

Primi risultati del sistema sperimentale GBAS

Salvatore GAGLIONE *, Mario VULTAGGIO**, Paolo GERVASONI***

(*) (**) - Dipartimento di Scienze e Tecnologie dell'Università degli Studi di Napoli "PARTHENOPE", via F. Acton n°38
80133 Napoli, tel 081-5475114, fax 081-5519314,

mario.vultaggio@uniparthenope.it

salvatore.gaglione@uniparthenope.it

(***) - THALES ITALIA S.P.A. -Navais Division - Via E. Mattei, 1 - 20064 Gorgonzola (MI) - Italy Office (+39) 02
95095 473 mobile (+39) 347 2974779 fax (+39) 02 95095 311 paolo.gervasoni@thalesatm.com

Sommario: I sistemi satellitari GNSS (GPS+GLONASS), pur assicurando una copertura globale, una buona precisione ed una semplicità d'uso, per talune applicazioni nel settore della Navigazione Aerea e Marittima hanno necessità di sistemi di potenziamento (noti come *Augmentation Systems*). In questi anni sono notevoli gli sforzi che si stanno facendo a livello Europeo per lo sviluppo di tali sistemi di potenziamento che si basano su satelliti SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) e su infrastrutture terrestri GBAS (*Ground Based Augmentation System*).

Quest'ultimi sono sistemi progettati e realizzati per supportare la Navigazione Aerea nelle operazioni di Cat. I e per fornire opportuni servizi di posizionamento.

Scopo di questo lavoro è quello di verificarne le potenzialità in termini di accuratezza raggiunta. A tal fine si prendono in considerazione i risultati ottenuti dal processamento di dati effettuato con Pegasus V4 (software utilizzato nei principali centri di ricerca europei) di dati collezionati alla stazione GBAS dell'aeroporto di Milano- Linate.

Abstract: *The GNSS (Global Navigation Satellite Systems-GPS+GLONASS) are not sufficient to support Air and Maritime Navigation in specific applications; so it is necessary to introduce Augmentation Systems. In last years the European Scientific Community are focusing its attention on Augmentation Systems based on Satellite infrastructure (SBAS - Satellite Based Augmentation System) and on Ground based one (GBAS - Ground Based Augmentation System).*

This one is a implemented system to support Air Navigation in CAT-I approaching operation.

The purpose of this work is to verify GBAS performance. So we started from a data set of measures collected at the GBAS installation of Milano Linate and we process this with the software PEGASUS v 4.0. Some results on availability, integrity and accuracy are reported and discussed.

Introduzione

La continua evoluzione che ha caratterizzato l'impiego dei satelliti per la navigazione aerea è tale da ritenere con ragionevole certezza che i sistemi satellitari a copertura globale (*GNSS: Global Navigation Satellite Systems*), che consentono la determinazione della posizione (come il GPS americano, il GLONASS russo o il futuro sistema europeo GALILEO), sostituiranno progressivamente gli attuali sistemi radioelettrici usati per l'avvicinamento e l'atterraggio.

L'ICAO (*International Civil Air Navigation Organization*), in previsione di tale utilizzo, anziché emettere norme per rendere obbligatoria la dotazione di certi equipaggiamenti, che avrebbe costretto l'ICAO a scegliere tra un sistema e l'altro, ha stabilito dei criteri ai quali devono rispondere i sistemi di navigazione in generale e i sistemi satellitari in particolare; tali criteri sono stabiliti per ogni fase di volo, compresi gli avvicinamenti e gli atterraggi in modo da servire da guida agli Stati per la scelta del sistema di navigazione e per le industrie affinché possano sviluppare e perfezionare la loro produzione. I criteri stabiliti dall'ICAO sono noti con il termine RNP (*Required Navigation Performance*); essi definiscono i seguenti parametri:

Precisione (o *accuracy*), definita come la differenza tra la posizione stimata e la posizione effettiva. La precisione deve essere riferita sia alla posizione dell'aeromobile nel piano orizzontale, sia lungo la verticale. Tenuto conto che gli errori dei sistemi satellitari variano continuamente, in quanto varia

la geometria dei satelliti, la probabilità che l'errore di posizione non superi un assegnato valore (che dipende dalla fase del volo) deve essere di almeno il 95%.

Integrità (o *integrity*), definita come la capacità di un sistema di individuare e segnalare eventuali avarie che possano compromettere i requisiti di precisione richiesti per quella particolare fase del volo.

