

A partire dal numero di marzo 2020 abbiamo iniziato la pubblicazione di una serie di articoli presentati da parte di tecnici/ingegneri ferroviari nell'ambito 12° Congresso mondiale sulla ricerca ferroviaria (WCRR 2019) che si è svolto a Tokyo, in Giappone, dal 28 ottobre al 1 novembre 2019 nella sede chiamata Tokyo International Forum.

Il WCRR è stato istituito allo scopo di fornire una panoramica dello sviluppo mondiale delle tecnologie ferroviarie e discutere le direzioni future che gli operatori ferroviari dovranno prendere. Questo è il più grande congresso internazionale sulla ricerca ferroviaria al mondo, nel senso che ricercatori e ingegneri ferroviari si riuniscono insieme agli operatori ferroviari in un congresso.

Per alcuni paesi, garantire la competitività delle ferrovie rispetto al trasporto su strada e aereo è fondamentale, mentre in altri il potenziamento della capacità di trasporto ferroviario è ancora la prima priorità. Per continuare ad essere scelto come mezzo di trasporto in futuro, le ferrovie devono fornire un'esperienza cliente di alta qualità basata su nuove tecnologie per un funzionamento economicamente efficiente, pur mantenendo elevati standard di sicurezza ed eccellenti prestazioni ambientali. Le scoperte nella ricerca e nello sviluppo saranno indispensabili e talvolta potrebbe essere necessaria un'innovazione radicale per superare le barriere dei sistemi ferroviari convenzionali.

APPLICAZIONI ERTMS/ETCS BASATE SULLA TECNOLOGIA DI POSIZIONAMENTO GNSS

Classificazione dell'infrastruttura ferroviaria

di **Massimiliano CIAFFI, Giusy EMMANUELE, Maria CATALDO,
Elena RAZZANO, Fabio SENESI**

RFI - Direzione Tecnica

Juliette MARAIS, Syed Ali KAZIM,

UnivLille Nord de France - IFSTTAR - COSYS, LEOST - Villeneuve d'Ascq - Francia

Omar GARCIA CRESPILO, Daniel GERBETH, Maria CAAMANO

Institute of Communication and Navigation, German Aerospace Center (DLR) - Oberpfaffenhofen - Germany

Alessia VENNARINI, Andrea COLUCCIA, Alessandro NERI

Radiolabs - Roma - Italia

e **Salvatore SABINA**

Hitachi Rail - Genova - Italia

Sommario

Oggi l'ERTMS è lo standard europeo per il segnalamento ferroviario utilizzato sia in ambito nazionale che internazionale. L'ERTMS prevede l'utilizzo di balise fisiche per stabilire la posizione del treno. In questo articolo verrà descritta la tecnica e la metodologia utilizzata per il posizionamento delle balise virtuali sul binario ed il ruolo che ha la tecnologia satellitare GNSS per supportarne il rilevamento.

Tuttavia, la presenza di disturbi locali (ad es. "multi-path", NLOS o interferenze) che potrebbero non essere rilevati da una rete di correzione dell'errore (rete di augmentation), può portare potenzialmente ad errori non trascurabili nel misurare la pseudo-distanza (ad esempio la GNSS), e ciò porterebbe ad un errore nella posizione della VB non accettabile con l'integrità richiesta. Al fine di prevenire tale possibile situazione critica, la VB deve essere posizionata in aree in cui non vi siano disturbi lo-

cali che potrebbero indurre il VBR, a bordo del treno, a non poter stimare in tempo reale gli errori di posizione delle VB. Il progetto ERSAT-GGC è stato finanziato per affrontare questa sfida. Lo scopo è quello di descrivere le tecniche ed i metodi sviluppati per caratterizzare le aree delle linee ferroviarie al fine di individuare la giusta posizione sul binario in cui collocare le Balise Virtuali.

1. Introduzione

Negli ultimi anni, lo sviluppo e la diffusione dell'ERTMS ha garantito un significativo miglioramento della sicurezza ferroviaria e permesso l'interoperabilità in tutta Europa. Lo standard ERTMS è applicabile sia a livello nazionale che internazionale (garantisce l'interoperabilità). Il progetto innovativo ERSAT-GGC (ERTMS+SATellite Galileo Game Changer) vuole rappresentare un passaggio cruciale nel processo di applicazione dello standard europeo del segnalamento ferroviario ERTMS anche alle linee regionali e locali. L'obiettivo principale di ERSAT-GGC è quello di fornire un forte contributo al processo di validazione della tecnologia GNSS secondo i principi funzionali dell'ERTMS.

