



Sviluppo di un sistema di posizionamento GNSS per il supporto alle manovre automatiche di treni merci di nuova generazione a basse velocità

Development of a GNSS positioning system to support automatic manoeuvring of new-generation freight trains at low speeds

Francesca DE MARINIS
Simona GURRÌ
Paolo DABOVE

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.06.2025.ART.1>)

Sommario - Il presente contributo propone un sistema di posizionamento satellitare sviluppato per l'integrazione nel sistema di segnalamento ETCS di livello 2 (ex L3), con particolare riferimento alle applicazioni a bassa velocità nel settore ferroviario merci. Il sistema è destinato all'impiego su treni di nuova generazione F-EMU (*Freight-Electric Multiple Unit*), caratterizzati da composizione modulare e potenza distribuita, per supportare l'automazione delle manovre nei nodi logistici e migliorare l'efficienza operativa nei terminal ferroviari. La validazione è stata condotta attraverso campagne sperimentali in ambiente urbano e simulazioni effettuate in contesti virtuali realistici, attraverso modelli di macro e microsimulazione. Il sistema è stato testato con ricevitori satellitari a basso e medio costo, nonché con un sistema di riferimento GNSS-indipendente, ottenendo risultati con accuratezze medie sub-metriche in condizioni ottimali e inferiori a 3 metri in tutti i test, dimostrando la robustezza e l'affidabilità della soluzione proposta e la sua idoneità all'integrazione nei futuri scenari di automazione ferroviaria.

1. Introduzione

Il Libro Bianco dell'Unione Europea del 2011 [1], ha delineato una strategia per rendere il sistema di trasporti europeo più sostenibile, efficiente e integrato, puntando in particolare al riequilibrio modale. Tuttavia, permangono ostacoli strutturali, tra cui l'obsolescenza del materiale rotabile nel settore ferroviario delle merci, privo di tecnologie digitali e diagnostiche moderne. Questa problematica è aggravata dalla lentezza nell'ammmodernamento dei sistemi di gestione e segnalamento, che rimangono basati su infrastrutture fisse e non interoperabili. A ciò si aggiunge la forte dipendenza dal petrolio del trasporto stradale, che rende il settore vulnerabile e ambientalmente insostenibile. Per affrontare queste sfide, è essenziale promuovere un trasporto a basse o zero emissioni, quale quello ferroviario, digitalizzare i servizi e diffondere sistemi di gestione

Summary - This paper proposes a satellite positioning system developed to be integrated into the ETCS Level 2 (formerly L3) signaling system, with particular focus on low-speed applications in freight rail. The system is intended for use on new-generation F-EMU (*Freight Electric Multiple Unit*) trains, characterized by modular composition and distributed power, to support the automation of shunting at logistics nodes and to improve the operational efficiency at rail terminals. Validation was conducted through experimental campaigns in an urban environment and simulations carried out in realistic virtual contexts through macro and micro-simulation models. The system was tested with low- and medium-cost satellite receivers as well as with a GNSS-independent reference system, obtaining results with sub-meter mean accuracies under optimal conditions and less than 3 meters in all tests, demonstrating the robustness and reliability of the proposed solution and its suitability for integration into future rail automation scenarios.

1. Introduction

The White Paper on the Future of Transport published by the European Union in 2011 [1], outlined a strategy to make Europe's transport system more sustainable, efficient and integrated, focusing in particular on modal rebalancing. However, structural obstacles remain, including the outdated rolling stock in the rail freight sector, which lacks modern digital and diagnostic technologies. This issue is exacerbated by the slow modernisation of management and signalling systems, which are still based on fixed, non-interoperable infrastructure. Added to this, road transport's heavy reliance on oil makes the sector both vulnerable and environmentally unsustainable. To address these issues, it is crucial to encourage the use of low- or zero-emission modes of transport, such as rail, and to digitise services and implement traffic management systems on a global scale, such as the European Rail Traffic Management System (ERTMS). The objective of this paper is set in this context: to investigate the study and application of

del traffico a scala globale come l'ERTMS (*European Rail Traffic Management System*). È proprio in questo contesto che si inserisce l'obiettivo del presente lavoro: approfondire lo studio e l'applicazione di un sistema di posizionamento satellitare, che prevede la localizzazione continua e puntuale dei treni, utilizzando ricevitori low-cost e servizi di correzione gratuiti. Il sistema proposto è pensato per essere utilizzato su treni merci di nuova generazione (F-EMU) come supporto all'automazione delle manovre nei nodi ferroviari, a basse velocità, dove le operazioni di composizione, scomposizione e posizionamento del convoglio rappresentano una componente significativa del tempo totale di trasporto. La scelta di implementare tale sistema sui treni merci di nuova generazione è motivata dalla loro predisposizione nativa all'integrazione con tecnologie GNSS, grazie a un'architettura progettuale avanzata e digitalizzata. Al contrario, i treni convenzionali, caratterizzati da trazione centralizzata e dotazioni tecnologiche limitate, offrono minori margini di integrazione e benefici operativi, rendendo meno vantaggiosa l'adozione di soluzioni basate su localizzazione satellitare. L'applicazione prevede quindi l'utilizzo di più dispositivi di localizzazione per valutare le performance di due ricevitori con prezzi di mercato e prestazioni differenti, integrando servizi gratuiti per la trasmissione delle correzioni necessarie per un posizionamento di precisione. Il sistema sviluppato costituisce un modulo funzionale all'interno di un'architettura più estesa, potenzialmente integrabile con ulteriori componenti come sensoristica di bordo, sistemi Lidar e piattaforme di diagnostica, che permetterebbe al convoglio di effettuare manovre in completa autonomia e nel rispetto di tutti i requisiti di sicurezza previsti per tali applicazioni.

L'obiettivo finale del sistema, progettato per operare congiuntamente ai nuovi treni merci, è quello di incrementare l'efficienza delle operazioni nei terminal intermodali, riducendo i tempi associati alle manovre e migliorando l'integrazione del trasporto ferroviario all'interno delle catene logistiche multimodali.

2. Stato dell'arte

Il trasporto ferroviario delle merci in Europa si trova attualmente in una fase cruciale di trasformazione, spinta dalla necessità di aumentare la competitività rispetto al trasporto su strada e di contribuire agli obiettivi di sostenibilità ambientale fissati a livello europeo. Sebbene la ferrovia sia ampiamente riconosciuta come una modalità più efficiente e a basse emissioni di CO₂, il settore continua ad affrontare sfide strutturali rilevanti, tra cui l'obsolescenza del materiale rotabile, la scarsa interoperabilità e la lenta adozione di tecnologie digitali e automatizzate. Negli ultimi anni, diversi progetti innovativi sono stati avviati per modernizzare il comparto merci, con particolare attenzione all'automazione delle manovre e alla digitalizzazione dei processi operativi. In ambito tedesco, due tra i progetti più significativi sono SAMIRA [2] e Azubig [3], presentati nel 2020, che si concentrano sullo sviluppo di veicoli

a satellite positioning system, which provides for the continuous and timely tracking of trains, using low-cost receivers and free correction services. The proposed system is designed to be used on next-generation freight trains (F-EMUs) as a support for the automation of shunting at railroad junctions, at low speeds, where the operations of train composition, breakdown and positioning represent a significant component of the total transport time. The decision to implement such a system on new-generation freight trains is motivated by their native readiness for integration with GNSS technologies, thanks to an advanced, digitised design architecture. In contrast, conventional trains, characterized by centralized traction and limited technological equipment, offer less room for integration and operational benefits, making the adoption of satellite location-based solutions less advantageous. Therefore, the application involves the use of multiple localization devices to evaluate the performance of two receivers with different market prices and performance, integrating free services for the transmission of corrections necessary for precision positioning. The developed system constitutes a functional module within a larger architecture, potentially integrable with additional components such as on-board sensors, Lidar systems, and diagnostic platforms, which would allow the convoy to maneuver in complete autonomy and in compliance with all safety requirements for such applications.

The ultimate goal of the system, designed to operate in conjunction with the new goods trains, is to increase the efficiency of operations at intermodal terminals, reducing the time associated with manoeuvres and improving the integration of rail transport within multimodal logistics chains.

2. State of art

European rail freight is currently undergoing a crucial period of transformation, driven by the need to increase its competitiveness compared to road transport and to contribute to environmental sustainability goals set at European level. Although rail is widely recognised as a more efficient mode of transport with lower CO₂ emissions, the sector continues to face significant structural challenges, including ageing rolling stock, poor interoperability and slow uptake of digital and automated technologies. In recent years, several innovative projects have been launched to modernise the freight sector, with a focus on shunting automation and digitalisation of operational processes. In the German context, two of the most significant projects are SAMIRA [2] and Azubig [3], presented in 2020, which focus on the development of autonomous manoeuvring vehicles. Both projects are based on integrated multi-sensor architectures capable of detecting obstacles, monitoring the surrounding environment and making autonomous decisions in an operational context. The port of Hamburg was chosen for the validation phase of the SAMIRA vehicle, demonstrating a 66% reduction in turnaround time and a 200% increase in capacity, thanks to more efficient manoeuvring and reduced human intervention. Internationally, Alstom has also invested in the development of autonomous locomotives [4], in particular by demonstrating the fully autonomous operation of a diesel locomotive in the Netherlands, using a GoA4 (Grade of

di manovra autonomi. Entrambi i progetti si basano su architetture multi-sensore integrate, in grado di rilevare ostacoli, monitorare l'ambiente circostante e prendere decisioni autonome in contesto operativo. Il porto di Amburgo è stato scelto per la fase di validazione del veicolo SAMIRA, dimostrando un abbattimento del 66% dei tempi di turnaround e un aumento della capacità del 200%, grazie alla maggiore efficienza nelle manovre e alla riduzione dell'intervento umano. A livello internazionale, anche Alstom ha investito nello sviluppo di locomotive autonome [4], in particolare dimostrando il funzionamento completamente autonomo di una locomotiva diesel nei Paesi Bassi, utilizzando un sistema di automazione GoA4 (*Grade of Automation, Livello 4*) per l'avvio, la guida, l'arresto e il superamento degli ostacoli. Un altro progetto rilevante è quello della startup americana *Parallel Systems* [5], che propone un veicolo merci completamente autonomo ed elettrico, basato su moduli indipendenti che viaggiano su binari tradizionali. Ogni unità è in grado di trasportare un singolo container e di viaggiare in convogli dinamici, potenzialmente riorganizzabili lungo il percorso.

