καθόλη τη διάρκεια μίας πτήσης. Η ελάχιστη απαίτηση σε συνέχεια κατά τη διάρκεια μίας πτήσης, ορίζεται χρονικά για την en-route πλοήγηση σε μία ώρα και για τις διαδικασίες προσέγγισης και προσγείωσης σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα.

## **Ακεραιότητα**

Η ακεραιότητα είναι ένα μέτρο της εμπιστοσύνης που μπορεί να δοθεί στην ορθότητα των πληροφοριών που παρέχεται από το συνολικό σύστημα. Η ακεραιότητα περιλαμβάνει την ικανότητα του συστήματος να ειδοποιεί τον χρήστη όταν το σύστημα δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για την προβλεπόμενη διαδικασία (φάση πτήσης). Η ακεραιότητα του GNSS βασίζεται σε υπολογισμούς από εξοπλισμό εντός του αεροσκάφους (avionics), ο οποίος διασφαλίζει ότι το σφάλμα του υπολογισμού θέσης δεν θα υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο για την τρέχουσα διαδικασία.

Το απαραίτητο επίπεδο ακεραιότητας για κάθε φάση πτήσης καθορίζεται σε σχέση με συγκεκριμένα οριζόντια / πλευρικά όρια συναγερμού, ενώ για τις διαδικασίες προσεγγίσεων με κατακόρυφη καθοδήγηση και καθοδήγηση ακριβείας εκτός από τα οριζόντια, καθορίζονται και κατακόρυφα όρια συναγερμού (HAL / LAL και VAL). Επίσης απαραίτητο στοιχείο της ακεραιότητας αποτελεί ο χρόνος ειδοποίησης, που είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο χρονικό

διάστημα από την έναρξη μιας εσφαλμένης κατάστασης μέχρι την αναγγελία της στο αεροσκάφος. Αυτές οι τιμές με βάση το Annex 10 του ICAO, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2

Διαδικασίες	En-route		Terminal	Non-Precision approach	Approach with vertical guidance (APV)		Precision approach CAT I
	Oceanic	Continental			APV-I	APV-II	
HAL / LAL	7.4 Km (4 NM)	3.7 Km (2 NM)	1.85 Km (1 NM)	556 m (0.3 NM)	40 m (130 ft)	40 m (130 ft)	40 m (130 ft)
VAL	N/A	N/A	N/A	N/A	50 m (164 ft)	20 m (66 ft)	35 - 10m (115 - 33ft)
Χρόνος Ειδοποίησης	5 min	5 min	15 sec	10 sec	10 sec	6 sec	6 sec

Πίνακας 4.2 Όρια Συναγερμού ανά Διαδικασία

Τα avionics του αεροσκάφους υπολογίζουν συνεχώς κατά την πτήση τα αντίστοιχα επίπεδα προστασίας (HPL / LPL και VPL). Οι όροι HAL / HPL χρησιμοποιούνται από τα συστήματα ABAS και SBAS, ενώ οι όροι LAL / LPL χρησιμοποιούνται από το GBAS. Τα επίπεδα προστασίας είναι τα ανώτατα όρια εμπιστοσύνης στα σφάλματα θέσης ενώ τα όρια συναγερμού ορίζουν το μέγιστο σφάλμα θέσης που επιτρέπεται για μία διαδικασία. Όταν οποιοδήποτε επίπεδο προστασίας υπερβαίνει το αντίστοιχο όριο συναγερμού, τα avionics ειδοποιούν το πλήρωμα του αεροσκάφους και αυτό προβαίνει στις προβλεπόμενες διαδικασίες. Κίνδυνος για την ακεραιότητα υφίσταται όταν ένα σφάλμα που είναι εκτός ανοχής γίνεται αντιληπτό αλλά η ειδοποίηση του πληρώματος υπερβαίνει τον χρόνο ειδοποίησης.

# Κεφάλαιο 5

## Διαφορική Διόρθωση

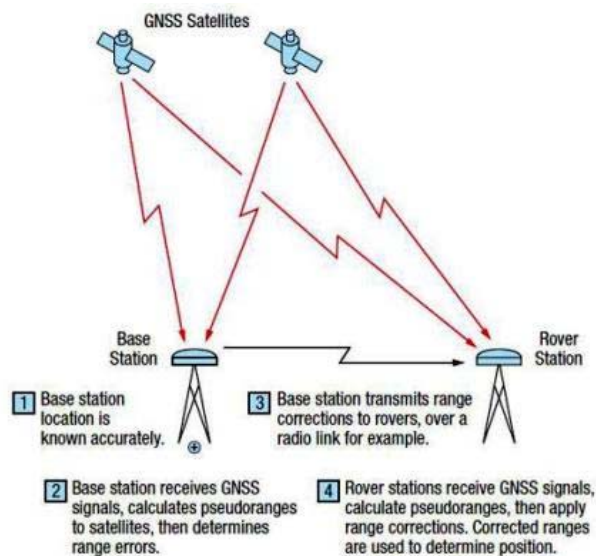
Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτυχθεί η βασική αρχή λειτουργίας των συστημάτων GBAS που είναι η διαφορική διόρθωση. Διαφορική Διόρθωση είναι η διαδικασία διόρθωσης των δεδομένων που συλλέγονται σε μία άγνωστη τοποθεσία με δεδομένα που συλλέγονται ταυτόχρονα σε ένα σταθμό βάσης. Στην περίπτωση αυτή, η αρχή διαφορικής διόρθωσης θα χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση των μετρήσεων της ψευδοαπόστασης που εκτελούνται από ένα αεροσκάφος μέσω δορυφορικού συστήματος πλοήγησης (GPS), καθώς μπορεί να αφαιρέσει την πλειοψηφία των επιπτώσεων των κύριων πηγών σφαλμάτων που επηρεάζουν τις μετρήσεις αυτές.

Στην αρχή θα αναφερθούν οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή της διαφορικής διόρθωσης και στη συνέχεια θα αναλυθούν οι μέθοδοι υπολογισμού και εφαρμογής της διόρθωσης των μετρήσεων ψευδοαπόστασης. Εκτενής αναφορά θα γίνει στον αλγόριθμο διόρθωσης ψευδοαπόστασης PRC, όπου θα αναλυθεί το μοντέλο υπολογισμού του.



## 5.1 Αρχή Διαφορισμού

Στο παράδειγμα του παρακάτω σχήματος 5.1 παρουσιάζεται ένα σύστημα GNSS, αποτελούμενο από ένα δέκτη και διάφορους δορυφόρους, όπου το  $X_i$  αντιπροσωπεύει την μεταβαλλόμενη θέση της πηγής εκπομπής (δορυφόρος)  $i$  και το  $X_u$  την θέση ενός σταθερού δέκτη. Και οι δύο θέσεις εκφράζονται σε συντεταγμένες WGS84. Ο όρος  $\Delta t_i$  αντιπροσωπεύει το χρόνο που χρειάζεται το σήμα να ταξιδέψει από τον δορυφόρο στον δέκτη.



Σχήμα 5.1 Σταθμοί Αναφοράς GNSS [51]

Ακολουθώντας την αρχή λειτουργίας του συστήματος και θεωρώντας ότι το σήμα ταξιδεύει στο κενό με την ταχύτητα του φωτός, οι δέκτες GNSS υπολογίζουν την ψευδοαπόσταση από τους δορυφόρους μέσω της παρακάτω εξίσωσης (5.1):

$$\hat{\rho}_i = c \cdot \Delta t_i \quad [5.1]$$

Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των πηγών σφαλμάτων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο παραπάνω τύπος δεν θα υπολογίζει την ακριβή ψευδοαπόσταση, καθώς θεωρεί τη διαδρομή του σήματος ως γραμμική και υποθέτει ότι έχει μια σταθερή ταχύτητα ταξιδιού. Αυτό φυσικά δεν ισχύει, οπότε οι εξισώσεις πλοήγησης που έχουν υποβληθεί προηγουμένως, πρέπει να αναδιατυπωθούν ως εξής:

$$\hat{\rho}_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r - \Delta \rho_i \quad [5.2]$$

Όπου  $\Delta\rho_i$  είναι το σφάλμα ψευδοαπόστασης που προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης (5.1). Υποθέτοντας ότι ο σταθερός σταθμός δέκτη του Σχ. 5.1 έχει πολύ ακριβή γνώση, τόσο της θέσης του όσο και της απόκλισης του ρολογιού του  $\Delta t_r$ , η εξίσωση (5.2) μπορεί να αναστραφεί έτσι ώστε να υπολογιστεί το σφάλμα ψευδοαπόστασης  $\Delta\rho_i$  ως εξής:

$$\Delta\rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r - \hat{\rho}_i \quad [5.3]$$

Ο παραπάνω όρος  $\Delta\rho_i$  θα ενσωματώνει όλες τις πηγές σφαλμάτων που επηρεάζουν τη μέτρηση της ψευδοαπόστασης. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι πηγές σφαλμάτων χωρίζονται σε δύο ομάδες, τις κύριες και τις δευτερεύουσες, το οποίο εκφράζεται σαν εξίσωση ως[45]:

$$\Delta\rho = \Delta\rho_{\text{κύριες}} + \Delta\rho_{\text{δευτερεύουσες}} \quad [5.4]$$

Αν θεωρηθεί ως δεδομένο ότι η θέση του σταθμού δέκτη επιλέχτηκε έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα του φαινομένου της πολυδιαδρομής του σήματος, τότε μπορεί να υποτεθεί ότι, οι δευτερεύουσες πηγές σφαλμάτων έχουν ελάχιστη συμβολή στο συνολικό σφάλμα ψευδοαπόστασης  $\Delta\rho_i$  σε σχέση με τις κύριες, οπότε η εξίσωση (5.4) θα ισούται με :

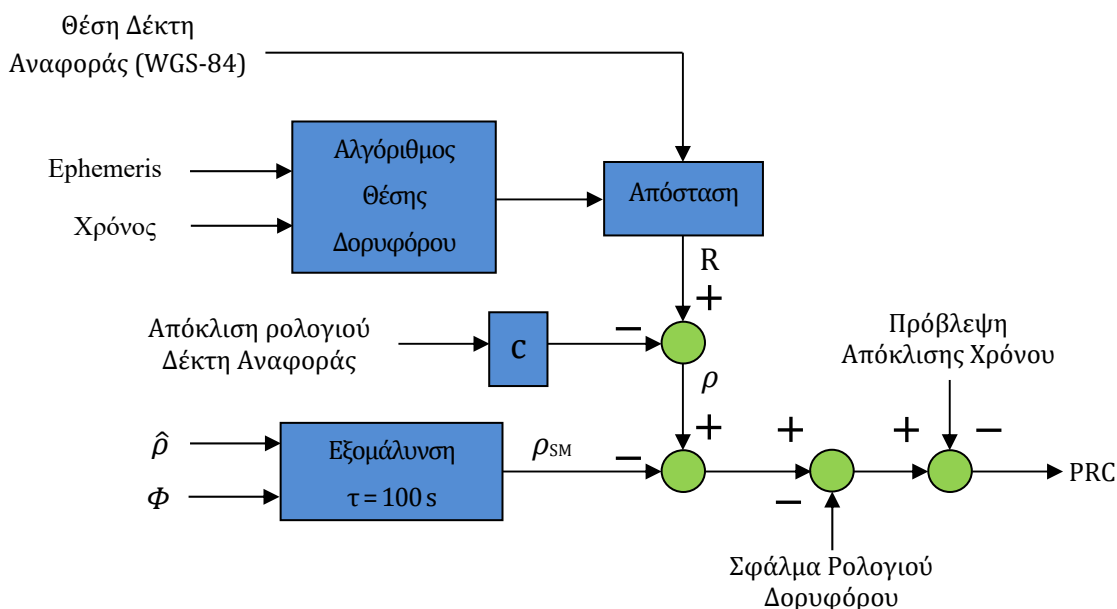
$$\Delta\rho_i \approx \Delta\rho_{i \text{ κύριες}} = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r - \hat{\rho}_i \quad [5.5]$$

Χρησιμοποιώντας δηλαδή έναν σταθερό δέκτη, του οποίου υπάρχει πολύ ακριβή γνώση της θέσης του, της απόκλισης του ρολογιού του αλλά και των χαρακτηριστικών του άμεσου περιβάλλοντος του, είναι δυνατό να εκτιμηθούν οι κύριες πηγές σφαλμάτων που επηρεάζουν τις μετρήσεις ψευδοαπόστασης οποιονδήποτε άλλου δέκτη εντός της ευρύτερης περιοχής του σταθμού βάσης από έναν συγκεκριμένο δορυφόρο. Γι αυτό και οι δέκτες με τέτοια χαρακτηριστικά ονομάζονται δέκτες αναφοράς.

## 5.2 Υπολογισμός Διόρθωσης Ψευδοαπόστασης PRC

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η μέθοδος στην οποία βασίζεται η διόρθωση της ψευδοαπόστασης PRC (Pseudorange Correction) από μία μεταβαλλόμενη πηγή δεδομένων. Στην περίπτωση του συστήματος GBAS, το υποσύστημα εδάφους περιλαμβάνει ένα σύνολο δεκτών αναφοράς που συλλέγουν τις μετρήσεις ψευδοαπόστασης από τους δορυφόρους και η

διαδικασία διόρθωσης τους πραγματοποιείται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Ο υπολογισμός και η εφαρμογή του αλγόριθμου διόρθωσης Ψευδοαπόστασης (PRC) αποτελούν τη βάση της λειτουργίας του συστήματος GBAS. Το βασικό μοντέλο υπολογισμού της PRC (για αστερισμούς GPS), με βάση το εγχειρίδιο ED-114 του οργανισμού EUROCAE του ICAO, παρουσιάζεται ως σχεδιάγραμμα στο σχήμα 5.2 [08]:



Σχήμα 5.2 Σχεδιάγραμμα Μοντέλου Διόρθωσης Ψευδοαπόστασης

Όπως παρατηρείται και από το σχεδιάγραμμα Μοντέλου Διόρθωσης Ψευδοαπόστασης, ο υπολογισμός της PRC είναι μία διαδικασία πολλών βημάτων. Αυτά τα βήματα περιλαμβάνουν τον υπολογισμό των παρακάτω δεδομένων:

### 1) Δορυφορική θέση

Η δορυφορική θέση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του μηνύματος πλοήγησης GPS, υπολογίζοντας τα ως μια συνάρτηση χρόνου. Ο αλγόριθμος προσδιορισμού δορυφορικής θέσης σε συντεταγμένες WGS84 είναι γνωστός και περιλαμβάνει όλες τις σταθερές παραμέτρους που έχουν σχέση με τις τροχιές των δορυφόρων και την αλληλεπίδραση με τη γη και την ατμόσφαιρα της.

### 2) Γεωμετρική απόσταση - R

Λαμβάνεται η γεωμετρική απόσταση μεταξύ της πηγής  $i$  και του δέκτη αναφοράς  $u$ , σύμφωνα με:

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} \quad [5.6]$$

όπου  $x, y, z$  οι συντεταγμένες τους σε WGS84.

### 3) Γεωμετρική ψευδοαπόσταση - $\rho$

Η γεωμετρική ψευδοαπόσταση είναι η ψευδοαπόσταση του δέκτη αναφοράς από τον δορυφόρο, που υπολογίζεται αρχικά, δηλαδή:

$$\rho_i = R_i - c \cdot \Delta t_r \quad [5.7]$$

Ο παραπάνω υπολογισμός βέβαια, ισχύει λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι η απόκλιση του ρολογιού του δέκτη αναφοράς είναι γνωστή.

### 4) Εξομαλυμένη Ψευδοαπόσταση - $\rho_{SM}$

Η οποία λαμβάνεται μέσω της εξομάλυνσης από το φίλτρο, τόσο της αρχικής ψευδοαπόστασης  $\rho$ , όσο και της φάσης του φέροντος σήματος  $\varphi$ :

$$\rho_{SM_{in}} = \alpha \cdot \hat{\rho}_i + (1 - \alpha) \left[ \rho_{SM_{in-1}} + \frac{\lambda}{2\pi} (\varphi_{i_n} - \varphi_{i_{n-1}}) \right] \quad [5.8]$$

όπου:

- $\rho_{SM_{n-1}}$  είναι η αμέσως προηγούμενη εξομαλυνθείσα ψευδοαπόσταση.
- $\varphi_{n-1}$  είναι η αμέσως προηγούμενη φάση του φέροντος σήματος.
- $\alpha$  είναι ο τελεστής στάθμισης του φίλτρου, ίσος με το χρονικό διάστημα δείγματος διαιρούμενο με τη χρονική σταθερά του φίλτρου, που στο παρόν μοντέλο είναι 100 δευτερόλεπτα και
- $\lambda$  είναι το μήκος κύματος της  $L_1$ , ίσο με 0,1904 m.

### 5) Εκτίμηση σφάλματος δορυφορικού ρολογιού - $\Delta t_{sv}$

Αυτός ο όρος αντιπροσωπεύει το σφάλμα του δορυφορικού ρολογιού σε σχέση με την ώρα του συστήματος (GPS) και ισούται με:

$$\Delta t_{SV_i} = \alpha_{f0} + \alpha_{f1} \cdot (t - t_{oc}) + \alpha_{f2} \cdot (t - t_{oc})^2 - T_{GD} + t_r \quad [5.9]$$

όπου:

- οι  $\alpha_{f0}$ ,  $\alpha_{f1}$  και  $\alpha_{f2}$  είναι διάφοροι συντελεστές
- $t$  είναι ο χρόνος μετάδοσης του μηνύματος πλοήγησης
- $t_{oc}$  είναι ο χρόνος αναφοράς δεδομένων του ρολογιού δορυφόρου και
- $T_{GD}$  είναι μία χρονική καθυστέρηση

με τα παραπάνω στοιχεία να δίνονται στο περιοδικό GPS Ephemeris ενώ

- $t_r$  είναι ο διορθωτικός όρος που λαμβάνεται από:

$$t_r = F \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin(E_k) \quad [5.10]$$

όπου:

- $F = -4,442807633 \times 10^{-10} s \cdot m^{1/2}$
- $e$  η εκκεντρότητα της δορυφορικής τροχιάς
- $\sqrt{A}$  η τετραγωνική ρίζα του ημικυκλικού άξονα της δορυφορικής τροχιάς,

που επίσης δίνονται στο GPS Ephemeris και τέλος

- $E_k$  η έκεντρη ανωμαλία του δορυφόρου

#### 6) Εκτίμηση απόκλισης ρολογιού - $\Delta\rho_{clock}$

Αυτός ο όρος είναι μια πρόσθετη προσαρμογή στο ρολόι του δέκτη αναφοράς που υπολογίζεται σε συνάρτηση με τα δεδομένα όλων των δορυφόρων που εντοπίζονται από τον δέκτη, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες παραμέτρους που σχετίζονται μόνο με τα δεδομένα του υπό ανάλυση δορυφόρου. Συγκεκριμένα υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta\rho_{clock} = \sum_{i \in S_c} k_i \cdot (\rho_i - \rho_{SM_i} - c \cdot \Delta t_{SV_i}) \quad [5.11]$$

όπου εκτός από τους γνωστούς από τα προηγούμενα όρους  $\rho$ ,  $\rho_{SM}$  και  $\Delta t_{SV}$ , ο όρος

- $S_c$  είναι το σύνολο των δορυφόρων που βλέπουν οι δέκτες αναφοράς και
- $k_i$  είναι συντελεστής στάθμισης που λαμβάνει υπόψη το υψόμετρο των δορυφόρων

Συνοψίζοντας η διόρθωση Ψευδοαπόστασης από μία πηγή  $i$  (δορυφόρο) υπολογίζεται με την αφαίρεση του συνόλου των όρων  $\rho_{SM}$ ,  $\Delta t_{SV}$  και  $\Delta\rho_{clock}$ , από τη γεωμετρική ψευδοαπόσταση  $\rho$ , ως εξής:

$$PRC_i = \rho_i - (\rho_{SM_i} + c \cdot \Delta t_{SV_i} + \Delta\rho_{clock}) \quad [5.12]$$

Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς περαιτέρω αλλαγές σε οποιοδήποτε κινητή πηγή, οπότε με έναν μόνο σταθμό βάσης μπορούν να υπολογιστούν οι διορθώσεις ψευδοαπόστασης για όλους τους δορυφόρους σε οπτική επαφή. Βέβαια, ο σταθμός βάσης ενός συστήματος GBAS διαθέτει περισσότερους από έναν δέκτες αναφοράς, κάτι που είναι απαραίτητο όπως θα δούμε στη συνέχεια, καθώς για να καλύπτεται η ακεραιότητα του συστήματος απαιτούνται τουλάχιστον δύο σταθμοί. Σε αυτή την περίπτωση η PRC που θα μεταδίδεται για έναν δορυφόρο θα είναι ο μέσος όρος των διορθώσεων των δεδομένων που λαμβάνονται από κάθε έναν δέκτη αναφοράς για τον συγκεκριμένο δορυφόρο.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι ο χρόνος υπολογισμού της PRC,  $t_{count}$ , είναι σημαντικό στοιχείο για την εκτίμηση της ισχύος της, αλλά και χρήσιμο για την εφαρμογή της, όπως θα φανεί στην επόμενη ενότητα.

### 5.3 Εφαρμογή Διόρθωσης Ψευδοαπόστασης

Αφού υπολογισθούν οι διορθώσεις της ψευδοαπόστασης για όλους τους δορυφόρους που βρίσκονται σε ωφέλιμη οπτική επαφή, αυτές ομαδοποιούνται σε μηνύματα και αποστέλλονται στην ευρύτερη περιοχή του συστήματος μέσω ενός σταθμού εκπομπής δεδομένων στη μπάντα των VHF. Οι σταθμοί που κινούνται εντός της περιοχής, αφού λάβουν τα εκπεμπόμενα μηνύματα, επιλέγουν ποια θα χρησιμοποιήσουν, ανάλογα με ποιους δορυφόρους βλέπουν και χρησιμοποιούν.

Η διόρθωση PRC μπορεί να εφαρμοστεί κυρίως με δύο διαφορετικούς τρόπους, σε πραγματικό χρόνο ή με μετεπεξεργασία δεδομένων. Στην πρώτη περίπτωση της διαφορικής διόρθωσης σε πραγματικό χρόνο (Real-Time Differential Correction), τα δεδομένα μεταδίδονται από τον επίγειο σταθμό και εφαρμόζονται άμεσα από τους χρήστες του συστήματος. Η μέθοδος αυτή είναι ιδανική για πλοήγηση, καθώς εφαρμόζεται από τον χρήστη σε πραγματικό χρόνο στο πεδίο δράσης του. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απαιτεί από τα αεροσκάφη να διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό, τόσο για την λήψη των δεδομένων του σταθμού βάσης VHF όσο και για την σύγκριση τους με τα δεδομένα του δέκτη GPS του αεροσκάφους.

Στη δεύτερη μέθοδο, γνωστή και ως Post Processing, η εφαρμογή της PRC πραγματοποιείται σε δεύτερο χρόνο, καθώς η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων GPS που συλλέγονται, γίνεται μεταγενέστερα. Αυτή η μέθοδος είναι πιο ακριβής και πολύ χρήσιμη για την επιχειρησιακή αξιολόγηση των συστημάτων μέσα από την λεπτομερή ανάλυση των δεδομένων που έχουν ληφθεί. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η δεύτερη περίπτωση δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε συστήματα πλοήγησης όπως είναι το GBAS όπου απαιτείται η PRC να εφαρμόζεται άμεσα κατά τη διάρκεια της πτήσης.

Τα συστήματα GBAS κάνουν χρήση της πρώτης μεθόδου εφαρμογής της PRC σε πραγματικό χρόνο και μάλιστα οι διορθώσεις που στέλνονται έχουν χρονική αναφορά (time tags) και αναφορά του ρυθμού μεταβολής τους (RRC) έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να χρησιμοποιήσει τις διορθώσεις ανάλογα με το χρόνο. Σύμφωνα με το Doc MOPS DO-253C του οργανισμού RTCA για τον πρότυπο εξοπλισμό GBAS ενός αεροσκάφους [12], η διαφορικά διορθωμένη ψευδοαπόσταση του αεροσκάφους,  $\rho_{corr}$ , από μια πηγή μέτρησης  $i$  (δορυφόρο) σε μια χρονική στιγμή  $t$  με βάση την διόρθωση PRC, υπολογίζεται ως:

$$\rho_{corr_i}(t) = \rho_{SM_i}(t) + PRC_i(t_{zcount}) + RRC_i(t_{zcount}) \cdot (t - t_{zcount}) + c \cdot \Delta t_{SV_i} + TC_i \quad [5.13]$$

Ο όρος RRC (Range Rate Correction) υποδηλώνει τον ρυθμό μεταβολής των διορθώσεων ψευδοαπόστασης που εκπέμπονται από το σταθμό βάσης, δηλαδή την διαφορά στις τρέχουσες με τις προηγούμενες διορθώσεις. Οι τρέχουσες και οι αμέσως προηγούμενες διορθώσεις που εκπέμπονται, πρέπει να αντισταθμίζουν τις απρογραμμάτιστες αλλαγές στη συμπεριφορά των δορυφόρων, με σκοπό την εξάλειψη των απότομων διορθώσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή του συντελεστή RRC, ο οποίος διαβιβάζεται από το σταθμό εδάφους και υπολογίζεται ως εξής:

$$RRC_n = \frac{PRC_n - PRC_{n-1}}{t_{zcount_n} - t_{zcount_{n-1}}} \quad [5.14]$$

Όπου  $t_{zcount}$  είναι ο χρόνος υπολογισμού της PRC, που είναι διαφορετικός κάθε φορά.

Οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης 5.13, πλην του όρου TC που υποδηλώνει την τροποσφαιρική διόρθωση του αεροσκάφους σε σχέση με την τοπική διόρθωση του σταθμού αναφοράς, αποτυπώνονται στο βασικό μοντέλο διόρθωσης ψευδοαπόστασης. Συγκεκριμένα δεν χρησιμοποιείται η αρχική μέτρηση ψευδοαπόστασης, αλλά η εξομαλυνθείσα  $\rho_{SM}$  από το φίλτρο εξομάλυνσης του σχήματος 5.2 και επίσης ο όρος  $\Delta t_{sv}$  υποδηλώνει τη διόρθωση στην απόκλιση του δορυφορικού ρολογιού.

Η τροποσφαιρική διόρθωση TC που αναφέρεται σε έναν δορυφόρο  $i$  υπολογίζεται από την εξίσωση 5.15 :

$$TC_i = N_R h_0 \frac{10^{-6}}{\sqrt{0.002 + \sin^2(\theta_i)}} \left( 1 - e^{-\Delta h/h_0} \right) \quad [5.15]$$

Όπου

- $N_R$  είναι ο δείκτης τροποσφαιρικής διαθεσιμότητας
- $h_0$  είναι το ύψος των ορίων της τροπόσφαιρας
- $\theta$  είναι η γωνία λήψης από τον δορυφόρο και
- $\Delta h$  το ύψος του αεροσκάφους πάνω από το σημείο αναφοράς του GBAS

Όλα τα παραπάνω δεδομένα μεταδίδονται από το υποσύστημα εδάφους του GBAS.



# Κεφάλαιο 6

## GBAS

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα προσδιοριστούν, ο σκοπός ανάπτυξης του συστήματος GBAS και τα οφέλη λειτουργίας του έναντι του ILS. Έπειτα θα αναφερθούν οι διαφορετικές τεχνολογίες του συστήματος GBAS και θα αναπτυχθεί η αρχιτεκτονική του. Τέλος, θα αναλυθούν οι δύο επίσημες υπηρεσίες GBAS, η υπηρεσία προσέγγισης ακριβείας PA και η υπηρεσία προσδιορισμού θέσης και θα γίνει αναφορά στην επίδοση του συστήματος και στον έλεγχο της ακεραιότητας του.

### **6.1 Το Σύστημα GBAS και τα πλεονεκτήματα του έναντι του ILS**

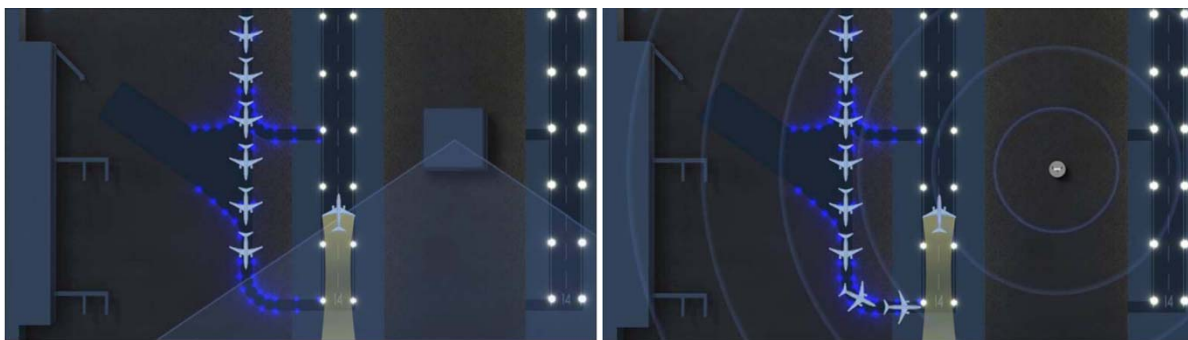
Όπως αναφέρθηκε στα πρώτα κεφάλαια, ένα μεγάλο μέρος της πολιτικής αεροπορίας χρησιμοποιεί n-route πλοήγηση μέσω GPS και θέλει να την διευρύνει και στις υπόλοιπες φάσεις των πτήσεων ώστε να αντικαταστήσει τα συμβατικά ραδιοβοηθήματα. Οι δυνατότητες πλοήγησης μέσω GPS είναι περιορισμένες, οπότε απαιτείται η βελτίωση των χαρακτηριστικών του GNSS συστήματος, της ακρίβειας, της αξιοπιστίας και της διαθεσιμότητας ώστε να

καλυφθούν τα απαιτούμενα του ICAO για τις αντίστοιχες διαδικασίες. Σκοπός του Ground Based Augmentation System GBAS είναι να προσφέρει διαδικασίες προσέγγισης ακριβείας από κατηγορία I έως κατηγορία III για συνθήκες ιδιαίτερα χαμηλής ορατότητας.