L'introduzione della tecnologia di posizionamento GNSS, basato sulle Balise Virtuali (VB), consente di ridurre al minimo l'impatto sulle soluzioni ERTMS esistenti e di garantire la compatibilità con le versioni precedenti, proteggendo investimenti pianificati su ERTMS e relativi piani di implementazione. Vale la pena ricordare che gli obiettivi principali del sistema di trasmissione (Virtual Balise Transmission System) VBTS sono:

- calcolare la posizione del treno per determinare le Virtual Balise (VB) in modo sicuro;
- stimare dinamicamente l'errore massimo di posizione associato alla posizione" del treno stesso.

L'applicazione della tecnologia di posizionamento GNSS, all'interno di ERTMS/ETCS, rappresenta un passo avanti significativo in termini di riduzione dei costi, che può essere potenzialmente applicata ai circa 28000 km di linee regionali e locali in tutta Europa, dove si pianifica l'installazione di ERTMS.

E' importante posizionare la Virtual Balise (VB) in tratte di linea in cui è possibile avere una ricezione ottimale del segnale GNSS. Tuttavia, nell'ambito dei Progetti di Ricerca & Sviluppo in essere o precedenti, che indagano sull'introduzione della tecnologia GNSS nell'ambito ferroviario, non si ritrova alcuno studio specifico sulla possibilità di caratterizzare le linee in termini di disturbi locali GNSS, per delineare le aree in cui eventi locali inattesi possono potenzialmente condurre ad errori di posizionamento delle VB. Il progetto ERSAT-GGC è stato finanziato per vincere tale sfida.

Lo studio in questione ha l'obiettivo di definire e sviluppare un processo per classificare linee ferroviarie dove possono essere collocate le Virtual Balise (VB), per elimi-

Tabella degli Acronimi e Definizioni

| | |
|-----------------|---|
| ADC | Analog-to-Digital Converter |
| AGC | Automatic Gain Control |
| dB-Hz | deciBel-Hertz |
| CMC | Code-Minus-Carrier |
| CMC-Delta | Variazione incrementale del CMC |
| COTS | Component Off-the-Shelf |
| DGNSS | Differential Global Navigation Satellite System |
| EGNSS | European Global Navigation Satellite System |
| ERSAT GGC | ERTMS+SATellite-Galileo Game Changer |
| ERTMS | European Railway Traffic Management System |
| ETCS | European Train Control System |
| GNSS | Global Navigation Satellite System |
| IMU | Inertial Measurement Units |
| LOS | Line-Of-Sight |
| MOPS | Minimum Operational Performance Standard |
| NLOS | Non Line Of Sight |
| NMEA | National Marine Electronics Association |
| PSD | Power Spectral Density |
| PVT | Position, Velocity, Time |
| R&S | Ricerca & Sviluppo |
| RF | Radio Frequency |
| RFI | Radio Frequency Interferences |
| SBAS | Satellite-based Augmentation System |
| SIL (0-1-2-3-4) | Safety integrity level (0-1-2-3-4) |
| VB | Virtual Balise |
| VBR | Virtual Balise Reader |
| VBTS | Virtual Balise Transmission System |

nare in anticipo aree in cui eventi inattesi a livello locale possono potenzialmente influire sulla sicurezza e sulla disponibilità. In particolare, lo scopo principale è quello di sviluppare un processo per classificare le aree idonee al posizionamento delle Virtual Balise (VB), in conformità ai processi Cenelec SIL 4 attualmente in essere per l'applicazione ERTMS/ETCS in ambito ferroviario. In tal modo anche la funzione "Posizione del treno" con tecnologia GNSS sarà in grado di garantire il SIL4. Per poter testare quanto appena esposto, ERSAT-GGC beneficia del sito prova esistente in Sardegna di circa 50 km a doppio binario, tra Cagliari e San Gavino.

In questo articolo, presenteremo i diversi disturbi GNSS locali (ad esempio Non Line of Sight NLOS, "multipath", interferenze in radiofrequenza), rilevanti per l'identificazione della posizione sui binari in cui le Virtual Balise (VB) possono essere posizionate. In seguito, saranno illustrate le relative tecniche di rilevamento dei disturbi stessi, necessarie per il processo di classificazione della linea e la sua idoneità, illustrandone la sperimentazione con i relativi risultati.

2. Effetti locali e le loro conseguenze

È importante posizionare in modo adeguato l'antenna GNSS in quanto dal suo posizionamento dipende la capacità del ricevitore di valutare con accuratezza la distanza da ciascuno dei satelliti visibili. In effetti, questa distanza chiamata "pseudo-distance" è il risultato della moltiplicazione tra il tempo di arrivo del segnale e la velocità della luce. Nelle applicazioni per il trasporto ferroviario, l'antenna GNSS, collocata idealmente sull'imperiale del treno, è soggetta al degrado del segnale causato dagli ostacoli circostanti. Edifici, alberi, gallerie, impediscono a volte al ricevitore di acquisire il segnale satellitare oppure alterano la sua ricezione, riflettendo sulle diverse superfici (effetto Multipath). Questi effetti sono considerati incertezze locali per il posizionamento delle VB basato su GNSS, nel senso che nessun sistema ad incremento differenziale di augmentation (ad es. SBAS o DGNSS) può fornire le correzioni per mitigarle, a causa della forte dipendenza dall'ambiente circostante attraversato dalla linea ferroviaria e quindi dal treno.