Accanto all'automazione, un altro filone di innovazione riguarda la digitalizzazione dei carri e dei sistemi di monitoraggio. Il progetto *Smart Train* di Mercitalia Intermodal [6] rappresenta un esempio concreto in questa direzione. L'iniziativa prevede l'adozione di tecnologie IoT, machine learning e analisi dei dati per digitalizzare la movimentazione delle merci. I carri sono equipaggiati con sensori in grado di monitorare in tempo reale parametri chiave come il sistema frenante, il chilometraggio, la temperatura e la geolocalizzazione, permettendo una gestione ottimizzata e interventi di manutenzione predittiva. Nel contesto della digitalizzazione, un'innovazione strategica è rappresentata dall'introduzione dei DAC (*Digital Automatic Couplers*), che automatizzano le operazioni di aggancio e sgancio dei carri, la cui diffusione è stata ulteriormente favorita da diversi progetti europei, tra cui l'*European DAC Delivery* [7], finanziato nell'ambito di *Shift2Rail*, che ha identificato il DAC come un elemento abilitante per molte funzionalità avanzate. Oltre a velocizzare le operazioni nei terminal, il DAC consente la formazione di convogli più lunghi e pesanti, grazie alla sua maggiore resistenza meccanica, e abilita funzioni di controllo in tempo reale dell'integrità del treno, migliorando sensibilmente la sicurezza operativa.

Tuttavia, va sottolineato come la maggior parte di queste soluzioni si concentri esclusivamente su innovazioni *on-board*, intervenendo principalmente sul materiale rotabile esistente o su locomotive di nuova generazione, senza mettere in discussione l'architettura complessiva del treno merci tradizionale. Si tratta, nella maggior parte dei casi, di aggiornamenti incrementali che migliorano le prestazioni, l'efficienza e la sicurezza, ma che non trasformano radicalmente il concetto stesso di treno merci. Inoltre, nessuno dei progetti attualmente in corso propone un ripensamento sistemico del convoglio ferroviario in termini di modularità, flessibilità o autonomia operativa nei terminal.

Automation, Level 4) automation system for starting, driving, stopping and overcoming obstacles. The American start-up *Parallel Systems* is another relevant project [5], which proposes a fully autonomous, electric freight vehicle based on independent modules travelling on conventional tracks. Each unit can carry a single container and travel in dynamic convoys that can potentially be rearranged along the way.

In addition to automation, another strand of innovation concerns the digitalisation of wagons and monitoring systems. Mercitalia Intermodal's *Smart Train* project [6] is a concrete example in this direction. The initiative involves the use of IoT technologies, machine learning and data analytics to digitise the movement of goods. The wagons are equipped with sensors that can monitor key parameters such as the braking system, mileage, temperature and geolocation in real time, enabling optimised management and predictive maintenance. In the context of digitalisation, a strategic innovation is the introduction of DACs (*Digital Automatic Couplers*), which automate the coupling and uncoupling of rail cars. The use of DACs has been further promoted by several European projects, including the *European DAC Delivery* [7], funded as part of *Shift2Rail*, which has identified DAC as an enabler for many advanced functionalities. As well as speeding up terminal operations, DAC's greater mechanical strength allows longer and heavier trainsets to be built and enables real-time train integrity monitoring functions, significantly improving operational safety.

However, it should be stressed that most of these solutions focus exclusively on on-board innovations, mainly on existing rolling stock or on new generation locomotives, without calling into question the overall architecture of the traditional freight train. In most cases, these are incremental improvements that improve performance, efficiency and safety, but do not radically change the concept of the freight train itself. Moreover, none of the projects currently underway proposes a systemic rethinking of the train in terms of modularity, flexibility or operational autonomy in terminals.

With this in the background, the *F-EMU* (*Freight - Electric Multiple Unit*) is an innovative freight train designed to overcome the limitations of conventional architectures. Unlike conventional freight trains, in which one or more locomotives pull a long series of passive wagons, the *F-EMU* has a modular structure in which each module contains at least one motorised unit. This allows power to be distributed throughout the trainset, improving performance in terms of acceleration, traction and operational flexibility. The train is also equipped with regenerative and electro-pneumatic braking, which allows more efficient energy management and more precise control during manoeuvring, particularly useful at railway junctions. Another feature is the possibility of using light cars for intermodal transport, such as the *Sacca60* model, which helps to optimise loads without compromising performance. Several recent studies, including [8][9][10] have analysed the functional and systemic requirements that a train of this complexity must fulfil, adopting *Model-Based System Engineering* (MBSE) and *microsimulation* approaches, which will be explored in more detail in the following chapters.

In questo scenario si inserisce il F-EMU (*Freight – Electric Multiple Unit*), un treno merci innovativo progettato per superare le limitazioni delle architetture convenzionali. A differenza dei treni merci tradizionali, nei quali una o più locomotive trainano una lunga sequenza di carri passivi, il F-EMU adotta una struttura modulare in cui ciascun modulo include almeno un'unità motorizzata. Questo consente una distribuzione della potenza lungo il convoglio, migliorando le prestazioni in termini di accelerazione, aderenza e flessibilità operativa. Il treno è inoltre dotato di frenatura rigenerativa ed elettropneumatica, che consente una gestione più efficiente dell'energia e un controllo più preciso in fase di manovra, particolarmente utile nei nodi ferroviari. Un ulteriore elemento distintivo è la possibilità di impiegare carri leggeri per il trasporto intermodale, come il modello Sacca60, che contribuisce a ottimizzare i carichi senza compromettere le prestazioni. Diversi studi recenti, tra cui [8][9][10] hanno analizzato i requisiti funzionali e sistemici che un treno di tale complessità deve soddisfare, adottando approcci basati su *Model-Based System Engineering* (MBSE) e microsimulazione, che verranno approfonditi nei capitoli successivi.

Un altro aspetto ancora poco indagato, ma di estrema rilevanza per il pieno sfruttamento delle potenzialità del F-EMU, riguarda l'integrazione di sistemi di posizionamento satellitare per il supporto alla movimentazione autonoma nei nodi ferroviari. In questi contesti, caratterizzati da basse velocità e frequenti operazioni di composizione e scomposizione, l'introduzione di tecnologie GNSS potrebbe offrire significativi vantaggi in termini di efficienza, sicurezza e riduzione dei costi operativi e del personale impiegato.

A partire dalla liberalizzazione dell'uso civile dei sistemi satellitari, il settore ferroviario ha progressivamente iniziato a esplorare le potenzialità del posizionamento satellitare per migliorare la localizzazione dei convogli e supportare l'evoluzione dei sistemi di segnalamento. Uno dei primi esempi rilevanti fu il progetto APOLO [11], attivo tra il 1998 e il 2001, che propose un approccio multi-sensore basato sul GPS, combinato con sensori inerziali. Tuttavia, l'accuratezza ottenuta — dell'ordine di dieci metri — non era sufficiente per applicazioni *safety-critical*, rendendo il sistema non idoneo ai requisiti ferroviari. Da allora, l'Unione Europea ha investito in modo sistematico in ricerca e sviluppo, finanziando numerosi progetti per esplorare e validare l'integrazione del GNSS nel contesto ferroviario. Tra i più rilevanti si annoverano ERSAT [12] [13], 3InSat [14], RHINOS [15] e GRAIL [16], che hanno affrontato diverse sfide: dalla validazione delle architetture stand-alone e aumentate [17], all'integrazione del GNSS con odometria e piattaforme inerziali, fino all'adozione di tecniche di *sensor fusion* avanzate. Questi progetti hanno puntato a garantire accuratezza, continuità e integrità del segnale, nel rispetto dei requisiti di sicurezza funzionale definiti dalle norme EN 50126 [18] e EN 50129 [19], con riferimento ai *Safety Integrity Level* (SIL) richiesti per i sistemi di segnalamento ferroviario.

Another aspect that has not yet been fully explored, but which is extremely important for fully exploiting the potential of F-EMU, is the integration of satellite positioning systems to support autonomous movement in railway nodes. In this context, characterised by low speeds and frequent couple and uncouple operations, the introduction of GNSS technologies could offer significant advantages in terms of efficiency, safety and reduction of operating costs and human resources.

After the liberalisation of the civil use of satellite systems, the railway sector has gradually started to explore the potential of satellite positioning to improve the location of trains and support the development of signalling systems. One of the first relevant examples was the APOLO project [11], active between 1998 and 2001, which proposed a multi-sensor approach based on GPS combined with inertial sensors. However, the accuracy achieved - in the order of tens of m - was not sufficient for safety-critical applications, making the system unsuitable for railway requirements. Since then, the European Union has systematically invested in research and development, funding numerous projects to explore and validate the integration of GNSS in the railway context. Among the most relevant are ERSAT [12][13], 3InSat [14], RHINOS [15] and GRAIL [16]. These projects have faced different challenges: from the validation of stand-alone and augmented architectures [17], to the integration of GNSS with odometry and inertial platforms, and the adoption of advanced sensor fusion techniques. These projects have focused on ensuring accuracy, continuity and signal integrity, in compliance with the functional safety requirements defined by EN 50126 [18] e EN 50129 [19] standards, with reference to the Safety Integrity Level (SIL) required for railway signalling systems.