Ουσιαστικά το GBAS αναπτύχθηκε ως ένα GNSS σύστημα προσέγγισης PA (Precision Approach) εναλλακτικό του ραδιοβοηθήματος προσέγγισης ακριβείας και προσγειώσης ILS. Από την μέχρι τώρα λειτουργία του GBAS ως σύστημα παροχής PA CAT-I, αποδείχτηκε ότι τα πλεονεκτήματα του έναντι του ILS, είναι αρκετά για να το καταστήσουν σε λίγα χρόνια το πρωτεύων σύστημα για προσεγγίσεις ακριβείας και αυτόματες προσγειώσεις.

Το σύστημα GBAS χρειάζεται λιγότερες υποδομές, καθώς με μία μόνο εγκατάσταση υποσυστήματος εδάφους σε ένα αεροδρόμιο, μπορούν να καλυφθούν 48 διαδικασίες εντός αυτού. Αντίθετα εξοπλισμός ILS απαιτείται στο άκρο κάθε διαδρόμου στον οποίο εφαρμόζεται κάποια ILS διαδικασία. Αυτό συνεπάγεται μικρότερο κόστος εγκατάστασης, αλλά και λειτουργίας και συντήρησης παράλληλα, όπως και λιγότερους από αέρα ελέγχους, που σημαίνει λιγότερα καύσιμα, καθώς οι από αέρα έλεγχοι (Flight Checks) γίνονται μέσω ειδικά εξοπλισμένων αεροσκαφών.

Μέσω της χρήσης του συστήματος GBAS αυξάνεται η χωρητικότητα του αεροδρομίου, καθώς μπορούν να εξυπηρετηθούν περισσότερες πτήσεις και περισσότερα αεροσκάφη ταυτόχρονα. Λόγω του ότι τα δεδομένα VDB του GBAS εκπέμπονται στη ζώνη των VHF συχνοτήτων, είναι λιγότερο ευαίσθητα σε σφάλματα πολυδιαδρομής λόγω ανακλάσεων από εμπόδια εντός ή γύρω από το αεροδρόμιο, όπως κτίρια αλλά και αεροσκάφη που κινούνται στον τροχόδρομο ή βρίσκονται σε διαδικασία προσέγγισης ή καθόδου. Στο ILS λόγω των επιδράσεων στο σήμα του localizer από ανακλάσεις ή παρεμβολές από τα κοντινά αεροσκάφη, απαιτούνται μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των αεροσκαφών και μεγαλύτερες ελεύθερες περιοχές (σχήμα 6.1) κοντά στον διάδρομο, οδηγώντας έτσι σε μείωση της χωρητικότητας και σε καθυστερήσεις ή ακυρώσεις πτήσεων σε συνθήκες χαμηλής ορατότητας. Αντίθετα το GBAS λόγω της πηγής δεδομένων του, που βρίσκεται στο διάστημα, μπορεί να ανταποκριθεί ακόμα και στις πιο ακραίες καιρικές συνθήκες, καθώς δεν επηρεάζεται από αυτές, κάτι που το καθιστά και πολύ πιο ασφαλές από το ασταθές ILS.



Σχήμα 6.1 Ελεύθερη περιοχή στο ILS [52]    Σχήμα 6.2 Καμία ελεύθερη περιοχή στο GBAS [52]

Το σύστημα ILS λόγω της εκπομπής του με κατευθυντικές κεραίες, εγκατεστημένες στα άκρα των διαδρόμων, έχει ραδιοκάλυψη υπό συγκεκριμένες γωνίες και αυτό δημιουργεί αρκετούς 'τυφλούς' τομείς, όπου εκεί δημιουργείται το γνωστό φαινόμενο της 'ψευδούς λήψης' που είναι αρκετά κρίσιμο. Επίσης αυτό δημιουργεί αυστηρούς περιορισμούς ως προς τα ύψη των εμποδίων (κτήρια) στον τομέα του glide path αλλά καθιστά και αδύνατη την εγκατάσταση του ILS σε αεροδρόμια με περιοχές δύσκολης μορφολογίας εδάφους. Το GBAS αντιθέτως μέσω της ιστροπικής VHF κεραίας, εκπέμπει το σήμα VDB πανκατευθυντικά (σχήμα 6.2) με συνέπεια να υπάρχει ραδιοκάλυψη όλης σχεδόν της περιοχής τουλάχιστον μέχρι τα 23 NM. Αυτό συνεπάγεται την άρση των παραπάνω περιορισμών, τη δημιουργία καλύτερων και καμπύλων διαδικασιών, αλλά και προσεγγίσεων με μεγαλύτερη γωνία καθόδου. Τα οφέλη από τις βελτιωμένες διαδικασίες εκτός από οικονομικά λόγω των λιγότερων καυσίμων των αεροσκαφών, είναι και οικολογικά, με λιγότερα καυσαέρια αλλά και θόρυβο μειωμένο κατά 30 με 40 %.

## 6.2 Τεχνολογίες και Υπηρεσίες GBAS

Το σύστημα GBAS αυτή τη στιγμή είναι τυποποιημένο ώστε να παρέχει υπηρεσίες πλοήγησης για προσεγγίσεις ακριβείας PA (Precision Approach) μέχρι κατηγορία I (CAT-I), χρησιμοποιώντας τον αστερισμό του GPS ή του Glonass και λαμβάνει σήματα μόνο στη ζώνη συχνοτήτων L<sub>1</sub>. Η υπηρεσία αυτή είναι γνωστή ως Προσέγγιση τύπου C, GBAS **GAST-C** (Approach Service Type C), η οποία αναπτύσσεται στην παρούσα διατριβή.

Προκειμένου να επεκταθεί η προσέγγιση μέσω GBAS για κατηγορίες II και III (CAT II/III), η υπηρεσία **GAST-D** (GBAS Approach Service Type D) αναπτύσσεται συνεχώς και είναι κοντά σε τυποποίηση. Μέσω του GAST-D παρακολουθείται η ιονοσφαιρική απειλή και γίνεται

προσπάθεια αντιμετώπισης της, ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις ακεραιότητας για υπηρεσίες PA CAT II/III. Το GAST-D έχει σχεδόν την ίδια αρχιτεκτονική με το GAST-C, αλλά έχει νέα monitors εδάφους για τις επιδράσεις της ιονόσφαιρας και την καλύτερη επιτήρηση της ακεραιότητας.

Λόγω της καθυστέρησης ολοκλήρωσης του GAST-D και χάρη στην ανάπτυξη συγχρόνων αστερισμών GNSS όπως του Galileo και του Beidou, αλλά και τον εκσυγχρονισμό του GPS, ερευνάται η τεχνολογία των πολλαπλών αστερισμών (multi-Constellation MC) και της πολλαπλής συχνότητας (Multi-Frequency MF), η λεγόμενη τεχνολογία **GAST-F**. Στην Ευρώπη οι ερευνητικές δραστηριότητες επικεντρώθηκαν στην εκμετάλλευση δύο GNSS αστερισμών, του GPS και του Galileo, με τη λήψη δύο συχνοτήτων δημιουργώντας την τεχνολογία DC/DF για την υπηρεσία GAST-F.

Στο μέλλον και αφού οι υπηρεσίες GAST-D και GAST-F επικυρωθούν, υπάρχει ο σχεδιασμός της συνέργειας μεταξύ των δύο τεχνολογιών. Συγκεκριμένα σε περίπτωση απώλειας συχνότητας όταν το GAST-F επιλέγεται σαν το πρωτεύων σύστημα, η υπηρεσία μεταβάλλεται σε GAST-D ή μεταπίπτει σε GAST-C και CAT-I. Αντίστοιχα αν το πρωτεύων σύστημα είναι το GAST-D και χαθεί η ακεραιότητα λόγω ιονοσφαιρικών ανωμαλιών, γίνεται επιλογή της τεχνολογίας GAST-F. Με αυτό τον τρόπο διευρύνεται και εξασφαλίζεται η Συνέχεια (Continuity) της παρεχόμενης υπηρεσίας GBAS.

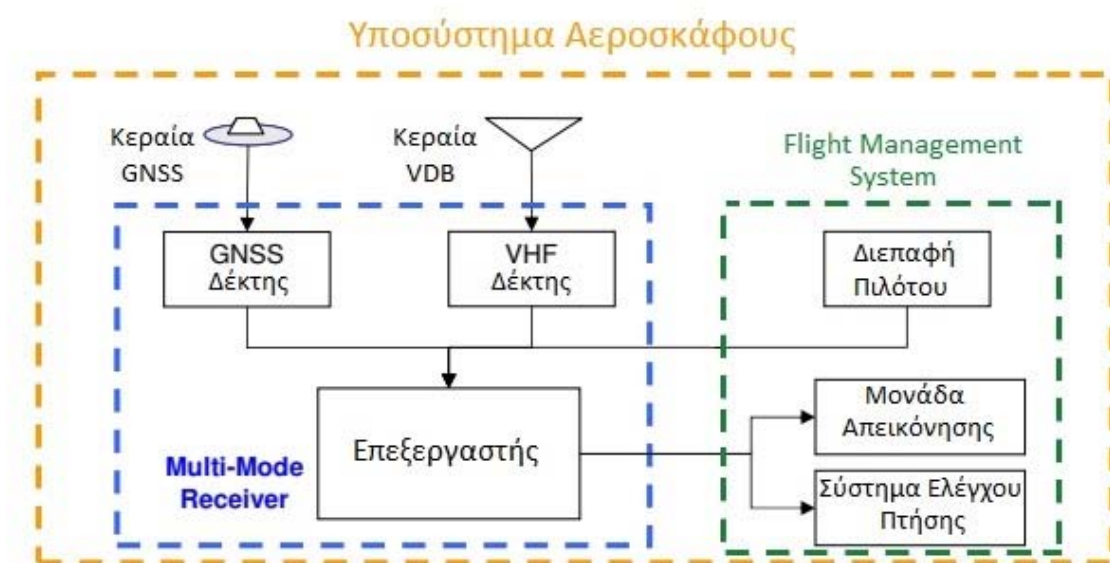
### 6.3 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα GBAS αποτελείται από τρία υποσυστήματα, το υποσύστημα εδάφους, το δορυφορικό υποσύστημα και το υποσύστημα του αεροσκάφους.

Το υποσύστημα εδάφους και η λειτουργία του χωρίζεται σε τρία επιμέρους μικρότερα υποσυστήματα, το υποσύστημα της λήψης των δορυφορικών δεδομένων, το κεντρικό υποσύστημα της επεξεργασίας τους και το υποσύστημα εκπομπής των τελικών μηνυμάτων διόρθωσης. Εκτενής αναφορά και μελέτη του υποσυστήματος εδάφους θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο 7.

Το δορυφορικό υποσύστημα αποτελεί την πηγή δεδομένων του συστήματος GBAS και προς το παρόν ο αστερισμός δορυφόρων που χρησιμοποιείται είναι αυτός των ΗΠΑ, το σύστημα GPS. Στα προηγούμενα κεφάλαια αναπτύχθηκαν αρκετά από τα χαρακτηριστικά των συστημάτων GNSS που σχετίζονται με τη λειτουργία του GBAS.

Το υποσύστημα αεροσκάφους αποτελείται από τρία μέρη. Τις κεραιές λήψης των σημάτων GNSS και των σημάτων VDB του GBAS, το υποσύστημα λήψης και επεξεργασίας MMR (Multi-Mode Receiver) και το τερματικό διεπαφής FMS (Flight Management System) που βρίσκεται στο πιλοτήριο του αεροσκάφους. Τα μέρη του υποσυστήματος αεροσκάφους, όπως και η ροή της λειτουργίας του, απεικονίζονται στο σχήμα 6.3



Σχήμα 6.3 Υποσύστημα Αεροσκάφους

Οι κύριες λειτουργίες του υποσυστήματος αεροσκάφους είναι, αρχικά να δεχτεί μέσω των κεραιών του, τα VDB σήματα του GBAS και τα σήματα του αστερισμού GNSS και να τα αποκωδικοποιήσει μέσω του MMR. Το MMR στη συνέχεια θα αξιολογήσει τη διαθεσιμότητα του συστήματος στο να υποστηρίξει την διαδικασία πτήσης που βρίσκεται σε εξέλιξη και αφού αυτό θα ισχύσει, θα προσδιορίσει τη θέση του αεροσκάφους και την ακεραιότητα της. Τέλος το τερματικό FMS αφού λάβει τα τελικά δεδομένα μέσω TCP/IP, παρέχει σήματα καθοδήγησης και ακεραιότητας στον χρήστη του συστήματος, δηλαδή στον πιλότο.

Για να πραγματοποιηθεί όλη η παραπάνω διαδικασία και το αεροσκάφος να μπει σε διαδικασία προσέγγισης μέσω GBAS, πρέπει πρώτα ο πιλότος να επιλέξει την συχνότητα του αεροδρομίου από το οποίο εκπέμπονται οι επίγειες πληροφορίες GBAS. Αυτό γίνεται, με την επιλογή από τον

πιλότο ενός πενταψήφιου καναλιού μέσω του FMS, διαδικασία που θα αναπτυχθεί σε επόμενη ενότητα.

## 6.4 Προσέγγιση Ακριβείας GBAS

Η διαδικασία προσέγγισης Ακριβείας (Precision Approach) GBAS, προορίζεται για όλες τις PA κατηγορίες. Μία ολοκληρωμένη διαδικασία PA περιλαμβάνει την περιοχή FAS (Final Approach Segment) και ορίζεται από επίπεδα προστασίας (Protection Levels) και όρια ειδοποίησης (Alert Limits) που καθορίζονται από διάφορες αποκλίσεις.

### 6.4.1 Κατηγορίες Προσεγγίσεων Ακριβείας

Οι κατηγορίες Προσεγγίσεων Ακριβείας είναι τρεις και χωρίζονται σε CAT-I, CAT-II και CAT-III. Αυτές ταξινομούνται με βάση την ορατότητα της διαδρομής RVR (Runway Visual Range) και το ύψος απόφασης DH (Decision Height). RVR είναι η μέγιστη απόσταση στον κεντρικό άξονα του διαδρόμου, όπου ο πιλότος μπορεί να δει τα σημάδια επιφανείας που οριοθετούν τον διάδρομο. DH είναι το ελάχιστο ύψος πάνω από το διάδρομο όπου ο πιλότος αποφασίζει αν θα προσγειωθεί, ή θα εγκαταλείψει τη διαδικασία. Βασίζεται στο αν ο πιλότος μπορεί πλέον χωρίς την καθοδήγηση οργάνων (Instrumental), αλλά μόνο με οπτική επαφή (Visual) να εφαρμόσει διαδικασία προσγείωσης. Οι κατηγορίες Προσέγγισης Ακριβείας ορίζονται στο πίνακα 6.1 ως:

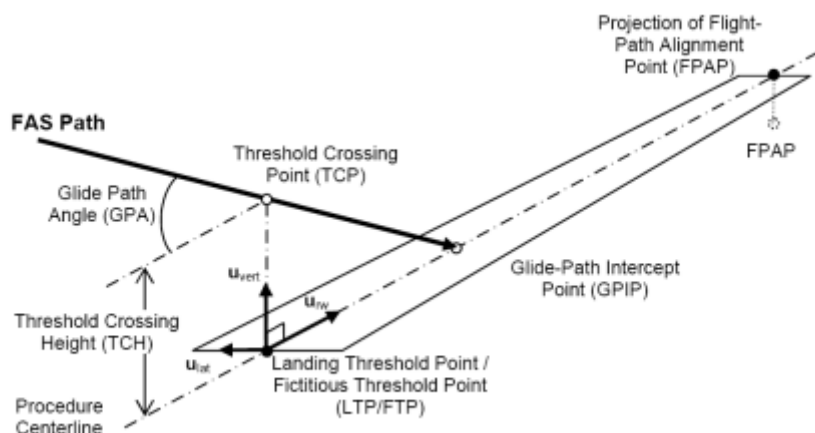
Κατηγορία	DH (μέτρα)	RVR (μέτρα)
CAT-I	$\geq 60$	$\geq 550$
CAT-II	$60 > DH \geq 30$	$\geq 350$
CAT-IIIA	$< 30$ ή καθόλου DH	$\geq 200$
CAT-IIIB	$< 15$ ή καθόλου DH	$200 > RVR \geq 50$
CAT-IIIC	0 (Διάδρομος)	0 (Διάδρομος)

Πίνακας 6.1 Ελάχιστες Απαιτήσεις ανά κατηγορία διαδικασιών PA

### 6.4.2 Ορισμός Τελικού Τμήματος Προσέγγισης FAS

Το τμήμα FAS (Final Approach Segment) είναι η νοητή ευθεία που ορίζεται από το κέντρο του κατωφλίου προσγείωσης (LTP), το κέντρο του πλασματικού κατωφλίου (FTP), το κέντρο

ευθυγράμμισης καθόδου (FPAP), το ύψος διέλευσης κατωφλίου (TCH) και τη γωνία καθόδου (GPA), όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4



Σχήμα 6.4 Ορισμός τμήματος FAS [14]

Το σημείο LTP/FTP βρίσκεται στη διασταύρωση του κεντρικού άξονα του διαδρόμου και του κατωφλίου στην αρχή του διαδρόμου (Threshold) και είναι το σημείο όπου η διαδρομή FAS περνά από το TCH. Το FPAP βρίσκεται στο ίδιο ύψος με το LTP/FTP και χρησιμοποιείται για την ευθυγράμμιση της προσέγγισης. GPA είναι η γωνία μεταξύ της διαδρομής καθόδου (Glide Path) και του οριζόντιου επιπέδου του LTP/FTP και ορίζει το σημείο επαφής του με το διάδρομο GPIP.

Δύο επιπλέον παράμετροι χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το FAS, το εύρος πορείας (Course Width CW), που αντιπροσωπεύει την πλευρική μετατόπιση από τη ευθεία μεταξύ FAS και LTP/FTP και απεικονίζεται μέσω ενός δείκτη απόκλισης πορείας, και την αντιστάθμιση μήκους (Length Offset LO), που είναι η απόσταση από το τέλος του διαδρόμου έως το FPAP. Τα διάφορα FASs αναγνωρίζονται από τα αεροσκάφη μέσω αντίστοιχου για το καθένα αριθμού αναφοράς RPDS, που μεταδίδεται από το υποσύστημα εδάφους GBAS μέσω των VDB μηνυμάτων του.

### 6.4.3 Απαιτήσεις Υποσυστήματος Εδάφους

Προκειμένου να υποστηρίξει διαδικασίες PA CAT-I, το υποσύστημα εδάφους πρέπει να υποδεικνύει κίνδυνο για την ακεραιότητα, ίσο ή μικρότερο από  $1,5 \times 10^{-7}$  ανά προσέγγιση με χρόνο προειδοποίησης  $3^{\omega}$  δευτερόλεπτων και κίνδυνο για την συνέχεια ίσο ή μικρότερο από  $3,3 \times 10^{-6}$  κατά τη διάρκεια οποιονδήποτε 15 δευτερόλεπτων.

#### 6.4.4 Διαδικασία

Η διαδικασία για την εκτέλεση μίας προσέγγισης GBAS αρχίζει με την επιλογή του αριθμού καναλιού στο FMS, από τον πιλότο. Ο αριθμός καναλιού είναι ένας πενταψήφιος αριθμός μεταξύ 20000 και 39999 και χρησιμοποιείται για τη λήψη της συχνότητας μετάδοσης του υποσυστήματος εδάφους GBAS και την επιλογή του επιθυμητού FAS μέσω του RPDS. Οι αριθμοί των καναλιών και η αντιστοίχιση με τη συχνότητα και τον αριθμό RPDS, φαίνεται στον πίνακα 6.2, ο οποίος δημιουργείται μέσω των παρακάτω σχέσεων :

$$F = 108.0 + ((N - 20000) \bmod 411) \times 0.025 [\text{MHz}] \quad (6.1)$$

$$RPDS = (N - 20000) \div 411 \quad (6.2)$$

Αριθμός Καναλιού	Συχνότητα (MHz)	Αριθμός RPDS
20000	108.000	0
20001	108.025	0
20002	108.050	0
...	...	...
20398	117.950	0
20399	117.975	0
20400-20410	δεν χρησιμοποιούνται	-
20411	108.000	1
20412	108.025	1
20413	108.050	1
...	...	...
39998	114.750	48
39999	114.775	48

Πίνακας 6.2 Κανάλια συστήματος GBAS

Μετά την επιλογή καναλιού και αφού το υποσύστημα αεροσκάφους συντονιστεί στην επιθυμητή συχνότητα, την αποδιαμορφώνει, την αποκωδικοποιεί και ελέγχει τα μηνύματα που λαμβάνει, ώστε να επιλέξει την κατάλληλη FAS. Αφού την επιλέξει, προχωρά στην οργάνωση της με όλα τα στοιχεία που ήδη αναφέρθηκαν. Τα μηνύματα περιέχουν επίσης τις διαφορεικά διορθωμένες ψευδοαποστάσεις, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης του αεροσκάφους, εντός της διαδρομής FAS και παράλληλα υπολογίζονται οι αποκλίσεις της



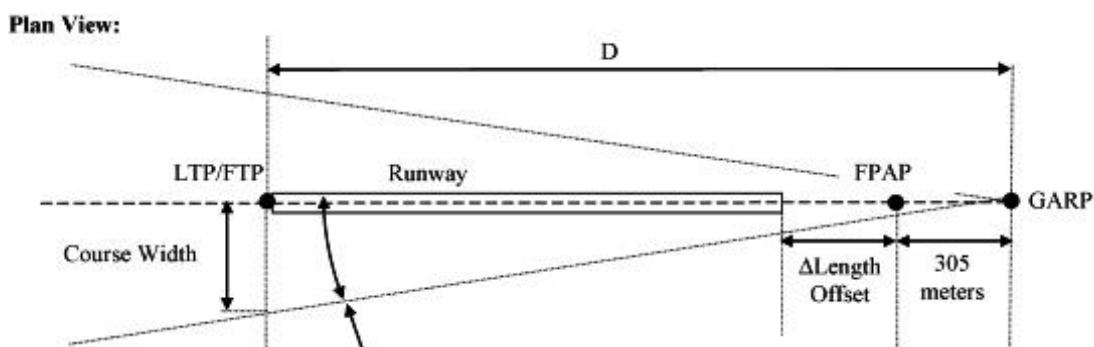
διαδρομής όπως στη περίπτωση μίας ILS διαδικασίας. Αυτές οι πληροφορίες στη συνέχεια περνούν στο σύστημα ελέγχου πτήσης και στις κύριες ενδείξεις πιλοτηρίου, μαζί με την ένδειξη ακεραιότητας, που δηλώνει αν το σύστημα πληροί τις προϋποθέσεις/ απαιτήσεις λειτουργίας, και την απόσταση από το LTP/FTP.

#### 6.4.5 Αποκλίσεις (Deviations)

Χρησιμοποιώντας την διαφορικά διορθωμένη θέση, το υποσύστημα αεροσκάφους υπολογίζει τις πλευρικές και τις κάθετες αποκλίσεις από την επιθυμητή ευθεία FAS. Όπως και στο σύστημα ILS, αυτές αποτυπώνονται με την αντίστοιχη διαφορά στο βάθος διαμόρφωσης DDM.

##### Πλευρική απόκλιση (Lateral Deviation)

Η αποτύπωση της πλευρικής απόκλισης από τη FAS, φαίνεται παρακάτω :

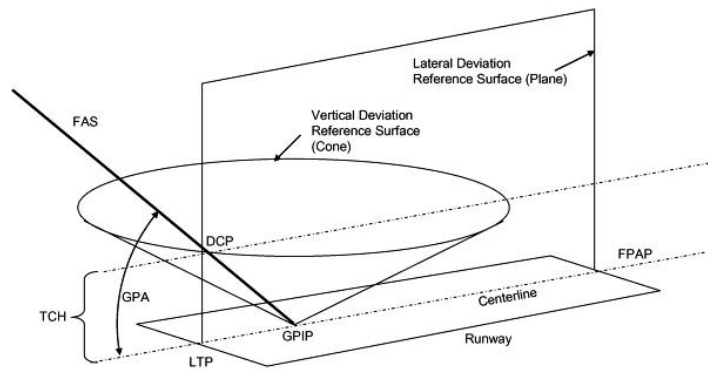


Σχήμα 6.5 Πλευρική απόκλιση από τη FAS [17]

Για τον υπολογισμό της πλευρικής απόκλισης, ορίζεται το σημείο αναφοράς αζιμούθιου GARP, ως το σημείο που βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο που περιέχει το LTP/FTP και είναι 305 μέτρα πέρα από το σημείο όπου η κάθετη προβολή του FPAP, τέμνει αυτό το επίπεδο.

##### Κάθετη απόκλιση (Vertical Deviation)

Η κάθετη απόκλιση από τη FAS δηλώνεται σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς υψομέτρου GERP, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 6.6



Σχήμα 6.6 Κάθετη απόκλιση από τη FAS [17]

Το GERP μπορεί να βρίσκεται στο GPIIP ή να μετατοπίζεται πλευρικά του, με σταθερή τιμή αντιστάθμισης 150 μέτρων. Το GERP είναι η κορυφή ενός κυκλικού κώνου με μία γωνία που καθορίζεται από τη GPA και από όπου υπολογίζεται η κάθετη απόκλιση.

#### 6.4.6 Επίπεδα προστασίας (Protection Levels)

Τα επίπεδα προστασίας για PA διαδικασίες, είναι υψηλά όρια εμπιστοσύνης για το ενδεχόμενο λάθους θέσεως. Ο υπολογισμός τους βασίζεται στις πρότυπες πλευρικές και κάθετες αποκλίσεις, και ορίζονται αντίστοιχα ως πλευρικά επίπεδα προστασίας LPL και κάθετα επίπεδα προστασίας VPL. Μάλιστα οι αποκλίσεις λαμβάνονται σε μεγαλύτερο βαθμό από τις πρότυπες τιμές τους, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η κατάσταση με το χειρότερο σενάριο.

#### 6.4.7 Όρια Ειδοποίησης (Alert Limits)

Τα όρια ειδοποίησης ορίζονται από τα επίπεδα προστασίας της PA ως συνάρτηση της θέσης του αεροσκάφους. Συγκεκριμένα τα PA όρια ειδοποίησης ορίζονται από το πλευρικό όριο ειδοποίησης της FAS, το FASLAL, και το κάθετο όριο ειδοποίησης της FAS, το FASVAL. Οι πίνακες 6.3 και 6.4 παρουσιάζουν τις συνθήκες υπολογισμού των πλευρικών και των κάθετων ορίων ειδοποίησης, LAL και VAL αντίστοιχα.

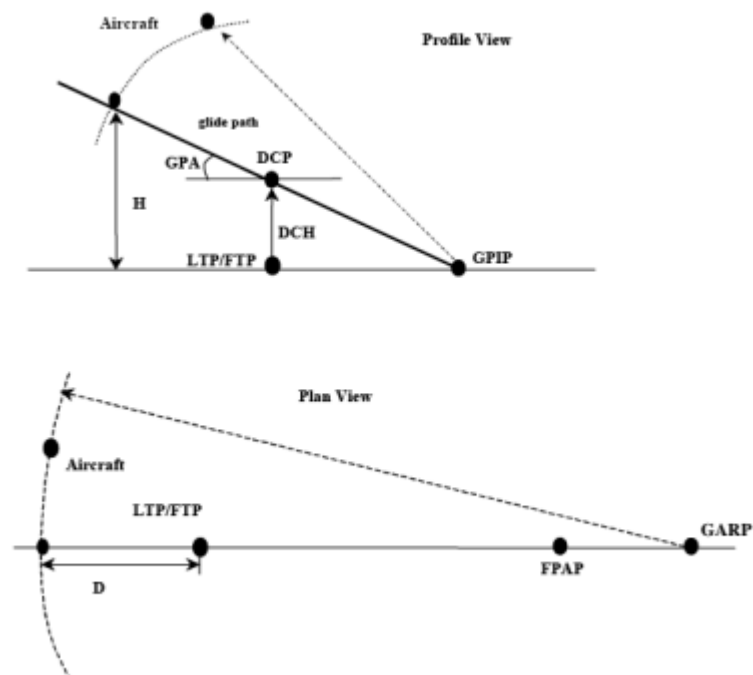
Συνθήκες (αποστάσεις σε μέτρα)	Πλευρικά όρια ειδοποίησης LAL
$D \geq 7500$	FASLAL + 29.15
$7500 > D \geq 873$	$0.0044 \cdot D + \text{FASLAL} - 3.85$
$873 \geq D$	FASLAL

Πίνακας 6.3 Συνθήκες LAL για PA διαδικασία

Συνθήκες (αποστάσεις σε μέτρα)	Πλευρικά όρια ειδοποίησης LAL
$H \geq 408.432$	FASVAL + 33.35
$408.432 > H \geq 60.96$	$0.096 \cdot H + \text{FASVAL} - 5.85$
$60.96 \geq H$	FASVAL

Πίνακας 6.4 Συνθήκες VAL για PA διαδικασία

Όπου D είναι η οριζόντια απόσταση του αεροσκάφους από το σημείο LTP/FTP όπως αποτυπώνεται κατά το μήκος του FAS και H είναι το ύψος του αεροσκάφους πάνω από το LTP/FTP όπως αποτυπώνεται πάνω στο FAS. Μάλιστα όπως φαίνεται από τους πίνακες, όσο το αεροσκάφος προσεγγίζει το σημείο LTP/FTP, οι απαιτήσεις ακρίβειας γίνονται αυστηρότερες. Το πώς ορίζονται το D και το H φαίνεται στα σχεδιαγράμματα του σχήματος 6.7 [14]



Σχήμα 6.7 Αποτύπωση του D και H [14]

## 6.5 Υπηρεσία Εντοπισμού Θέσης

Ομοίως με την προηγούμενη ενότητα και εδώ θα παρουσιαστεί αναλυτικά η διαδικασία και οι αντίστοιχοι παράγοντες σχετικά με την υπηρεσία εντοπισμού θέσης GBAS.