Inoltre, a causa del movimento dei satelliti intorno alla terra e della loro posizione relativa mutevole rispetto all'utente finale, si ha anche una dipendenza temporale.

In letteratura sono ben noti i disturbi locali in ricezione del segnale GNSS. Nel progetto ERSAT-GGC ed in questo articolo, gli eventi GNSS locali in esame sono quelli che rappresentano un'incertezza permanente per l'utente. Per tale motivo, i principali disturbi trattati sono: il "multipath", il NLOS, e le interferenze involontarie. Contestualmente, la classificazione della zona di interesse non dovrebbe considerare gli effetti temporanei, come quelli dovuti al "multipath" causato da un treno in movimento su un binario adiacente o ad interferenze intenzionali (come "spoofing" o "jamming")⁽¹⁾ che non si prevede siano presenti in maniera continuativa lungo la linea. È onere del VBTS e della sua integrazione in ERTMS gestire e distinguere adeguatamente questi tipi di eventi temporanei. Di seguito una breve analisi dei diversi disturbi.

2.1 Multipath e NLOS

Come riportato in [1], dal punto di vista del ricevitore, si può distinguere tra effetti di "multipath" e di NLOS. La determinazione della posizione tramite GNSS presuppone che i segnali si propaghino direttamente nel cono di visibilità tra il satellite e l'antenna sul treno. Tuttavia, in presenza di superfici riflettenti (ad esempio edifici o vegetazione di alto fusto) il segnale può essere riflesso e ricevuto dopo un percorso indiretto.

Il "multipath" è caratterizzato dalla ricezione di echi multipli di uno stesso segnale, ciascuno dei quali arriva in ritardo rispetto al tempo impiegabile nel percorso diretto. La durata del ritardo dipende dalla distanza dall'ostacolo. Al contrario, NLOS rappresenta il caso in cui il segnale diretto non può essere ricevuto a causa della presenza di un ostacolo schermante, mentre il segnale riflesso viene ricevuto. Pertanto, il "multipath" comporta un tipo di interferenza che può essere costruttiva o distruttiva e che modifica la stima del tempo di propagazione. Per NLOS, il risultato di correlazione è sempre caratterizzato da un ritardo nella stima "pseudo-range" causato dall'assenza del percorso diretto.

2.2 Interferenze

I ricevitori GNSS sono sensibili a diversi tipi di interferenze in radiofrequenza (RFI), sia intenzionali (ad esempio "jamming"¹ e "spoofing"⁽²⁾) che non intenzionali (ad esempio emissioni spurie di altri sistemi radio). L'impatto delle interferenze in radiofrequenza è vario, poiché può provocare un degrado nella accuratezza del posizionamento o una perdita completa del segnale [4].

In letteratura sono state individuate diverse tecniche per il rivelamento delle interferenze. Tali tecniche operano in modo da osservare il comportamento di una o più grandezze e rivelarne lo scostamento da quello nominale. Quando ciò accade emettono un allarme ed eventualmente attuano delle contromisure mediante opportune tecniche di mitigazione dell'interferenza se previste.

3. Processo di Classificazione del Binario

L'obiettivo di ERSAT-GGC è di costruire un processo di classificazione dell'area del binario basato sulla identificazione della presenza di disturbi locali permanenti GNSS lungo la linea ferroviaria. Gli elementi principali del processo sono:

- un sistema "**hardware di misura**", responsabile dell'acquisizione dei dati delle osservazioni dei segnali;
- le "**tecniche di rilevamento**", mirate ai diversi disturbi GNSS;
- una "**logica decisionale**", che elabori i risultati delle tecniche di rilevamento e generi la classificazione dell'area. La metodologia decisionale o di classificazione combina le informazioni di più corse del treno e permette di giungere ad una conclusione sull'idoneità di un'area per il posizionamento delle VB.

Con riferimento alle tecniche di rilevamento e alla letteratura, l'obiettivo in ERSAT-GGC è stato quello di acquisire, identificare e classificare un'area del binario come

(1) Con jamming si intende un disturbo volontario di comunicazioni radio (wireless) che diminuisce il rapporto segnale/rumore, indice di chiarezza del segnale, tipicamente trasmettendo sulla stessa frequenza e con la stessa modulazione del segnale che si vuole disturbare.

(2) Con spoofing si intende una forma intelligente di interferenza che induce il ricevitore a credere di essere in una falsa località.

adatta o non adatta per posizionare le VB e non per realizzare azioni di mitigazione del disturbo. Questa ricerca si concentra innanzitutto su quali tecniche di monitoraggio GNSS possono essere utilizzate per valutare se il livello del disturbo può portare ad un errore non accettabile nella misurazione dello pseudo-range.