Overall, the experiments carried out to date have clearly demonstrated the effectiveness of using GNSS in passenger rail transport. On the contrary, in the freight sector, the use of such technologies is still limited, both in the scientific literature and in operational applications. This is the direction of the work presented, which proposes and validates a low-cost, high-precision satellite positioning system designed for low-speed applications, compatible with the operational needs of terminals and capable of supporting the full potential of the F-EMU architecture.

3. Methodology developed

The methodology adopted for the development of the satellite positioning system and the functional design of the goods train (F-EMU) is explained below.

3.1. MBSE methodologies for F-EMU modeling and validation

Designing complex systems, such as trains, requires methodological tools that can effectively manage interaction between heterogeneous subsystems, traceability of requirements and integration of different disciplinary domains (e.g., mechanical, electrical, computer and signaling). This is the context of Model-Based Systems Engineering (MBSE),

Nel complesso, le sperimentazioni finora condotte hanno dimostrato in modo solido l'efficacia dell'utilizzo di sistemi di posizionamento satellitare nel trasporto ferroviario passeggeri. Al contrario, nel trasporto merci l'adozione di tali tecnologie è ancora limitata, sia nella letteratura scientifica che nelle applicazioni operative. È in questa direzione che si orienta il lavoro presentato, proponendo e validando un sistema di posizionamento satellitare *low-cost* e ad alta precisione, pensato per applicazioni a bassa velocità, compatibile con le esigenze operative dei terminal e in grado di supportare il pieno potenziale dell'architettura F-EMU.

3. Metodologia sviluppata

Viene illustrata di seguito la metodologia adottata per lo sviluppo del sistema di posizionamento satellitare e per la progettazione funzionale dell'elettrotreno merci (F-EMU).

3.1. Metodologie MBSE per la modellazione e la validazione del F-EMU

La progettazione di sistemi complessi, come quelli che caratterizzano un treno, richiede strumenti metodologici in grado di gestire efficacemente l'interazione tra sottosistemi eterogenei, la tracciabilità dei requisiti e l'integrazione tra domini disciplinari differenti (meccanico, elettrico, informatico, segnalamento). In tale contesto si colloca il *Model-Based System Engineering* (MBSE), un approccio metodologico che adotta modelli digitali formali e strutturati come fonte primaria di definizione e analisi del sistema. L'MBSE consente di modellare l'intero ciclo di vita di un sistema complesso, dalla definizione dei requisiti alla progettazione logica e fisica, fino alla verifica, validazione e manutenzione. Tramite linguaggi di modellazione standardizzati come SysML (*Systems Modeling Language*), è possibile descrivere in modo rigoroso le funzioni del sistema, le sue interazioni interne ed esterne, le interfacce e i vincoli, garantendo coerenza e tracciabilità bidirezionale tra i diversi livelli progettuali (Fig.1).

Nel caso specifico dello sviluppo del F-EMU, l'utilizzo dell'approccio MBSE si è rivelato particolarmente efficace per la gestione simultanea di numerosi requisiti tecnico-funzionali e per la validazione preliminare delle architetture candidate. L'architettura è stata sviluppata attraverso lo strumento *System Composer* del software MATLAB, nell'ambiente Simulink; in particolare, la funzione riguardante la manovra automatica nei terminal, denominata *MoveAlone*, è stata sviluppata come

La funzione ricopre un ruolo di

a methodological approach that uses formal, structured digital models as the primary source for system definition and analysis. MBSE makes it possible to model the entire lifecycle of a complex system, from requirements definition through logical and physical design to verification, validation and maintenance. Using standardised modelling languages such as SysML (Systems Modelling Language), it is possible to rigorously describe the functions of the system, its internal and external interactions, interfaces and constraints, ensuring bi-directional consistency and traceability between the different design levels (Fig. 1).

In the specific case of the development of the F-EMU, the use of the MBSE approach proved to be particularly effective for the simultaneous treatment of numerous technical-functional requirements and for the preliminary validation of candidate architectures. The architecture was developed using the System Composer tool of the MATLAB software, in the Simulink environment; in particular, the automatic manoeuvring function in the terminals, called MoveAlone, has been developed as can be seen in Fig. 2.

This function plays an interesting role in terms of the innovations brought by the F-EMU. Each module is equipped with an energy storage system and can move independently of the others. This is represented by the "ProvideEE" function, in which electrical energy is input into the subsystem. During line traction, each module recovers electrical energy from the pantograph. Through the "RestoreEE" function, this energy recharges the batteries distributed along the convoy. These batteries are sized to provide energy for manoeuvring in terminals at a maximum speed of 30 km/h for three consecutive hours under full load. The electrical energy is converted into mechanical energy in the "ConvertEEinME" function and it is physically expressed by the electric motors. The control unit, expressed by the "Unit Control" function, performs several tasks, including checking the residual charge, receiving the mission plan from the terminal con-

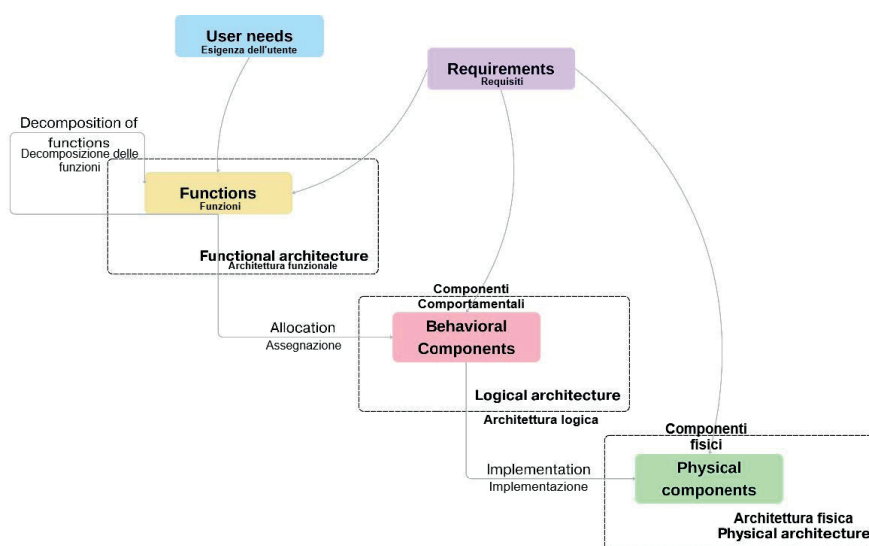


Figura 1 - Architettura funzionale, logica e fisica alla base del MBSE.
Figure 1 - Functional, logical and physical architecture underlying the MBSE.

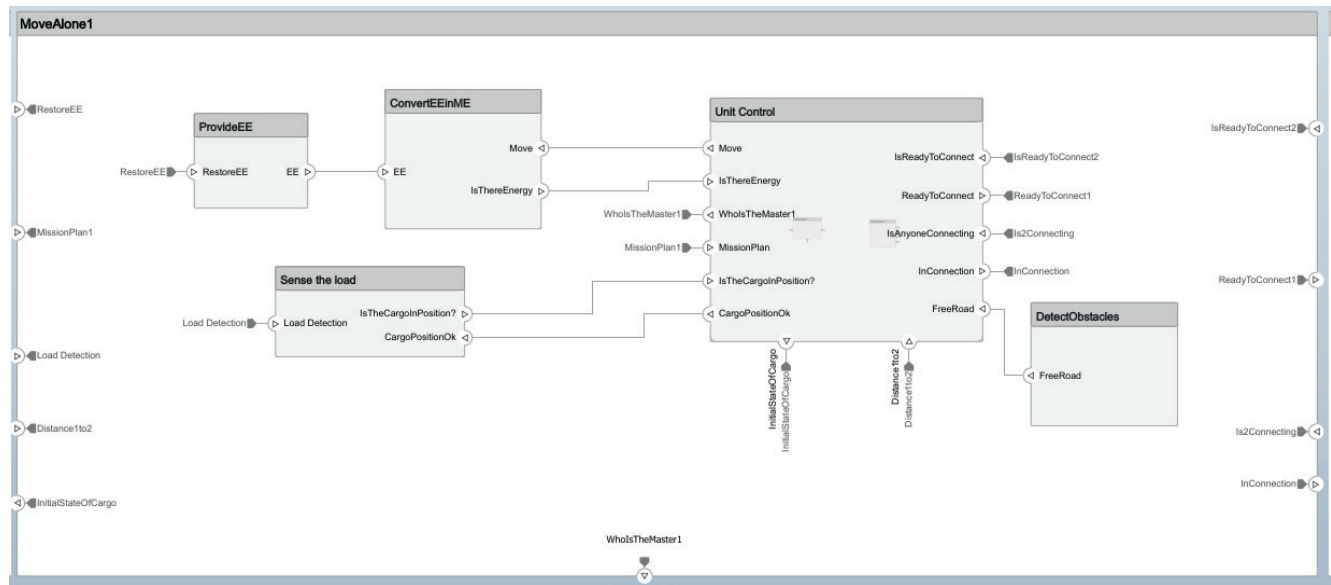


Figura 2 - Funzione di manovra automatica nei terminali sviluppata in System Composer.
 Figure 2 - Automatic terminal manoeuvring function developed in System Composer.