### 6.5.1 Απαιτήσεις Υποσυστήματος Εδάφους

Προκειμένου να υποστηριχτεί η υπηρεσία εντοπισμού θέσης, το υποσύστημα εδάφους χρειάζεται να έχει ένα κίνδυνο ακεραιότητας ίσο ή μικρότερο από  $9,9 \times 10^{-8}$  ανά προσέγγιση με χρόνο προειδοποίησης  $3^{\text{ων}}$  δευτερολέπτων και κίνδυνο συνέχειας ίσο ή μικρότερο από  $10^{-4}$ , κατά τη διάρκεια οποιονδήποτε 15 δευτερολέπτων.

### 6.5.2 Διαδικασία

Η διαδικασία χρήσης του εντοπισμού θέσης είναι όμοια με την διαδικασία προσέγγισης ακριβείας PA. Επιλέγεται ένας αριθμός και η αντιστοίχιση συχνοτήτων είναι η ίδια όπως στην διαδικασία PA, στον πίνακα 6.2, με τη διαφορά ότι αντί να ληφθεί ο αριθμός RPDS, λαμβάνεται ένα χαρακτηριστικό για τον σταθμό που θα χρησιμοποιηθεί, το RSDS (δεδομένα αναφοράς επιλογής σταθμού). Με αυτό τον τρόπο μπορούν περισσότεροι από ένας σταθμοί GBAS να εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα, εντός της ίδιας περιοχής.

Η πρώτη ενέργεια του υποσυστήματος αεροσκάφους είναι να αξιολογήσει την απόσταση του από το σημείο αναφοράς του GBAS και να ελέγξει αν είναι εντός της μέγιστης απόστασης, όπου οι διορθώσεις GBAS θεωρούνται έγκυρες. Η απόσταση αυτή εκπέμπεται από το υποσύστημα εδάφους και αξιολογείται μέσα από το λειτουργικό σύστημα του αεροσκάφους.

### 6.5.3 Αποκλίσεις (Deviations)

Δεν υπάρχουν απαιτήσεις ελάχιστης απόκλισης από την υπηρεσία εντοπισμού θέσης GBAS ως προς την παροχή καθοδήγησης. Ωστόσο το GNSS υποστηρίζει διαδικασίες πλοήγησης RNAV, που δημιουργούν επιθυμητό flight path, και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή καθοδήγησης σε ένα αεροσκάφος υποδεικνύοντας το σφάλμα πτήσης FTE, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ εκτιμώμενης και επιθυμητής θέσης αεροσκάφους.

#### 6.5.4 Επίπεδα προστασίας (Protection Levels)

Ομοίως με την υπηρεσία προσέγγισης PA, η υπηρεσία εντοπισμού έχει δύο τύπους επιπέδων προστασίας που υπολογίζονται υπό φυσιολογικές ή υπό εσφαλμένες συνθήκες, υπόθεσης H0 και H1 αντίστοιχα, αλλά και έναν τύπο ακόμη που αφορά τα σφάλματα ephemeris, δηλαδή την πιθανότητα μεγάλων αποκλίσεων μεταξύ των πραγματικών και των εκτιμώμενων θέσεων των δορυφόρων. Τα επίπεδα προστασίας για αυτή την υπηρεσία ορίζονται ως κάθετα VPL και ως οριζόντια επίπεδα HPL, ο υπολογισμός των οποίων είναι μία αρκετά σύνθετη διαδικασία.

#### 6.5.5 Όρια Ειδοποίησης (Alert Limits)

Τα όρια ειδοποίησης για την υπηρεσία εντοπισμού θέσης εξαρτώνται από την προβλεπόμενη GNSS διαδικασία πτήσης και τόσο τα οριζόντια, όσο και τα κάθετα όρια ειδοποίησης φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα 6.5

Τυπικές Λειτουργίες	Οριζόντια Όρια Ειδοποίησης	Κάθετα Όρια Ειδοποίησης
En-Route	3.7 Χμ	N/A
En-Route, Terminal	1.85 Χμ	N/A
NPA	556 μέτρα	N/A
APV-I	556 μέτρα	50 μέτρα
APV-II	40 μέτρα	20 μέτρα
CAT-I	40 μέτρα	15 έως 10 μέτρα

Πίνακας 6.5 Όρια Ειδοποίησης για GNSS διαδικασίες

### 6.6 Επίδοση συστήματος και έλεγχος Ακεραιότητας

Η επίδοση του συστήματος GBAS χαρακτηρίζεται από τις δύο ξεχωριστές επιδόσεις του υποσυστήματος αεροσκάφους και του υποσυστήματος εδάφους. Οι δύο αυτές επιδόσεις χαρακτηρίζουν την συμβολή του κάθε υποσυστήματος στη διόρθωση του σφάλματος ψευδοαπόστασης.

Το υποσύστημα αεροσκάφους χαρακτηρίζεται από την μετρική προσδιορισμού της ακρίβειας αεροσκάφους (**AAD**) και ορίζεται είτε για βασική ακρίβεια που πετυχαίνεται χρησιμοποιώντας

συνήθη τεχνολογία δέκτη, είτε για βελτιωμένη ακρίβεια βασισμένη σε δέκτη τελευταίας τεχνολογίας.

Το υποσύστημα εδάφους προσδιορίζεται από δύο μετρικές :

- Την μετρική προσδιορισμού της ακρίβειας εδάφους (**GAD**) που ορίζει την ελάχιστη απόδοση σταθερής κατάστασης για την ακρίβεια της διόρθωσης ψευδοαπόστασης για το GBAS SIS (Signal in Space), δηλαδή, χαρακτηρίζει την προβλεπόμενη συμβολή του υποσυστήματος εδάφους στο διορθωμένο σφάλμα ψευδοαπόστασης. Το GAD είναι χρήσιμο για την πρόβλεψη του επιπέδου υπηρεσίας που μπορεί να υποστηριχθεί από το σύστημα.

- Την μετρική προσδιορισμού της συνέχειας και της ακεραιότητας εδάφους (**GCID**), η οποία ισχύει μόνο για την υπηρεσία προσέγγισης ακριβείας και υποδεικνύει εάν το υποσύστημα εδάφους μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της συνέχειας και της ακρίβειας της αντίστοιχης κατηγορίας PA. Στην πράξη το GCID υποδεικνύει την τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας του υποσυστήματος εδάφους [14]

Επίσης το υποσύστημα εδάφους εκπέμπει μία σημαντική πληροφορία που αφορά την επίδοση του, τα λεγόμενα **B-Values**, για να γνωρίζει το υποσύστημα αεροσκάφους τον αριθμό των δεκτών αναφοράς που παράγουν έγκυρες μετρήσεις για ένα δεδομένο δορυφόρο. Τα B-Values είναι παράμετροι που σχετίζονται με την ακεραιότητα της PRC.

Η συνέχεια του υποσυστήματος εδάφους είναι η πιθανότητα ότι στη διάρκεια οποιασδήποτε περιόδου 15 δευτερολέπτων που ο πομπός VHF εκπέμπει συνεχώς δεδομένα, η εκπεμπόμενη ισχύς είναι εντός των καθορισμένων ορίων, τα επίπεδα προστασίας για CAT-I PA είναι χαμηλότερα από τα όρια ειδοποίησης και η ακεραιότητα του υποσυστήματος διασφαλίζεται από τη λειτουργία του monitor παρακολούθησης ακεραιότητας.

Η ακεραιότητα του υποσυστήματος εδάφους εξασφαλίζεται από την συνεχή λειτουργία του monitor παρακολούθησης ακεραιότητας, το οποίο σε μόνιμη βάση ελέγχει

- Τις μετρήσεις του δέκτη αναφοράς για να ανιχνεύσει τους προβληματικούς δέκτες και να τους αποκλείσει από την διαδικασία

- Τους διαθέσιμους δορυφόρους ώστε να προειδοποιήσει τους χρήστες είτε για την εμφάνιση αστοχιών στο σήμα, όπως παραμόρφωση ή χαμηλή στάθμη, είτε για σφάλματα Ephemeris.

- Την εκπομπή δεδομένων ώστε να επιβεβαιώσει ότι το VDB link είναι εντός της απαιτούμενης ισχύος και ότι τα αλλοιωμένα δεδομένα καταγράφονται.

Ειδικότερα, ο έλεγχος ακεραιότητας πραγματοποιείται μέσω της παρακολούθησης της ποιότητας, της συνέπειας και της επικοινωνίας του υποσυστήματος. Ο μηχανισμός παρακολούθησης της ποιότητας (QM) αποτελείται από τέσσερις επιμέρους ελέγχους, τον έλεγχο της κατάστασης του δέκτη (ROM), τον έλεγχο της ποιότητας του σήματος που λαμβάνει (SQM), τον έλεγχο της ποιότητας των δεδομένων του σήματος (DQM) και τον έλεγχο της ποιότητας των μετρήσεων της ψευδοαπόστασης και της φάσης του φέροντος. Ο έλεγχος της συνέπειας (MRCC) πραγματοποιείται ελέγχοντας τη συνέπεια των μετρήσεων που εκτελούνται από διαφορετικούς δέκτες αναφοράς, για να ανιχνεύσουν βλάβες στους λοιπούς δέκτες. Ο έλεγχος VHF επικοινωνίας (VCCM) πραγματοποιείται μέσω ενός δέκτη VHF που παρακολουθεί το VDB σήμα και διασφαλίζει ότι η μετάδοση είναι εντός των καθορισμένων απαιτήσεων.

# Κεφάλαιο 7

## Μοντέλο Επίγειου Σταθμού GBAS

Ο κύριος στόχος αυτής της διατριβής είναι να μελετηθούν οι επιμέρους τεχνολογίες που απαιτούνται για την εφαρμογή και υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος GBAS, ώστε να σχεδιαστεί ένα μοντέλο επίγειου σταθμού κατάλληλο για να εφαρμοσθεί στο μέλλον στον Αερολιμένα Καστοριάς. Σχεδιάζοντας τις προδιαγραφές και τις τεχνολογίες που απαιτούνται για ένα πρότυπο επίγειο σταθμό GBAS δημιουργείται ένα μοντέλο (framework) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στον αερολιμένα Καστοριάς, όσο και σε άλλα αεροδρόμια της Ελλάδας. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι προδιαγραφές και τα κριτήρια του siting και της εγκατάστασης ενός υποσυστήματος εδάφους GBAS σε ένα αεροδρόμιο και θα παρατεθούν χρήσιμα στοιχεία της λειτουργίας και της εγκατάστασης του Αερολιμένα Καστοριάς.

### 7.1 Γενική Αρχιτεκτονική Αεροδρομίων

Είναι χρήσιμο για την κατανόηση των στοιχείων που θα παρατεθούν στη μελέτη αυτού του κεφαλαίου, να γίνει αναφορά στη γενική αρχιτεκτονική ενός αεροδρομίου. Οι συστάσεις σχεδιασμού των αεροδρομίων καλύπτονται κυρίως από το Annex 14 του ICAO. Αυτές επικεντρώνονται στους διαδρόμους, τους τροχόδρομους, την πίστα και τις περιοχές



εγκατάστασης των ραδιοβοηθημάτων, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών ασφαλείας γύρω τους. Παρόλα αυτά, τα αεροδρόμια διαθέτουν και άλλες υποδομές όπως αεροσταθμούς (terminals), πύργους ελέγχου, κτίριο πυροσβεστικής κ.α., οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τη διάταξη του αεροδρομίου και πρέπει να πληρούν τις αποστάσεις και τα ύψη ασφαλείας.

Οι περιοχές όπως ακριβώς ορίζονται στο Annex 14 του ICAO [02] είναι :

- Runway (Διάδρομος).

Καθορισμένη ορθογώνια περιοχή επί του εδάφους του αεροδρομίου, που έχει προετοιμαστεί για την προσγείωση και την απογείωση των αεροσκαφών.

- Stopway (Άκρο Διαδρόμου).

Καθορισμένη ορθογώνια περιοχή επί του εδάφους του αεροδρομίου, στο τέλος της διαθέσιμης διαδρομής απογείωσης, που έχει προετοιμαστεί κατάλληλα ώστε ένα αεροσκάφος να μπορεί να σταματήσει σε περίπτωση αποτυχημένης απογείωσης.

- Taxiway (Τροχόδρομος)

Καθορισμένη διαδρομή επί του εδάφους του αεροδρομίου, που προορίζεται για την τροχοδρόμηση ενός αεροσκάφους και για την σύνδεση μεταξύ διαφορετικών περιοχών ενός αεροδρομίου. Συνήθως βρίσκεται παράλληλα με τον διάδρομο.

- Apron (Πίστα)

Καθορισμένη περιοχή επί του εδάφους του αεροδρομίου, που προορίζεται για σκοπούς φόρτωσης ή εκφόρτωσης επιβατών ή φορτίου στα αεροσκάφη, για ανεφοδιασμό τους με καύσιμα, για συντήρηση και για στάθμευση.

- Terminal (Αεροσταθμός)

Η κύρια κτιριακή εγκατάσταση εξυπηρέτησης των επιβατών και των εταιριών που δραστηριοποιούνται στο αεροδρόμιο. Περιλαμβάνει χώρους όπως την αίθουσα αναμονής, την αίθουσα αναχωρήσεων με τις πύλες εξόδου στην πίστα και την αίθουσα αφίξεων με την παραλαβή των αποσκευών.

- Tower (Πύργος Ελέγχου)

Θεωρητικά το ψηλότερο κτίριο του αεροδρομίου, που είτε είναι ανεξάρτητο, είτε είναι μαζί με το terminal. Εδώ βρίσκεται ο χώρος από όπου πραγματοποιείται ο έλεγχος κίνησης του

αεροδρομίου από τους Ελεγκτές Εναέριας Κυκλοφορίας, όπως επίσης και ο χώρος των συστημάτων επιτήρησης της ασφάλειας της Εναέριας Κυκλοφορίας, καθώς και όλες οι υπηρεσίες που σχετίζονται με την Εναέρια Κυκλοφορία.

- Obstacles Free Zone (OFZ)

Ο εναέριος χώρος πάνω από την περιοχή προσέγγισης, τις μεταβατικές περιοχές και την επιφάνεια προσγείωσης.

- Obstacles Limitation Surfaces (OLS)

Ο εναέριος χώρος γύρω από το αεροδρόμιο, που πρέπει να διατηρείται χωρίς εμπόδια, ώστε οι διαδικασίες των αεροσκαφών εντός αυτού, να πραγματοποιούνται με ασφάλεια. Οι διαστάσεις και οι κλίσεις του OLS καθορίζουν τα όρια στα οποία τα εμπόδια μπορούν να αναπτυχθούν.

- Περιοχή ασφαλείας διαδρόμου (RESA).

Μία περιοχή συμμετρική ως προς την κεντρική γραμμή του διαδρόμου και μετά το άκρο του, με διαστάσεις και σχεδίαση τέτοια ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος ζημιάς σε ένα αεροπλάνο που μπορεί να βγει εκτός αυτού.

Εκτός από τις περιοχές του αεροδρομίου υπάρχουν και οι ελεγχόμενοι εναέριοι χώροι, όπως οι αεροδιάδρομοι, οι τερματικές περιοχές (TMA) και οι ζώνες ελέγχου (CTR). Μέσα στις τερματικές περιοχές και τις ζώνες ελέγχου γίνονται οι διάφοροι ελιγμοί των α/φών, που έχουν σχέση με τις διαδικασίες προσέγγισης, προσγείωσης και απογείωσης.

## 7.2 Κρατικός Αερολιμένας Καστοριάς

Οι αεροπορικοί οργανισμοί αναφέρονται στα αεροδρόμια με κωδικές ονομασίες, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα τον οργανισμό. Για τον κρατικό Αερολιμένα Καστοριάς ισχύουν οι παρακάτω:

- Για την IATA (International Air Transport Association) αναφέρεται σαν **KSO**
- Για τον ICAO αναφέρεται σαν **LGKA** που είναι και το πιο επίσημο και
- Για την ΥΠΑ αναφέρεται σαν **ΚΑΚΤΑ** για εγχώρια χρήση

Ο Κρατικός Αερολιμένας Καστοριάς Αριστοτέλης βρίσκεται στη δυτική Μακεδονία, 12 χιλιόμετρα από την Καστοριά, την πρωτεύουσα του νομού Καστοριάς και δίπλα στην πόλη του Άργους Ορεστικού. Είναι εγκατεστημένο σε υψόμετρο 660 μέτρων. ενώ το γεωγραφικό του πλάτος είναι 40° 27' 00" Βόρειο και το γεωγραφικό του μήκος 21° 17' 00" Ανατολικό .

Ο Αερολιμένας Καστοριάς έχει διαμόρφωση Μονού Διαδρόμου (Single Runway) βέλτιστα τοποθετημένου, σε σχέση με τους ανέμους της περιοχής, το ελάχιστο φορτίο θορύβου που θα φέρουν οι διαδικασίες προσέγγισης και απογείωσης στον γείτονα πληθυσμό και σε σχέση με την μορφολογία του εδάφους, ώστε τα όμορα εμπόδια και βουνά, να μην επηρεάζουν τις διαδικασίες προσέγγισης του.

Ο διάδρομος RWY του Αερολιμένα Καστοριάς είναι από τους μεγαλύτερους της χώρας και σύμφωνα με το AIP του [Παράρτημα Α] το ωφέλιμο μήκος του είναι 2.698 μέτρα και το πλάτος του 45 μέτρα, το υλικό στρώσης του είναι ασφαλτος και οι διευθύνσεις των άκρων του (RWY 12 και RWY 30) είναι 125° και 305° μοίρες αντίστοιχα. Το αεροδρόμιο δεν διαθέτει τροχόδρομο και η τροχοδρόμηση των αεροσκαφών γίνεται εντός του διαδρόμου και από τη πίστα προς τον διάδρομο μέσω συνδετήριου.



Σχήμα 7.1 Αεροφωτογραφία του Αερολιμένα Καστοριάς

Ο Αερολιμένας διαθέτει Αεροσταθμό (Terminal) απλής διαμόρφωσης, δηλαδή περιλαμβάνει μία κοινή είσοδο που οδηγεί σε ενιαίο χώρο αναμονής και με αρκετές εξόδους που οδηγούν στην πίστα (Apron). Η πίστα είναι μικρής έκτασης και διαθέτει 2 θέσεις στάθμευσης για μεγάλα α/φη τύπου B737 και χώρο για τη στάθμευση ελαφρών αεροσκαφών επιφάνειας 2000 τμ.

Περισσότερες πληροφορίες και στοιχεία του Αερολιμένα Καστοριάς παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α της παρούσης.

Ο Αερολιμένας Καστοριάς διαθέτει ραδιοβοηθήματα για IFR διαδικασίες προσέγγισης σε συνθήκες υψηλής και μεσαίας νέφωσης. Συγκεκριμένα διαθέτει ένα τερματικό σταθμό VOR ισχύος 50 W σε συνεργασία με ένα σταθμό DME για την παροχή της δημοσιευμένης στο AIP διαδικασίας VOR/DME KAS.

Με βάση το τοπικό γραφείο της Εθνικής Μετεωρολογικής υπηρεσίας (EMY), οι νεφώσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή του αεροδρομίου κυμαίνονται κατά 90% (Μέση νέφωση) από 2000 έως 3000 πόδια (ft) και κατά 10% από 1000 έως 1500 πόδια (ft) (χαμηλή νέφωση), ενώ η νέφωση σε πολύ χαμηλά επίπεδα, δηλαδή από τα 1000 πόδια έως το έδαφος (ομίχλη), με ελάχιστη ορατότητα, είναι πολύ σπάνια. Αντίστοιχα η ορατότητα (RVR) που επικρατεί συνήθως στις παραπάνω περιπτώσεις, πλην ελαχίστων περιπτώσεων, κυμαίνεται περί τα 2500 μέτρα. Γνωρίζοντας ότι για διαδικασία VOR/DME το ελάχιστο ύψος που ο πιλότος πρέπει να δει καθαρά το διάδρομο και να αποφασίσει (Minimum Decision Height) είναι 1100 ft, συμπεραίνουμε ότι οι πτήσεις που πραγματοποιούνται τις μέρες που επικρατεί χαμηλή νέφωση, δεν καταφέρνουν να προσγειωθούν στο αεροδρόμιο. Μάλιστα όπως αναφέρθηκε, το ποσοστό των συγκεκριμένων νεφώσεων κυμαίνεται περί του 10%, που σημαίνει ότι το παραπάνω ζήτημα των μη ολοκληρωμένων πτήσεων (missed approach) δεν είναι σπάνιο και δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στην ανάπτυξη του αεροδρομίου.

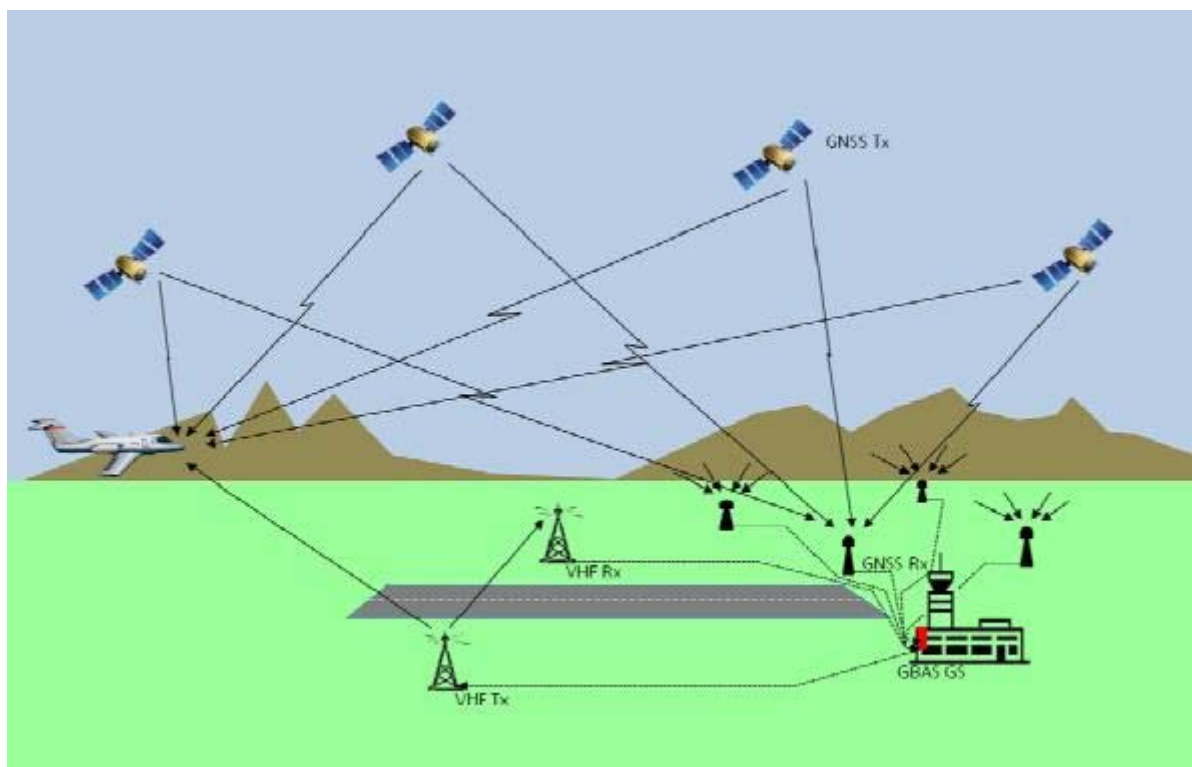
### **7.3 Αρχιτεκτονική Επίγειου Σταθμού GBAS**

Ένα επίγειος σταθμός GBAS περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Δέκτες RR και κεραίες RRA GNSS
- Κύριο Υποσύστημα VDB που περιέχει πομπό, δέκτη και κεραία (ενδεχομένως συμπεριλαμβάνεται και δευτερεύον υποσύστημα ως εναλλακτικό)

- Πίνακες ελέγχου, λειτουργίας και συντήρησης (Users Interface)
- Κεντρικός σταθμός GBAS, που περιλαμβάνει:
  - Υποσύστημα δέκτη GNSS
  - Μονάδα επεξεργασίας
  - Μονάδα πομπού VDB
  - Μονάδα δέκτη VDB
  - Μονάδες ελέγχου, λειτουργίας και συντήρησης, συμπεριλαμβανομένων των οθονών απεικόνισης

Αναλόγως της αρχιτεκτονικής που θα επιλεγθεί, μερικά από τα παραπάνω στοιχεία του κεντρικού σταθμού μπορεί να βρίσκονται και εξωτερικά αυτού.



Σχήμα 7.2 Βασική Αρχιτεκτονική GBAS [05]

**Δέκτες RR** (Reference Receiver) και **Κεραίες RRA** (Reference Receiver Antenna)

Ένας επίγειος σταθμός GBAS μπορεί να περιλαμβάνει πολλούς δέκτες RR. Για τη βέλτιστη ακρίβεια, ακεραιότητα και συνέχεια, απαιτούνται 4 δέκτες RR, αλλά αν οικονομικοί λόγοι δεν το επιτρέπουν, ένας GBAS σταθμός μπορεί να λειτουργήσει και με 2 δέκτες, αλλά με μειωμένες τις μετρικές ποιότητας. Οι δέκτες RR εγκαθίστανται, είτε ενσωματωμένοι στον οικίσκο του κεντρικού σταθμού GBAS, είτε μαζί με τις κεραίες τους ή πολύ κοντά σε αυτές. Ο δέκτης RR εφαρμόζει μία αρχική επεξεργασία των δεδομένων GNSS που λαμβάνονται από την κεραία RRA και τα στέλνει στον κεντρικό επεξεργαστή. Η κεραία RRA είναι τύπου MLA (Multipath Limiting Antenna) η οποία ελαχιστοποιεί τις ανακλάσεις του GNSS σήματος που προκαλούν σφάλματα μέτρησης.

### **Υποσύστημα VDB**

Ο **πομπός VDB** είναι υπεύθυνος για τη μετάδοση σημάτων που περιέχουν, σήματα διόρθωσης GNSS, πληροφορίες εδάφους και δεδομένα FAS για το στάδιο της τελικής προσέγγισης. Αυτό απαιτεί οπτική επαφή προς όλες τις προσεγγίσεις, μια ορισμένη ισχύ σήματος για να εξασφαλίσει το θεμιτό εύρος ραδιοκάλυψης και χρήση απαραίτητων μέτρων για τη μείωση του multipath στο σήμα VDB. Ένας σταθμός GBAS μπορεί να εφαρμοστεί και χωρίς να περιλαμβάνει **δέκτη VDB**, ωστόσο, στα SARPs του ICAO [01] ζητείται η παρακολούθηση της εκπομπής των δεδομένων VDB κατά την εκπομπή τους στη VHF συχνότητα, οπότε τα περισσότερα επίγεια υποσυστήματα GBAS περιλαμβάνουν τουλάχιστον ένα δέκτη VDB. Η κεραία VDB είναι μία omni directional κεραία VHF που εκπέμπει μεταξύ 108.025 MHz και 117.950 MHz με βήμα 25 KHz. Είναι σχεδιασμένη και τοποθετημένη έτσι ώστε να εκπέμπει προς όλες τις προσεγγίσεις, αλλά και για να εκπέμπει ελάχιστα προς το επίπεδο του εδάφους για την αποφυγή του multipath.

### **Κεντρικός Σταθμός GBAS**

Η **μονάδα επεξεργασίας** που βρίσκεται στον κεντρικό σταθμό εκτελεί τους υπολογισμούς διόρθωσης ψευδοαπόστασης PRC, τη μορφοποίηση των μηνυμάτων και τον έλεγχο των απαιτούμενων επιπέδων της ακεραιότητας, της συνέχειας και της διαθεσιμότητας, τόσο των εισερχόμενων δορυφορικών, όσο και των εξερχόμενων διορθωμένων δεδομένων.