Il requisito dell'integrità è definito dalla probabilità di evidenziare tali errori e dal tempo che intercorre tra il verificarsi di un'avaria e la segnalazione di tale evento all'utente (tempo di allarme).

Disponibilità (o *availability*), definita come la percentuale di tempo in cui il sistema di navigazione è in grado di funzionare correttamente assicurando le precisioni richieste. Tale parametro è funzione delle caratteristiche fisiche dell'ambiente e della tecnologia del ricevitore.

Continuità (o *continuity*), definita come la capacità del sistema di portare a termine la manovra intrapresa senza interruzioni causate da avarie o da anomalie che possano compromettere la sicurezza delle operazioni. Tale parametro è definito dalla probabilità che il sistema sia disponibile per tutta la durata della manovra nell'ipotesi che il sistema lo fosse all'inizio.

Categorie di Avvicinamento

L'ICAO, in base ai criteri RNP, ha stabilito la seguente classificazione relativamente agli avvicinamenti e agli atterraggi:

- avvicinamento di non precisione NPA (*Non Precision Approach*) o di tipo RNP 0.3 NM;
- avvicinamento con guida verticale APV-I (*Approach with Vertical Guidance*) o di tipo RNP 0.3/125 (feet);
- avvicinamento con guida verticale APV-II (*Approach with Vertical Guidance*) o di tipo RNP 0.03/50;
- avvicinamento di precisione di categoria I (CAT I) o di categoria RNP 0.02/40;
- avvicinamento di precisione di categoria II (CAT II) o di categoria RNP 0.01/15;
- avvicinamento di precisione di categoria III (CAT III) o di categoria RNP 0.003/0.

Gli avvicinamenti NPA riguardano le fasi di avvicinamento iniziale e intermedio e, in generale, procedure di avvicinamento di non precisione. Sono previste una MDA/H non inferiore a 250 ft e una precisione orizzontale di ± 0.3 NM, oltre ai seguenti requisiti:

integrità: $1-10^{-5}/h$ che corrisponde a una probabilità del 99.999% di evidenziare errori che compromettano il requisito di precisione richiesto;

disponibilità 95% e continuità: $1-10^{-4}/h$ che corrisponde a una probabilità del 99.99%.

Per gli altri avvicinamenti ci si riferisce alla tabella 1.

Tabella 1 – Parametri RNP relativi alle diverse categorie di avvicinamento

RNP	Categ.	Precisione (orizz. e vert.)	Integrità (probab. e tempo di allarme)	Disponib.	Continuità
0.3/125	APV I	± 0.3 NM 125 ft	$1-10^{-5} / h$	0.95	$1-10^{-4} / h$
0.03/50	APV II	± 0.03 NM 50 ft	$1-3.5 \times 10^{-7} / h$ 6 sec.	0.9975	$1-10^{-5} / h$
0.02/40	Cat. I	± 0.02 NM 40 ft	$1-3.5 \times 10^{-7} / h$ 6 sec.	0.9975	$1-10^{-5} / h$
0.01/15	Cat. II	± 0.01 NM 15 ft	$1-2.5 \times 10^{-9} / h$ 1 sec.	0.9985	$1-6 \times 10^{-6} / h$
0.003/0	Cat. III	± 0.003 NM	$1-2 \times 10^{-9} / h$ 1 sec.	0.999	$1-6 \times 10^{-6} / h$

I parametri RNP (per esempio, 0.03 NM/125 ft) definiscono le semidimensioni di un volume entro il quale l'aeromobile deve mantenere la propria posizione durante l'avvicinamento con un margine di probabilità del 95% (tunnel di contenimento interno). Un secondo volume di contenimento (tunnel esterno) rappresenta il limite massimo entro cui si deve trovare l'aeromobile con una probabilità che sfiora il 100%.

I sistemi di navigazione basati sull'uso dei satelliti sono visti dall'ICAO come potenziali sistemi in grado di assicurare una guida in tutte le fasi del volo, nella partenza, durante la fase di crociera, negli avvicinamenti, durante l'atterraggio e persino nei movimenti al suolo; un sistema capace di tali prestazioni è detto gate-to-gate.

Gli attuali sistemi satellitari non soddisfano completamente i requisiti RNP stabiliti dall'ICAO senza opportuni sistemi di potenziamento (o di *augmentation*).