particolare interesse in termini di innovazioni portate dal F-EMU. Infatti ogni modulo, possedendo un sistema di stoccaggio energetico, può muoversi in modo autonomo rispetto agli altri. Questo è rappresentato dalla funzione "ProvideEE" in cui l'energia elettrica è un input del sottosistema. Ogni modulo durante la trazione in linea, recupera energia elettrica dal pantografo e tramite "RestoreEE" va a ricaricare delle batterie distribuite lungo il convoglio. Queste ultime sono dimensionate in modo da poter fornire energia per le manovre nei terminali con una velocità massima di 30 km/h per tre ore consecutive e a pieno carico. L'energia elettrica viene convertita in energia meccanica nella funzione "ConvertEEinME", fisicamente espressa dai motori elettrici. La centralina di controllo espressa dalla funzione "Unit Control" svolge diverse funzioni tra cui controllare la carica residua, ricevere il piano di missione dal posto di comando e controllo del terminal (esterno al sistema treno), assicurarsi che la via sia libera e che l'allineamento con altri moduli sia garantito per stabilire la connessione tramite accoppiatore automatico. Si adotta un approccio gerarchico master-slave tra i moduli per stabilire le connessioni. Si noti come gli input e output "isAnyoneConnecting", "InConnection", "IsReadyToConnect" e "ReadyToConnect" costituiscano un handshake di dati tra due moduli in tentativo di connessione. Il sistema di comunicazione veicolo-veicolo e veicolo-infrastruttura non è stato ancora progettato fisicamente, ma si ritiene plausibile una comunicazione con protocollo 5G (ad esempio FRMCS).

All'interno di questa architettura funzionale si inserisce il sistema di posizionamento satellitare oggetto di questo studio, concepito per fornire informazioni accurate sulla posizione del convoglio e impiegato come supporto alle operazioni di manovra automatica nei terminali ferro-

rol room (external to the train system), ensuring the path is clear, and aligning with other modules to establish a connection via an automatic coupler. A hierarchical master-slave approach is used to establish connections between modules. Note that the inputs and outputs "isAnyoneConnecting," "InConnection," "IsReadyToConnect," and "ReadyToConnect" constitute a data handshake between two modules during a connection attempt. Although the vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure communication system has not yet been physically designed, 5G protocol communication (e.g., FRMCS) is considered plausible.

This functional architecture incorporates the satellite positioning system, which is the focus of this study. It is designed to provide accurate convoy position information and support automatic shunting operations in rail terminals. Satellite location enables each module to comply with its assigned mission from the terminal control room during autonomous maneuvering. Location information complements obstacle detection systems (e.g., LIDAR) to provide precise data on the relative positions of the modules.

Although a full FMECA analysis of the automated shunting subsystem has not yet been conducted, based on the assigned function of positioning, the estimated required Safety Integrity Level (SIL) is SIL 2 rather than SIL 4, which is required for signalling protection functions. If the FMECA analysis reveals a high severity level for certain failure scenarios, the plan is to implement appropriate mitigation measures, including introducing redundancy in the most critical components of the system, such as proximity sensors.

Standard intermodal handling of intermodal transport units (ITUs) by rail-mounted gantry cranes (RMGs) occurs "vertically," meaning the crane lifts an ITU, moves along the train, and lifts another ITU. This process is typically repeated twice per train (i.e., unloading and loading) and often

viari. Infatti, la posizione satellitare consente di garantire il rispetto della missione affidata ad ogni modulo dal posto di comando e controllo del terminal, durante le manovre autonome. La localizzazione si aggiunge ai sistemi di rilevamento ostacoli (ad esempio LIDAR), per fornire informazioni esatte sulla posizione relativa tra i moduli.

Al momento non è stata ancora condotta un'analisi FMECA completa del sottosistema di manovra automatica; tuttavia, sulla base della funzione assegnata al posizionamento si stima che il livello di integrità della sicurezza (SIL) richiesto sia pari a SIL 2, e non SIL 4, come avviene per le funzioni di protezione del segnalamento. Nel caso in cui l'analisi FMECA dovesse evidenziare un livello di *severity* elevato per determinati scenari di guasto, si prevede di adottare opportune misure di mitigazione, tra cui l'introduzione di ridondanza nei componenti più critici del sistema, come ad esempio i sensori di prossimità.

La movimentazione intermodale standard delle UTI (Unità di Trasporto Intermodale) tramite gru a cavalletto montate su rotaia (RMG) avviene "in verticale", ovvero la gru solleva un'UTI, si sposta longitudinalmente al treno e gestisce un'altra UTI. Tipicamente, questo processo viene ripetuto due volte per ogni treno (cioè scarico e carico), coinvolgendo spesso più RMG che operano parallelamente. Tuttavia, il movimento longitudinale della RMG è più lento e consuma più energia rispetto ai movimenti della presa in direzione orizzontale, cioè perpendicolare al treno. Per treni più lunghi, ciò comporta tempi di movimentazione più lunghi o la necessità di RMG aggiuntive.

Per accelerare questo processo e soddisfare il requisito di flessibilità nell'esercizio nei terminal, può essere implementato un concetto di movimentazione dinamica "orizzontale" utilizzando tecnologie di manovra autonoma. Posizionando moduli in coppie o triplette parallelamente tra loro in terminali con più binari operativi, è possibile aumentare l'efficienza delle operazioni delle RMG. Questa configurazione consente la movimentazione simultanea di più UTI da una singola posizione su binari differenti.

I test di validazione del sistema di posizionamento, come verrà illustrato nei successivi paragrafi, sono stati condotti in un ambiente simile a un terminal (cioè cielo aperto con strutture metalliche circostanti) dimostrano che il sistema è in grado di garantire una precisione nelle condizioni ottimali, e comunque inferiore ai 4 m anche nei casi meno favorevoli, risultando pertanto conforme ai requisiti richiesti per applicazioni in ambito ferroviario anche a bassa velocità [20][21].

3.2. Principi e metodi del posizionamento satellitare ad alta precisione

Il posizionamento satellitare (Fig. 3) si basa sulla stima della distanza tra un ricevitore - di cui non si conoscono le coordinate - e ciascun satellite visibile nel segmento spaziale, attraverso misure basate sul codice o sulla fase della portante [22]. Il posizionamento di codice si basa sulla

involves multiple RMGs operating in parallel. However, longitudinal RMG movement is slower and consumes more energy than horizontal movement, i.e., movement perpendicular to the train. For longer trains, this results in longer handling times or the need for additional RMGs.

To speed up the process and increase flexibility in terminal operations, a "horizontal" dynamic handling concept can be implemented using autonomous shunting technologies. In terminals with multiple operating tracks, placing modules in pairs or triplets parallel to each other increases the efficiency of RMG operations. This configuration allows for the simultaneous handling of multiple ITUs from a single position on different tracks.

As will be explained in the following sections, the validation tests of the positioning system were conducted in a terminal-like environment (i.e., open sky with surrounding metal structures). These tests show that the system can guarantee an accuracy of less than 4 meters under optimal conditions and in the least favourable cases. Thus, the system is compliant with the requirements for applications in the railroad environment, even at low speeds [20][21].

3.2. Principles and methods of high precision satellite positioning

Satellite positioning (Fig. 3) is based on the estimation of the distance between a receiver - whose coordinates are unknown - and each visible satellite in the space segment, through measurements based on code or carrier phase [22]. Code-based positioning is based on the measurement of the time taken by the signal to travel the distance between satellite and receiver, calculated by comparing the pseudo-random code (PRN) transmitted by the satellite with that generated locally by the receiver.

$$P_i^j(t) = \sqrt{(X_i - U_x)^2 + (Y_i - U_y)^2 + (Z_i - U_z)^2} + c(dT_u) = PSR \quad (1)$$

Equation (1) represents the basic model of GNSS code positioning, also known as absolute or stand-alone positioning. It describes the pseudorange (PSR), i.e. the apparent distance between the satellite (with known coordinates) and the receiver (with unknown coordinates), calculated as the sum of the geometric distance and a correction term related to the receiver clock error. The solution of the system of equations obtained from at least four satellites allows the three spatial coordinates of the receiver and the time error to be estimated simultaneously.

Phase positioning is based on the measurement of the carrier phase of the electromagnetic signal transmitted by the satellite.

$$P_i^j(t) = \rho_i^j(t) + N_i^j \lambda + f^j \Delta \delta_i^j(t) \quad (2)$$

In this case, the distance is measured as the sum of three components: the geometric distance between the satellite and the receiver $\rho(t)$, the phase ambiguity multiplied by the wavelength $N\lambda$ and a factor that considers residual errors due to dynamic effects, a noise and residual corrections. This method

misura del tempo impiegato dal segnale per percorrere la distanza tra satellite e ricevitore, calcolato mediante il confronto tra il codice pseudo-casuale trasmesso dal satellite e quello generato localmente dal ricevitore.

$$P_i^j(t) = \sqrt{(X_i - U_x)^2 + (Y_i - U_y)^2 + (Z_i - U_z)^2} + c(dt_u) = PSR \quad (1)$$

L'equazione (1) rappresenta il modello di base del posizionamento GNSS di codice, noto anche come posizionamento assoluto o stand-alone. Essa descrive la *pseudo-range* (PSR), ovvero la distanza apparente tra il satellite (di coordinate note) e il ricevitore (di coordinate sconosciute), calcolata come somma tra la distanza geometrica e un termine correttivo legato all'errore dell'orologio del ricevitore. La soluzione del sistema di equazioni ottenuto da almeno quattro satelliti consente di stimare simultaneamente le tre coordinate spaziali del ricevitore e l'errore temporale.