3.1. Vincoli operativi

La metodologia della classificazione della linea si avvale di apparecchiature commerciali, per permettere a qualsiasi utente di installare ed utilizzare il sistema, per limitare i costi e la complessità dell'installazione. L'elemento principale è un ricevitore GNSS COTS che fornisca dati grezzi e, ove necessario, un analizzatore di spettro. Inoltre, potrebbe essere necessario anche l'uso di simulatori. Per ulteriori sviluppi si potranno prendere in considerazione sensori più evoluti come ad esempio le videocamere.

Il processo di classificazione prevede due passaggi:

- l'iniziale classificazione del binario partendo da assenza totale di dati;
- il monitoraggio del binario a scopo di aggiornamento.

Poiché i MOPS dedicati alle ferrovie non sono ancora stati definiti, la ricerca è stata sviluppata con un approccio parametrico, lasciando al futuro utente la definizione delle proprietà dell'antenna e del ricevitore.

Una volta individuate singolarmente tutte le problematiche, i risultati ottenuti vengono correlati, al fine di decidere se il binario possiede aree con requisiti adatti al posizionamento di VB. La sfida, in questa fase, è stata la possibilità di valutare la presenza di uno stesso disturbo nel tempo e nello spazio, in base all'evoluzione della geometria e della trasmissione del satellite durante il ciclo orbitale del sistema GNSS.

3.2 Tecniche di rilevamento "multipath" e NLOS

Considerando lo stato dell'arte e la necessità di utilizzare elementi COTS, sono state selezionate una serie di tecniche per il rilevamento di "multipath" e NLOS.

La prima tecnica si basa sul rapporto "C/N0", disponibile nei ricevitori commerciali e che caratterizza il rapporto di "portante-rumore". Il C/N0 è calcolato in base ai valori di trasmissione di potenza del rumore, nonché alla larghezza di banda di campionamento, che di solito è la larghezza di banda equivalente al rumore dell'ultimo stadio del filtro nel "front-end" RF di un ricevitore. Il C/N0 dipende dall'apparecchiatura utilizzata per l'acquisizione del segnale. È importante determinare quanto segnale riesce a rilevare un qualsiasi ricevitore commerciale. C/N0 è generalmente espresso in dB-Hz ed è riferito al rapporto tra la potenza trasmessa e la potenza del rumore per unità di larghezza di banda ([5] [6]). I valori C/N0, per tutti i canali tracciati, sono forniti in formati proprietari per ciascun ricevitore.

Il C/N0 dipende da:

- l'apparecchiatura utilizzata per l'acquisizione;
- angolo di elevazione del satellite;
- le condizioni di ricezione (LOS/"multipath"/NLOS).

La prima fase è quella di calibrazione, obbligatoria per la messa a punto dell'apparecchiatura e per l'installazione dell'antenna. Nella fase di rilevamento vengono invece definiti dei valori soglia come indicato dalla linea blu (ved. fig. 1): quando il valore $\Delta C/N0$ è maggiore della soglia si classifica quel segnale come "multipath". I punti rossi sono gli eventi rilevati.

Una seconda tecnica di rilevamento del "multipath" si basa sulla differenza di tempo relativa a pseudo-range a meno delle misurazioni della fase della portante. Queste misurazio-