II GBAS

Come riportato nell'annesso X dell'ICAO un GBAS combinato con un altro elemento GNSS deve soddisfare i requisiti di accuratezza, continuità, disponibilità e integrità per ogni procedura operativa.

Il sistema GBAS è composto da 3 sotto-sistemi primari:

- Il sotto-sistema Satellitare GNSS: esso genera i segnali di distanza ed i messaggi di navigazione. I segnali satellitari ricevuti dai ricevitori GNSS sono soggetti a varie sorgenti di errori. Con il sistema GBAS, alcuni di questi errori possono essere compensati attraverso l'utilizzo delle tecniche differenziali.
- Il sotto-sistema di terra GBAS, che utilizza 2 o più ricevitori GNSS. Esso raggruppa le misure di pseudorange di tutti i satelliti GNSS in vista e calcola e trasmette le correzioni differenziali e le relative informazioni d'integrità per esse in base alla propria posizione osservata. Queste correzioni d'integrità calcolate sono trasmesse dal sistema di terra attraverso il VHF Data Broadcasts (VDB) nelle bande che vanno da 108 MHz a 117.975 MHz. Il trasmettitore invia le correzioni di pseudorange, i parametri d'integrità ed altri dati rilevati localmente come i dati del Segmento Finale per l'Avvicinamento (*Final Approach Segment-FAS*), riferiti al Sistema Geodetico Mondiale (*World Geodetic System-84*). Quando viene utilizzata un'antenna con un fascio omnidirezionale, la stazione di terra ha la capacità di supportare diversi atterraggi su distinte piste.
- Il sotto-sistema Aircraft. Questo sotto-sistema include l'area di copertura della stazione di terra che può utilizzare le correzioni trasmesse per calcolare le proprie misure in linea con il principio differenziale. Dopo la selezione del FAS desiderato per la pista d'atterraggio, la posizione, corretta in modo differenziato, è utilizzata per generare i segnali guida di navigazione. Questi segnali rappresentano le deviazioni laterali e verticali come pure la distanza dalla soglia del punto d'intersezione del FAS selezionato e le informazioni d'integrità.

Al fine di assicurare l'interoperabilità e garantire un'efficiente utilizzo del servizio, i dati diffusi sono gli stessi per tutte le operazioni, e cioè:

- a) Fornire correzioni locali sulle pseudorange;
- b) Fornire dati GBAS;
- c) Fornire dati relativi all'ultimo segmento della fase finale dell'avvicinamento;
- d) Fornire possibili fonti di dati di distanza;
- e) Fornire un controllo sull'integrità delle fonti GNSS.

In questa fase, è cioè per la valutazione delle prestazioni del sistema, non potendo essere previste prove in volo e quindi con un ricevitore in moto ad elevata dinamica (per evidenti problemi legati a questioni di costi) si è pensato di utilizzare un ricevitore statico.

Per quanto detto è stata istituita una stazione di Monitoraggio GBAS (Ground Monitoring Station) che si comporta come un utente aereo: riceve i segnali di posizionamento provenienti dai satelliti GPS ed anche i dati di correzione trasmessi dalla Stazione di Riferimento, quindi può ricalcolare la propria posizione GPS proprio come farebbe un aeromobile. Poiché però la Stazione di Monitoraggio, a differenza degli aerei, si trova sempre in una posizione fissa e ben nota, è in grado di verifica-

re se le correzioni trasmesse dalla Stazione di Riferimento forniscono o meno agli utenti una precisione finale compatibile con le specifiche di CAT-1

Allo scopo di fornire all'operatore una valutazione in tempo reale dell'accuratezza del sistema GBAS, i dati di correzione degli pseudo-range trasmessi dalla Stazione di Riferimento vengono trasmessi al Ricevitore GNSS, che ricalcola in base ad essi la posizione della Stazione di Monitoraggio. La deviazione tra le coordinate così ottenute e quelle note è indicativa della precisione del sistema.

La stazione di monitoraggio GBAS di Linate

E' stato preso in esame, per questo lavoro, l'istallazione di Milano Linate gestita dalla società THALES che opera per conto dell'ENAV, con la quale si è intrapresa una proficua attività di scambio culturale

Composizione

In particolare, a sistema di riferimento già istallato la collaborazione con la società introdotta si è focalizzata sulla Stazione di Monitoraggio (GMS) denominata AS 670 di cui si riporta di seguito lo schema a blocchi.