Il posizionamento di fase, al contrario, si basa sulla misura della fase della portante del segnale elettromagnetico trasmesso dal satellite.

$$P_i^j(t) = \rho_i^j(t) + N_i^j \lambda + f^j \Delta \delta_i^j(t) \quad (2)$$

In questo caso la distanza è misurata come somma di tre componenti: la distanza geometrica tra satellite e ricevitore $\rho(t)$, l'ambiguità di fase moltiplicata per la lunghezza d'onda $N\lambda$ e un fattore che tiene conto di errori residui dovuto a effetti dinamici, rumore e correzioni residue. Questa metodologia sfrutta la lunghezza d'onda molto più corta della portante, consentendo una stima della distanza con una precisione potenziale fino al livello centimetrico o millimetrico. Tuttavia, per raggiungere tali livelli di accuratezza, è necessario risolvere correttamente l'ambiguità del numero intero di cicli (N) tra il satellite e il ricevitore, un problema noto come *carrier phase ambiguity resolution*. Sebbene più complesso dal punto di vista computazionale, questo approccio rappresenta la base per tecniche ad alta precisione quali RTK (*Real-Time Kinematic*) e NRTK (*Network RTK*), nelle quali le misure di fase vengono integrate con correzioni provenienti da una stazione o da una rete di stazioni permanenti per la stima differenziale della posizione in tempo reale. L'equazione di posizionamento viene quindi riscritta tenendo conto delle correzioni, come segue:

$$P = \rho + d_p + c(dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} + \epsilon_{mp} + \epsilon_p \quad (3)$$

Dove ρ è la misurazione reale, d_p rappresenta l'errore nelle orbite satellitari, $c(dt - dT)$ è la componente che tiene conto dello sfasamento temporale degli orologi del ricevitore e del satellite, d_{ion} e d_{trop} rappresentano il ritardo dovuto all'attraversamento della ionosfera e della troposfera, ϵ_{mp} rappresenta il *multipath* e ϵ_p il rumore nella ricezione del segnale dal ricevitore.

Proprio in virtù dei requisiti di accuratezza, continuità e affidabilità imposti dalle applicazioni ferroviarie, in particolare nei contesti di localizzazione associati ai sistemi di segnalamento avanzati, nel presente lavoro si è

exploits the much shorter wavelength of the carrier, allowing distance estimation with potential accuracy to the centimetre or millimetre level. However, to achieve this level of accuracy, it is necessary to correctly resolve the ambiguity between the satellite and receiver over an integer number of cycles (N), a problem known as carrier phase ambiguity resolution. Although more computationally intensive, this approach provides the basis for high accuracy techniques such as Real-Time Kinematic (RTK) and Network RTK (NRTK), where phase measurements are supplemented with corrections from a station or network of permanent stations for real-time differential position estimation. The positioning equation is then rewritten to take account of the corrections, as follows:

$$P = \rho + d_p + c(dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} + \epsilon_{mp} + \epsilon_p \quad (3)$$

Where ρ is the real measurement, d_p is the satellite orbit error, $c(dt - dT)$ is the component taking into account the time lag between the receiver and satellite clock, d_{ion} e d_{trop} are the ionospheric and tropospheric crossing delays, ϵ_{mp} is the multipath and ϵ_p is the noise in the reception of the signal from the receiver.

It is precisely because of the requirements of accuracy, continuity and reliability imposed by railway applications, especially in the context of localisation associated with advanced signalling systems, that the Network Real-Time Kinematic (NRTK) technique [24], and in particular the Virtual Reference Station (VRS) method, was chosen in this work. This technique allows the virtual creation of a reference station in the proximity of the mobile receiver (rover), based on the data observed by the real stations belonging to the network. In this way, a virtually very small baseline is obtained, which significantly improves the quality of the differential corrections and reduces the systematic errors due to the distance between the receiver and the station. Spatial interpolation of the residuals between the different stations in the network effectively mitigates baseline errors and thus improves the overall accuracy of the solution. Corrections are provided in real time using standard protocols such as NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) and are supplemented by the rover receiver with carrier phase measurements to resolve ambiguities.

In the present work, two different free differential correction services were used, both accessible after registering, but with different architectures and operating modes: the first service is free, the second is not:

- *The first is the SPIN3 GNSS service [25]: it exploits a network of 39 permanent stations distributed across Lombardy, Piedmont and Valle d'Aosta and provides differential corrections both in real time through the NTRIP protocol and in post-processing for data processing.*
- *The second service is Galileo HAS (High-Accuracy Service) [26], recently developed by EUSPA (European Union Agency for the Space Programme), which provides real-time corrections via the Internet using the HTTPS protocol, directly using signals from the Galileo constellation. This approach eliminates the need for an extended terrestrial infrastructure by directly exploiting the space segment for the distribution of corrections.*

scelto di adottare la tecnica *Network Real-Time Kinematic* (NRTK) [24], e in particolare il metodo *Virtual Reference Station* (VRS). Questa tecnica consente la creazione virtuale di una stazione di riferimento in prossimità del ricevitore mobile (rover), sulla base dei dati osservati dalle stazioni reali appartenenti alla rete. In questo modo, si ottiene una baseline virtualmente molto ridotta, migliorando sensibilmente la qualità delle correzioni differenziali e riducendo gli errori sistematici dovuti alla distanza tra ricevitore e stazione. L'interpolazione spaziale dei residui tra le diverse stazioni della rete consente di mitigare in modo efficace gli errori legati alla distanza (baseline) e migliorare così l'accuratezza complessiva della soluzione. Le correzioni vengono fornite in tempo reale attraverso protocolli standard come NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) e integrate dal ricevitore rover con le misure di fase della portante, al fine di risolvere l'ambiguità.

Nel presente lavoro sono stati utilizzati due diversi servizi gratuiti di correzione differenziale, entrambi accessibili previa registrazione, ma con architetture e modalità operative distinte:

- Il primo è il servizio SPIN3 GNSS (Servizio di Posizionamento Interregionale) [25]: esso sfrutta una rete di 39 stazioni permanenti distribuite tra Lombardia, Piemonte e Valle d'Aosta e fornisce correzioni differenziali sia in tempo reale attraverso il protocollo NTRIP sia in post-processamento per l'elaborazione dei dati.
- Il secondo servizio è Galileo HAS (*High-Accuracy Service*) [26], sviluppato recentemente dall'EUSPA (*European Union Agency for the Space Programme*), che fornisce correzioni in tempo reale via Internet tramite il protocollo HTTPS, utilizzando direttamente i segnali della costellazione Galileo. Questo approccio elimina la necessità di un'infrastruttura terrestre estesa, sfruttando direttamente il segmento spaziale per la distribuzione delle correzioni.

Una rappresentazione schematica degli strumenti e dei software impiegati nel presente lavoro è fornita nella Fig. 4, al fine di offrire una visione d'insieme chiara e sintetica dell'architettura operativa adottata.

Non conoscendo a priori le prestazioni del sistema proposto in condizioni operative realistiche, si è proceduto con una fase di test e validazione condotta su un veicolo stradale in ambiente urbano, simulando fedelmente le condizioni tipiche dei terminal ferroviari merci, comprese le basse ve-

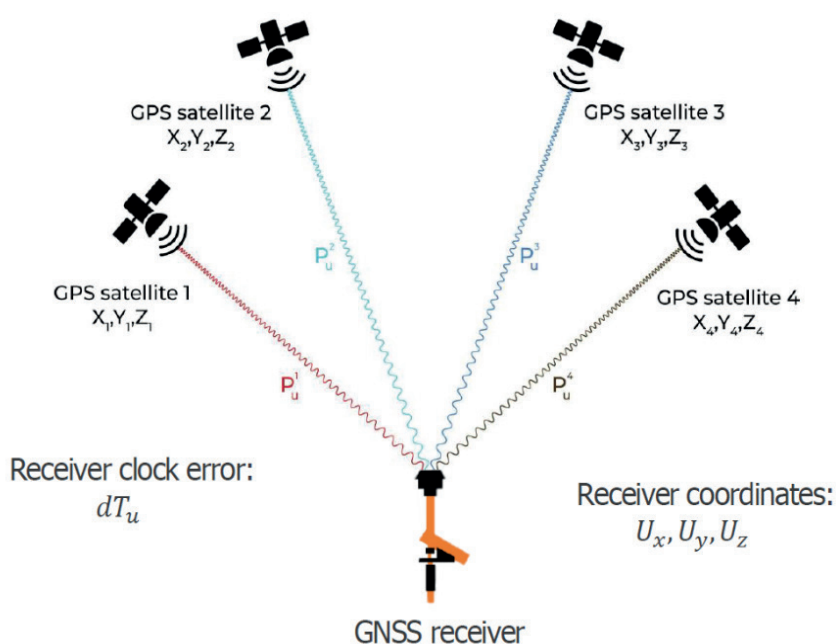


Figura 3 – Posizionamento assoluto o stand-alone con ricevitore geodetico GNSS ed almeno quattro satelliti in vista [23].
 Figure 3 – Absolute or stand-alone positioning with GNSS geodetic receiver and at least four satellites in view [23].

A schematic representation of the tools and software used in this work is provided in Fig. 4, offering a clear and concise overview of the adopted operational architecture.

Since the performance of the proposed system under realistic operating conditions was not known in advance, a test and validation phase were carried out on a road vehicle in an urban environment. This closely simulated the typical conditions of freight railway terminals, including the low operating speeds and complex manoeuvres that characterise such environments.