Για την παρακολούθηση και τον χειρισμό των συστημάτων του κεντρικού σταθμού βρίσκονται ενσωματωμένες εντός αυτού δύο μονάδες:

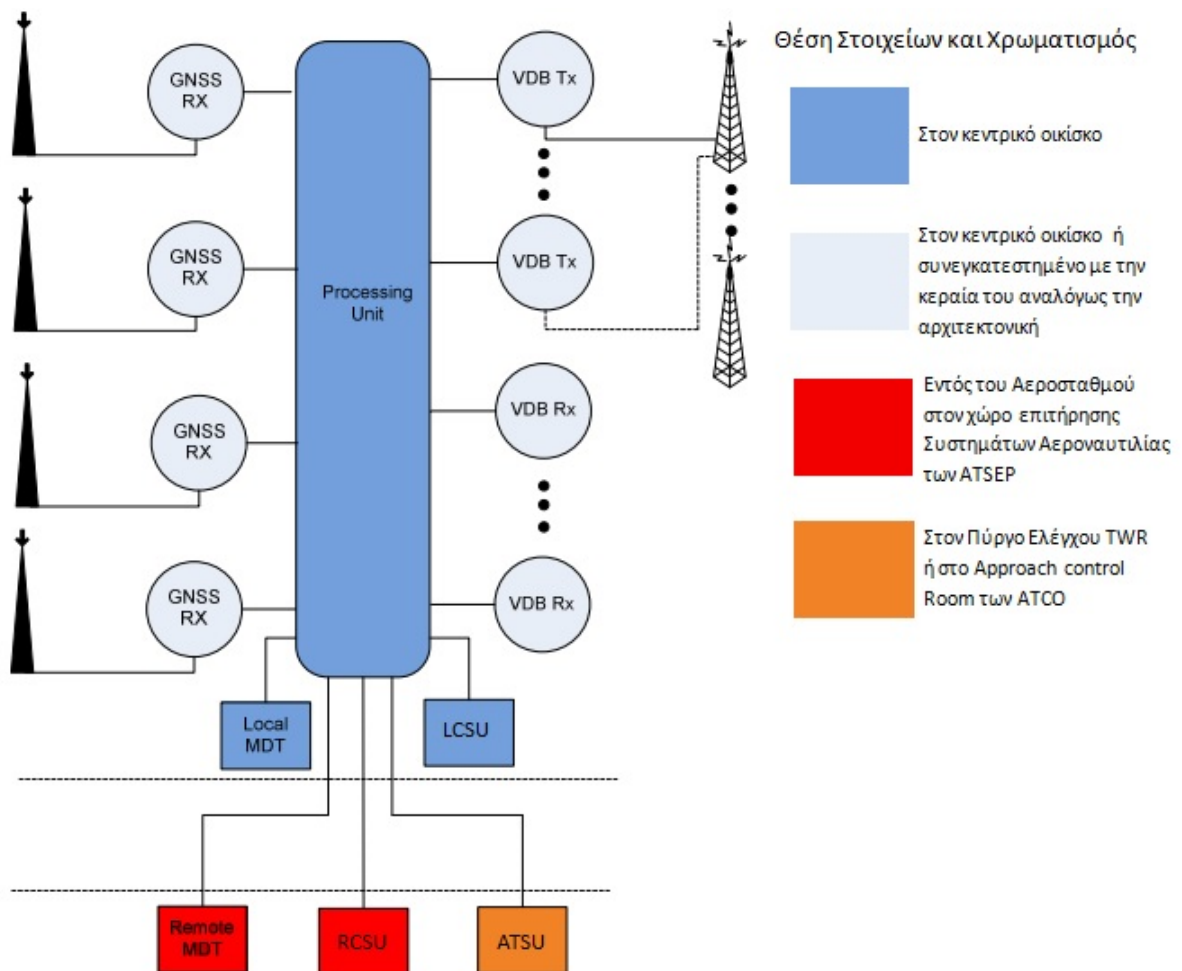
- Η **μονάδα παρακολούθησης και βασικού χειρισμού LCSU** (Local Control and Status Unit) που παρέχει οπτικές και ακουστικές ενδείξεις της κατάστασης του συστήματος. Μέσω της ακουστικής ένδειξης υποδεικνύεται κάποιο σημαντικό σφάλμα και μέσω της οπτικής, η βασική λειτουργική κατάσταση του, η οποία μπορεί να αλλάξει μέσω βασικών επιλογών όπως ενεργοποίησης/ απενεργοποίησης, ή μετάβασης σε λειτουργία service και
- Η **μονάδα διαχείρισης LMDT** (Local Maintenance Data Terminal) που είναι ένας τυπικός φορητός υπολογιστής με εγκατεστημένο το κατάλληλο λογισμικό, ο οποίος συνδέεται με το κεντρικό σύστημα και δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να κάνει λεπτομερή διάγνωση όλων των βαθμίδων του συστήματος και να το διαμορφώσει.

### Πίνακες ελέγχου, λειτουργίας και συντήρησης

Το υποσύστημα αυτό λογιζόμενο σαν μία ολοκληρωμένη μονάδα τηλεχειρισμού, αποτελείται από:

- **ATSU** (Air Traffic Status Unit) το τερματικό που βρίσκεται στον Πύργο Ελέγχου και αποτυπώνει την βασική κατάσταση του συστήματος έχοντας τη δυνατότητα ελάχιστου ή καθόλου χειρισμού του
- **RCSU** (Remote Control and Status Unit) το τερματικό που βρίσκεται στον ασφαλή χώρο των τεχνικών ATSEP και παρέχει λεπτομερή κατάσταση του συστήματος και απομακρυσμένο τηλεχειρισμό του και
- **RMDT** (Remote Maintenance Data terminal) το αντίστοιχο σύστημα MDT που βρίσκεται επίσης στον ασφαλή χώρο των τεχνικών ATSEP και συνδέεται απομακρυσμένα στο κεντρικό σύστημα του οικίσκου του GBAS.

Παρακάτω παρουσιάζεται η γενική αρχιτεκτονική ενός επίγειου υποσυστήματος GBAS και τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.



Σχήμα 7.3 Γενική Αρχιτεκτονική GBAS [05]

## 7.4 Siting και Εγκατάσταση Επίγειου Σταθμού GBAS

Γενικά, ένας σταθμός GBAS είναι πολύ ευέλικτος όταν πρόκειται για την επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης του, σε αντίθεση με ένα ILS που πρέπει να βρίσκεται σε συγκεκριμένες τοποθεσίες στο κάθε άκρο του διαδρόμου και να καταλαμβάνει σημαντικές περιοχές γύρω από τις εγκαταστάσεις του. Ένας σταθμός εδάφους GBAS έχει ορισμένους περιορισμούς σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των στοιχείων του (κεραίες / δέκτες αναφοράς GNSS, κεραία / πομπός VDB κλπ.), τις μέγιστες αποστάσεις από κρίσιμα σημεία της διαδικασίας προσέγγισης όπως τα κατώφλια ή κατώτατα όρια και ελάχιστες αποστάσεις από τις περιοχές που επιχειρούνται οι διαδικασίες. Οι περιορισμοί όμως αυτοί επιτρέπουν την τοποθέτηση (Siting) του σταθμού και των στοιχείων του μακριά από τα άκρα των διαδρόμων και σε θέση σχετικά ανεξάρτητη από αυτά.



#### 7.4.1 Διαδικασία Τοποθέτησης - Siting Process

Η διαδικασία αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- Επιλογή τοποθεσίας - Site Selection
- Αξιολόγηση τοποθεσίας – Site Survey/ Qualification
- Εκχώρηση καναλιού VDB για GBAS
- Εγκατάσταση – Installation
- Έρευνα για τα σημεία αναφοράς
- Αποδοχή της όλης εγκατάστασης

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει συνήθως τον πάροχο υπηρεσιών, τον κατασκευαστή του εξοπλισμού, την αρχή του αερολιμένα και την υπηρεσία πολιτικής αεροπορίας. Σε πρώιμο στάδιο θα πρέπει να βεβαιωθεί ότι οι τοπικές απαιτήσεις και οι διαδικασίες λαμβάνονται υπόψη για την αρχική επιλογή των υποψήφιων θέσεων, οι οποίες θα πρέπει να ανταποκρίνονται πλήρως στις συνολικές απαιτήσεις απόδοσης του GBAS με βάση το Annex 10 του ICAO [01].

Το στάδιο αυτό αντιπροσωπεύει μία διαδικασία εξάλειψης κτιρίων - εμποδίων, απαραίτητη για να καλυφθούν πολύπλοκοι περιορισμοί και απαιτήσεις. Αυτά περιλαμβάνουν λειτουργικές απαιτήσεις (όπως την χωροκάλυψη του GBAS), απαιτήσεις του επιμέρους εξοπλισμού (όπως περιοχή LOCA για τις κεραιές του GNSS, ελάχιστη απόσταση διαχωρισμού μεταξύ των VHF κεραιών VDB κ.α.) και άλλες απαιτήσεις όπως για την διαθεσιμότητα της ισχύος και των γραμμών μεταφοράς, αλλά και για την πρόσβαση και την ασφάλεια της τοποθεσίας. Επιπλέον κάτι που πρέπει να ελεγχθεί, είναι οι παρεμβολές του περιβάλλοντος χώρου. Για τις επιλεγμένες τοποθεσίες όλες οι απαραίτητες πληροφορίες (όπως χάρτες, εμπόδια, γραμμές τροφοδοσίας και τηλεπικοινωνιών, συχνότητες κ.α.) συγκεντρώνονται και μελετώνται.

Ο στόχος αυτής της διαδικασίας είναι να προσδιοριστεί ένας μικρός αριθμός (κατά προτίμηση 3ων) πιθανών θέσεων εγκατάστασης, που αντιπροσωπεύουν το βέλτιστο των παραγόντων που εξετάζονται. Η εύρεση και η αξιολόγηση των κατάλληλων υποψήφιων τοποθεσιών πρέπει να γίνει συνδυάζοντας μελέτη των χαρτών, επιτόπιων επιθεωρήσεων και μετρήσεων και ενδεχομένως ανάλυση και μοντελοποίηση. Σε γενικές γραμμές όλες οι πιθανές τοποθεσίες εντός 3<sup>ων</sup> NM από κάθε άκρο του διαδρόμου που υποστηρίζεται, θα πρέπει να εξετάζονται και να αξιολογούνται σύμφωνα με κατευθυντήριες γραμμές που ορίζονται στις παρακάτω παραγράφους.

Συνίσταται η εγκατάσταση του GBAS σε ανοιχτή, μη ανεπτυγμένη περιοχή του αεροδρομίου, αλλά εντός της περιμέτρου του. Αυτό ελαχιστοποιεί προβλήματα που πηγάζουν από τις RF παρεμβολές, τις λειτουργίες του αεροδρομίου και τις υποδομές ασφαλείας του. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, εγκαταστάσεις σε οροφές κτιρίων, μπορούν επίσης να αποδώσουν ένα καλό επίπεδο υπηρεσίας, με την προϋπόθεση ότι οι κεραιές των δεκτών αναφοράς GNSS θα τοποθετηθούν σε περιβάλλον χωρίς multipath. Επιπλέον υπάρχουν πολλές τεχνικές για την αντιμετώπιση των δυσκολιών μίας τοποθεσίας, όπως η τεχνική διαφορισμού στην κεραία VDB και ο τηλεχειρισμός των GNSS δεκτών αναφοράς. Η εφαρμογή αυτών των τεχνικών μπορεί να αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος της εγκατάστασης αλλά αξίζει τον κόπο, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμες καλύτερες τοποθεσίες. Η υποψήφια τοποθεσία θα πρέπει να παρέχει μία θέση για την κεραία του πομπού VDB, η οποία θα καλύπτει τα κριτήρια που περιγράφονται παρακάτω, συμπεριλαμβανομένου επαρκούς χώρου για το χτίσιμο ενός οικίσκου όπου θα εγκατασταθεί ο εξοπλισμός του πομπού σε απόσταση λίγων μέτρων από την κεραία του. Η περιοχή γύρω από την κεραία του VDB πομπού πρέπει να παρέχει επίσης αρκετές κατάλληλες θέσεις για τις κεραιές των GNSS δεκτών αναφοράς.

Η διαδικασία επιλογής τοποθεσίας αποτελείται από την προκαταρκτική απόκτηση δεδομένων, την αξιολόγηση των ακινήτων, την προκαταρκτική επιθεώρηση του χώρου και την προκαταρκτική ανάλυση της τοποθεσίας. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας επιλογής τοποθεσίας, αποτυπώνονται στην προκαταρκτική έκθεση έρευνας τοποθεσίας.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται το **Site Survey/ Qualification**, τυπικά από τον κατασκευαστή του επίγειου σταθμού και βασίζεται στις πληροφορίες που αποκτήθηκαν κατά την διαδικασία του Site Selection. Ο κατασκευαστής πρέπει να βεβαιωθεί ότι η απαραίτητη απόδοση του σταθμού στην επιλεγμένη τοποθεσία τελεί υπό όλες τις περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες του αεροδρομίου (Site Qualification). Οπότε ο κατασκευαστής διεξάγει δοκιμές στις υποψήφιες τοποθεσίες με τις προεπιλεγμένες κεραιές και τους δέκτες GNSS αλλά προσωρινά εγκατεστημένους σε ειδική κινητή μονάδα (mobile). Έπειτα συγκεντρώνονται τα τεχνικά δεδομένα (Site Survey) από κάθε τοποθεσία ώστε να αναλυθούν μέσω μαθηματικών μοντέλων (Site trade-off analysis) και να αξιολογηθούν για να επιλεγεί η βέλτιστη θέση εγκατάστασης του υποσυστήματος GBAS (site Decision).

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι η προετοιμασία της εγκατάστασης και λειτουργίας του GBAS (**Site Preparation/Preinstallation**). Αποτελείται από δραστηριότητες που αφορούν, την εκχώρηση VHF καναλιού για τη μετάδοση των VDB μηνυμάτων του GBAS, τη δημιουργία της

περιοχής (restricted area) γύρω από τις εγκαταστάσεις του υποσυστήματος GBAS και την αξιολόγηση των εμποδίων για την δημοσίευση της διαδικασίας προσέγγισης GBAS. Η εκχώρηση της VHF συχνότητας πρέπει να εφαρμοστεί με βάση τα κριτήρια διαχωρισμού συχνοτήτων μεταξύ GBAS και των άλλων προ εγκατεστημένων συστημάτων που λειτουργούν στην αεροπορική ζώνη των VHF, όπως ενδεχομένως με ILS ή και VOR συστήματα. Ο καθορισμός και η δημιουργία της περιοχής BRA (building restricted area) για την κάθε μία υποδομή του GBAS, πραγματοποιείται αφού αποφασιστεί η τελική τοποθεσία του συστήματος. Η δημοσίευση της διαδικασίας προσέγγισης GBAS απαιτεί ο καθαρισμός από τα εμπόδια να έχει ήδη καθορισθεί για να καλύπτονται οι απαιτήσεις ελάχιστου ύψους/υψομέτρου εμποδίων (OCA/H) με βάση τα PANS OPS του ICAO [46].

Η εγκατάσταση (**Site Installation**) του υποσυστήματος εδάφους GBAS μπορεί να χωριστεί σε δύο στάδια, το αρχικό στάδιο της προετοιμασίας της υποδομής και αυτό της υλοποίησης του συστήματος GBAS. Η ολοκλήρωση της υποδομής των συστημάτων που εγκαθίστανται στον αερολιμένα, είναι κατά κανόνα ευθύνη του φορέα διαχείρισης του. Ο οικίσκος και τα θεμέλια των κεραιών και των πομπών/ δεκτών, χτίζονται με βάση τις προδιαγραφές του κατασκευαστή του υποσυστήματος εδάφους. Οι αγωγοί των καλωδίων εγκαθίστανται υπογείως σύμφωνα με την έκθεση του Site Survey που έγινε προγενέστερα. Αφού η ετοιμασία της υποδομής ολοκληρωθεί και ελεγχθεί, ο εγκαταστάτης προχωρά στην εγκατάσταση του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη τις τελικές εκθέσεις από όλα τα προηγούμενα βήματα της διαδικασίας του Siting και τις τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος.

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για την σωστή και ακριβή λειτουργία του GBAS είναι η έρευνα για τον καθορισμό και την εξασφάλιση της ακρίβειας των σημείων αναφοράς (**Survey of Reference Points**). Θα πρέπει να δημιουργηθούν κατάλληλες διαδικασίες για την αποθήκευση και τη συντήρηση της ακρίβειας όλων των συντεταγμένων δεδομένων. Πρέπει να καθοριστεί το σημείο αναφοράς του συστήματος GBAS σε σχέση με το WGS-84 με απόλυτη ακρίβεια, χρησιμοποιώντας ανεξάρτητο εξοπλισμό μετρήσεων ή με τις ήδη εγκατεστημένες κεραιές συνδεδεμένες στην μονάδα έρευνας. Το σφάλμα του σημείου αναφοράς θα πρέπει να είναι μικρότερο από 0,25 μέτρα κάθετα και μικρότερο από 1 μέτρο οριζόντια. Αν το σημείο αναφοράς δεν ταυτίζεται με μία από τις θέσεις των κεραιών αναφοράς, τότε ένα σταθερό σημάδι πρέπει να εγκατασταθεί για αυτό το ρόλο.

Τελευταίο στάδιο της διαδικασίας του Siting αποτελεί η αποδοχή της εγκατάστασης (**Site Acceptance**). Αφού ολοκληρωθεί η εγκατάσταση και γίνουν οι απαραίτητες επαληθεύσεις ότι το

τελικό αποτέλεσμα είναι το επιθυμητό με βάση τις προδιαγραφές και τις τελικές εκθέσεις, γίνεται έλεγχος της ορθότητας της λειτουργίας του. Αρχικά εφαρμόζεται έλεγχος λειτουργίας με χρήση εξοπλισμού εδάφους (Ground Check) και έπειτα πραγματοποιείται από αέρα έλεγχος (Flight Check) μέσω ειδικά εξοπλισμένου αεροσκάφους, που είναι και η τελική και καθοριστική διαδικασία πιστοποίησης της ορθής λειτουργίας του συστήματος, ώστε αυτό να καταστεί επιχειρησιακά διαθέσιμο.

#### **7.4.2 Κριτήρια Siting Υποσυστήματος Εδάφους GBAS**

Ο κύριος σκοπός αυτής της διατριβής είναι να αναπτύξει τις απαιτήσεις απόδοσης του GBAS με βάση το Annex 10 του ICAO και να παρουσιάσει τους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο για την εγκατάσταση ενός σταθμού GBAS στο αεροδρόμιο Καστοριάς και κατ' επέκταση σε αεροδρόμια με σχετικά κοινά χαρακτηριστικά. Αυτοί οι περιορισμοί θα αναπτυχθούν σε μεγάλο βαθμό παρακάτω μέσα από την παρουσίαση και ανάλυση των κριτηρίων της διαδικασίας του Siting του υποσυστήματος εδάφους GBAS.

#### **Γενικοί Παράγοντες της διαδικασίας του Siting**

Το κεφάλαιο αυτό δίνει μία επισκόπηση των γενικών κριτηρίων για το siting και τη σχέση με τα διάφορα στοιχεία αρχιτεκτονικής. Ο σκοπός της διαδικασίας είναι να επιλέξει τη βέλτιστη θέση με την αποδεκτή διαθεσιμότητα του συστήματος και την επαρκή ραδιοκάλυψη του VDB πομπού, λαμβάνοντας υπόψη πρακτικά ζητήματα όπως αυτό της προσβασιμότητας. Για να γίνει αυτό είναι αναγκαίο να εξεταστούν ζητήματα και κριτήρια που έχουν σχέση με το φυσικό περιβάλλον και επηρεάζουν το σύστημα. Για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα θα πρέπει να υπάρχει μία ολοκληρωμένη εικόνα της τοποθεσίας, εξετάζοντας γενικά κριτήρια, αλλά και συγκεκριμένα κριτήρια σύμφωνα με τον κατασκευαστή που θα προτιμηθεί.

Τα γενικά κριτήρια που αφορούν το Siting είναι συγκεντρωμένα στον παρακάτω πίνακα:

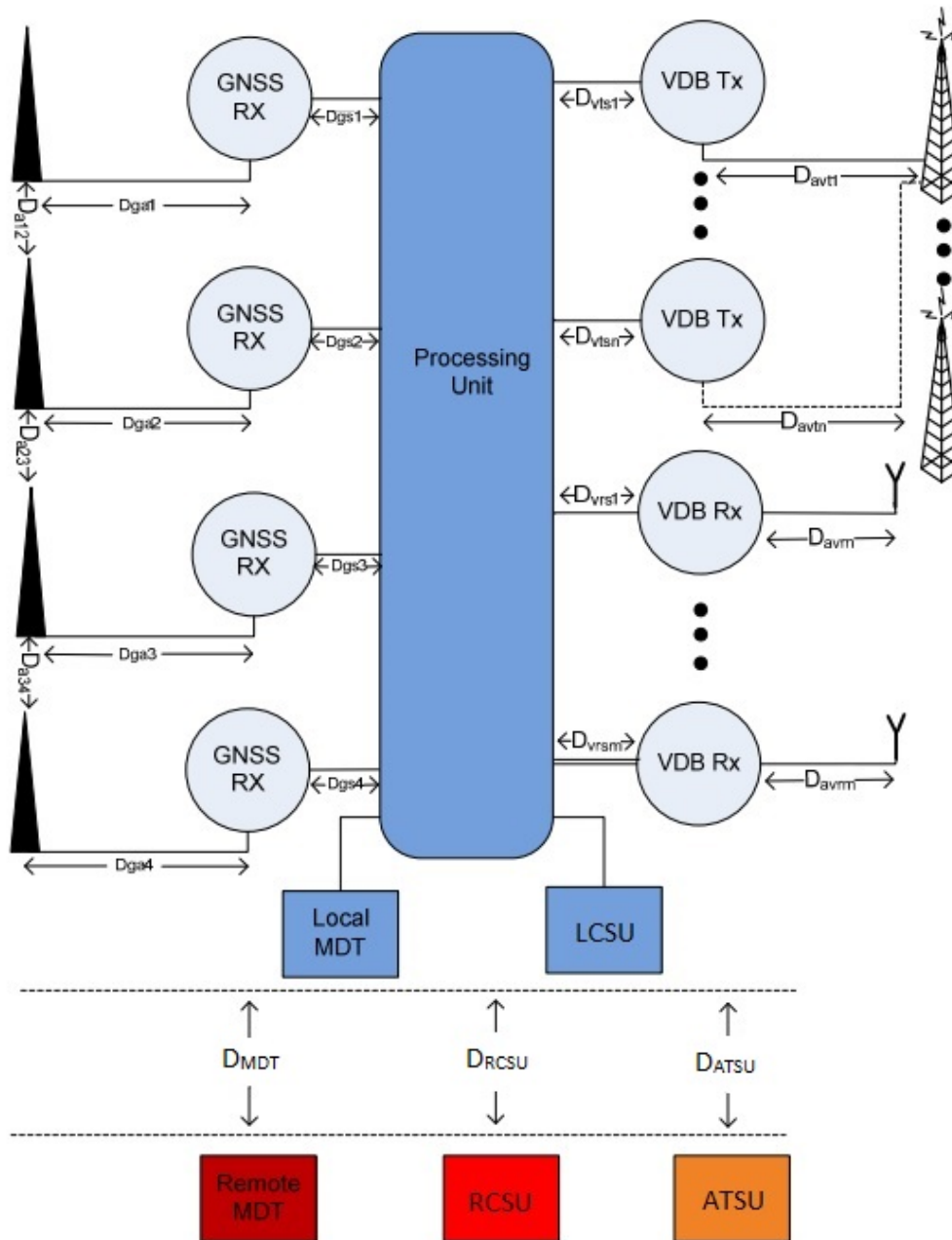
<b>ID</b>	<b>Κριτήρια τοποθεσίας Εγκατάστασης</b>	<b>Στοιχεία Εφαρμογής</b>
<b>S1</b>	Θέματα ασφάλειας: Ο κεντρικός σταθμός και όλος ο εξοπλισμός πρέπει να είναι εγκατεστημένος σε ασφαλή περιοχές, εντός του φράχτη του αεροδρομίου	Υποσύστημα GNSS Υποσύστημα VDB Κεντρικός Οικίσκος

<b>S2</b>	Παράγοντες σχετικοί με τις περιοχές περιορισμού εμποδίων	Υποσύστημα GNSS Υποσύστημα VDB Κεντρικός Οικίσκος
<b>S3</b>	<p>Θέματα Ραδιοκάλυψης:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Πρέπει να καλύπτεται η ελάχιστη απαιτούμενη λαμβανόμενη ισχύς σήματος. Το εκπεμπόμενο σήμα να είναι όσο το δυνατόν πιο απρόσκοπτο ώστε να είναι το ίδιο για όλες τις επιχειρησιακές περιοχές. Οι LOCA πρέπει να τηρούνται</li> <li>• Η κεραία VDB να μην βρίσκεται σε απόσταση πάνω από 3 NM (5,5 Χλμ.) από τα thresholds των διαδρομών</li> <li>• Η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς του σήματος VDB καθορίζει την ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση από τις επιχειρησιακές περιοχές του πομπού VDB</li> </ul>	Υποσύστημα VDB
<b>S4</b>	Μέγιστη απόσταση των κεραιών GNSS από τα thresholds των διαδρομών που εξυπηρετούνται από διαδικασίες GBAS είναι τα 5 Χλμ για μετριάσμο της επιρροής της ιονόσφαιρας	Υποσύστημα GNSS
<b>S5</b>	Ζώνη Ορίζοντα: Εμπόδια με ύψος άνω των 3 <sup>ο</sup> μοιρών στον ορίζοντα των κεραιών GNSS επιθυμητό είναι να αποφεύγονται γιατί η σκίαση μπορεί να επηρεάσει τη διαθεσιμότητα όσο και τη συνέχεια του συστήματος. Η περιοχή τοποθέτησης πρέπει να είναι κατά κύριο λόγο οριζόντια και με περιορισμένη τη βλάστηση	Υποσύστημα GNSS
<b>S6</b>	Θέματα ανάκλασης: Το multipath πρέπει να αποφεύγεται, οπότε επιφάνειες που προκαλούν το φαινόμενο της ανάκλασης όπως επιφάνειες νερού (στάσιμα νερά) δεν πρέπει να υπάρχουν στην εγγύτερη περιοχή. Η LOCA πρέπει να τηρείται	Υποσύστημα GNSS
<b>S7</b>	Ελάχιστος χωρισμός και συγκεκριμένη γεωμετρική διευθέτηση μεταξύ των κεραιών GNSS λόγω του μεταξύ τους multipath και για λόγους monitoring μεταξύ τους	Υποσύστημα GNSS
<b>S8</b>	Κλιματικές συνθήκες και εποχικές διακυμάνσεις: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Να αποφεύγονται περιοχές που πιάνουν πολύ χιόνι και περιοχές που μαζεύεται το χιόνι κατά τον αποχιονισμό</li> </ul>	Υποσύστημα GNSS Υποσύστημα VDB

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Καθορισμός ελάχιστου ύψους κεραίας με βάση το μέγιστο ύψος χιονιού</li> <li>Να λαμβάνονται μέτρα αποφυγής πλημμυρικών καταστάσεων</li> </ul>	
<b>S9</b>	Οποιαδήποτε πιθανά σχέδια επέκτασης ή τροποποίησης του αεροδρομίου	General
<b>S10</b>	Χρήση της υπάρχουσας υποδομής του αεροδρομίου	General
<b>S11</b>	Θέματα RFI: Απόσταση από δημόσιους χώρους	Υποσύστημα GNSS

Πίνακας 7.1 Γενικοί περιορισμοί του Siting

Όσον αφορά τα ειδικά κριτήρια του Siting, αυτά καθορίζονται από την αρχιτεκτονική και την εγκατάσταση του επίγειου υποσυστήματος του συγκεκριμένου κατασκευαστή που επιλέχτηκε. Για κάθε κατασκευαστή κάποιες αποστάσεις διαχωρισμού πρέπει να καθορίζονται αυστηρώς και κάποιες όχι απαραίτητα. Οι αποστάσεις απεικονίζονται στο σχήμα 7.4 και τα ειδικά κριτήρια στον πίνακα 7.2 παρακάτω.



Σχήμα 7.4 Αποστάσεις Διαχωρισμού Κατασκευαστή [05]

Αποστάσεις	Σημεία	Απαιτήσεις Διαχωρισμού
$D_{ga1}$	Antenna – GNSS RX 1	Μπορεί να καθοριστεί μέγιστη αλλά και ελάχιστη τιμή και εξαρτάται από τον τύπο του καλωδίου, την ενίσχυση της κεραίας και την ευαισθησία του δέκτη
$D_{ga2}$	Antenna – GNSS RX 2	Όπως παραπάνω
$D_{ga3}$	Antenna – GNSS RX 3	Όπως παραπάνω
$D_{ga4}$	Antenna – GNSS RX 4	Όπως παραπάνω

$D_{a12}$	Antenna 1–Antenna 2	Συνήθως ένας εύρος μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής, που καθορίζεται για την αποφυγή του multipath μεταξύ των κεραιών και το αμοιβαίο monitoring
$D_{a23}$	Antenna 2–Antenna 3	Όπως παραπάνω
$D_{a34}$	Antenna 3–Antenna 4	Όπως παραπάνω
$D_{a41}$	Antenna 4–Antenna 1	Όπως παραπάνω
$D_{gs1}$	GNSS RX 1 - Shelter	Σε περίπτωση που επιλεγεί συν-εγκατάσταση του GNSS δέκτη με την κεραία του, πρέπει να καθοριστεί η μέγιστη απόσταση από τον οικίσκο με βάση το κανάλι επικοινωνίας (καλώδιο)
$D_{gs2}$	GNSS RX 2 - Shelter	Όπως παραπάνω
$D_{gs3}$	GNSS RX 3 - Shelter	Όπως παραπάνω
$D_{gs4}$	GNSS RX 4 - Shelter	Όπως παραπάνω
$D_{vts1}$	VDB TX 1 - Shelter	Συνήθως η απόσταση είναι μηδενική γιατί ο πομπός εγκαθίσταται στον οικίσκο. Αν εγκατασταθεί εκτός του οικίσκου, μία μέγιστη απόσταση καθορίζεται εξαρτώμενη από το κανάλι επικοινωνίας με τον οικίσκο.
$D_{vtsn}$	VDB TX n - Shelter	Όπως παραπάνω
$D_{vrs1}$	VDB RX 1 - Shelter	Η απόσταση είναι η ίδια με αυτή του πομπού καθώς πομπός και δέκτης συν-εγκαθίστανται.
$D_{vrs m}$	VDB RX m - Shelter	Όπως παραπάνω
$D_{avt1}$	Antenna – VDB TX 1	Καθορίζεται από την ισχύ εξόδου του πομπού, τη μέγιστη και την ελάχιστη απαιτούμενη λαμβανόμενη ισχύς σήματος, το κέρδος της κεραίας και την ποιότητα του καλωδίου
$D_{avtn}$	Antenna – VDB TX n	Όπως παραπάνω
$D_{avr1}$	Antenna – VDB RX 1	Εξαρτάται από το πώς γίνεται το monitoring και λογικά είναι 0 αν ο δέκτης κλέβει το σήμα στην έξοδο του πομπού (κοινή κεραία), ή είναι ίση με την απόσταση του πομπού αν η κεραία λήψης συν εγκαθίσταται στον ίδιο ιστό με την κεραία εκπομπής
$D_{avr m}$	Antenna – VDB RX m	Όπως παραπάνω



D <sub>MDT</sub>	MDT - Shelter	Εξαρτάται από το κανάλι επικοινωνίας
D <sub>RCSU</sub>	RCSU - Shelter	Εξαρτάται από το κανάλι επικοινωνίας
D <sub>ATSU</sub>	ATSU - Shelter	Εξαρτάται από το κανάλι επικοινωνίας

Πίνακας 7.2 Συγκεκριμένοι Περιορισμοί στην Αρχιτεκτονική του Site

Επιπλέον των παραπάνω κριτηρίων και αποστάσεων, πρέπει να προσδιοριστούν οι περιοχές LOCA (Local Object Consideration Area) γύρω από όλες τις κεραιές. Πρόκειται για περιοχές 3<sup>ων</sup> διαστάσεων που αφορούν όγκο και όχι έκταση με διάφορους περιορισμούς. Οι όγκοι αυτοί προσδιορίζονται με βάση το διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών και την ευαισθησία τους στις ανακλάσεις, που ακολούθως ορίζονται από την τεχνολογία του δέκτη και της κεραιάς.