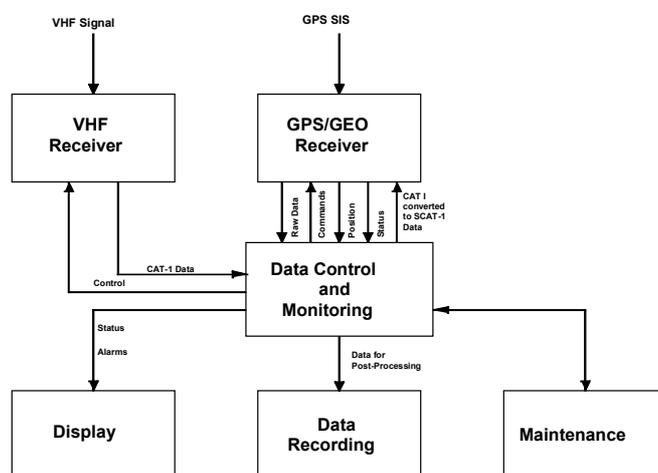


Figura 1 - Diagramma a blocchi delle principali funzioni del GMS

La Stazione di Monitoraggio GBAS o GMS è un apparato che comprende le seguenti unità fondamentali:

- Ricevitore GNSS,
- Ricevitore VHF,
- Unità Locale di Controllo,
- Unità di memorizzazione.

Il Ricevitore GNSS riceve i SIS di GPS/GEO e converte questi segnali in una forma utilizzabile.

Il Ricevitore VHF riceve i messaggi trasmessi da una stazione di riferimento GBAS (CAT-1).

L'Unità di Controllo Locale elabora i dati di navigazione e calcola le informazioni di monitoraggio (avvertimenti e allarmi).

L'unità di memorizzazione registra i dati attinenti necessari per la successiva elaborazione. Il supporto di memorizzazione è un hard disk rimovibile (R-HDD).

La principale funzione del GMS è quella di raccogliere mediante appropriati Ricevitori GPS e VHF i segnali nello spazio (*signals in space - SIS*) trasmessi rispettivamente dai satelliti GPS e dalla Stazione di Riferimento GBAS, estrarre le informazioni in essi contenute e memorizzare questi dati, incluse le informazioni sullo stato di funzionamento del GMS stesso, su supporti di massa (hard disk e/o opzionalmente nastro magnetico) per la successiva elaborazione in post-processing.

Inoltre, allo scopo di fornire delle utili indicazioni all'operatore circa lo stato di funzionamento del sistema GBAS all'operatore in tempo reale, il GMS verifica le informazioni SIS calcolando la pro-

pria posizione (con correzione differenziale se è disponibile un collegamento CAT-I) e confronta i risultati così elaborati con un punto di riferimento di posizione GMS noto a priori. La differenza, come errore residuo di posizione, può essere assunta quale indicatore del funzionamento corretto della stazione GBAS.

E' importante osservare che la correzione differenziale (sulla base del messaggio in formato CAT-I trasmesso dalla Stazione di Riferimento) dei dati di posizionamento della stazione, che vengono presentati all'operatore, viene effettuata dallo stesso ricevitore GPS.

Il ricevitore NovAtel Millennium SRDW impiegato nella Stazione di Monitoraggio non è tuttavia in grado di accettare in ingresso un messaggio di correzione differenziale nel formato previsto dalle SARPS ICAO per la CAT. I. Dal momento che esso accetta tuttavia messaggi in formato SCAT-1, che al momento della progettazione della Stazione (inizio anno 2002) non esistevano in commercio altri ricevitori con le caratteristiche previste, e che l'uso di un messaggio di formato SCAT-1 comporta una degradazione di precisione spaziale inferiore ai due centimetri su ciascuna coordinata, dunque ben inferiore ai limiti ICAO, si è deciso di procedere (nell'unità LCU) alla conversione di formato del messaggio ricevuto da CAT-I a SCAT-1. Ciò ha dunque un effetto del tutto trascurabile sulla precisione dei dati presentati all'operatore, mentre non ha alcun effetto sui dati che vengono registrati sull'unità SU in vista dell'elaborazione in post-processing.