3.3. System architecture and equipments

As mentioned in the previous sections, the F-EMU has a modular design (Fig.5), which makes it easily adaptable to multiple contexts, allowing it to reach an overall length of 750 m with a total mass of 2310 tonnes.

The main features and performance of the F-EMU are described in Tab.1.

The proposed GNSS receiver, given its small size and minimal required space, can be easily installed on the train modules without modifying the gabarit of the train. To validate its performance, in addition to verifying the absolute accuracies obtained under different operating conditions, a direct comparison was made with two parallel measurement systems. The first is based on a professional GNSS receiver, which is more expensive and has higher technical specifications than the receiver under study; the second uses a total station for point collimation, independent of the satellite system. The latter method

locità operative e le manovre complesse che caratterizzano tali ambienti.

3.3. Architettura del sistema e strumentazione

Come accennato nelle sezioni precedenti, il F-EMU ha un design modulare (Fig. 5) che lo rende facilmente adattabile a molteplici contesti, permettendogli di raggiungere una lunghezza complessiva di 750 m con una massa totale di 2310 tonnellate.

Le caratteristiche principali e le prestazioni del F-EMU sono descritte in Tab.1.

Il ricevitore satellitare proposto, grazie alle sue dimensioni ridotte e all'ingombro minimo, può essere facilmente installato sui moduli del convoglio senza alterare la sagoma limite del treno. Al fine di validarne le prestazioni, oltre alla verifica delle accuratezze assolute ottenute nelle diverse condizioni operative, è stato effettuato un confronto diretto con due sistemi di misurazione paralleli. Il primo si basa su un ricevitore satellitare professionale, caratterizzato da un costo più elevato e da specifiche tecniche superiori rispetto al ricevitore oggetto di studio; il secondo utilizza una stazione totale per la collimazione dei punti, indipendente dal sistema satellitare. Quest'ultimo metodo è stato adottato come sistema di riferimento assoluto per la valutazione sperimentale, grazie alla sua elevata precisione e all'affidabilità nelle misure in ambienti controllati. Il setup strumentale adottato per l'acquisizione dei dati è illustrato in Fig. 6.

In aggiunta alle tre tecniche di posizionamento utilizzate, i file di output sono stati elaborati utilizzando due approcci diversi:

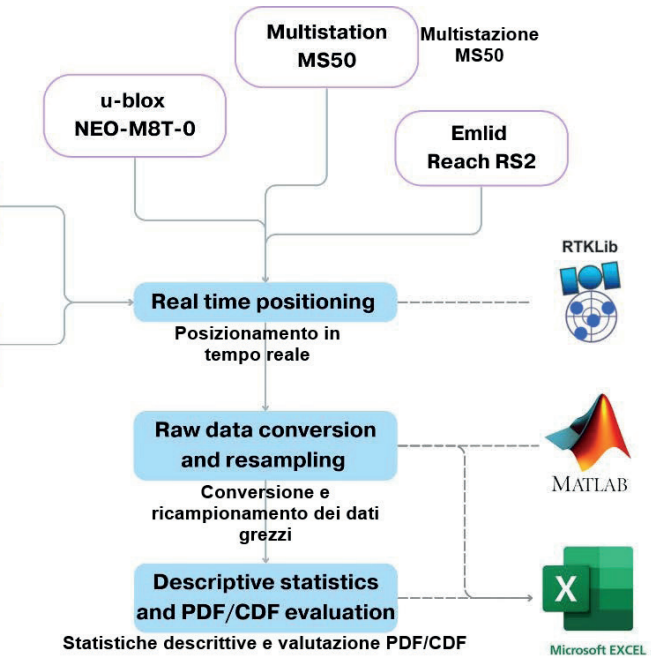


Figura 4 - Diagramma di flusso del sistema di posizionamento GNSS con i relativi software e strumenti utilizzati.
 Figure 4 - Flow chart of the GNSS positioning system with related software and tools used.

was chosen as the absolute reference system for the experimental evaluation due to its high precision and reliability in measurements in controlled environments. The instrumental setup adopted for data acquisition is shown in Fig. 6.

In addition to the three positioning techniques used, the output files were processed using two different approaches:

- direct analysis of the generated data;
- relative kinematic post-processing (PPK), using the RINEX file of the SPIN3 station closest to the test site.

The first approach provides a direct assessment of the positioning accuracy based solely on the raw data obtained in real time from both the receiver and the stations, while the latter



Figura 5 - Esempio di composizione di un F-EMU con modulo elementare formato da 3 carri a composizione bloccata e con le unità di testa e coda.

Figure 5 - Example of the composition of a F-EMU with an elementary module consisting of 3 wagons with blocked composition and the head and tail units.

- analisi diretta dei dati generati;
- post-elaborazione relativa cinematica (PPK), utilizzando il file RINEX della stazione SPIN3 più vicina al sito di prova.

Il primo approccio fornisce una valutazione diretta dell'accuratezza del posizionamento basandosi esclusivamente sui dati grezzi ottenuti in tempo reale, sia del ricevitore che delle stazioni, mentre il secondo affina i risultati del posizionamento incorporando dati di correzione dalla stazione di riferimento SPIN3 più vicina per migliorare ulteriormente l'accuratezza mitigando gli errori. Quest'ultimo rappresenterà un ulteriore confronto per la soluzione in tempo reale, in quanto è considerata la migliore soluzione che si possa ottenere con questa configurazione complessiva.

Una panoramica degli strumenti utilizzati è presentata nella Tab. 2.

I file contenenti le soluzioni di posizionamento ottenute dai tre strumenti sono stati convertiti nel sistema cartografico ENU (East-North-Up), riferito al sistema di coordinate UTM 32N, attraverso la funzione 'deg2utm' di MATLAB [27], al fine di disporre di un riferimento spaziale comune per l'analisi e il confronto dei dati. Per quanto riguarda la frequenza di acquisizione, i due ricevitori satellitari operano con una frequenza di un campionamento al secondo, mentre la stazione totale registra dati con una frequenza di 4 campionamenti al secondo. Si è quindi reso necessario effettuare un *downsampling* della serie temporale della stazione totale, in modo da uniformare il numero di osservazioni e garantire la sincronia temporale tra tutti i sistemi di misura coinvolti. Inoltre, i dataset sono stati filtrati escludendo tutte le osservazioni prive di soluzione "fissata", ovvero quei punti in cui il ricevitore non riceveva correzioni differenziali né dalla rete di stazioni permanenti né dal servizio Galileo, compromettendo la qualità del dato. Questo passaggio ha garantito l'inclusione nel confronto soltanto delle posizioni determinate con elevato livello di affidabilità. Per ogni test sono state poi calcolate le differenze assolute tra le coordinate Est e Nord e quelle planimetriche (2D) con entrambi i ricevitori con riferimento la stazione totale, insieme all'errore medio e alla deviazione standard di ciascun test.

Tabella 1 – *Table 1*
Caratteristiche dimensionali e parametri prestazionali del F-EMU
Dimensional characteristics and performance parameters of the F-EMU

Lunghezza del carro <i>Car length</i>	20 m
Lunghezza del modulo <i>Module length</i>	60 m
Numero di assili <i>Drive axles</i>	12
Assili motori <i>Axle load</i>	4
Carico assiale <i>Car mass</i>	17.5 t
Massa del carro <i>Module mass</i>	70 t
Massa del modulo <i>Adherent mass</i>	210 t
Massa aderente <i>Adherent mass</i>	70 t
% massa aderente <i>% adhering mass</i>	33%
Velocità massima <i>Maximum speed</i>	160 km/h
Resistenza da fermo <i>Resistance at standstill</i>	0.018 t/t
Resistenza a regime (v=160 km/h) <i>Resistance at steady speed (v=160 km/h)</i>	0.028 t/t
Sforzo a regime <i>Steady-state effort</i>	364 kN
Potenza totale <i>Total power</i>	27.91 MW

refines the positioning results by incorporating additional correction data from the nearest SPIN3 reference station to further improve accuracy by mitigating errors. The latter will provide a further comparison for the real-time solution, as it is the best that can be achieved with this overall configuration.

An overview of the tools used is given in Tab. 2.

The files containing the positioning solutions obtained

Tabella 2 – *Table 2*

Panoramica della strumentazione utilizzata
Overview of instrumentation used

Ricevitore low-cost <i>Low-cost receiver</i>	Ricevitore professionale <i>Professional receiver</i>	Stazione totale <i>Total station</i>
u-blox NEO-M8T-0	Emlid Reach RS2	Leica Multistation MS50
modulo GNSS ad alta precisione <i>high-precision GNSS module</i> poco ingombro <i>small footprint</i> prezzo: 96 \$ <i>price: 96 \$</i>	modulo GNSS multi-banda ad alta precisione <i>high-precision multi-band GNSS module</i> medio ingombro <i>medium footprint</i> prezzo: 2,499 \$ <i>price: 2,499\$</i>	precisione molto alta <i>very high precision</i> frequenza di campionamento molto alta <i>very high sampling rate</i> prezzo: 20,000\$ <i>price: 20,000\$</i>

4. Caso studio: l'Interporto di S.I.TO modellato in micro-simulazione e la campagna di test su strada

Per rappresentare fedelmente l'ambiente operativo e le manovre caratteristiche del trasporto ferroviario merci, è stato scelto come riferimento il terminal intermodale situato all'interno dell'Interporto di SITO (Società Interporto di Torino), uno dei più importanti poli logistici del Nord-Ovest Italia. Il terminal intermodale, oggetto dello studio, è dotato di 3 binari di presa e consegna e 4 binari operativi, con lunghezze comprese tra i 550 e i 750 m per adeguarsi alle nuove normative europee.