Κατά την εκκίνηση της διαδικασίας του siting, συνιστάται να προσδιοριστούν ανεξάρτητα οι πιθανές θέσεις για τις κεραιές GNSS και VDB, βάση των γενικών κριτηρίων τοποθέτησης. Αν έχει επιλεγεί μία συγκεκριμένη εγκατάσταση θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα κριτήρια του συγκεκριμένου κατασκευαστή.

#### 7.4.3 Υποσύστημα λήψης GNSS

Οι δέκτες GNSS μπορούν να τοποθετηθούν δίπλα στις κεραιές, οπότε συνήθως θα περιέχουν τα κυκλώματα τροφοδοσίας και αντικεραυνικής προστασίας. Εναλλακτικά θα μπορούσαν να είναι εγκατεστημένοι και μέσα στον κεντρικό οικίσκο, όταν οι αποστάσεις του οικίσκου από τις κεραιές επιτρέπουν τη χρήση ομοαξονικού καλωδίου (coaxial cable). Για τον εντοπισμό πιθανών θέσεων για το υποσύστημα GNSS πρέπει να λαμβάνονται συνδυαστικά υπόψη τα παρακάτω από τον πίνακα 7.1 κριτήρια

- Θέματα Ασφάλειας (S1)
- Περιοχές περιορισμού εμποδίων (S2)
- Η μέγιστη απόσταση του σημείου αναφοράς του συστήματος GBAS από οποιοδήποτε κατώφλι LTP των διαδρόμων που εξυπηρετούνται από το σταθμό GBAS είναι 5 Χλμ. (S4)
- Ζώνη ύψους ορίζοντα (S5)

- Ανακλώμενες επιφάνειες και multipath στην κοντινή περιοχή της GNSS κεραίας (S6)
- Ελάχιστος χωρισμός και συγκεκριμένη γεωμετρική διευθέτηση μεταξύ των κεραιών GNSS λόγω του μεταξύ τους multipath και για λόγους monitoring μεταξύ τους (S7)
- Σχέδια τροποποίησης ή επέκτασης αεροδρομίου (S9)
- Απόσταση από δημόσιους χώρους, λόγω παρεμβολών RFI (S11)

Όλα τα παραπάνω είναι γενικά κριτήρια και λίγο ή πολύ ανεξάρτητα από την αρχιτεκτονική του επίγειου σταθμού. Ζητήματα της LOCA και του multipath μπορεί να διαφέρουν από σταθμό σε σταθμό, αλλά οι διαφορές είναι μικρές. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την επίδραση του multipath και για την περιοχή LOCA θα δοθούν παρακάτω.

Ιδανικά, οι θέσεις των κεραιών RRA θα πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε η βάση της κεραίας να έχει ένα καθαρό πεδίο ορίζοντα πάνω από το ύψος των 3° και για όλο τον κύκλο των 360°. Αυτό θα επιτρέψει την απόκτηση, επαλήθευση και ομαλοποίηση του σήματος από έναν δορυφόρο που ανέρχεται στον ορίζοντα (ανατέλλει) ώστε να συμπεριληφθεί στα δεδομένα διόρθωσης ξεκινώντας από το ύψος των 5°. Σε αυτές τις μικρές γωνίες, ακόμη και μέτριες ποσότητες βλάστησης ενδέχεται να εμποδίσουν τα GNSS σήματα. Η ζώνη ορίζοντα για συγκεκριμένη θέση κεραίας καθορίζει το απαιτούμενο ύψος της κεραίας, ορίζει την επιτρεπόμενη ανάπτυξη της βλάστησης και την επίδραση των κοντινών οχημάτων (π.χ. αεροσκάφη σε τροχοδρόμηση και οχήματα πυροσβεστικής, συντήρησης και ασφάλειας). Εάν το απαιτούμενο ύψος είναι υπερβολικό, θα πρέπει να προτιμηθεί άλλη θέση. Αν δεν υπάρχουν άλλες επιλογές, το ιδανικό ύψος της κεραίας πρέπει να καθοριστεί σε συνδυασμό με άλλες ενέργειες ώστε να εξασφαλιστεί επιτρεπτό multipath και ικανοποιητική κάλυψη του ορίζοντα. Όταν μια κεραία πρόκειται να τοποθετηθεί στο έδαφος, πρέπει να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Ωστόσο, αυτό αυξάνει την πιθανότητα κάλυψης από χιόνι ή παρεμβολών από το προσωπικό συντήρησης. Το προτεινόμενο ύψος μίας κεραίας είναι μεταξύ 2 και 3<sup>ων</sup> μέτρων, επιτρέποντας έτσι την επιθεώρηση της από το έδαφος και άλλες δραστηριότητες συντήρησης αεροδρομίου χωρίς να επηρεάζεται η διαθεσιμότητα του συστήματος.

Πρακτικά, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι εφικτό να επιτευχθεί πλήρης κάλυψη. Ακόμη και σε περιοχές όπου το έδαφος είναι το ιδανικό, μπορεί να υπάρχουν κτίρια και κατασκευές που αποκρύπτουν τμήματα του ορίζοντα. Κανονικά, η σκίαση που αναμένεται σε έναν αερολιμένα

θεωρείται ότι προκαλεί αποδεκτές μειώσεις διαθεσιμότητας, ωστόσο η διαθεσιμότητα πρέπει να προσομοιώνεται κατά την επιτόπια προετοιμασία για να διασφαλιστεί ότι η προτεινόμενη θέση έχει επαρκή απόδοση διαθεσιμότητας. Γενικά, η μη λήψη των δορυφόρων GPS κάτω από τις 5° έχει ελάχιστη επίδραση στη διαθεσιμότητα του συστήματος. Εάν όμως υπάρχουν εμπόδια που ενδέχεται να αποκλείουν δορυφορικά σήματα πάνω από αυτή τη γωνία, τότε μία ανάλυση του επιπέδου σκίασης και της ενδεχόμενης επιρροής της στη διαθεσιμότητα του συστήματος πρέπει να πραγματοποιείται.

### **Παράμετροι multipath για RRA siting και περιοχή LOCA (Local Object Consideration Area)**

Η εύρεση μίας θέσης η οποία είναι ελεύθερη από αντικείμενα που ενδέχεται να προκαλέσουν λήψη δευτερευόντων σημάτων λόγω ανάκλασης από τους δέκτες αναφοράς, είναι σημαντική για την επίδοση του υποσυστήματος εδάφους GBAS. Γενικά, οι κεραιές RRA δεν είναι ανθεκτικές σε υψηλά φαινόμενα multipath, οπότε είναι σημαντικό να παρακολουθείται συνεχώς η τήρηση συγκεκριμένων περιορισμών σε μία καθορισμένη περιοχή γύρω από τις κεραιές ώστε να αποφεύγονται τα φαινόμενα multipath. Αυτή η περιοχή ονομάζεται LOCA.

Οι RRA LOCAs (Local Object Consideration Areas) είναι καθορισμένοι όγκοι γύρω από τις κεραιές RRAs μέσα στους οποίους ακίνητα αντικείμενα έχουν μεγάλη πιθανότητα να προκαλέσουν μη αποδεκτή υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος. Αντικείμενα που εντοπίζονται εντός της LOCA μπορεί να προκαλέσουν είτε παρεμπόδιση των σημάτων GPS, είτε ανάκλαση και περίθλαση τους, με αποτέλεσμα την αδυναμία να παραχθούν επαρκώς ακριβείς διορθώσεις ψευδοαπόστασης. Όλες οι περιοχές της LOCA είναι σημαντικές και πρέπει να αξιολογηθούν προσεκτικά όταν επιλέγεται μία μελλοντική τοποθεσία κεραιάς. Ιδανικά μία καθαρή περιοχή των 155 μέτρων είναι επιθυμητή γύρω από κάθε κεραιά. Σε κάποια αεροδρόμια όπου αυτό δεν είναι εφικτό, οι επιπτώσεις του υποβιβασμού της LOCA στην ακεραιότητα, την ακρίβεια και την συνέχεια πρέπει να αξιολογηθούν σε βάθος μέσω ανάλυσης δεδομένων και μαθηματικών μοντέλων. Το αεροδρόμιο Καστοριάς έχει μεγάλη έκταση με ελάχιστα ακίνητα που αποτελούν εμπόδια εντός αυτής και οι μετακινήσεις στους χώρους του αεροδρομίου είναι συγκεκριμένες και ελεγχόμενες. Οπότε δεν θα υπάρχουν ζητήματα υποβάθμισης της LOCA, με τις απαιτούμενες αποστάσεις να καλύπτονται πλήρως.

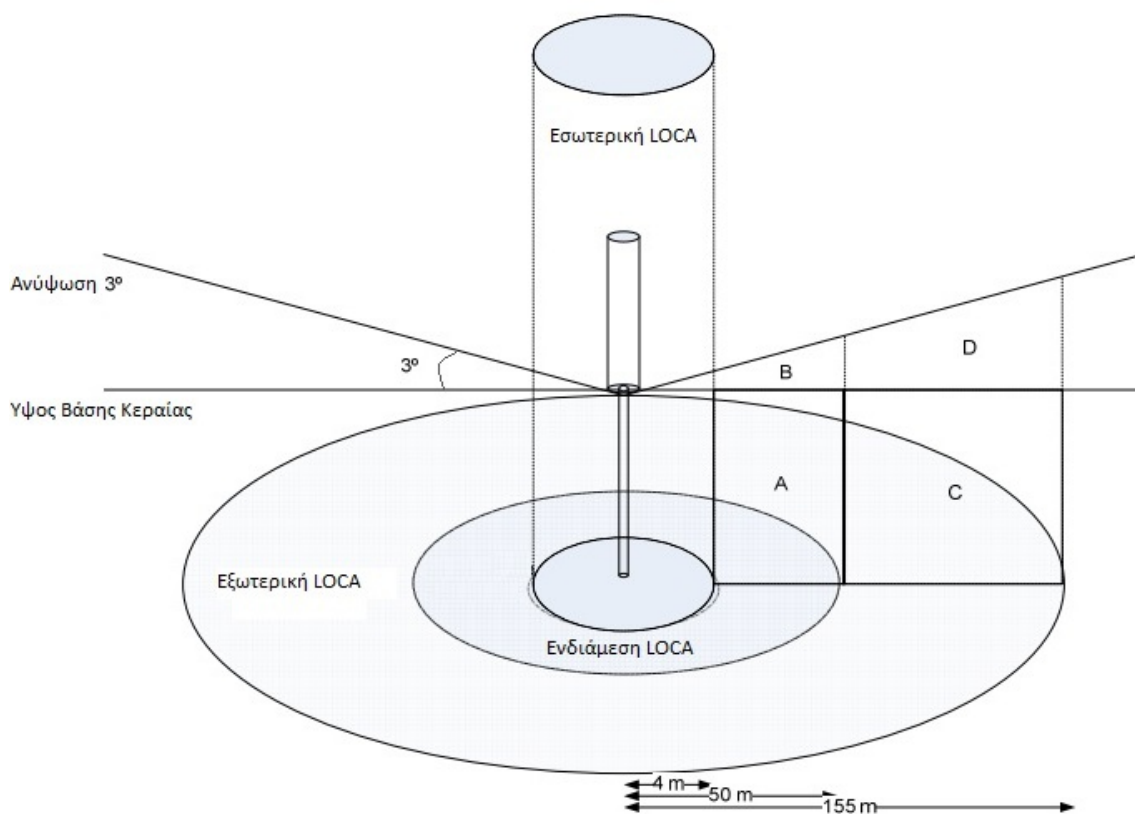
Η περιοχή LOCA καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την ευαισθησία της κεραιάς στο multipath και από τα χαρακτηριστικά του δέκτη. Οι προδιαγραφές της περιοχής LOCA για RRA καθορίζονται από την FAA [07] για έναν συγκεκριμένο συνδυασμό κεραιάς GNSS και δέκτη

αναφοράς. Πρόκειται για κεραία τύπου συστοιχίας διπόλων (dipole array antenna) σε συνδυασμό με “0.1 chip narrow correlator E-L” δέκτη αναφοράς, τα οποία και προτείνονται. Η περιοχή LOCA για αυτό τον συνδυασμό κεραίας δέκτη αποτελείται από:

- Εσωτερική RRA LOCA. Πρόκειται για έναν εικονικό κύλινδρο με ακτίνα 4 m, προκειμένου να εξασφαλιστούν οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες της κεραίας και να μην δημιουργηθεί παραμόρφωση κοντά της. Δεν επιτρέπονται σταθερά ή μετακινούμενα αντικείμενα και οποιαδήποτε βλάβιση εντός της περιοχής.

- Ενδιάμεση RRA LOCA. Είναι επίσης ένας εικονικός κύλινδρος με κώνο στην κορυφή κεντραρισμένο γύρω από τη βάση της κεραίας με γωνία 3° μοιρών. Η βάση του κυλίνδρου (στο επίπεδο του εδάφους) εκτείνεται από τα 4 μέτρα της εσωτερικής LOCA έως τα 50 μέτρα και προσδιορίζει μία περιοχή όπου εξασφαλίζεται μειωμένη ανάκλαση από τη γη και επιτρέπεται επιλεκτική ύπαρξη αντικειμένων και μόνο συντονισμένες μετακινήσεις.

- Εξωτερική LOCA. Είναι επίσης ένας εικονικός κύλινδρος με κώνο στην κορυφή κεντραρισμένο γύρω από τη βάση της κεραίας με γωνία 3° μοιρών. Η βάση του κυλίνδρου (στο επίπεδο του εδάφους) εκτείνεται από τα 50 μέτρα της ενδιάμεσης LOCA έως τα 155 μέτρα και προσδιορίζει μία περιοχή όπου μετακινήσεις με ύψος μικρότερο από το ύψος της βάσης της κεραίας επιτρέπονται, ενώ σπάνιες μετακινήσεις με ύψος μεγαλύτερο από το ύψος της βάσης της κεραίας είναι οριακά εφικτές, όπως επίσης και επιλεκτική ύπαρξη αντικειμένων είναι επιτρεπτή.



Σχήμα 7.5 Περιοχή LOCA για RRA [05]

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις και οι περιορισμοί που αφορούν την εσωτερική LOCA μίας κεραίας RRA

- 1) Να παρέχεται μία περιοχή γύρω από την RRA με ελάχιστη ακτίνα 4ων μέτρων
- 2) Μπορεί να τοποθετηθεί μη μεταλλική περίφραξη γύρω από την κεραία για να επισημανθεί η περιοχή
- 3) Το έδαφος στην κλειστή περιοχή πρέπει να είναι προετοιμασμένο κατάλληλα ώστε να αποκλείεται η ανάπτυξη οποιασδήποτε βλάστησης
- 4) Οι ανακλάσεις εδάφους υπαγορεύονται από το υλικό στη βάση της εσωτερικής LOCA. Αν το υλικό κάτω από την κεραία είναι ιδιαίτερα ανακλαστικό τότε συνιστάται η κάλυψη του με κατάλληλα βαθμολογημένο χαλί
- 5) Το έδαφος στην κλειστή περιοχή θα πρέπει να είναι προετοιμασμένο για να απομακρύνει το νερό και να παρέχει την σωστή αποστράγγιση μακριά από το βάθος της κεραίας. Για την

ικανοποίηση αυτής της απαίτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα βαθμολογημένο χαλίκι

6) Πρέπει να υπάρχει μόνιμος έλεγχος και αντιμετώπιση οποιασδήποτε ανάπτυξης βλάστησης

7) Απαγορεύεται η οποιοδήποτε τύπου καλλιέργεια

8) Συσσώρευση χιονιού εντός της εσωτερικής LOCA δεν επιτρέπεται



Σχήμα 7.6 Πρότυπη τοποθέτηση κεραίας RRA και περιοχή LOCA στο Αεροδρόμιο του Σύνδνεϋ [48]

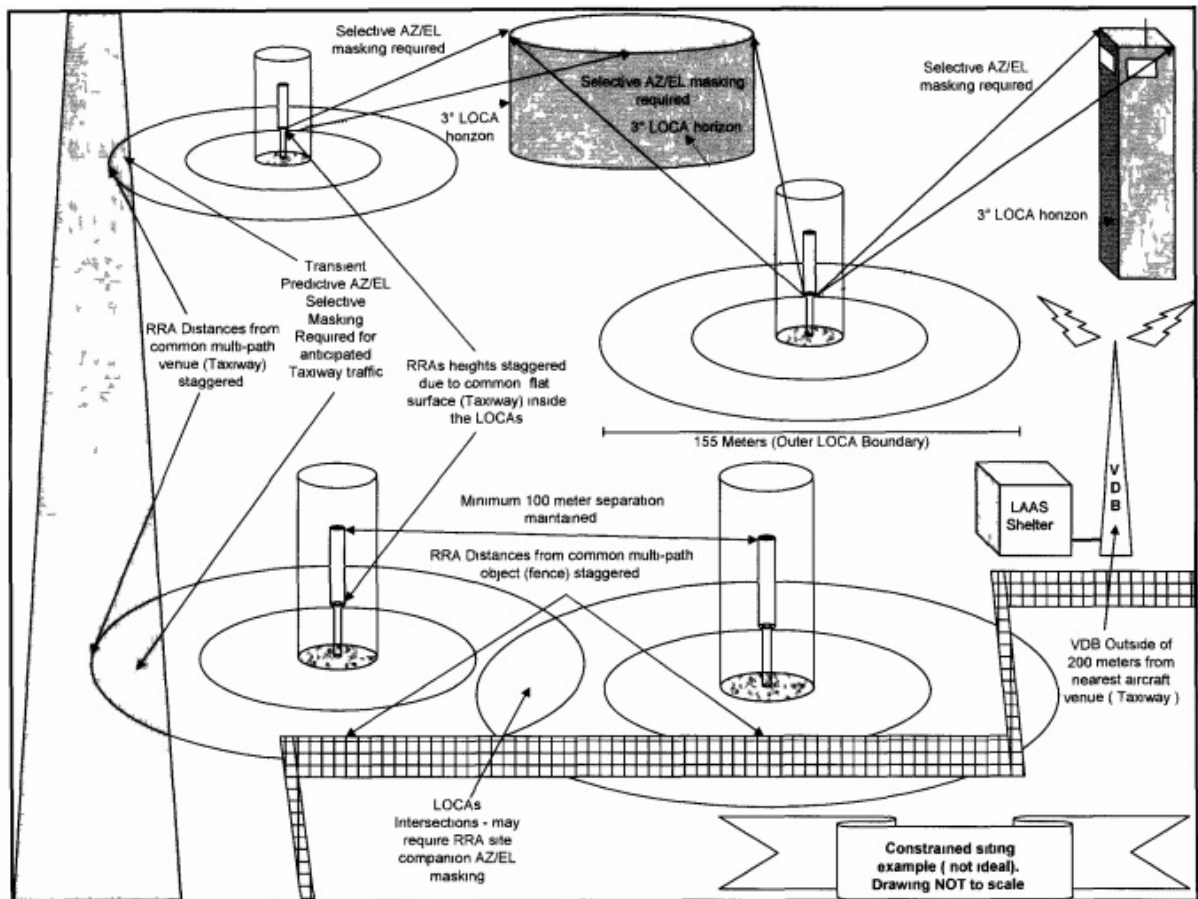
Παρακάτω παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις και οι περιορισμοί που αφορούν την ενδιάμεση και την εξωτερική LOCA μίας κεραίας RRA

- 1) Η βλάστηση δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει το 1 μέτρο σε ύψος εντός μίας περιοχής με ακτίνα 6,1 μέτρων γύρω από την κεραία
- 2) Το βάθος του χιονιού κάτω από την κεραία δεν αποτελεί θέμα για multipath μονής ανάκλασης. Η κεραία πρέπει να εγκατασταθεί έτσι ώστε το φυσιολογικά συσσωρευμένο χιόνι να μην καλύπτει κανένα μέρος της κεραίας (δεν πρέπει να παραβιάζονται οι περιορισμοί μέγιστου μήκους κεραίας με εξαίρεση τον ιστό της). Αν το χιόνι υπερκαλύπτει την κεραία, πρέπει να απομακρυνθεί άμεσα. Η βλάστηση έχει διαφορετική επίπτωση (διάχυτο multipath) και επομένως περιορίζεται στο 1 μέτρο
- 3) Ενέργειες πρέπει να γίνουν άμεσα όταν παρατηρηθεί ανάπτυξη βλάστησης άνω του 1 μέτρου

- 4) Μη μεταλλική περίφραξη μπορεί να τοποθετηθεί γύρω από την κεραία για να επισημανθεί η περιοχή
- 5) Περιοδικές εργασίες κοπής πρέπει να συντονίζονται ώστε να συμπίπτουν με το πρόγραμμα συντήρησης
- 6) Συσσώρευση χιονιού στην ενδιάμεση LOCA δεν πρέπει να επιτρέπεται
- 7) Συσσώρευση χιονιού στην εξωτερική LOCA είναι αποδεκτή υπό τους περιορισμούς της LOCA
- 8) Η μετακίνηση εξοπλισμού στις περιοχές πρέπει να είναι περιορισμένη και σπάνια, ενώ στάθμευση εξοπλισμού για μεγάλο χρονικό διάστημα δεν επιτρέπεται
- 9) Το συνολικό ύψος του συσσωρευμένου χιονιού με φυσικό ή τεχνικό τρόπο δεν πρέπει να είναι ψηλότερο από τη βάση της κεραίας

#### **Διαχωρισμός RRAs κατά το Siting τους**

Μία τυπική διαμόρφωση ενός επίγειου υποσυστήματος περιλαμβάνει 4 δέκτες αναφοράς. Τα κριτήρια μίας τυπικής τοποθέτησης και διαχωρισμού των RRAs πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαδικασία του siting. Κάθε κεραία πρέπει να διαχωρίζεται από κάθε γειτονική της κεραία κατά τουλάχιστον 105 μέτρα. Τα σημεία στα οποία εγκαθίστανται οι κεραίες, πρέπει να είναι έτσι επιλεγμένα ώστε να αποφεύγεται η γραμμικότητα εγκατάστασης τους στο χώρο και πρέπει να εγκαθίστανται κλιμακωτά ώστε να μη δημιουργούνται φαινόμενα συνεργατικού και συσχετισμένου multipath. Συγκεκριμένα όταν υπάρχει η ίδια επίπεδη επιφάνεια (taxiway) εντός των LOCA δύο κεραιών RRA, θα πρέπει οι κεραίες να έχουν διαφορετικό ύψος η μία από την άλλη. Αντίστοιχα οι αποστάσεις των RRAs από κοινά αντικείμενα (φράχτης) που προκαλούν multipath και στις δύο κεραίες πρέπει να είναι διαφορετικές.



Σχήμα 7.7 Διαχωρισμοί μεταξύ των Κεραιών [07]

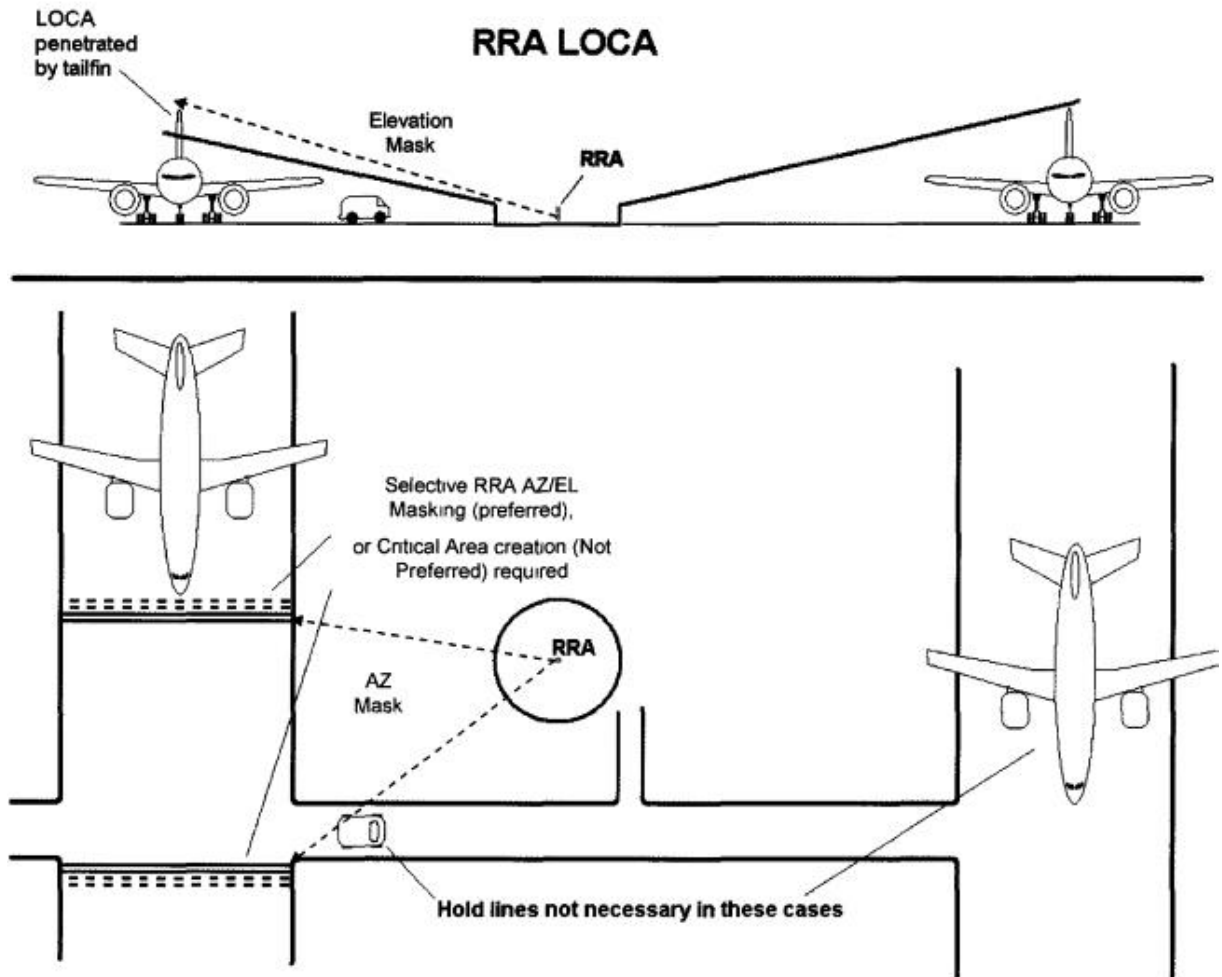
### Άλλα κριτήρια για RRA siting

Οι παρεμβολές RFI (Interference Radio Frequency) ενδέχεται να επηρεάσουν τη διαδικασία του siting των RRAs. Γενικά, δημόσιοι χώροι όπως αυτοκινητόδρομοι, χώροι στάθμευσης κλπ μπορούν να αποτελέσουν πιθανές πηγές RFI. Λόγω συνήθως της περιορισμένης εμβέλειας των παρεμβολών από τους δημόσιους χώρους, ο μικρός κίνδυνος απώλειας της συνέχειας και της διαθεσιμότητας λόγω αυτών μπορεί να μηδενιστεί με την επιλογή θέσεων εγκατάστασης RRAs όσο το δυνατόν μακριά από δημόσιους χώρους. Αν πάλι αυτό είναι αδύνατο, μία ενδεχόμενη λύση ως προς τις παρεμβολές που δημιουργούνται από την κίνηση σε δρόμους που συνορεύουν με το αεροδρόμιο, θα ήταν η εγκατάσταση στον φράχτη ενός πρόσθετου μεταλλικού πλέγματος με κενά μικρότερα του 1 cm, που δεν θα αφήνει τα σήματα των παρεμβολών με μεγαλύτερο του 1 cm μήκος κύματος να το διαπεράσουν και να επηρεάσουν τον δέκτη RR.