Analisi dei dati di misura

Dalla stazione Rover GMS, che attualmente acquisisce in modalità statica, sono stati presi in considerazione, per una prima analisi, un set di misure archiviate il giorno 5 settembre 2005 acquisite con continuità per 24 ore. Le misure opportunamente registrate nei formati proprietari dei ricevitori utilizzati sono state, in post processamento, analizzate e ridotte mediante il software PEGASUS-Plus v4.0 sviluppato dal centro di ricerca Europeo EURCONTROL.

Lo studio della serie è stato rivolto alla determinazione dei seguenti parametri: accuratezza, disponibilità, continuità e integrità del sistema GBAS.

La variabilità dei dati di posizione è riportata nella rappresentazione di figura 2.

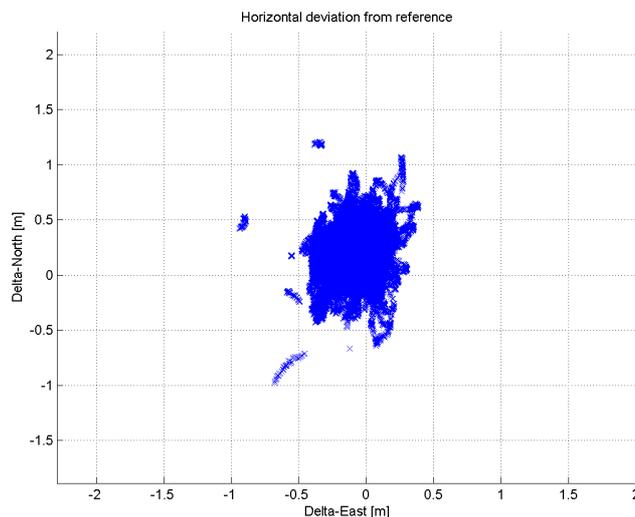


Figure 2 – Deviazione Orizzontale

La distribuzione spaziale mostra che è possibile qualitativamente verificare come l'errore sul posizionamento orizzontale è contenuto; esso raggiunge un massimo di ± 1 m negli istanti in cui non s'è ricevuto il messaggio di correzione GBAS mentre la sua distribuzione statistica è stata introdotta di seguito in figura 5.

Per quanto riguarda l'integrità del sistema in navigazione aerea, occorre introdurre alcune grandezze utili le la sua determinazione.

L'accuratezza del sistema di navigazione è definita in termini di errore totale del sistema TSE (Total System Error) che ha come riferimento, ad esempio per un aereo, la traiettoria programmata relativa a ogni fase di volo. Per seguire la traiettoria programmata il sistema di navigazione stima la posizione del mobile e dispone i comandi appropriati. L'errore nella stima della posizione del mobile che è l'errore del sistema di navigazione NSE (Navigation System Error), non è altro che la differenza tra la posizione vera e quella stimata (v. figura 3)



Figura 3 – Viale aereo di Navigazione

La differenza tra la rotta programmata e quella calcolata dal sistema di navigazione è nota come FTE (*Flight Technical Error*) e contiene errori dovuti alla dinamica del mobile, effetti di turbolenza, errori umani ecc. Il vettore somma di NSE e TSE è il FTE. Il vettore NSE non può essere osservato senza un sistema di riferimento d'alta precisione pertanto si è dovuto stabilire un procedimento con il quale si assegna un limite superiore per questo errore. Tale procedimento, in ultima analisi, fornisce all'utente una stima sul rispetto dei criteri di integrità che sarà di seguito discussa.

Si definisce livello di protezione orizzontale HPL (*Horizontal Protection Level*), il raggio del cerchio nel piano orizzontale (tangente all'ellissoide WGS84) con centro la posizione vera del mobile. Esso determina l'area in cui si assume possa essere il mobile senza che sia necessario un intervento di allerta. Si definisce, inoltre, livello di protezione verticale VPL (*Vertical Protection Level*) la metà del segmento sull'asse verticale (perpendicolare al piano tangente al WGS84) nel cui centro è la posizione vera del mobile; esso determina l'area in cui si assume possa essere il mobile senza che sia necessaria una richiesta di allerta.

I livelli di protezione, così definiti, per il GBAS come per un SBAS, sono una funzione della costellazione satellitare e delle prestazioni stimate del sistema. Quindi, usando le correzioni del GBAS il livello di protezione può essere stimato senza la necessità di conoscere le reali misure di pseudorange. I livelli di protezioni calcolati devono essere confrontati con i limiti di allarme prefissati AL (*Allarm Limits*) per le particolari fasi di avvicinamento. Se i limiti sono rispettati allora l'integrità della soluzione può essere assicurata per quella determinata fase di volo.