L'intera area è stata modellata all'interno della suite TRENO/trenissimo [28], una piattaforma software integrata per la simulazione d'esercizio ferroviario. In particolare:

- TRENO si occupa della macrosimulazione della circolazione ferroviaria su rete, considerando flussi, orari e conflitti di traffico;
- trenissimo consente una microsimulazione dettagliata, modellando il comportamento dinamico dei veicoli, le interazioni con l'infrastruttura e i sistemi di segnalamento.

from the three instruments were converted into the ENU (East-North-Up) cartographic system, referring to the UTM 32N coordinate system, through the MATLAB 'deg2utm' function [27], to have a common spatial reference for data analysis and comparison. In terms of acquisition frequency, the two GNSS receivers operate at a rate of one sampling per second, while the total station records data at a rate of 4 samplings per second. It was therefore necessary to downsample the time series of the total station to standardise the number of observations and ensure temporal synchrony between all the measurement systems involved. In addition, the datasets were filtered by excluding all observations without a 'fixed' solution, i.e. those points where the receiver did not receive differential corrections either from the network of permanent stations or from the Galileo service, thus compromising the quality of the data. This step ensured that only positions determined with a high level of reliability were included in the comparison. The absolute differences between east and north coordinates and planimetric (2D) coordinates were then calculated for each test with both receivers referencing the total station, together with the mean error and standard deviation for each test.

4. Case study: the S.I.TO Hub modelled in micro-simulation and the road test campaign

The intermodal terminal located in the freight village of SITO (Società Interporto di Torino), one of the most important logistics hubs in the north-west of Italy, was chosen as a reference to faithfully represent the operational environment and manoeuvres that characterise rail freight transport. The intermodal terminal, the subject of the study, is equipped with 3 pick-up and delivery tracks and 4 operating tracks, ranging in length from 550 to 750 m, to comply with the new European regulations.

The entire area was modelled within the TRENO/trenissimo suite [28], an integrated software platform for railway operation simulation. In particular:

- TRENO deals with the macro-simulation of railway traffic on the network, taking into account flows, timetables and traffic conflicts;
- trenissimo allows detailed micro-simulation, modelling the dynamic behaviour of vehicles, interactions with the infrastructure and signalling systems.

The model realised with trenissimo uses a double-vertex graph representation based on arcs and nodes to describe the railway network in a structured way.



Figura 6 – Disposizione della strumentazione su veicolo stradale per la validazione del sistema GNSS.

Figure 6 – Arrangement of instrumentation on road vehicle for GNSS validation.

Il modello realizzato tramite trenissimo adotta una rappresentazione a grafo, basata su archi e nodi, per descrivere in modo strutturato la rete ferroviaria. In particolare, ogni nodo è rappresentato da due seminodi distinti, al fine di gestire in modo esplicito il senso di percorrenza su tratte bidirezionali. I nodi rappresentano punti significativi della linea (giunzioni, cambi di pendenza, conta-assi, punti chilometrici, variazioni di velocità), mentre gli archi modellano i tratti di binario compresi tra due nodi successivi. Gli archi contengono invece tutte le informazioni necessarie per il corretto funzionamento della simulazione, tra cui la chilometrica di inizio e fine, la lunghezza, la pendenza longitudinale, il raggio di curvatura, la resistenza specifica (es. in galleria) e il rango di circolazione. Il modello sviluppato è illustrato in Fig.7.

Dal punto di vista dinamico, per la valutazione delle resistenze al moto ordinarie dei vagoni motorizzati, viene impiegata la formula di Davis, espressa nella forma:

$$R_o = A + Bv^2 \quad (4)$$

Dove R è la resistenza totale espressa in N, v è la velocità del veicolo in m/s e A e B sono coefficienti empirici che tengono conto rispettivamente della resistenza meccanica e della resistenza aerodinamiche, valutati numericamente come coefficienti di Strahl con valori $A = 2.5 \text{ N/kN}$ e $B = 0.0004 \text{ N/kN}$.

Per quanto riguarda invece la resistenza in curva, si fa riferimento alla formula di von Röckl, che stima la forza resistente generata dalla percorrenza in curva come segue:

$$R_c = \frac{a}{R - b} \quad (5)$$

Dove R è il raggio di curvatura espresso in m mentre a e b sono parametri dipendenti dal raggio e dallo scartamento (in questo caso 1435 mm).

Oltre alla modellazione dell'infrastruttura, la simulazione richiede l'inserimento dei dati tecnici del convoglio, necessari per la corretta rappresentazione del suo comportamento dinamico. Tra questi rientrano la caratteristica meccanica della locomotrice, le proprietà geometriche e di massa dei carri, il grado di frenatura e i parametri utili al calcolo delle resistenze al moto (Tab.1).

Each node is represented by two different half-nodes in order to explicitly manage the direction of travel on bidirectional lines. Nodes represent significant points on the line (junctions, grade changes, axle counters, mileage points, speed variations), while arcs model the sections of line between two successive nodes. The arcs, on the other hand, contain all the information necessary for the simulation to work properly, including the start and end mileage, length, longitudinal gradient, radius of curvature, specific resistance (e.g. in tunnels) and traffic rank. The model developed is shown in Fig. 7.

From a dynamic point of view, the Davis formula is used to evaluate the normal motion resistances of motorised carriages as follows:

$$R_o = A + Bv^2 \quad (4)$$

Where R is the total resistance expressed in N, v is the vehicle speed in m/s and A and B are empirical coefficients that take into account mechanic and aerodynamic resistance respectively, numerically expressed as Strahl coefficients with $A = 2.5 \text{ N/kN}$ and $B = 0.0004 \text{ N/kN}$.

About the curve resistance, reference is made to the von Röckl formula, which estimates the resistance force generated by cornering as follows:

$$R_c = \frac{a}{R - b} \quad (5)$$

Where R is the radius of curvature expressed in m, while a and b are parameters depending on the radius and gauge (in this case 1435 mm).

In addition to modelling the infrastructure, the simulation requires the input of the technical data of the trainset, which is necessary for the correct representation of its dynamic behaviour. These include the mechanical characteristics of the locomotive, the geometric and mass properties of the wagons, the degree of braking and the parameters useful for calculating the resistance to motion (Tab.1).

4.1. Results

From the simulation, it was possible to derive the travel times, braking distances and operating speeds of a freight

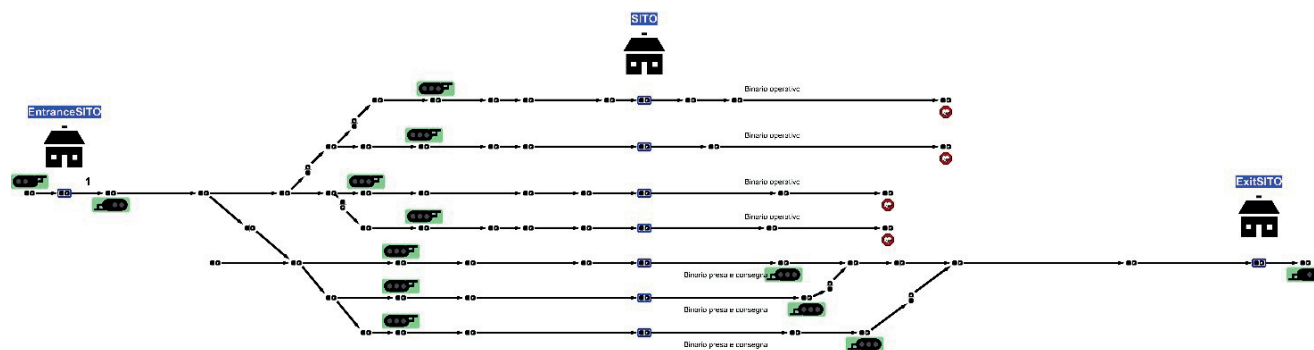


Figura 7 - Terminal intermodale, modello microscopico ad archi e nodi.
Figure 7 - Intermodal terminal, microscopic arc and node model.

4.1. Risultati

La simulazione condotta ha consentito di ricavare i tempi di percorrenza, gli spazi di frenata e le velocità operative di un treno merci in fase di avvicinamento a uno dei binari del terminal, pronto per le operazioni di scarico. Per garantire la coerenza con le normative vigenti e le reali condizioni di esercizio, il limite di velocità è stato inizialmente fissato a 10 km/h, valore comunemente adottato per la marcia nei terminal intermodali. Tuttavia, sono stati eseguiti anche test a velocità inferiori, considerando che, secondo le prescrizioni operative di Rete Ferroviaria Italiana (RFI), la velocità nei piazzali e nei cortili ferroviari si mantiene generalmente nell'intervallo compreso tra 5 e 10 km/h.

I dati ottenuti dalla simulazione sono stati successivamente impiegati per guidare le manovre del veicolo stradale utilizzato nella fase di validazione sperimentale del sistema di posizionamento, sfruttando gli strumenti precedentemente descritti.

Sono stati effettuati un totale di 8 test, per valutare l'affidabilità e la ripetibilità delle soluzioni ricavate dal ricevitore low cost.

In Tab. 3 sono riassunti i risultati ottenuti da tutti i test effettuati in coordinate Nord-Est.

Nella Tab. 4 è possibile apprezzare gli errori medi e le deviazioni standard in direzione parallela e trasversale alla direzione di marcia per il ricevitore u-blox a basso costo. Per calcolare questi errori è stato effettuato un cambio di coordinate dal sistema di riferimento Nord-Est a quello parallelo alla direzione identificata dalla collimazione dei punti della stazione totale, considerato come riferimento per il veicolo. Il valore assoluto dell'errore è tale da garantire l'identificazione del binario occupato (il caso peggiore si attesta su 2 m), sia il rispetto della traversa limite se previsto dal piano di missione ricevuto dal posto di comando e controllo del terminal.