Αν και για τις εγκαταστάσεις GBAS δεν απαιτούνται “κρίσιμες περιοχές” όπως στο ILS, σε κάποιες περιπτώσεις περιορισμένων επιλογών στην τοποθεσία εγκατάστασης, μπορεί να είναι αναγκαίες. Αν υπάρχουν περιοχές της RRA LOCA όπου δεν μπορεί να περιοριστεί η μετακίνηση μεγάλων αντικειμένων, όπως αεροσκαφών σε τροχοδρόμηση, που πιθανότατα θα προκαλέσουν



μη αποδεκτή μείωση της απόδοσης του συστήματος, τότε αυτές ορίζονται ως “κρίσιμες περιοχές” των διαδικασιών GBAS.



Σχήμα 7.8 Ενδεχόμενες Κρίσιμες Περιοχές στην περιοχή της LOCA [07]

Ένα άλλο κριτήριο για το siting των RRAs είναι η πιθανή φραγή του σήματος GPS από τα αεροσκάφη κατά τη διαδικασία προσέγγισης στο αεροδρόμιο. Γενικά ένα αεροσκάφος εν πτήση κινείται πολύ γρήγορα ώστε να προκαλέσει multipath, αλλά αν πετάει με μέτωπο προς την κεραία και σε χαμηλό υψόμετρο, κάποια σήματα μπορεί να μπλοκαριστούν για δευτερόλεπτα, δημιουργώντας πρόβλημα στον GNSS δέκτη. Σε αεροδρόμια του βορείου ημισφαιρίου, όπως της Καστοριάς, θα ήταν καλή ιδέα η τοποθέτηση των RRA στα νότια της διαδρομής προσέγγισης, καθώς ελάχιστοι δορυφόροι κινούνται σε τροχιά μεγάλου γεωγραφικού πλάτους προς τον αρκτικό κύκλο. Η πολική απεικόνιση των διαδρομών των δορυφόρων θα βοηθούσε στην αξιολόγηση της θέσης των RRA με βάση αυτό το κριτήριο.

#### **7.4.4 Υποσύστημα VDB**

Η κύρια αρχιτεκτονική του υποσυστήματος VDB περιλαμβάνει την εγκατάσταση του πομπού και του δέκτη VDB εντός του κύριου οικίσκου του επίγειου GBAS. Είναι επίσης δυνατή η εναλλακτική αρχιτεκτονική, όπου ο πομπός και ο δέκτης VDB είναι συνεγκατεστημένοι με την κεραία τους. Για την επιλογή της θέσης της κεραίας VDB λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω κριτήρια:

- Ασφάλεια (S1)

- Περιοχές περιορισμού εμποδίων (S2)

- Ραδιοκάλυψη (S3)

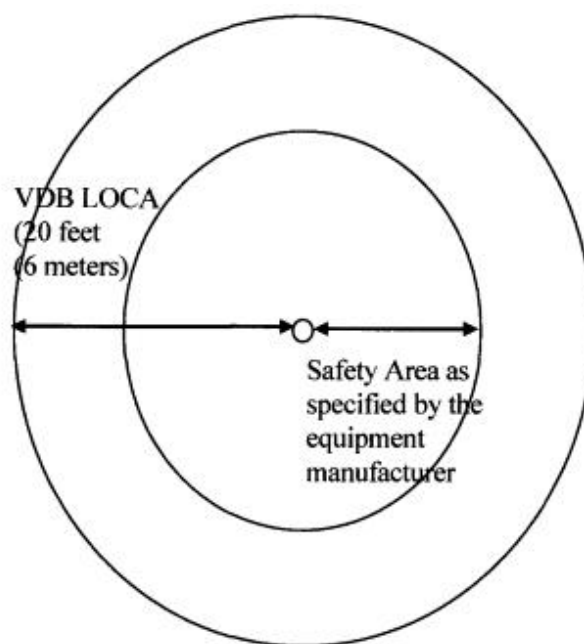
- Πιθανά σχέδια επέκτασης / τροποποίησης του αεροδρομίου (S9)

Τα κριτήρια αξιολόγησης της τοποθεσίας εγκατάστασης της κεραίας VDB είναι παρόμοια με τα κριτήρια του siting μίας RRA. Η κύρια διαφορά είναι ότι η επίδραση που έχουν τα αντικείμενα εντός των περιοχών περιορισμού εμποδίων, είναι στην ραδιοκάλυψη της κεραίας VDB.

#### **Περιοχές περιορισμού εμποδίων (S2)**

Η περιοχή γύρω από την κεραία VDB χωρίζεται στην περιοχή ασφαλείας VDB και την περιοχή VDB LOCA. Η περιοχή ασφαλείας (Safety Area) ορίζεται από τον κατασκευαστή και είναι η άμεση περιοχή γύρω από την κεραία όπου για την προστασία του προσωπικού από την ακτινοβολία της δεν επιτρέπεται η είσοδος σε αυτή εν ώρα λειτουργίας.

Η περιοχή VDB LOCA είναι καθορισμένος όγκος γύρω από την κεραία VDB εντός του οποίου ακίνητες υποδομές μπορούν να προκαλέσουν μη αποδεκτή υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος. Συγκεκριμένα μπορούν είτε να μπλοκάρουν το σήμα VDB είτε να δημιουργούν ανακλάσεις που ακυρώνουν το σήμα VDB προς λειτουργικά σημαντικές περιοχές της ραδιοκάλυψης. Οι διαστάσεις της VDB LOCA παρέχονται από τον εγκαταστάτη, ως αποτέλεσμα προσομοίωσης και ανάλυσης δεδομένων ως προς τους μηχανισμούς διάδοσης στην περιοχή του αεροδρομίου.



Σχήμα 7.9 Περιοχή ασφαλείας και LOCA κεραίας VDB [07]

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις και οι παρατηρήσεις που αφορούν την περιοχή περιορισμού εμποδίων γύρω από την κεραία VDB:

- 1) Μπορεί να τοποθετηθεί γύρω από την κεραία ένας φράκτης ή μία μη ανακλαστική σήμανση για να επισημανθεί η περιοχή
- 2) Το έδαφος στην κλειστή περιοχή πρέπει να είναι προετοιμασμένο για την εξάλειψη της ανάπτυξης της βλάστησης
- 3) Το έδαφος στην κλειστή περιοχή θα πρέπει να είναι προετοιμασμένο για να απομακρύνει το νερό και να παρέχει την σωστή αποστράγγιση μακριά από το βάθρο της κεραίας. Για την ικανοποίηση αυτής της απαίτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα βαθμολογημένο χαλίκι
- 4) Η βλάστηση δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει το 1 μέτρο σε ύψος εντός μίας περιοχής με ακτίνα 6,1 μέτρων γύρω από την κεραία
- 5) Πρέπει να υπάρχει μόνιμος έλεγχος και αντιμετώπιση οποιασδήποτε ανάπτυξης βλάστησης
- 6) Απαγορεύεται η οποιοδήποτε τύπου καλλιέργεια

7) Ο αερολιμένας πρέπει να παρέχει κατάλληλη σήμανση που να δείχνει ότι το προσωπικό αυστηρώς δεν πρέπει να εισέρχεται στην περιοχή όταν λειτουργεί το GBAS και κατ' επέκταση ο πομπός VDB



Σχήμα 7.10 Κεραία VDB στο αεροδρόμιο του Σύδνεϋ [48]

Όπως για τις RRA, έτσι και για τις κεραίες VDB μπορεί να υπάρξουν “κρίσιμες περιοχές”, δηλαδή καθορισμένοι τομείς όπου δεν μπορεί να περιοριστεί η μετακίνηση μεγάλων αντικειμένων, όπως αεροσκαφών σε τροχοδρόμηση που πιθανότατα θα προκαλέσουν μη αποδεκτή μείωση της απόδοσης του συστήματος.

### **Ελάχιστες απαιτήσεις λαμβανόμενης Ισχύος του σήματος VDB**

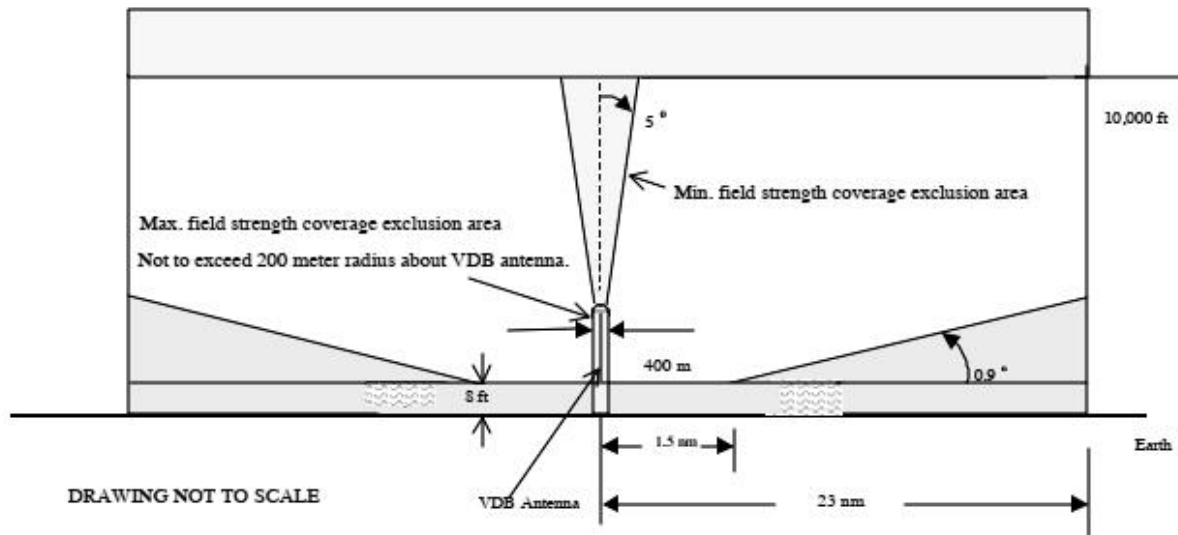
Η ενεργός ακτινοβολούμενη ισχύς (ERP) που πρέπει να παρέχει ένα οριζόντια πολωμένο σήμα εντός της περιοχής ραδιοκάλυψης του GBAS είναι 215 mV/m (-99 dBW/m<sup>2</sup>), ώστε να επιτυγχάνεται η ελάχιστη απαιτούμενη λαμβανόμενη ισχύς του σήματος για τους δέκτες των α/φών, που είναι -87 dBm. Οι παραπάνω απαιτήσεις ισχύος ισχύουν όταν δεν εμποδίζεται η οπτική επαφή λόγω τοπολογίας εδάφους ή άλλων εμποδίων.

Επομένως, η θέση της κεραίας VDB θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε το ακτινοβολούμενο σήμα να είναι όσο το δυνατόν πιο ελεύθερο. Ιδανικά από την κεραία θα πρέπει να υπάρχει απρόσκοπτη οπτική επαφή προς όλες τις λειτουργικές περιοχές, ειδικά των απαιτούμενων περιοχών για την κάλυψη της διαδικασίας προσέγγισης CAT I. Μικρές σταθερές δομές μπορεί να επιτρέπονται εντός της περιοχής οπτικής επαφής. Η διάθλαση γύρω από τις γωνίες και η διάδοση μέσα από μικρά κτίρια, μπορεί να προκαλέσουν κάλυψη και πίσω από υποδομές που εμποδίζουν την απευθείας οπτική επαφή, συνεισφέροντας έτσι στη συνολική ραδιοκάλυψη του σήματος VDB.

Η κάλυψη όλων των διαδικασιών σε ένα αεροδρόμιο από έναν μόνο πομπό θεωρείται ότι είναι μια δύσκολη συνθήκη, ειδικά για τα μεγάλα και σύνθετα αεροδρόμια, που είναι δύσκολο ή αδύνατο να βρεθεί ένας χώρος που να έχει οπτική επαφή σε όλο το εύρος όλων των διαδικασιών προσέγγισης CAT I. Η κεραία πρέπει γενικά να βρίσκεται όσο το δυνατόν ψηλότερα, όσο βέβαια αυτό είναι πρακτικά δυνατό. Μπορεί να χρειαστεί να αυξηθεί το ύψος της κεραίας για να παρέχει επαρκή ισχύ σήματος στους χρήστες σε χαμηλά υψόμετρα, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσει σε απαράδεκτες απώλειες εξασθένισης εντός της επιθυμητής περιοχής ραδιοκάλυψης. Η τοποθέτηση της κεραίας VDB στην οροφή ενός κτιρίου είναι μια εναλλακτική λύση, ωστόσο λόγω των χαρακτηριστικών των οριζόντια πολωμένων σημάτων, αυτή η λύση έχει ορισμένα μειονεκτήματα. Το ύψος του κτιρίου θα προστεθεί στο ύψος της κεραίας, και όσο υψηλότερη είναι η κεραία πάνω από το έδαφος, τόσο μεγαλύτερος λοβός σιγής θα υπάρξει. Επίσης οποιεσδήποτε απώλειες εξασθένισης μεγαλύτερες από 10dB θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ανεπαρκή κάλυψη. Οπότε η επιρροή των μηχανισμών διάδοσης του σήματος από τα εμπόδια που βρίσκονται εντός του χώρου κάλυψης πρέπει να μελετηθεί, ώστε να προσδιοριστεί ανάλογα η ελάχιστη εκπεμπόμενη ισχύς για να καλυφθούν οι απαιτήσεις της ελάχιστης λαμβανόμενης ισχύος του πεδίου. Αυτό μπορεί να γίνει μέσα από προγράμματα προσομοίωσης που στηρίζονται σε μοντέλα Ray Tracing, όπως το Trunet.

Η ελάχιστη απαιτούμενη λαμβανόμενη ισχύς πεδίου επιβάλλει επίσης ένα περιορισμό μέγιστης απόστασης. Η μέγιστη απόσταση από το πιο απομακρυσμένο σημείο της περιοχής κάλυψης (20 NM από το κατώφλι) έως την κεραία VDB θα πρέπει να είναι 23 NM (Σχ. 7.12). Αυτό σημαίνει ότι η κεραία VDB πρέπει να βρίσκεται σε ακτίνα 3NM (περίπου 5,5 χλμ.) από οποιοδήποτε κατώφλι που εξυπηρετείται από διαδικασίες GBAS. Να σημειωθεί ότι αυτός ο περιορισμός καλύπτεται από τον Αερολιμένα της Καστοριάς, μιας και το μέγιστο μήκος της έκτασης του είναι μικρότερο από 5,5 χλμ.

Η εγκατάσταση του υποσυστήματος εδάφους GBAS έχει σχεδιαστεί με τον ειδικό περιορισμό ότι δεν πληρείται η ελάχιστη λαμβανόμενη ισχύς του πεδίου ακριβώς πάνω από την κεραία VDB. Αυτή η περιοχή ορίζεται ως ένας κώνος 5° μοιρών, ο οποίος στην ουσία είναι το ανώτερο όριο υπό γωνία, της περιοχής ραδιοκάλυψης. Το πραγματικό άνω όριο της ραδιοκάλυψης πρέπει να επαληθεύεται κατά τη διάρκεια του αρχικού αλλά και του περιοδικού από αέρος ελέγχου (flight check). Αυτός ο κώνος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την τοποθέτηση της κεραίας VDB ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν επηρεάζει την απαιτούμενη περιοχή προσέγγισης.



Σχήμα 7.11 Ραδιοκάλυψη VDB και Κώνος Σιγής [07]

### Κριτήρια σχετικά με: την μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς πομπού VDB και τη μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς πεδίου (S3)

Δύο απαιτήσεις υπαγορεύουν τις ελάχιστες αποστάσεις από τις κεραίες VDB:

- Η απαίτηση της μέγιστης λαμβανόμενης ισχύος του πεδίου: επιβάλλει ελάχιστες αποστάσεις στις επιχειρησιακές περιοχές στις οποίες χρησιμοποιούνται υπηρεσίες GBAS, δηλαδή στη διαδρομή προσέγγισης και στους διαδρόμους.

- Η απαίτηση του burnout του δέκτη του αεροσκάφους: Επιβάλλει ελάχιστες αποστάσεις στους τροχόδρομους, στην πίστα και σε άλλες περιοχές όπου τα αεροσκάφη εξοπλισμένα με σύστημα GBAS μπορούν να λειτουργούν τον δέκτη τους, χωρίς να κάνουν χρήση υπηρεσιών GBAS. Το burnout των δεκτών ορίζεται στα 20 dBm [15]

Η μέγιστη απαίτηση για την ισχύ σήματος VDB, όπως αναφέρεται στο Annex 10 του ICAO [01], είναι 0,350 V/m (-35 dBW / m<sup>2</sup>). Αυτή η τιμή της έντασης πεδίου, αντιστοιχεί σε ελάχιστη απόσταση 200m της κεραίας VDB από τις επιχειρησιακές περιοχές, η οποία σημαίνει ότι ο δέκτης του χρήστη δεν θα κορεστεί, αν το αεροσκάφος βρίσκεται τουλάχιστον 200 μέτρα μακριά από την κεραία VDB. Ωστόσο, σε πρόσφατες μελέτες στο πλαίσιο του οργανισμού RTCA διαπιστώθηκε ότι, επιτρέποντας την εποικοδομητική εξασθένιση του σήματος και αυξάνοντας το κέρδος της κεραίας VHF του αεροσκάφους, επιτρέπεται υψηλότερη μέγιστη ισχύς πεδίου με τιμή 0,879 V/m., δηλαδή ελάχιστη απόσταση από τις επιχειρησιακές περιοχές (διάδρομος και προσέγγιση) της τάξεως των 80 μέτρων [05]. Εντούτοις, η τοποθέτηση της κεραίας VDB σε

τέτοια απόσταση από τους διαδρόμους, έρχεται σε σύγκρουση με τα ελάχιστα όρια και τους περιορισμούς του Annex 14 του ICAO, περί ελαχίστων αποστάσεων στις περιοχές αεροδρομίου[02].

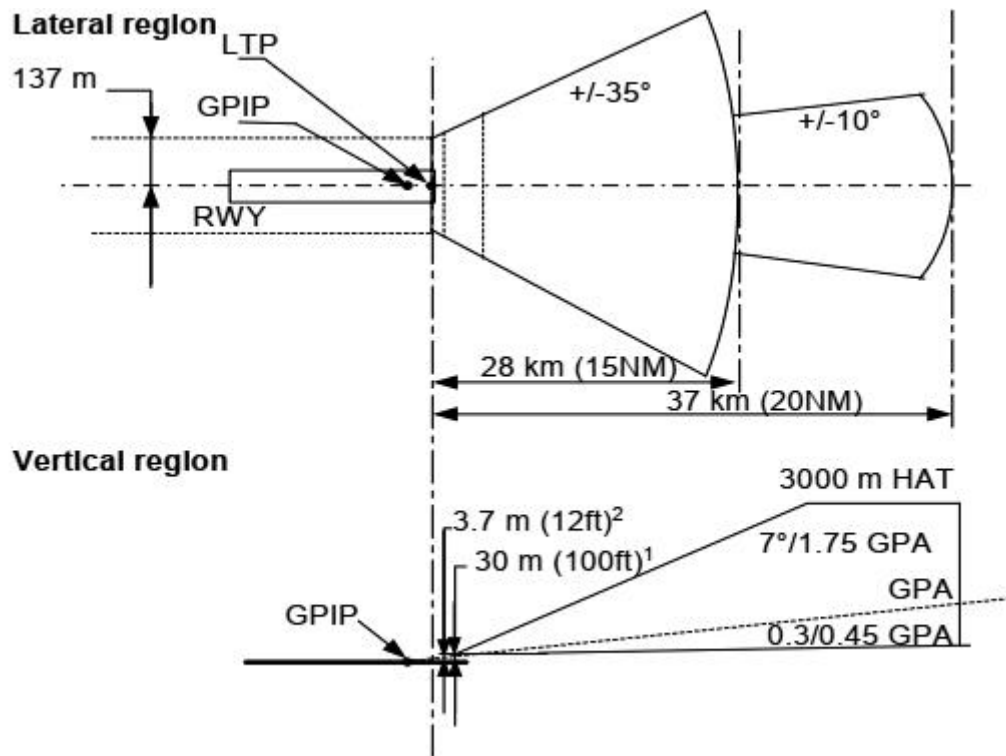
### **Περιοχή ραδιοκάλυψης**

Περιοχή ραδιοκάλυψης ενός υποσυστήματος εδάφους GBAS ορίζεται ως ο όγκος του εναέριου χώρου εντός του οποίου το υποσύστημα εκπομπής VDB πληροί τις ελάχιστες απαιτήσεις λαμβανόμενης ισχύος. Με την εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων, το υποσυστήματος εδάφους παρέχει την ακρίβεια, την ακεραιότητα, τη συνέχεια και τη διαθεσιμότητα που απαιτούνται για την υποστήριξη λειτουργιών προσέγγισης ακρίβειας CAT I και λειτουργιών RNAV εντός της περιοχής κάλυψης.

Η ελάχιστη ραδιοκάλυψη του GBAS για υπηρεσίες προσέγγισης, με βάση το ED-114 του EUROCAE, ορίζεται ως εξής:

α) Πλευρικά (Laterally), ξεκινώντας από τα 137 μέτρα της κάθε πλευράς του κέντρου του κατωφλίου προσγείωσης / κέντρο πλασματικού κατωφλίου (LTP / FTP) και προβάλλοντας  $\pm 35$  μοίρες εκατέρωθεν της διαδρομής τελικής προσέγγισης στα 28 χλμ. (15 NM) και  $\pm 10$  μοίρες από την πλευρά της τελικής διαδρομής προσέγγισης έως τα 37 χλμ. (20 NM) και

β) Κατακόρυφα (Vertically), εντός της πλευρικής περιοχής, προς τα πάνω μέχρι το μέγιστο ύψος των  $7^\circ$  μοιρών ή 1,75 φορές την δημοσιευμένη γωνία καθόδου (GPA) πάνω από το επίπεδο, με αρχή το σημείο επαφής με τον διάδρομο (GPIP) και προς τα κάτω από το ύψος του (0,30 - 0,45)GPA και πάνω, σε σχέση με το επίπεδο. Αυτή η ραδιοκάλυψη εφαρμόζεται υψομετρικά πάνω από το κατώφλι (HAT) από τα 30 έως τα 3000 μέτρα.



Σχήμα 7.12 Ελάχιστη Ραδιοκάλυψη Διαδικασίας Προσέγγισης CAT I μέσω GBAS [08]

Στην αξιολόγηση της θέσης της κεραίας VDB πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αλληλεπιδράσεις με τον εξοπλισμό του αεροδρομίου. Εκτός του ότι δεν μπορεί να γίνει εγκατάσταση της κεραίας εντός του προστατευμένου χώρου του υπάρχοντος εξοπλισμού, πρέπει να ελεγχθεί οπωσδήποτε αν υπάρχουν σοβαρά θέματα παρεμβολών μεταξύ τους.

#### 7.4.5 Κεντρικός Σταθμός GBAS

Η διαδικασία του siting του κεντρικού σταθμού GBAS αντιστοιχεί στο siting του οικίσκου υποσυστήματος εδάφους και λαμβάνει χώρα μετά τον προσδιορισμό των πιθανών θέσεων εγκατάστασης των υποσυστημάτων του δέκτη GNSS και του πομπού VDB. Οι παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν κατά τη διαδικασία του Siting είναι:

- Ασφάλεια (S1)
- Περιοχές περιορισμού εμποδίων(S2)
- Κλιματικές συνθήκες και εποχιακές διακυμάνσεις (S8)
- Πιθανά σχέδια επέκτασης / τροποποίησης του αεροδρομίου (S9)



- Επαναχρησιμοποίηση υπάρχουσας υποδομής, π.χ. γραμμών ισχύος και επικοινωνιών (S10)
- Θέση του οικίσκου σε σχέση με τον δέκτη αναφοράς RR και την κεραία VDB, για να αποφευχθεί ενδεχόμενο μη αποδεκτό multipath ή ακόμα και φραγή του σήματος τους από τον οικίσκο. Η θέση του οικίσκου θα πρέπει να εναρμονίζεται με τους κανόνες των LOCA των κεραιών RRA και VDB (S5 και S6)
- Απόσταση από τις κεραιές VDB και RRA (όταν ο πομπός και οι δέκτες είναι εγκατεστημένοι εντός του οικίσκου) για την ελαχιστοποίηση της καλωδίωσης. Αυτό έχει μεγάλη σημασία ειδικά για την κεραία VDB, καθώς η ισχύς εκπομπής είναι σημαντικός παράγοντας για την ραδιοκάλυψη οπότε τυπικά μία κεραία VDB βρίσκεται σε απόσταση 15-40 μέτρων από τον οικίσκο
- Ευκολία πρόσβασης (δρόμος πρόσβασης στο χώρο)

Εκτός από τα κριτήρια τοποθεσίας, άλλα κριτήρια σχετικά με τον οικίσκο είναι:

- Επαρκής προστασία από κυκλώματα υψηλής τάσης για τον αποκλεισμό παρεμβολών στην εκπομπή του σήματος VDB
- Απαιτούμενος χώρος εντός του οικίσκου για την ασφαλή τοποθέτηση του εξοπλισμού (racks, καμπίνες) και επαρκής χώρος εκτός και γύρω του για την εξυπηρέτηση του προσωπικού συντήρησης
- Περιβαλλοντικές εκτιμήσεις

Οι απαιτήσεις του siting για τον ίδιο τον οικίσκο δεν είναι πολύ περιοριστικές όπως για τα άλλα υποσυστήματα. Είναι όμως προτιμότερο να εγκατασταθεί όσο το δυνατόν περισσότερος εξοπλισμός (δέκτες GNSS, πομποί και δέκτες VDB) εντός του οικίσκου, προκειμένου να μην χρειαστούν ξεχωριστές εγκαταστάσεις στεγανών κυτίων ή μικρών οικίσκων για αυτές τις βαθμίδες σε εξωτερικούς χώρους, με όποιους επιπλέον κινδύνους αυτό συνεπάγεται αλλά και της μεταφοράς επιπλέον καλωδίωσης για την παροχή τροφοδοσίας 220V.

Ο οικίσκος πρέπει να παρέχει τεχνητό και φυσικό κλιματισμό προκειμένου να διατηρούνται οι θερμοκρασίες του εξοπλισμού εντός των ορίων που καθορίζονται από τον κατασκευαστή και συνίσταται ο χώρος να έχει σταθερή θερμοκρασία μεταξύ 10° και 25°C. Έτσι διασφαλίζεται η

βέλτιστη απόδοση του εξοπλισμού και αυξάνεται η διάρκεια ζωής του. Ωστόσο τα σημεία του αερισμού του πρέπει να ασφαλιζονται από την εισαγωγή μικρών ζωυφίων και διαφόρων εντόμων, που μπορεί να προκαλέσουν δυσλειτουργίες στο σύστημα.

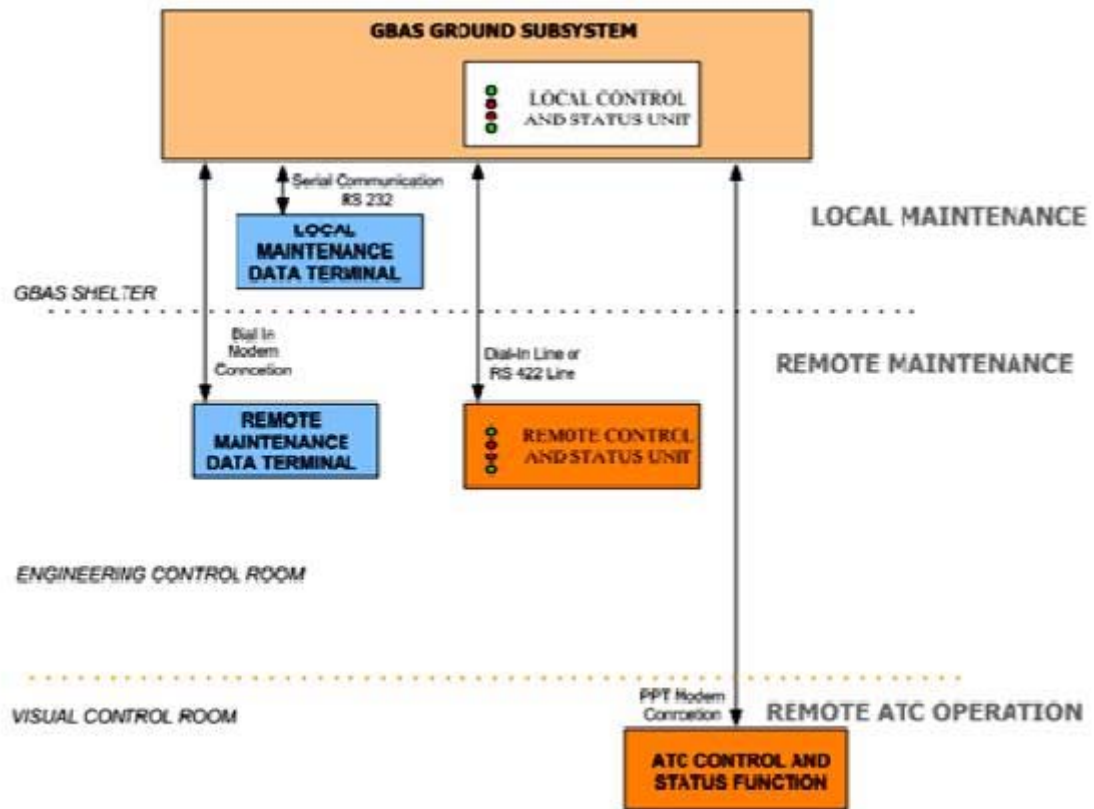
Η απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος πρέπει να εξασφαλίζεται μέσω εναλλακτικών πηγών τροφοδοσίας, όπως UPS, μπαταρίες και σύνδεση με το H/Z του αερολιμένα. Επίσης πρέπει να υπάρχει επαρκής γείωση με αντίσταση κάτω από 10Ω και σίγουρα όχι πάνω από 30Ω και προστασία από υπέρταση σε καλώδια που εισέρχονται και εξέρχονται, όπως και ειδικός εξοπλισμός προστασίας από κεραυνούς.