Si possono verificare i seguenti casi:

$$XLP < XAL \text{ l'integrità è assicurata}$$

$$XLP \geq XAL \text{ l'integrità non è assicurata}$$

dove

XLP rappresenta il livello di protezione verticale o orizzontale, XAL i limiti di allarmi verticali o orizzontali. Da quanto introdotto si intuisce che per garantire l'integrità del sistema di navigazione bisogna che l'errore sul posizionamento sia sempre inferiore ai relativi livelli di protezione; solo in queste condizioni, infatti, sicuramente l'errore di posizione sarà inferiore al limite di allerta. Dalla analisi dei dati effettuata si è sempre questa situazione come si può ricavare dai grafici di figura 4.

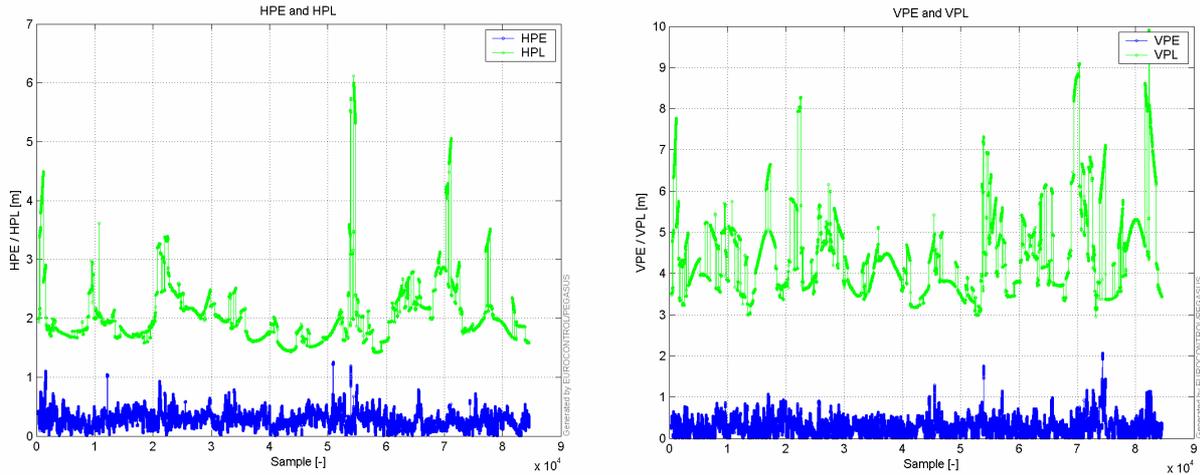


Figura 4 – Confronto tra Errore sul Posizionamento e relativi livelli di protezione

Per completezza si riportano inoltre istogrammi che forniscono informazioni statistiche sulla distribuzione dell'errore orizzontale e verticale e sui relativi livelli di protezione (v. figura 5 e 6).

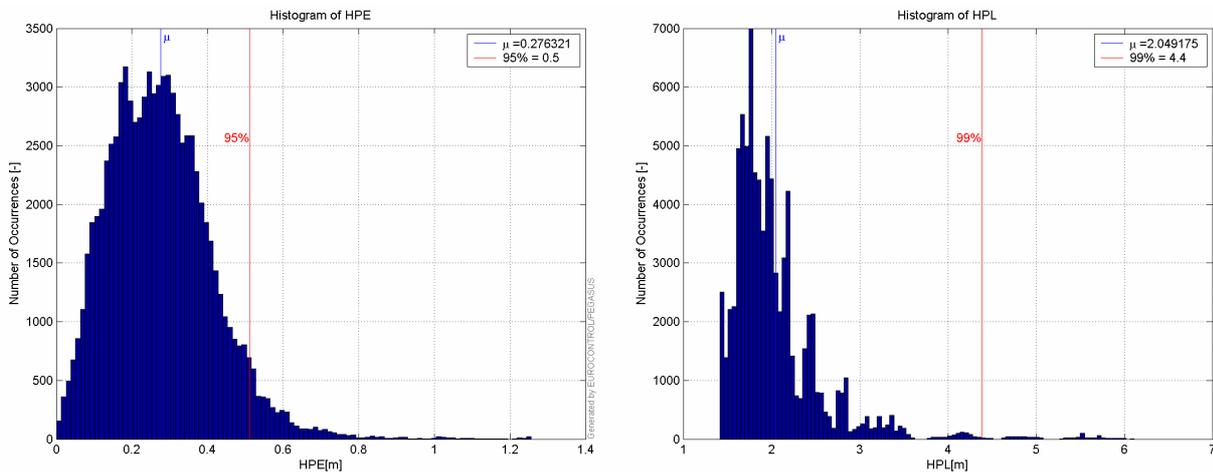


Figura 5 – Distribuzione statistica dell'errore Orizzontale e del suo Livello di Protezione