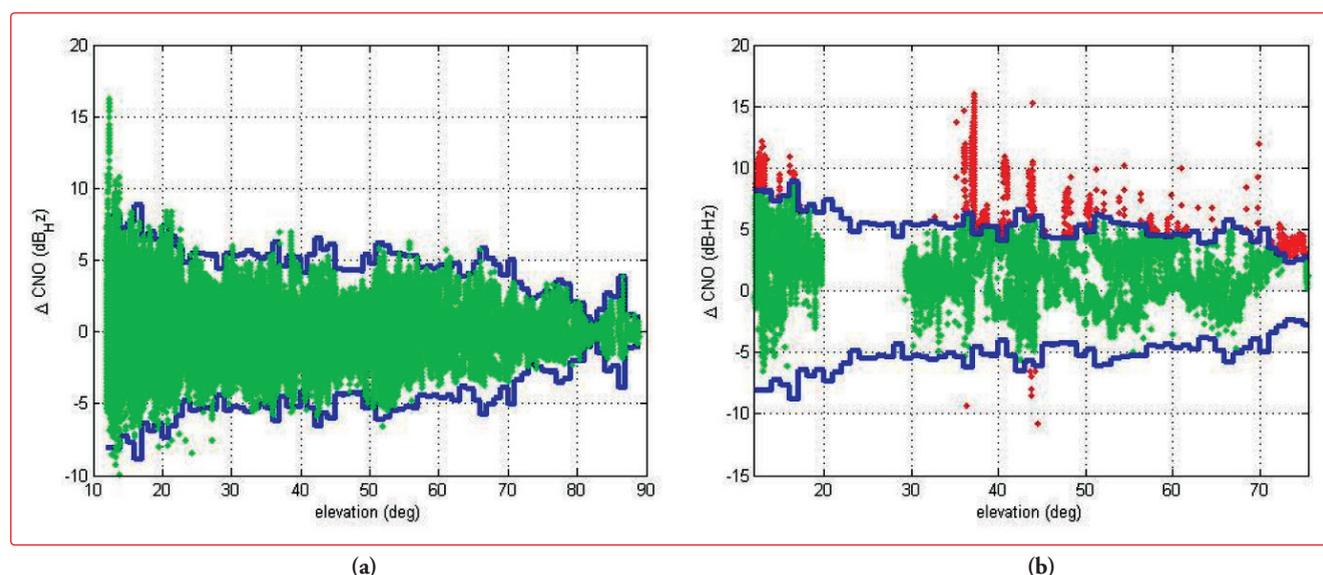


Fig. 1 - (a) Soglia di calibrazione basata su un set di dati di riferimento; (b) Eventi rilevati confrontando le misurazioni con la soglia

ni sono esposte nella maggioranza dei casi agli stessi errori di propagazione e di sistema, ma l'effetto del "multipath" nella misurazione della fase della portante è normalmente considerato trascurabile rispetto all'effetto sulla misurazione dello pseudo-range. Dalla differenza tra queste misurazioni otteniamo il rumore relativo al "multipath", normalmente chiamato CMC. In questa attività, la differenza di tempo (ad es. CMC-Delta) è considerata più adatta per i veicoli in movimento in modo da rimuovere completamente la dipendenza da errori ionosferici e dalle ambiguità della fase della portante che sono ancora presenti nella CMC [8].

Per determinare una soglia adeguata a questa tecnica, si è scelto di effettuare l'analisi di un set di dati di calibrazione, che permetta di costruire un modello dipendente dall'elevazione, come nel caso del rilevamento con C/N0 in ERSAT-GGC mostrato in figura 2.

In supporto alle tecniche esposte o per le future implementazioni si sono considerate altre tecniche, in particolare la valutazione dei residui PVT [8] e l'uso di sensori aggiuntivi come unità di misura inerziali (IMU) o videocamere. L'uso di tecniche di rilevamento basate su telecamera per il rilevamento specificamente di NLOS (descritto in precedenza [2]) presenta l'inconveniente della necessità di installare il dispositivo di acquisizione delle immagini sul tetto del treno, necessitando di verifiche in accordo con i vincoli tecnici ed operativi relativi alle norme di sicurezza ferroviaria. Il vantaggio principale è invece la capacità di elaborare in tempo reale lo stato di ricezione satellitare con una robusta accuratezza.

3.3 Tecniche di rilevamento delle interferenze

Le tecniche di rivelamento delle interferenze possono essere classificate in funzione del diverso stadio della "catena" del ricevitore in cui agiscono:

- all'interno del "front-end", attraverso l'analisi del comportamento del livello di AGC;
- all'uscita del "front-end", osservando la densità spettrale di potenza del segnale in uscita da tale blocco;
- all'uscita dello stadio di tracciamento di un ricevitore GNSS, osservando le misure di pseudo-range;
- in uscita al ricevitore GNSS mediante un'osservazione della stima della posizione [5].

Sono stati selezionati due approcci per il rivelamento delle interferenze, basate rispettivamente sul monitoraggio del livello di AGC e della densità spettrale di potenza.

Una tecnica di "pre-despreading" è il monitoraggio del livello di AGC e ha l'obiettivo di rivelare all'interno della banda GNSS la presenza di segnali non previsti. In condizioni nominali, il livello di AGC è sufficientemente stabile e limitato entro un intervallo noto, poiché il livello di potenza del segnale ricevuto tende a variare lentamente [5].

Al contrario, in caso di interferenza, il livello di AGC diminuisce drasticamente in risposta all'aumento della potenza nella banda GNSS. Considerato ciò, il rivelamento dell'interferenza avviene per confronto del livello di AGC con una soglia pre-determinata.