Πολύ κρίσιμο κομμάτι της σχεδίασης του οικίσκου, είναι η εξασφάλιση της ασφάλειας του από έκνομες ενέργειες ή φυσικές καταστροφές. Η εγκατάσταση συστήματος πυρανίχνευσης θα ήταν επιθυμητή, αλλά αν αυτό δεν είναι δυνατό, επιβάλλεται η τοποθέτηση πυροσβεστήρα CO<sub>2</sub>. Επίσης πρέπει να ασφαλιζεται όταν δεν υπάρχει εξουσιοδοτημένο προσωπικό, με την εφαρμογή συναγερμού εισβολής να είναι επιθυμητή.

#### **7.4.6 Έλεγχος και κατάσταση εξοπλισμού**

Το υποσύστημα εδάφους παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες για την υποστήριξη του προσωπικού συντήρησης και του ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας. Αυτές οι πληροφορίες βασίζονται στην παρακολούθηση και τον χειρισμό των συστημάτων σε τοπικό και σε απομακρυσμένο επίπεδο. Τοπικά εντός του οικίσκου αλλά και απομακρυσμένα εντός του Αεροσταθμού, υπάρχουν οι παρακάτω μονάδες:

- Μονάδες παρακολούθησης και βασικού χειρισμού (Local CSU, Remote CSU και ATSU)
- Μονάδες διαχείρισης (Local MDT και Remote MDT)



Σχήμα 7.13 Μονάδες κατάστασης και ελέγχου εξοπλισμού [05]

### Τοπικές μονάδες οικίσκου

Η τοπική μονάδα παρακολούθησης και βασικού χειρισμού **LCSU** είναι συνεγκατεστημένη με το κεντρικό υποσύστημα εδάφους εντός του οικίσκου και συνδέεται απευθείας με τον επεξεργαστή του υποσυστήματος μέσω καλωδιωτικών.

Ο βασικός χειρισμός του συστήματος περιλαμβάνει τουλάχιστον τις εξής επιλογές:

- Είσοδος και έξοδος σε λειτουργία συντήρησης / δοκιμής ή επιλογή mode λειτουργίας μεταξύ κανονικής λειτουργίας και λειτουργίας συντήρησης / δοκιμής
- Έλεγχος ON / OFF του εκπομπού VDB
- Επιλογή "Reset" ή "Restart" του εξοπλισμού υποσυστήματος εδάφους
- Λειτουργία on / off του συστήματος και
- Μεταγωγή της τροφοδοσίας μεταξύ εναλλασσόμενου ρεύματος και μπαταρίας

Η κατάσταση λειτουργίας του εξοπλισμού απεικονίζεται μέσω των εξής ενδείξεων:

- Ένδειξη "Normal" που εμφανίζεται όταν ο εξοπλισμός είναι λειτουργικός
- Ένδειξη "Alarm" που εμφανίζεται όταν ο εξοπλισμός δεν είναι διαθέσιμος, με "flag" στη συγκεκριμένη παράμετρο που προκάλεσε την κατάσταση συναγερμού
- Ένδειξη "συντήρησης" ή "δοκιμής" που εμφανίζεται όταν ο εξοπλισμός βρίσκεται σε λειτουργία συντήρησης και το σύστημα δεν είναι επιχειρησιακά κατάλληλο
- Ένδειξη της πηγής τροφοδοσίας του και
- Ένδειξη της κατάστασης του πομπού VDB, δηλαδή αν εκπέμπει ή όχι

Η τοπική μονάδα διαχείρισης **LMDT** είναι ένας τυπικός φορητός υπολογιστής που συνδέεται με το κεντρικό υποσύστημα μέσω καλωδίων δεδομένων (data cables) RS232, RS422 ή RS485. Στον υπολογιστή πρέπει να είναι εγκατεστημένο το κατάλληλο λογισμικό που θα δίνει τη δυνατότητα πλήρους ελέγχου και παραμετροποίησης του εξοπλισμού στον μηχανικό συντήρησης.

### **Μονάδες τηλεχειρισμού**

Η μονάδα τηλεχειρισμού **RCSU** πρέπει να εγκατασταθεί στον χώρο ελέγχου του μηχανικού συντήρησης ATSEP και παρέχει παρόμοια λειτουργικότητα με τη μονάδα LCSU. Η εφαρμογή αυτής της μονάδας είναι αρκετά χρήσιμη για την απομακρυσμένη συντήρηση αλλά είναι προαιρετική, καθώς παρέχονται οι περισσότερες από τις ενδείξεις και τους χειρισμούς της τοπικής στον οικίσκο LCSU.

Αν και η απαίτηση μέγιστης επιτρεπόμενης υστέρησης σε χρόνο δεν είναι αυστηρή και κυμαίνεται περί των 5 δευτερολέπτων, επιθυμητό για όσο το δυνατόν ασφαλείς διαδικασίες είναι η καθυστέρηση να μην υπερβαίνει τα 1 με 2 δευτερόλεπτα. Αυτό είναι ανάλογο με την ποιότητα και την ακεραιότητα του δικτύου μεταφοράς των δεδομένων μεταξύ του οικίσκου και του Αεροσταθμού. Η σύνδεση είναι προτιμότερο να γίνει με οπτικές ίνες, αντί για καλώδια δεδομένων τύπου RS232. Αν και η εγκατάσταση δικτύου οπτικών ινών είναι πιο κοστοβόρα από αυτή των καλωδίων, οι απώλειες πιστότητας δεδομένων είναι μηδενικές και η ταχύτητα μεταφοράς τους μεγαλύτερη με αποτέλεσμα τη βέλτιστη ποιότητα τηλεχειρισμού.

Η τοποθέτηση της RCSU στο χώρο των μηχανικών συντήρησης στηρίζεται κατά κύριο λόγο στις επιλογές των τελικών χρηστών του εξοπλισμού λαμβάνοντας υπόψη βέβαια την ασφάλεια και την ορθή λειτουργία του, αλλά και τη διαθεσιμότητα γραμμών επικοινωνίας.

Η μονάδα απομακρυσμένης διαχείρισης **RMDT** όπως και η RCSU πρέπει να εγκατασταθεί στον χώρο ελέγχου του μηχανικού συντήρησης ATSEP και είναι προαιρετική καθώς παρέχονται οι περισσότερες από τις ενδείξεις και τους χειρισμούς της τοπικής στον οικίσκο MDT. Ωστόσο για λόγους ασφαλείας οι απομακρυσμένες αλλαγές στις παραμέτρους ακεραιότητας δεν επιτρέπονται, οπότε δεν πρέπει να παρέχονται από την μονάδα. Για τον ίδιο λόγο η πρόσβαση στη μονάδα πρέπει να είναι αυστηρά ελεγχόμενη μέσω κωδικών πρόσβασης στο λογισμικό της. Η σύνδεση με τον οικίσκο γίνεται με τον ίδιο τρόπο που γίνεται η σύνδεση της RCSU.

Δεν υπάρχουν διεθνή πρότυπα για τη διεπαφή της μονάδας **ATSU**. Η σχεδίαση της καθορίζεται από τους αντίστοιχους εθνικούς κανονισμούς. Μπορεί να είναι αυτόνομη ή ενσωματωμένη στην διεπαφή των συστημάτων προσέγγισης και προσγείωσης του ATC. Η διεπαφή μπορεί να παρέχει πληροφορίες μόνο σχετικές με το GBAS, αλλά και συμπληρωματικές πληροφορίες που έχουν αποκτηθεί από διαφορετικούς αισθητήρες που έχουν σχέση με τη διαδικασία προσέγγισης, όπως κατάσταση φωτισμού διαδρόμων και πληροφορίες καιρού.

Το ATSU προορίζεται για εγκατάσταση στο χώρο του ATC και αναλόγως της χρήσης του τοποθετείται στον πύργο ελέγχου (Control Tower) ή στον έλεγχο προσέγγισης (Approach Control) ή συνήθως και στους δύο χώρους.

Η ATSU περιλαμβάνει την λειτουργία κατάστασης του εξοπλισμού και προαιρετικά τη λειτουργία περιορισμένου ελέγχου. Δεδομένου ότι οι ATCO ανησυχούν περισσότερο για τη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας GBAS ανά προσέγγιση παρά για την λειτουργική κατάσταση του σταθμού GBAS, η διεπαφή παρέχει τις αντίστοιχες ενδείξεις διαθεσιμότητας της υπηρεσίας προσέγγισης ανά άκρο διαδρόμου και απλή ένδειξη λειτουργίας ή όχι του σταθμού GBAS.

Εάν εφαρμόζονται λειτουργίες ελέγχου ανάλογα με την πολιτική του κάθε παρόχου, ο χειρισμός ενεργοποίησης και απενεργοποίησης συνολικά της υπηρεσίας ή μεμονωμένα της κάθε διαδικασίας στον αντίστοιχο διάδρομο πρέπει να παρέχεται. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση τεχνικών προβλημάτων του επίγειου σταθμού GBAS, δεν είναι ο ρόλος των ATCO να απενεργοποιούν τις προσεγγίσεις GBAS, αλλά των μηχανικών συντήρησης ATSEP.

Ο εξοπλισμός του υποσυστήματος εδάφους GBAS, όπως οι δέκτες RR, ο πομπός και ο δέκτης VDB, οι μονάδες επεξεργασίας του υποσυστήματος εδάφους, τα monitors και οι διεπαφές όλων αυτών, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον κατασκευαστή. Επομένως, μια πρότυπη μελέτη επιλογής εξοπλισμού είναι δύσκολο να επιτευχθεί και πιθανόν να μην προσφέρει κάποια προστιθέμενη αξία. Για το λόγο αυτό ο εξοπλισμός αυτού του επιπέδου, δεν εξετάζεται στην παρούσα διατριβή.

# Κεφάλαιο 8

## Επίλογος

Κλείνοντας την παρούσα διατριβή είναι χρήσιμο να παρουσιαστούν διάφορα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη συγγραφή της και απαντούν στα αρχικά ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας. Επίσης θα αναφερθούν τα μελλοντικά σχέδια που αφορούν την ανάπτυξη του συστήματος GBAS γενικά, αλλά και οι στόχοι εφαρμογής της εργασίας στον Αερολιμένα Καστοριάς, όπως και η επέκταση της μελέτης στο μέλλον.

### 8.1 Συμπεράσματα

Από τα δεδομένα και τις πληροφορίες που παρατίθενται στην παρούσα εργασία, διαπιστώνονται διάφορα σημαντικά συμπεράσματα σε σχέση με το σύστημα GBAS και την εγκατάσταση ενός υποσυστήματος εδάφους.

Το σημαντικότερο συμπέρασμα, το οποίο καθιστά την περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος GBAS προτεραιότητα για τα επόμενα χρόνια, είναι τα πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα του έναντι του συστήματος ILS, το οποίο είναι το μοναδικό εργαλείο για προσεγγίσεις ακριβείας από CAT-I έως CAT-II/III. Από τη μελέτη της εγκατάστασης και των περιοχών περιορισμού εμποδίων

διαπιστώθηκε ότι οι περιορισμοί είναι σαφώς λιγότεροι γύρω από τις εγκαταστάσεις του πομπού VDB έναντι των πομπών του ILS. Στο υποσύστημα εδάφους GBAS δεν υπάρχει η ανάγκη για ελεύθερες ζώνες, όπως στο ILS, που δημιουργεί σημαντικές μειώσεις στην χωρητικότητα ενός αεροδρομίου. Οι υποδομές του GBAS δεν απαιτείται να βρίσκονται δίπλα στο κατώφλι του κάθε διαδρόμου που εξυπηρετείται από GLS διαδικασίες, ενώ στο ILS πρέπει να υπάρχει εγκατάσταση σε όποιο κατώφλι υποστηρίζεται διαδικασία προσέγγισης ILS, ενώ με έναν μόνο επίγειο σταθμό GBAS σε ένα αεροδρόμιο, μπορεί να εξυπηρετηθούν όλοι οι διάδρομοι του, ακόμα και διάδρομοι σε άλλα αεροδρόμια εντός της εμβέλειας του GBAS πομπού VDB. Ο μικρότερος αριθμός υποδομών συνεπάγεται μικρότερο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του GBAS έναντι του ILS.

Από τη μελέτη του κεφαλαίου 7 όσον αφορά το siting ενός υποσυστήματος εδάφους GBAS βγαίνει το συμπέρασμα ότι, ο καθορισμός της τοποθεσίας, η προεργασία των περιοχών περιορισμών και των εγκαταστάσεων όπως και η συνολική εγκατάσταση του υποσυστήματος, είναι μία σχετικά βατή διαδικασία για τους εγκαταστάτες και τον πάροχο υπηρεσιών αεροναυτιλίας, καθώς δεν διαφέρει δραματικά από τα sitings των συμβατικών ραδιοβοηθημάτων που εγκαθίστανται και χρησιμοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες στα αεροδρόμια. Για την ορθή υλοποίηση του υποσυστήματος εδάφους, ώστε να μην υπάρχουν θέματα παρεμβολών από και προς τα υπάρχοντα συστήματα, χρειάζεται να εφαρμοσθούν σωστά οι προδιαγραφές και οι αποστάσεις ασφαλείας. Στον Αερολιμένα Καστοριάς θέματα παρεμβολών πρέπει να εξεταστούν σε σχέση με τη συχνότητα εκπομπής των 114.500 MHz του ραδιοβοηθήματος VOR και τη συχνότητα επικοινωνίας των 118.400 MHz του πύργου ελέγχου, καθώς βρίσκονται στην ίδια μπάντα συχνοτήτων εκπομπής των VDB σημάτων.

Από τα στοιχεία των καιρικών συνθηκών των προηγούμενων ετών για τον Αερολιμένα Καστοριάς και των ακυρώσεων πτήσεων λόγω αυτών, διαπιστώνεται ότι τα ήδη υπάρχοντα ραδιοβοηθήματα είναι ακατάλληλα για διαδικασίες τόσο χαμηλών νεφώσεων, ενώ η βέλτιστη λύση με βάση τα χαρακτηριστικά του παραπάνω ζητήματος, θεωρείται η εγκατάσταση GBAS τεχνολογίας GAST-C ώστε να καλυφθούν διαδικασίες προσέγγισης ακριβείας CAT-I. Η εγκατάσταση συστήματος GBAS τεχνολογίας GAST-D θεωρείται περιττή καθώς ο αριθμός των μη ολοκληρωμένων πτήσεων λόγω μηδενικής ορατότητας είναι ελάχιστες, ώστε να δικαιολογήσουν την ανάγκη διαδικασιών προσέγγισης ακριβείας και αυτόματης προσγείωσης (auto landing) CAT-III.



Μία γενική διαπίστωση για την ανάπτυξη του συστήματος GBAS, είναι ότι σε σχέση με τον προγραμματισμό της προηγούμενης δεκαετίας, το GBAS παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα χρήσης και κάλυψης διαδικασιών προσέγγισης ακριβείας παγκοσμίως, το οποίο οφείλεται σε συγκεκριμένους λόγους. Πρώτος και κύριος λόγος είναι ότι ο αριθμός των αεροσκαφών που διαθέτουν εξοπλισμό GBAS είναι πολύ μικρός, καθώς οι ιδιωτικές εταιρίες δεν προβαίνουν σε επενδύσεις συστημάτων αν αυτά δεν χρησιμοποιηθούν αρκετά και οριστικοποιηθεί η χρησιμότητα και η αξιοπιστία τους. Ο άλλος λόγος είναι η μεγάλη καθυστέρηση πιστοποίησης διαδικασιών GBAS CAT II/III λόγω μη κάλυψης των αντίστοιχων SARPs του ICAO από ιονοσφαιρικές στρεβλώσεις. Για το λόγο αυτό το GBAS δεν εγκαταστάθηκε σε πολλά αεροδρόμια με πολύ χαμηλές συνθήκες ορατότητας, αλλά συνέχισαν να καλύπτονται από διαδικασίες ILS.

Ένα άλλο γενικό συμπέρασμα που δείχνει την προοπτική του GBAS τα επόμενα χρόνια είναι ότι συστήματα GBAS δοκιμάζονται και εφαρμόζονται σε πολλά αεροδρόμια ανά τον κόσμο, αεροδρόμια μάλιστα με ιδιαίτερα υψηλές απαιτήσεις, ενώ τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η υπηρεσία προσέγγισης ακριβείας GBAS ανταποκρίνεται εύκολα στις απαιτήσεις απόδοσης για τις λειτουργίες CAT-I και αναμένεται ότι στο εγγύς μέλλον θα ανταποκρίνεται πλήρως και για CAT-II/III, ενώ αναμένεται το GBAS να αποτελέσει το κύριο μέσο για την υποστήριξη αυτών των λειτουργιών.

## **8.2 Στόχοι - Μελλοντικές επεκτάσεις**

Οι ΗΠΑ και αρκετές χώρες της Ε.Ε., λειτουργούν και αναπτύσσουν το σύστημα GBAS σε πολλά αεροδρόμια τους και μεγάλοι διαχειριστές αεροδρομίων, όπως η γερμανική Fraport επενδύουν αρκετά στην επικράτηση του ανάμεσα στις αεροπορικές εταιρίες, ώστε να εγκαταστήσουν το αντίστοιχο υποσύστημα GLS στον στόλο τους. Μάλιστα η Fraport στο Αεροδρόμιο της Φρανκφούρτης, επιδοτεί τη χρήση των διαδικασιών προσέγγισης GBAS από τις εταιρίες, με κάποιο σημαντικό ποσό ανά διαδικασία.

Η επόμενη μέρα του GBAS είναι συνυφασμένη με τα δύο προγράμματα ανάπτυξης της πολιτικής αεροπορίας, που τρέχουν παράλληλα από τις ΗΠΑ και την ΕΕ. Πρόκειται για το αμερικάνικο πρόγραμμα Next Gen και το ευρωπαϊκό SESAR. Σημαντικό κομμάτι αυτών των προγραμμάτων είναι η ανάπτυξη και βελτίωση του συστήματος GBAS. Συγκεκριμένα στόχος τους είναι η πλήρης λειτουργία και η ανάπτυξη του GAST-D GBAS, ώστε στο μέλλον το GBAS να είναι το κύριο

σύστημα που θα υποστηρίζει διαδικασίες προσέγγισης ακριβείας PA, αλλά και υπηρεσίες αυτόματης προσγείωσης (auto landing) σε συνθήκες μηδενικής ορατότητας.

Όσον αφορά την Ελλάδα, διαδικασίες προσέγγισης LPV μέσω συστήματος SBAS έχουν δημοσιευθεί για τα μεγάλα αεροδρόμια της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης και είναι σε εξέλιξη η δημοσίευση διαδικασιών και σε άλλα. Ωστόσο οι LPV διαδικασίες δεν αντικαθιστούν το σύστημα ILS για διαδικασίες προσέγγισης CAT-I, με συνέπεια η αεροναυτιλία της χώρας να στηρίζεται ακόμα σε αυτή την κοστοβόρα τεχνολογία. Είναι επιτακτική η ανάγκη της ανάπτυξης του συστήματος GBAS στα αεροδρόμια της Ελλάδας, όταν μάλιστα τα περισσότερα αεροδρόμια βρίσκονται σε νησιά και οι συνθήκες προσέγγισης τους παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες λόγω της τοπολογίας τους. Ευχής έργων είναι η παρούσα εργασία να βοηθήσει προς την κατεύθυνση αυτή, ειδικά αν ένας πρότυπος σταθμός GBAS εγκατασταθεί στον αερολιμένα Καστοριάς.

Αφορμή για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας αποτέλεσαν οι πολλές ακυρωμένες πτήσεις στον Αερολιμένα Καστοριάς λόγω των συχνών δυσμενών καιρικών συνθηκών που προαναφέρθηκαν. Η προσπάθεια εξεύρεσης λύσης, που να είναι εφικτό όμως να πραγματοποιηθεί, οδήγησε στην συνειδητή επιλογή του συστήματος GBAS, καθώς το ILS είναι αδύνατο να εγκατασταθεί και να υποστηριχτεί σε ένα αεροδρόμιο της κατηγορίας του Αερολιμένα Καστοριάς με τις παρούσες οικονομικές συνθήκες. Η διατριβή αυτή αποτελεί το πρώτο στάδιο της εγκατάστασης του συστήματος GBAS στον Αερολιμένα Καστοριάς και στόχος είναι στο αμέσως επόμενο διάστημα να ξεκινήσουν διαδικασίες για την υλοποίησή του.

Μία ενδεχόμενη εγκατάσταση ενός συστήματος GBAS στον Αερολιμένα Καστοριάς θα βοηθούσε πολύ στην ανάπτυξη του αεροδρομίου, καθώς στόχος είναι αφού λυθεί το ζήτημα των προβληματικών προσεγγίσεων, να προσκληθούν μεγάλες αεροπορικές εταιρίες (Ryanair, Easyjet) που ενδιαφέρονται για χρήση αεροδρομίων αντίστοιχης κατηγορίας, αναπτύσσοντας τα και καθιστώντας τα βάση για τον στόλο των αεροσκαφών τους και για πτήσεις που καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή του αεροδρομίου.

Η επέκταση της παρούσας μελέτης προς τις τεχνολογίες GAST-D και GAST-F σε συνδυασμό με την μελέτη της συμπεριφοράς της Ιονόσφαιρας και των επιδράσεων της στα δορυφορικά σήματα στην ευρύτερη περιοχή του αεροδρομίου της Καστοριάς, θα μπορούσε να είναι το έναυσμα για την δημιουργία ενός τομέα έρευνας των τεχνολογιών αεροναυτιλίας στον Αερολιμένα Καστοριάς ως κέντρο αεροπορικής έρευνας για την Ελλάδα. Πρόκειται για ένα

μακρινό όνειρο, που μπορεί να καταστεί μελλοντικός στόχος στα πλαίσια ενός ενιαίου ευρωπαϊκού προγράμματος ανάπτυξης και εκμετάλλευσης του Galileo και του EGNOS προς όφελος της αεροναυτιλίας.

## Βιβλιογραφία

- [01] ICAO 'International standards and recommended practices - Aeronautical Telecommunications', ICAO Annex 10, vol. I, Radio Navigation Aids, July 2013
- [02] ICAO Annex 14 Aerodromes. Volume I: Aerodrome Design and Operations, 19.11.2009
- [03] ICAO, 'Global Navigation Satellite System (GNSS) manual', Doc 9849, second edition, Montreal, Canada, ICAO, 2012
- [04] ICAO, er de A. S. Aless, 'Guide for Ground Based Augmentation System Implementation', p. 31. May 2013
- [05] Thales, SESAR JU - Ground Architecture and Airport Installation', D04 project 15.03.06, p 127, 21 March 2013
- [06] Thales, 'SESAR JU - GBAS cat II/III L1 approach', D07 project 15.03.06
- [07] FAA 'Siting Criteria for Ground Based Augmentation System (GBAS)' Document ORDER 6884.1, 15 December 2010
- [08] Eurocae: "Draft ED-114A Minimum Operational Performance Specification For Global Navigation Satellite Ground Based Augmentation System Ground Equipment to Support Category 1 Operations", October 2012
- [09] Eurocae ED-144 High Level Performance Requirements For a Global Navigation Satellite System / Ground Based Augmentation System to Support Precision Approach Operations
- [10] RTCA DO-235A, "Assessment of Radio Frequency Interference Relevant to the GNSS" RTCA, SC-159, 05.12.2002
- [11] RTCA DO-246D RTCA DO-245A Minimum Aviation Performance Standards for the Local Area Augmentation System (LAAS), December 2008
- [12] RTCA DO-253C Minimum Operational Performance Standards for the Local Area Augmentation System (LAAS), December 2008

- [13] ICAO EUR DOC 15, EUROPEAN GUIDANCE MATERIAL ON MANAGING BUILDING RESTRICTED AREAS, Second Edition, ICAO, September 2009
- [14] Amendment 77 to Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I – Aeronautical Telecommunications Radio Navigation Aids, ICAO, 2001 (3/0)
- [15] Eurocae WG28 WP N15/1 VDB Receiver Burnout Protection, Winfried Dunkel, June 2011
- [16] O. Mongénie, 'INTRODUCTION AND SETTING THE SCENE', SESAR-JU, p. 92.
- [17] T. Murphy and T. Imrich, 'Implementation and Operational Use of Ground-Based Augmentation Systems (GBASs)—A Component of the Future Air Traffic Management System', *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 12, pp. 1936–1957, Dec. 2008.
- [18] FAA, 'LAAS Performance Analysis/Activities Report', USA, March 2014
- [19] A. Lipp *et al.*, 'Initial GBAS Experiences In Europe', p. 12, Nov. 2001.
- [20] D. Guenter and J. Dennis, 'Initial operational experience with CAT I Ground Based Augmentation System (GBAS)', in *2015 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, 2015, pp. S1-1-S1-14.
- [21] M. Stanisak, M. Bitter, and T. Feuerle, 'Multiple Satellite Navigation Systems for the Ground Based Augmentation System', p. 12, January 2014.
- [22] R. Geister, I. Jessen, and T. Ludwig, 'GBAS research station in braunschweig - Five years of successful GBAS operations', in *2014 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) Conference Proceedings*, 2014, pp. I2-1-I2-11.
- [23] M. Felux, H. Becker, and T. Dautermann, 'GBAS landing system – precision approach guidance after ILS', *Aircraft Eng & Aerospace Tech*, vol. 85, no. 5, pp. 382–388, Aug. 2013.
- [24] O. Weber, 'GBAS Operational Implementations', DFS experiences and capabilities, p. 19, 2015.

- [25] T. Murphy, M. Harris, Y. S. Park, and S. Pullen, 'GBAS Differentially Corrected Positioning Service Ionospheric Anomaly Errors Evaluated in an Operational Context', p. 18, 2010
- [26] S. Raghunath and D. V. Ratnam, 'Ionospheric gradient detection methods for ground based augmentation system', in *2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS)*, 2015, pp. 894–898.
- [27] D. Gerbeth, M. Felux, M.-S. Ciriuc, and M. Caamano, 'Optimized Selection of Satellite Subsets for a Multi-Constellation GBAS', Conference: International Technical Meeting 2016, At Monterey, California, p. 9, 2016
- [28] B. Belabbas, T. Dautermann, G. Looye, and J. Kladetzke, 'GBAS based autoland system: A bottom up approach for GAST-D requirements', in *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, 2010, pp. 566–574.
- [29] C. J. Hegarty and E. Chatre, 'Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS)', *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 12, pp. 1902–1917, Dec. 2008.
- [30] R. Geister, C. Hanses, and H. Becker, 'Curved approach procedures enabled by a ground based augmentation system', in *2012 IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 2012, pp. 1–21.
- [31] M. Felux et al, 'GBAS Approach Guidance Performance - A comparison to ILS', p. 7, January 2013.
- [32] M. Steen, 'GBAS CURVED APPROACH PROCEDURES: ADVANTAGES, CHALLENGES AND APPLICABILITY', p. 11. 2012
- [33] T. Feuerle, M. Stanskiak, S. Saito, T. Yoshihara, and A. Lipp, 'GBAS Interoperability Trials and Multi-Constellation/Multi-Frequency Ground Mockup Evaluation', p. 8, 2016.
- [34] S. Graf, 'Fraport AG: An airport operator's perspective', in *2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS)*, 2018, pp. 1–29.

- [35] M. Caamano, M. Felux, M. Circiu, and D. Gerbeth, 'Multi-constellation GBAS: How to benefit from a second constellation', in *2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2016, pp. 833–841.
- [36] F. Behrend, O. Lehmann, D. D. Smedt, and S. Grand-Perret, 'CAT II / OTS CAT II operations using existing CAT I Ground Based Augmentation System', in *2011 IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference*, 2011, pp. 4B2-1-4B2-11.
- [37] D. Jensen, 'Honeywell SmartPath™ Ground Based Augmentation System (GBAS)', p. 29, 2009.
- [38] CANSO, 'Demystifying GNSS', Civil Air Navigation Services Organization (CANSO), January 2005
- [39] El-Rabbany A. 'Introduction to GPS: the Global Positioning System', Artech House, 2002
- [40] D. Salos, PhD, 'Integrity monitoring applied to the reception of GNSS signals in urban environments', Toulouse, 2012
- [41] C. Macabiau and C. Milner, 'GNSS integrity monitoring', ENAC, Prague, 2014
- [42] J. Celada, D. Pérez, J. Perocacho, J. Lera, M. Fernandez, J. Barrios, J. Ostolaza and J. Caro, 'MultiConstellation, Dual-frequency SBAS', in *ION GNSS 2015*, Tampa (FL), 2015
- [43] F. Belloir, 'Airbus status on SBAS', EGNOS Service Provision Workshop, Copenhagen, 2015
- [44] ICAO, 'International Standards and Recommended Practices', Annex 6 to Convention on International Civil aviation, Operation of aircraft, Eight edition, Jul. 2001.
- [45] Rife J., Walter T. and Blanch J. , 'Overbounding SBAS and GBAS Error Distributions with Excess-Mass Functions', 2004 International Symposium on GNSS/GPS, Sydney, Australia, 2004.
- [46] ICAO, 'PANS OPS, Procedures for Air Navigation Services, Aircraft Operations', doc 8168, Fifth Edition, 2006.