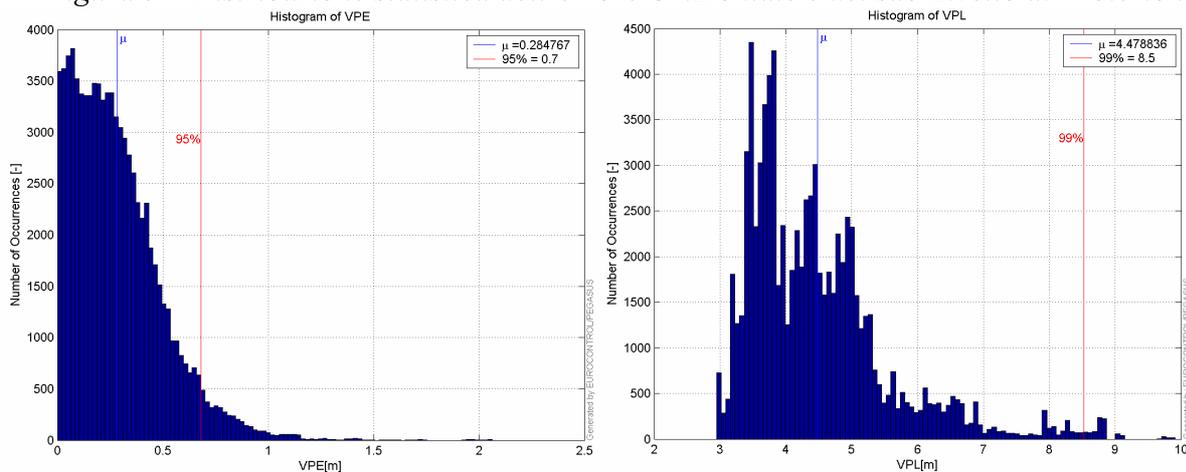


Figura 6 – Distribuzione statistica dell'errore Verticale e del suo Livello di Protezione

Dallo studio statistico del set di dati si è quindi ottenuto che:

Tabella 2 – dati statistici

	μ (m)	95% (m)
HPE	0.276321	0.5
HPL	2.049175	4.4
VPE	0.284767	0.7
VPL	4.478636	8.5

Conclusioni.

Da quanto introdotto, si può notare che tutti i test soddisfano la categoria di volo richiesta cioè la CAT-I.

Infatti, dalla tabella 1, si ha che la precisione per gli avvicinamenti CAT-I è in orizzontale di ± 0.02 NM (37.04 m) ed è ampiamente verificata; l'accuratezza verticale che è di 40 ft (12.19 m) risulta anch'essa rispettata.

Possiamo comunque osservare che l'elevata prestazione ottenuta dall'analisi della serie temporale è legata al tipo di posizionamento. A regime, infatti, le prestazioni riguarderanno un sistema mobile ad elevata dinamicità mentre in questa sede sono state analizzate le misure di tipo statico.

Si ringrazia l'ENAV di Roma per la disponibilità mostrata all'uso dei dati acquisiti dal sistema sperimentale GBAS di Linate – Milano

Bibliografia

- [1] PEGASUS*Plus Technical Notes, EUROCONTOL
- [2] Minimum Operational Performance Standards for Airborne Supplemental Navigation Equipment Using GPS, RTCA Document 208, July 1991
- [3] RTCA: Minimal Operational Performance Standards for GPS/WAAS Airborne Equipment, Doc. No. Do 229 A, June 1998
- [4] MARS3 Technical Notes for Pegasus, Rif: PEG-GBAS-TN02
- [5] ESA EGNOS web pages <http://www.esa.int/export/esaEG/estb.html>
- [6] S. GAGLIONE, T. COZZOLINO: ESTB – Egnos System Test Bed, Atti Istituto Italiano di navigazione, vol. xx, Roma 2004