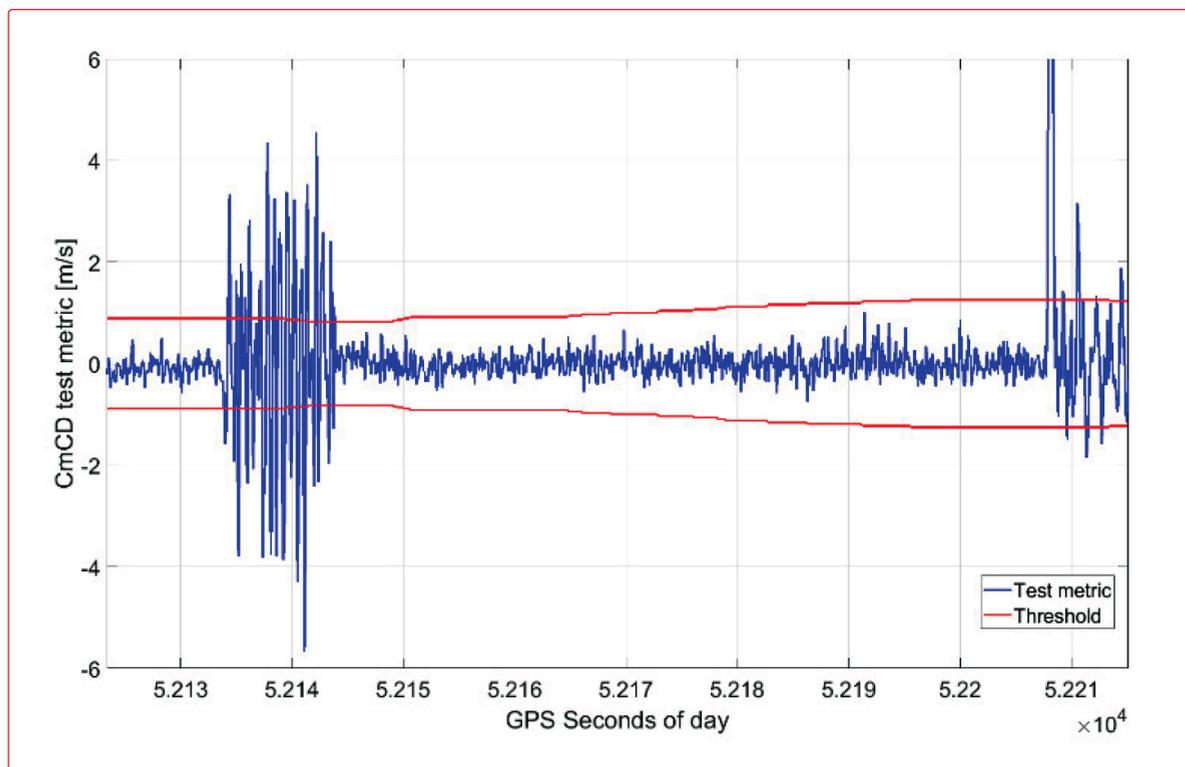


Fig. 2 - Rilevamento di Due Eventi "multipath" con tecnica CMC-Delta

La soglia è definita come una caratterizzazione del comportamento del livello di AGC in condizioni nominali. È necessaria una fase di calibrazione. Il calcolo della soglia si basa sul lavoro proposto in [7]. Il monitoraggio del livello di AGC è una tecnica di rivelamento semplice (ovvero richiede bassi costi di calcolo) ed è inoltre una metrica disponibile nella maggior parte dei ricevitori COTS-GNSS. Attualmente non esiste un metodo standard per la misura del livello di AGC nei ricevitori GNSS. Ogni costruttore di ricevitori fornisce un valore per tale grandezza che potrebbe richiedere delle valutazioni prima di poter essere adoperata [6].

In figura 3 si riporta un esempio di andamento nel tempo del livello di AGC relativo ad una delle campagne di misura realizzata nel progetto ERSAT-GGC. In essa si evidenzia il comportamento del livello di AGC in corrispondenza di un evento di "Interferenza". In particolare nella figura seguente, la linea blu rappresenta la variazione del livello di AGC nel tempo, mentre la linea verde è la soglia di decisione. Il cerchio rosso evidenzia un caso in cui è stata rivelata l'interferenza.

La tecnica basata sull'analisi della PSD può essere utilizzata per rivelare le interferenze riportate al §2., sia in banda GNSS che in banda vicina. È classificata come una tecnica di pre-correlazione perché agisce dopo il blocco di ADC e prima della fase di elaborazione del segnale, in cui viene effettuata l'acquisizione ed il tracciamento del segnale GNSS stesso. La qualità della PSD dipende dal particolare metodo utilizzato per la sua stima ma è anche strettamente dipen-

dente dalle caratteristiche del ricevitore COTS utilizzato, come ad esempio frequenza di campionamento, larghezza di banda del filtro "anti-aliasing", amplitudine/gain flatness e capacità del ricevitore COTS di fornire continuamente i campioni del segnale GNSS acquisito.

In generale, le prestazioni della tecnica sono influenzate dalla qualità della PSD e dalla cosiddetta "maschera" di frequenza.

La "maschera" di frequenza è una caratterizzazione statistica dello spettro di potenza sulla banda monitorata in condizioni nominali. La "maschera" di frequenza è il risultato di un'accurata fase di calibrazione che richiede una conoscenza approfondita dell'ambiente in cui opera il ricevitore e dipende dalle caratteristiche del ricevitore stesso.