- [47] T. Dautermann, M. Felux, and A. Grosch, 'Approach service type D evaluation of the DLR GBAS testbed', *GPS Solutions*, vol. 16, no. 3, pp. 375–387, Jul. 2012.
- [48] AirServices Australia, 'National GBAS Activities, version 3.0', 19<sup>th</sup> IGWG Meeting, Krakow, Poland, May 2018, [http://laas.tc.faa.gov/documents/IGWG/IGWG-19\\_May2018\\_Krakow.zip](http://laas.tc.faa.gov/documents/IGWG/IGWG-19_May2018_Krakow.zip)
- [49] Rohde-Schwarz, 'Avionics Standards, digital standards for R&S SMBV GBAS/ILS/VOR/DME Operating manual', [www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com), 2017
- [50] Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics, <https://www.gps.gov/>
- [51] Novatel Inc. (online) <https://www.novatel.com/products/novatel-correct-with-sbas-and-dgps/sbas-and-dgps/differential-gps-dgps/>
- [52] P. Reines, 'SmartPath® Ground Based Augmentation System (GBAS)', Honeywell, GBAS Seminar, Warsaw, Poland, November 2015



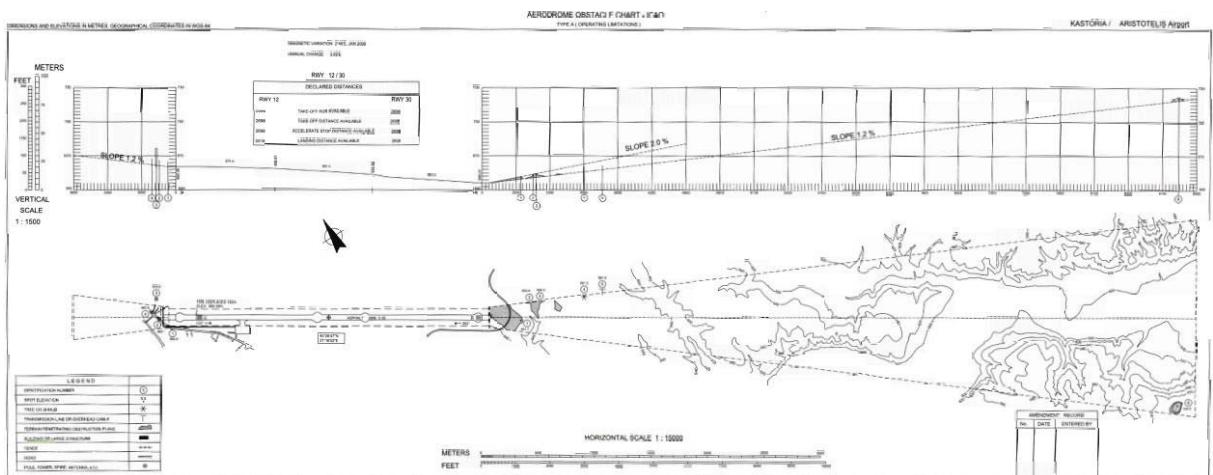
# Παράρτημα Α

## Στοιχεία Αερολιμένα Καστοριάς

Παρακάτω παρατίθενται χρήσιμα για τη διατριβή λεπτομερή επίσημα στοιχεία του Αερολιμένα Καστοριάς.

### A.1 AIP GREECE / LGKA

Εδώ παρουσιάζονται πίνακες με στοιχεία και χρήσιμοι χάρτες του AIP του Αεροδρομίου της Καστοριάς.



Σχήμα A.1 Χάρτης Εμποδίων Διαδικασίας Προσέγγισης

**LGKA AD 2.1 AERODROME LOCATION INDICATOR AND NAME**

**LGKA – KASTORIA / ARISTOTELIS**

**LGKA AD 2.2 AERODROME GEOGRAPHICAL AND ADMINISTRATIVE DATA**

1	ARP coordinates and site at AD	402647N 0211652E Centre of RWY 12/30
2	Direction and distance from (city)	BRG: NIL, 6.5 NM South of Kastoria city.
3	Elevation/Reference temperature	660.39 M (2166.63 FT) / 26° C
4	Geoid undulation at AD ELEV PSN	NIL
5	MAG VAR/Annual change	3°30'E (3.50°E) (JAN 2010) / 4.50°E (0.0750°E)
6	AD Administration, address, telephone, telefax, telex, AFS	Civil Aviation Authority (CAA) Kastoria/ Aristotelis Airport GR 52200 KASTORIA TEL: +30 24670 21700 FAX: +30 24670 41888 TLX: +215251 LGKA AFTN: LGKAYDYX
7	Types of traffic permitted (IFR/VFR)	IFR - VFR
8	Remarks	NIL

**LGKA AD 2.10 AERODROME OBSTACLES**

In approach/TKOF areas			In circling area and at AD		Remarks
1			2		
RWY NR/ Area affected	Obstacle type Elevation Markings/LGT	Coordinates	Obstacle type Elevation Markings/LGT	Coordinates	
a	b	c	a	b	
12	See relevant LGKA AOC chart-ICAO				TV antenna height 30 M AGL (840 M AMSL), located SE of aerodrome, 4.5 NM from KAS VOR/DME. No daylight marking available, lighted.
30	See relevant LGKA AOC chart-ICAO				

**LGKA AD 2.14 APPROACH AND RUNWAY LIGHTING**

RWY Designator	APCH LGT Type Length Intensity	THR LGT Colour Wingbars	PAPI VASIS Angle Distance from THR (MEHT)	TDZ, LGT Length	RWY Centre- line LGT Length Spacing, Colour Intensity	RWY edge LGT Length Spacing Colour Intensity	RWY End LGT Colour Wingbars	SWY LGT Length Colour	Remarks
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	NIL	RTIL	PAPI 3°	NIL	NIL	white	Yes	NIL	See also LGKA AD chart-ICAO.
30	NIL	RTIL	PAPI 3°	NIL	NIL	white	Yes	NIL	

**LGKA AD 2.17 ATS AIRSPACE**

1	Designation and lateral limits	KASTORIA ARISTOTELIS CTR Circle, 15 NM radius centered at 402647N 0211652E limited to the North by ATHINAL - TIRANA FIR boundaries.
		KASTORIA ARISTOTELIS ATZ Circle, 5 NM radius centred at 402647N 0211652E.
2	Vertical limits	CTR: SFC to FL 140 MSL
		ATZ: SFC to 2000 FT ALT
3	Airspace classification	NIL
4	ATS unit call sign Language(s)	CTR : MAKEDONIA CONTROL Greek, English.
		ATZ : KASTORIA INFORMATION Greek, English
5	Transition altitude	9000 FT
6	Remarks	NIL

**LGKA AD 2.18 ATS COMMUNICATION FACILITIES**

Service designation	Call sign	Frequency/ VHF CH	Operational hours	Remarks
1	2	3	4	5
AFIS	KASTORIA INFORMATION	118.400 257.800 MHz 121.500	HO HO HO	Primary freq Coverage FL 30 / 15 NM MIL RGA Emergency
G/A/G	KASTORIA RADIO	5637 kHz 2989 kHz	HO: 0400 – 1700 HO: 1700 - 0400	Primary freq. Primary freq.

All ATS Communication Facilities under responsibility of CAA.

**LGKA AD 2.19 RADIO NAVIGATION AND LANDING AIDS**

Type of aid MAG VAR CAT of ILS/MLS (For VOR/ILS/MLS, give declination)	ID	Frequency (CH)	Hours of operation	Position of transmitting antenna coordinates	Elevation of DME transmitting antenna (FT aMSL)	Remarks
1	2	3	4	5	6	7
KASTORIA VOR/DME (3°E)	KAS	114.50 MHz CH 92X	H24	402703.68N 0211631.15E	2181 FT / 665.01 M	Coverage FL 250 / 40 NM
KASTORIA L (3°E / 2005)	KSO	372 kHz	H24	402641.16N 0211645.61E	-	Coverage 25 NM

All Radio Navigation and Landing Aids under responsibility of CAA.  
See also **GEN 2.5** and **ENR 4.1**

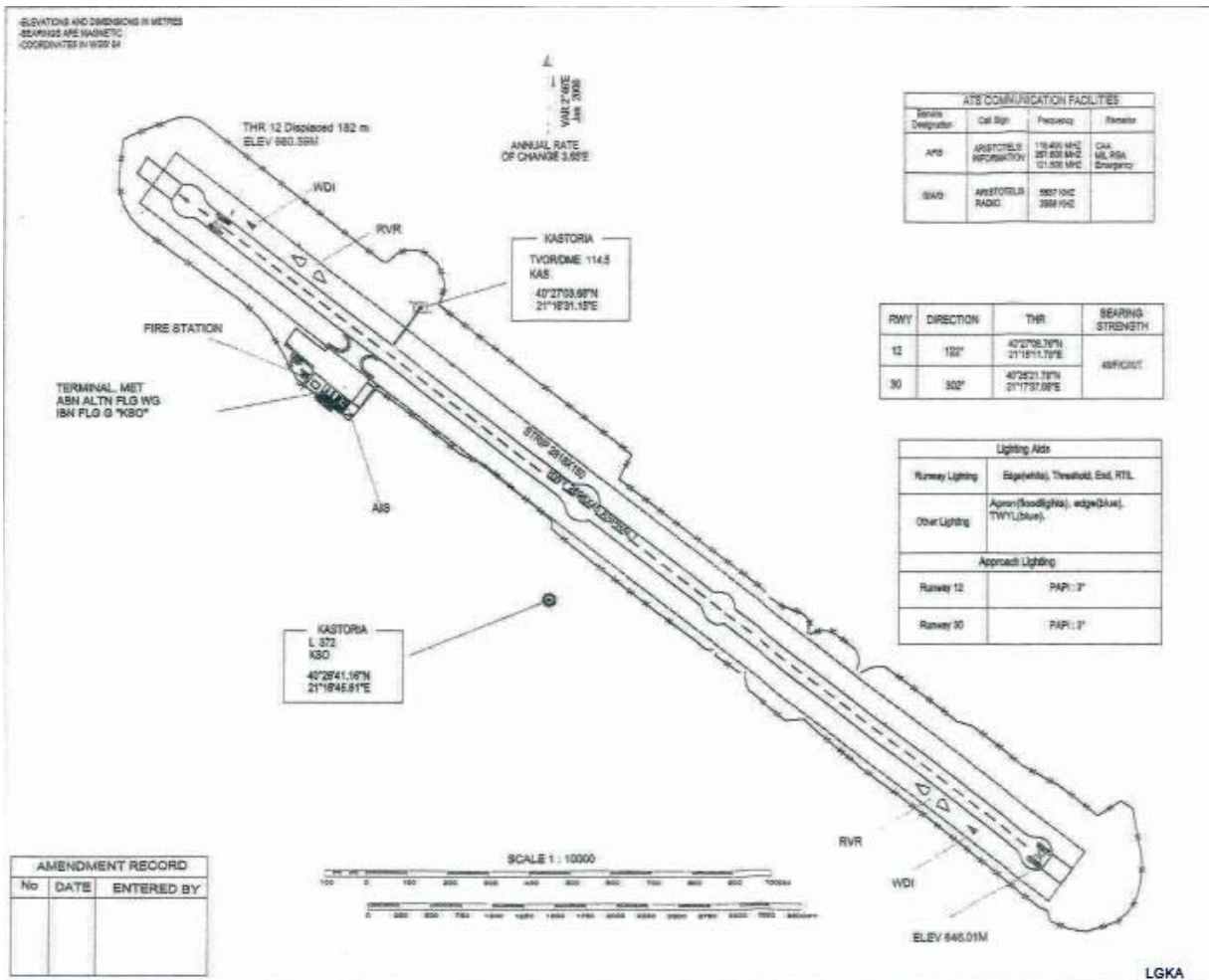
**LGKA AD 2.12 RUNWAY PHYSICAL CHARACTERISTICS**

Designation s RWY NR	TRUE BRG (degrees and minutes)	Dimensions of RWY (M)	Strength (PCN) and surface of RWY and SWY	THR coordinates RWY end coordinates THR geoid undulation	THR elevation and highest elevation of TDZ of precision APP RWY
1	2	3	4	5	6
12	125°	2698 x 45	PCN 40/F/C/X/T asphalt	402708.76N 0211611.78E	THR 660.39 M/ 2166.08 FT TDZ: NIL
30	305°	2698 x 45	PCN 40/F/C/X/T asphalt	402621.79N 0211737.06E	THR 646.01 M/ 2118.91 FT TDZ: NIL

Slope of RWY-SWY			SWY dimensions (M)	CWY dimensions (M)	Strip dimensions (M)	OFZ	Remarks
7			8	9	10	11	12
12	NIL	NIL	NIL	NIL	2818 x 150 M	NIL	See relevant LGKA AD and AOC chart-ICAO First 2000 M of RWY 30 not visible from AFIS site.
30	NIL	NIL	NIL	NIL	2818 x 150 M	NIL	

**LGKA AD 2.13 DECLARED DISTANCES**

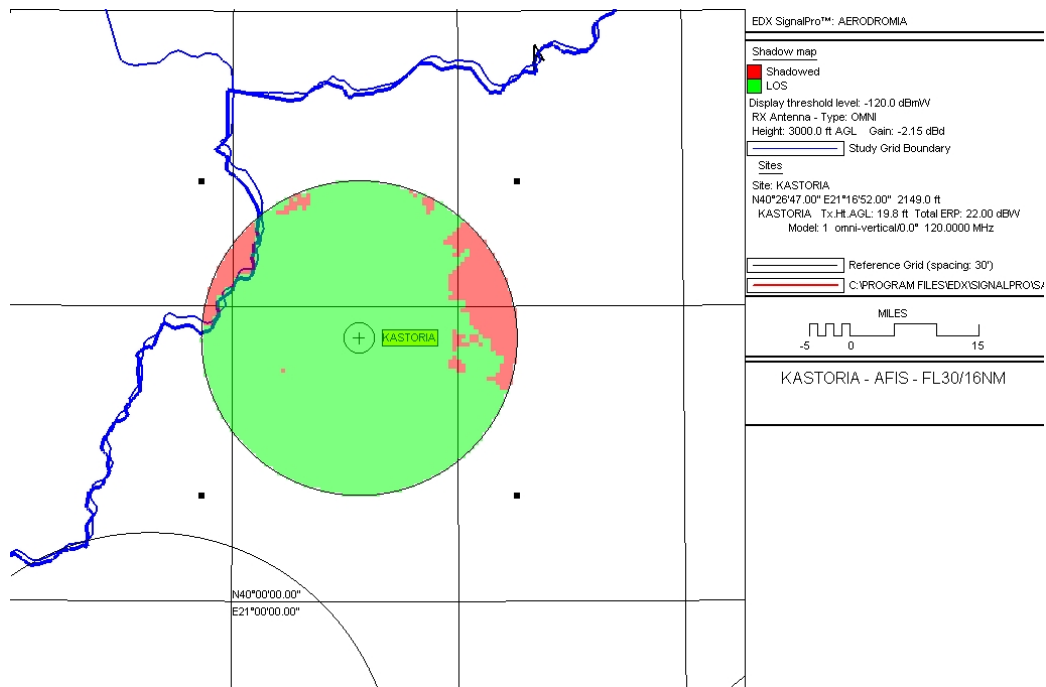
RWY Designator	TORA (M)	TODA (M)	ASDA (M)	LDA (M)	Remarks
1	2	3	4	5	6
12	2698	2698	2698	2516	THR RWY 12 displaced 182 M
30	2698	2698	2698	2698	NIL



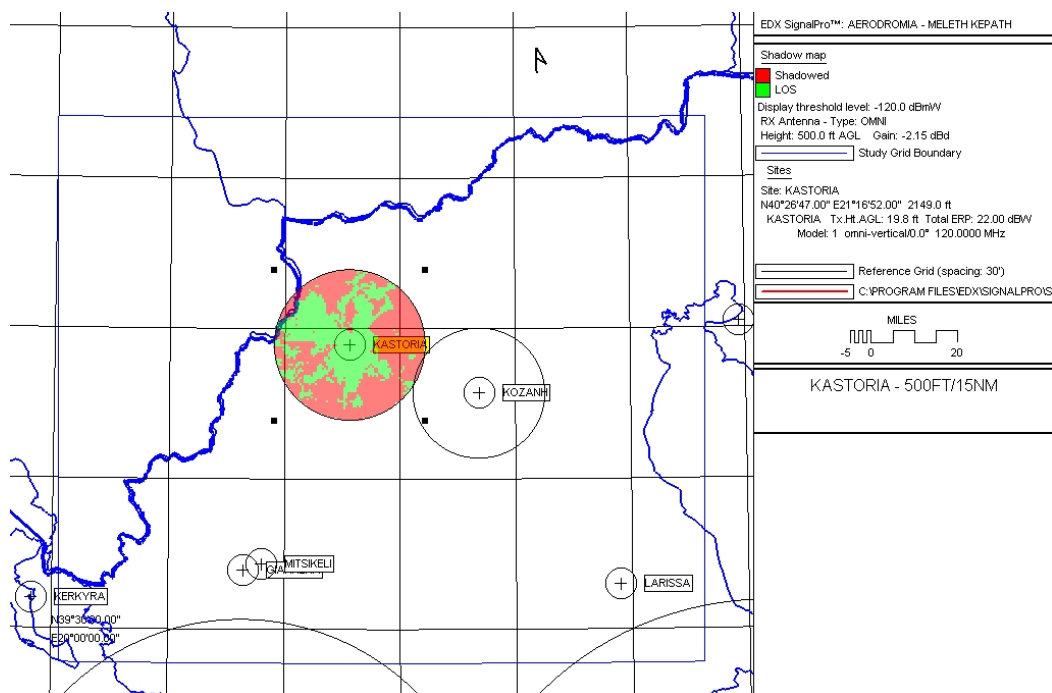
Σχήμα Α.2 Χάρτης Αερολιμένα Καστοριάς

## A.2 Ραδιοκαλύψεις

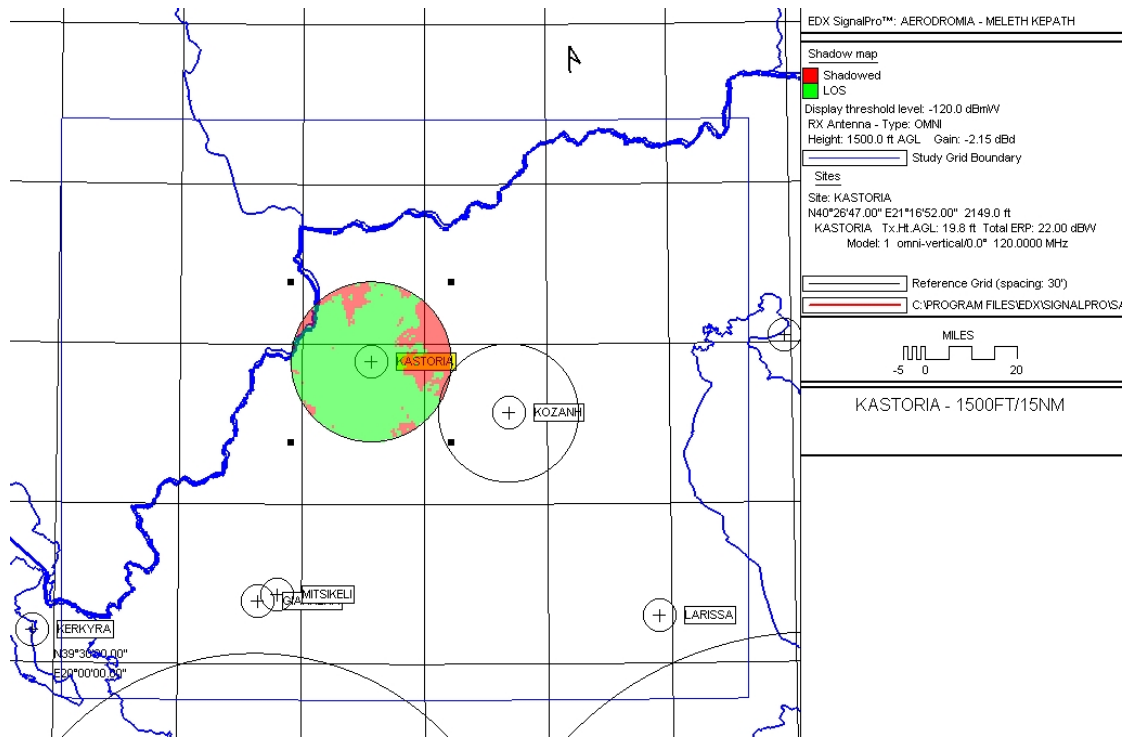
Παρακάτω παρατίθενται οι ραδιοκαλύψεις μίας omni vertical VHF κεραίας στη συχνότητα των 120 MHz για διάφορα υψομετρικά επίπεδα (flight levels) και σε εμβέλεια 15 και 16 NM. Είναι αρκετά χρήσιμη πληροφορία για τη πιθανή ραδιοκάλυψη του πομπού VDB που εκπέμπει πλησίον αυτής της συχνότητας.



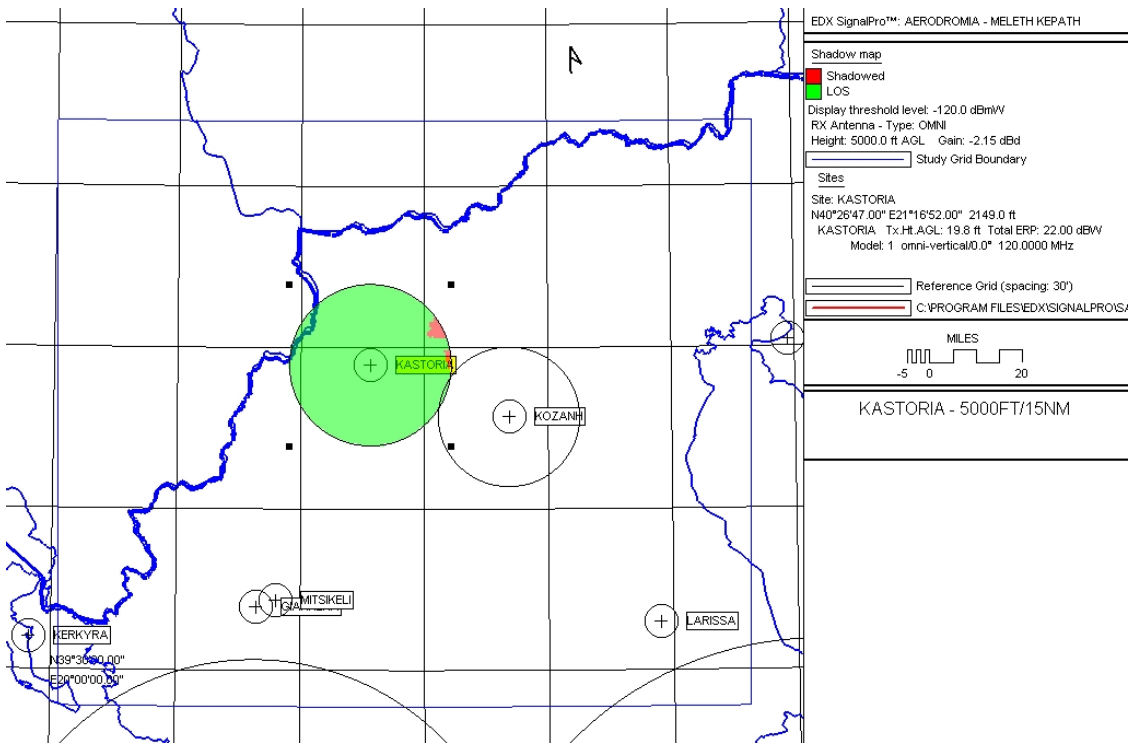
Σχήμα A- Ραδιοκάλυψη στα 3000 FT - 16NM



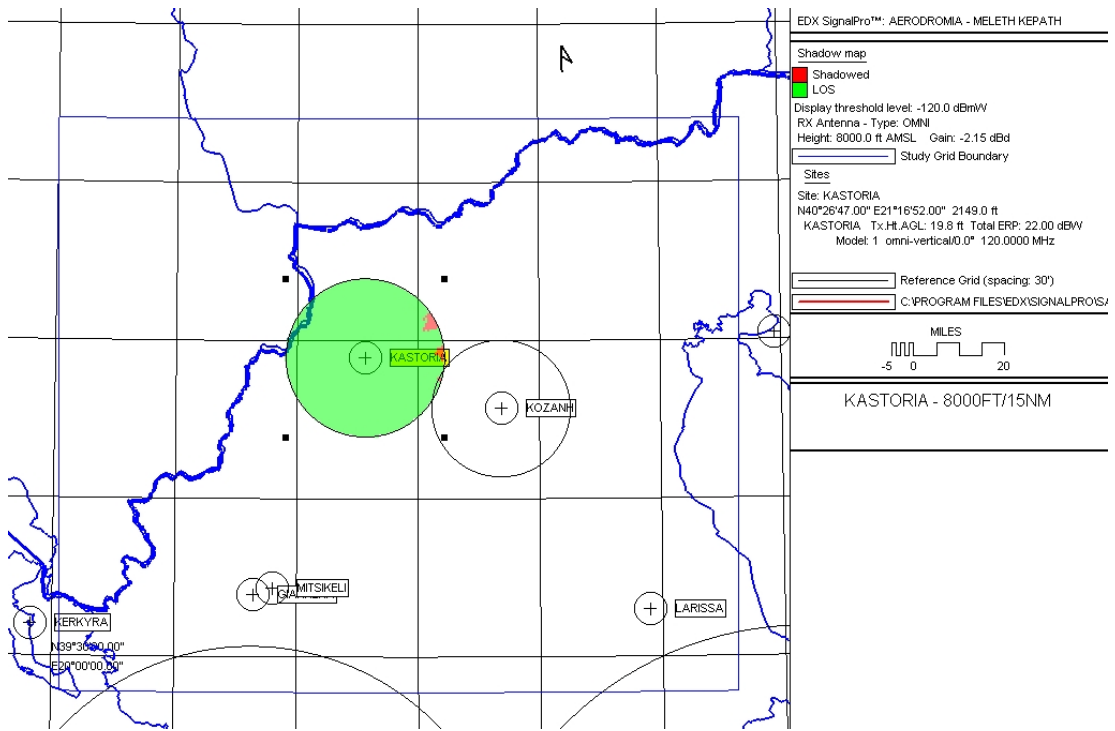
Σχήμα A- Ραδιοκάλυψη στα 500 FT - 15NM



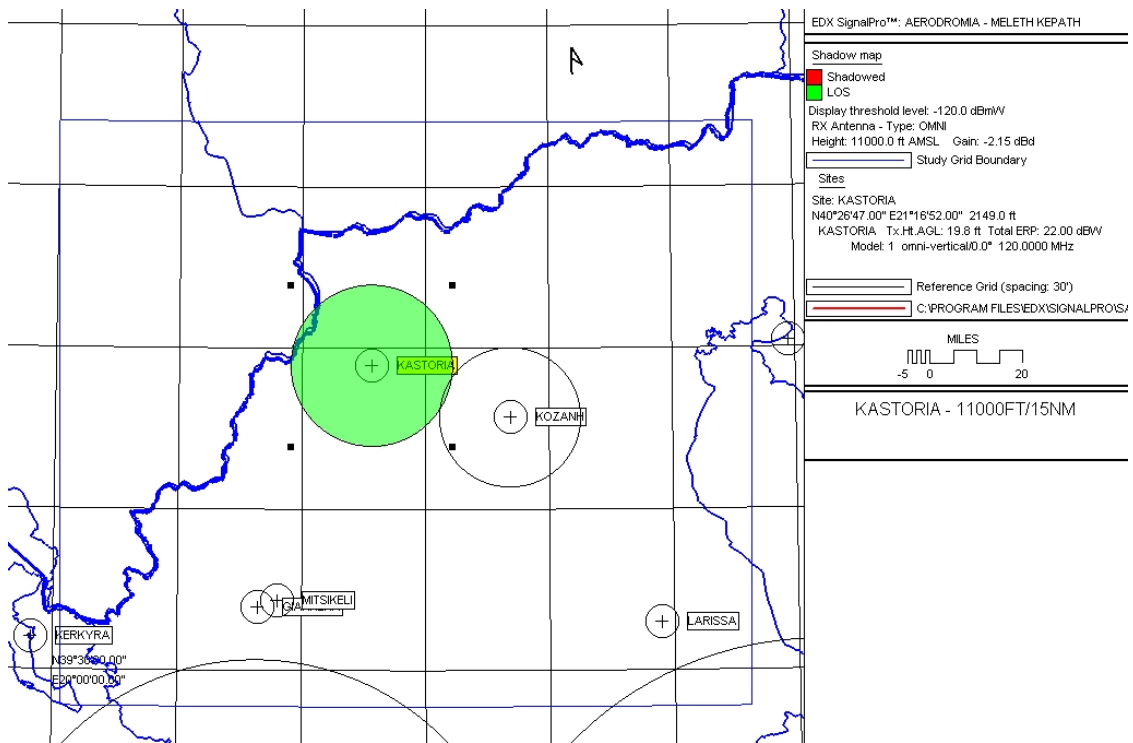
Σχήμα Α- Ραδιοκάλυψη στα 1500 FT – 15 ΝΜ



Σχήμα Α- Ραδιοκάλυψη στα 5000 FT – 15 ΝΜ



Σχήμα Α- Ραδιοκάλυψη στα 8000 FT – 15 NM



Σχήμα Α- Ραδιοκάλυψη στα 11000 FT – 15 NM