La tecnica confronta la PSD, opportunamente calcolata, con una "maschera" di frequenza, determina la presenza di interferenze quando rileva che la PSD misurata è al di sopra della maschera di frequenza su una porzione o su tutta la banda considerata. Un esempio di rivelamento di eventi di "interferenza" durante una delle campagne di misura del progetto ERSAT-GGC è mostrato in (ved. fig. 4).

La linea blu rappresenta l'andamento della PSD in funzione della frequenza. L'intervallo temporale è lo stesso in cui sono state rivelate le interferenze mediante la tecnica di monitoraggio del livello di AGC. La linea verde è la soglia di decisione. Il cerchio rosso evidenzia l'area sullo spettro in cui il valore della PSD stimata è al di sopra della maschera di frequenza.

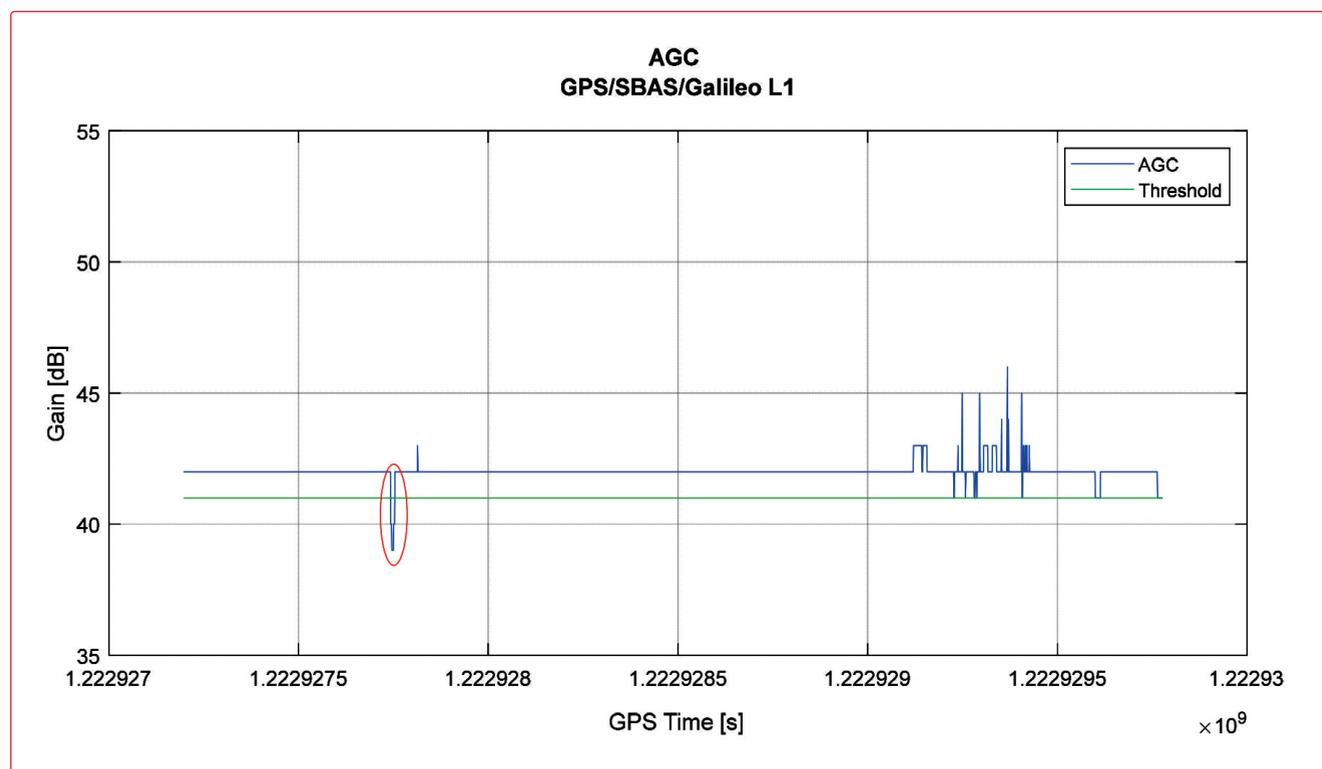


Fig. 3 - Interferenza rilevata con monitoraggio del livello AGC

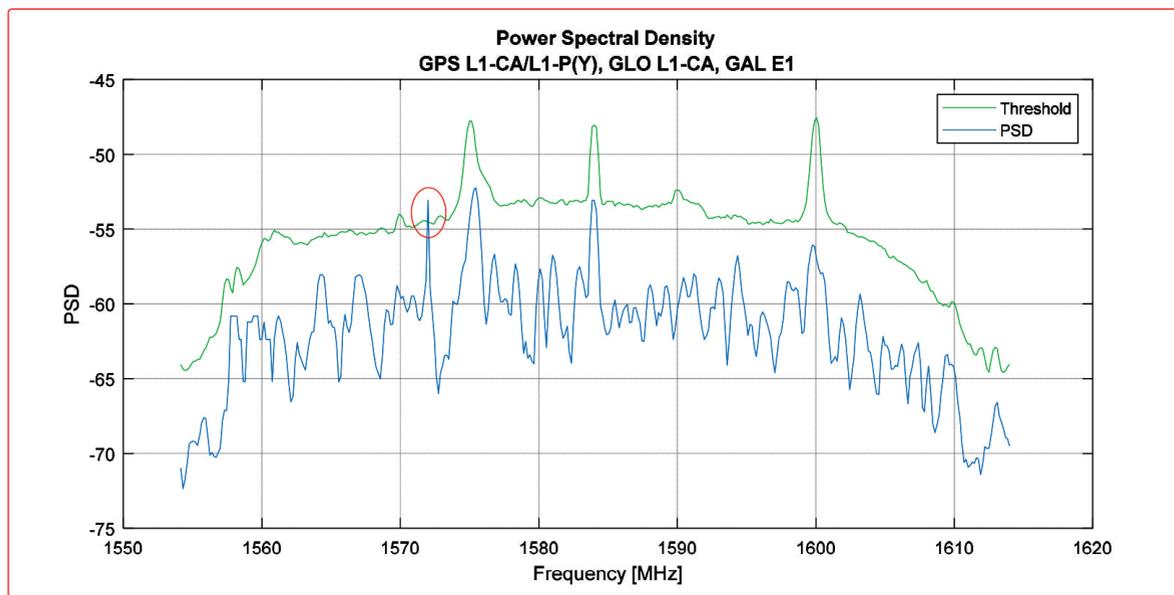


Fig. 4 - Rilevamento d'interferenze con monitoraggio PSD

4. Conclusioni

L'obiettivo principale di ERSAT-GGC è stato quello di contribuire al processo di validazione del EGNSS in ambito ferroviario ed in particolare nel processo di classificazione di un tracciato ferroviario in termini di aree idonee o meno al posizionamento delle Virtual Balise. Questo articolo ha evidenziato come le tecniche di rilevamento possano, grazie alla sperimentazione svolta per questo progetto, evidenziare e caratterizzare eventi critici per una corretta ricezione del segnale GNSS lungo il binario ferroviario.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato finanziato dal progetto H2020 GSA ERSAT-GGC n. 776039.

Bibliografia

- [1] Garcia Crespillo, O., Marais, J., Konovaltsev, A., Sabina, S., Vennarini, A., Coluccia, A., Razzano, E., Aguila, A., Ranauro, F. Neri, A., and Ciaffi, M., Local GNSS Threat Detection Methods for Virtual Balise Placement in Railway Applications, ITST 2018, Lisbon, October 2018.
- [2] Marais, J., Flancquart, A., & Berbineau, M. (2003). Prediction of GNSS availability in railway environments. In World Congress on Railway Research, Edinburgh, Sept.
- [3] Marais, J., Meurie, C., Attia, D., Ruichek, Y., & Flancquart, A. (2014). Toward accurate localization in guided transport: Combining GNSS data and imaging information. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 43, 188-197.
- [4] The Royal Academy of Engineering, "Global Navigation Space System: Reliance and Vulnerabilities," 2011. [Online]. Available: <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/global-navigation-space-systems>.
- [5] DAVIS, F., GNSS Interference Threats and Countermeasures, Artech House, 2015.
- [6] Borowski, H., Isoz, O., Lo, S., Eklöf, F., & Akos, D. (2012). Detecting false signals with automatic gain control. GPS World, 23(4), 38-43.
- [7] Pini, M., Motella, B., & Presti, L. L. (2016). Comparison between AGC control and statistical based methods for low power interference detection. In ION GNSS (Vol. 1, pp. 265-274).
- [8] Grosch, A., García Crespillo, O., Martini, I. and Günther, C., "Snapshot residual and Kalman Filter based fault detection and exclusion schemes for robust railway navigation," 2017 European Navigation Conference (ENC), Lausanne, 2017, pp. 36-47.
- [9] Beidler, Anton and Tollkuhn, Andreas and Giustiniano, Domenico and Plattner, Bernhard (2015) CMCD: Multipath Detection for Mobile GNSS Receivers. In: International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 26 - 28 January 2015, Dana Point, California.
- [10] Strode, P. R., & Groves, P. D. (2016). GNSS multipath detection using three-frequency signal-to-noise measurements. GPS solutions, 20(3), 399-412.

Termini chiave dizionario www.wikirail.it

- Localizzazione
- GNSS
- ERTMS



<https://wikirail.it/glossario/satellitario/>