Vengono riportate anche, a titolo dimostrativo, la solu-

train approaching one of the terminal's tracks, ready for unloading. To ensure consistency with current regulations and real operating conditions, the speed limit was initially set at 10 km/h, a value commonly adopted for running in intermodal terminals. However, tests were also carried out at lower speeds, considering that, according to the operating rules of the Rete Ferroviaria Italiana (RFI), the speed in stations and yards is generally maintained between 5 and 10 km/h.

The data obtained from the simulation were then used to guide the manoeuvres of the road vehicle used in the experimental validation phase of the positioning system, using the tools described above. A total of 8 tests were carried out to assess the reliability and repeatability of the solutions derived from the low-cost receiver.

Tab. 3 summarises the results obtained from all tests performed in North-East coordinates.

Tab. 4 shows the mean errors and standard deviations in directions parallel to and transverse to the direction of travel for the low-cost u-blox receiver. These errors were calculated by changing the coordinates from the North-East reference system to one parallel to the travel direction, identified by the collimation of the total station points, which were considered the vehicle reference. The absolute value of the error ensures identification of the occupied track (the worst case is 2 m) and respect of the fouling point, if provided by the mission plan received from the terminal control room.

The graphical solution of one of the tests, in particular Test No. 8 in Fig. 8, and the cumulative distribution functions in Fig. 9 are also shown for demonstration purposes.

The red arrow in Fig. 8 shows where the test began. The vehicle then continued to the stopping point and reversed back to the starting point. As shown in the legend, the coloured dots represent samples acquired by the two satellite receivers and the total station. The latter, highlighted in yellow, has a higher sampling rate and it is displayed in the background to avoid obscuring the data from the other sensors. Between the samplings of u-blox (magenta) and

Tabella 3 – Table 3

Accuratezza media delle soluzioni u-blox - Emlid a confronto
Average accuracy of u-blox and Emlid solutions compared

	Ricevitore low cost, u-blox <i>Low cost receiver, u-blox</i>		Ricevitore professionale, Emlid <i>Professional receiver, Emlid</i>	
	Errore medio planimetrico (m) <i>Planimetric mean error (m)</i>	Dev. Standard (m) <i>Standard dev. (m)</i>	Errore medio planimetrico (m) <i>Planimetric mean error (m)</i>	Dev. Standard (m) <i>Standard dev. (m)</i>
Test 1	0.525	0.245	0.374	0.219
Test 2	0.443	0.418	0.223	0.142
Test 3	0.488	0.203	0.331	0.194
Test 4	2.336	2.139	0.205	0.107
Test 5	0.397	0.196	0.283	0.158
Test 6	1.129	0.962	0.227	0.131
Test 7	0.394	0.362	0.186	0.139
Test 8	0.216	0.172	0.206	0.127

Tabella 4 – Table 4

Accuratezza media parallela e trasversale al senso di marcia dell'u-blox.
 Mean accuracies in parallel and transversetravel direction of u-blox.

	Errore medio \\ direzione marcia (m) <i>Mean error</i> \\ travel direction (m)	Dev. Standard (m) <i>Standard dev.</i> (m)	Errore medio ⊥ direzione marcia (m) <i>Mean error</i> ⊥ travel direction (m)	Dev. Standard (m) <i>Standard dev.</i> (m)
Test 1	0.380	0.231	0.365	0.209
Test 2	0.160	0.400	0.301	0.379
Test 3	0.304	0.156	0.304	0.168
Test 4	1.141	1.329	2.024	2.025
Test 5	0.280	0.191	0.268	0.134
Test 6	0.504	0.580	0.947	0.986
Test 7	0.209	0.218	0.302	0.345
Test 8	0.158	0.174	0.136	0.171

zione grafica di uno dei test, in particolare del Test n.8 in Fig. 8, e le funzioni di distribuzione cumulative in Fig. 9.

La freccia rossa in Fig. 8 indica il punto di partenza del test, in cui il veicolo ha proseguito fino al punto di arresto per poi tornare in retromarcia al punto iniziale. Come riportato in legenda, i punti colorati rappresentano i campionamenti acquisiti dai due ricevitori satellitari e dalla stazione totale. Quest'ultima, evidenziata in giallo, presenta una frequenza di campionamento superiore e viene visualizzata sullo sfondo per non oscurare i dati degli altri sensori. Tra i campionamenti dell'u-blox (magenta) e dell'Emlid (blu) è sempre presente un offset dovuto al disallineamento di montaggio sul veicolo: questa distanza è pari a circa 60 cm ed è stata correttamente compensata nel calcolo dei parametri statistici, ma risulta ancora visibile nella rappresentazione grafica a scopo illustrativo.

Come evidenziato dalla tabella dei risultati, il sistema di posizionamento proposto ha mostrato buone performance complessive, raggiungendo una precisione media di tipo decimetrico e discostandosi di poco rispetto ai risultati ottenuti dal ricevitore professionale. In 6 test su 8, le prestazioni sono risultate comparabili, mentre nei rimanenti 2 test (evidenziati in arancione in Tab. 4, test 4 e 6) il ricevitore low-cost ha mostrato una precisione media leggermente inferiore, comunque sempre inferiore ai 3 m. In questi casi, la differenza è stata dovuta a ritardi o al mancato "fissaggio" della soluzione, che hanno influito negativamente sulla stabilità della posizione stimata. Tali risultati dimostrano che, anche in assenza di soluzione "fissata", il ricevitore a basso costo è comunque in grado di fornire performance che ri-

Emlid (blue) there is always an offset due to the mounting misalignment on the vehicle: this distance is approximately 60 cm and has been correctly compensated for in the calculation of the statistical parameters, but is still visible in the graphic representation for illustration purposes.

As can be seen from the results table, the proposed positioning system showed good overall performance, achieving an average decimetric accuracy and deviating only slightly from the results obtained by the professional receiver. In 6 out of 8 tests the performance was comparable, while in the remaining 2 tests (highlighted in orange in Tab. 4, tests 4 and 6) the low-cost receiver showed a slightly lower mean accuracy, still less than 3 m. In these cases, the difference was due to delays or failure to 'fix' the solution, which affected the stability of the estimated position. These results show that, even in the absence of a "fixed" solution, the low-cost receiver is still able to provide performance that is fully within the regulatory



Figura 8 - Soluzione grafica del test n.8 di validazione del sistema GNSS in ambiente urbano.

Figure 8 - Graphical solution to test No. 8 of GNSS validation in an urban environment.

entrano pienamente negli standard normativi richiesti per i sistemi di localizzazione ferroviari. D'altra parte, il ricevitore professionale Emlid ha fornito costantemente una precisione compresa tra 10 e 40 cm, con una dispersione significativamente più bassa rispetto al ricevitore a basso costo. Il diverso comportamento può essere visualizzato anche dalle funzioni di distribuzione cumulativa in Fig. 9: le soluzioni di Emlid tendono ad avere una curva più ripida, il che significa che i valori sono concentrati all'interno di un intervallo ristretto, con una bassa variabilità, mentre le curve u-blox suggeriscono una maggiore dispersione, con valori distribuiti in un intervallo più ampio. È importante sottolineare che entrambi i dispositivi condividono lo stesso chipset GNSS u-blox, ma la differenza prestazionale risiede principalmente nella qualità dell'antenna e nelle capacità avanzate di filtraggio del ricevitore Emlid, che consentono una migliore ricezione del segnale e una riduzione del rumore. Nonostante queste differenze, la scelta del ricevitore a basso costo è giustificata da due fattori chiave:

1. basso impatto economico, per compensare i costi che derivano da un sistema complesso come quello di un elettrotreno merci;
2. ingombro ridotto, per un'installazione agevole senza interferire con la sagoma del treno.

Anche l'elaborazione in post-processamento del Test n.8 ha dimostrato la validità di questo sistema, dimostrando di discostarsi solo di pochi millimetri dalla miglior soluzione raggiungibile, come dimostrato in Fig.10 .

5. Conclusioni e sviluppi futuri

L'obiettivo di questo articolo è stato quello di presentare un sistema di posizionamento satellitare a basso co-

standards required for railway tracking systems. On the other hand, the professional Emlid receiver consistently provided an accuracy between 10 and 40 cm, with a significantly lower dispersion than the low-cost receiver. The different behaviour can also be visualised by the cumulative distribution functions in Fig. 9: Emlid's solutions tend to have a steeper curve, meaning that the values are concentrated in a narrow range with low variability, while the u-blox curves indicate greater dispersion, with values spread over a wider range. It is important to note that both devices use the same u-blox GNSS chipset, but the difference in performance is mainly due to the quality of the antenna and the advanced filtering capabilities of the Emlid receiver, which allows for better signal reception and noise reduction. Despite these differences, the choice of the low-cost receiver is justified by two key factors:

1. low economic impact, to compensate for the costs arising from a complex system such as F-EMU;
2. small footprint, for easy installation without interfering with the train gabarit.

Post-processing of Test No. 8 also demonstrated the validity of this system, proving to deviate by only a few millimetres from the best achievable solution, as shown in the Fig. 10.

5. Conclusions and future works

The objective of this article was to present a low-cost, reliable and sufficiently accurate satellite positioning system to meet the regulatory requirements of ERTMS, with particular reference to ETCS Level 2 (formerly Level 3), with application to innovative low-speed freight trains. The results of the study fully confirm the achievement of this objective: the system was able to guarantee decimetric accuracies under optimal conditions and, even in cases where the "fix" state was not reached, the maximum mean error always remained below 3 m, within

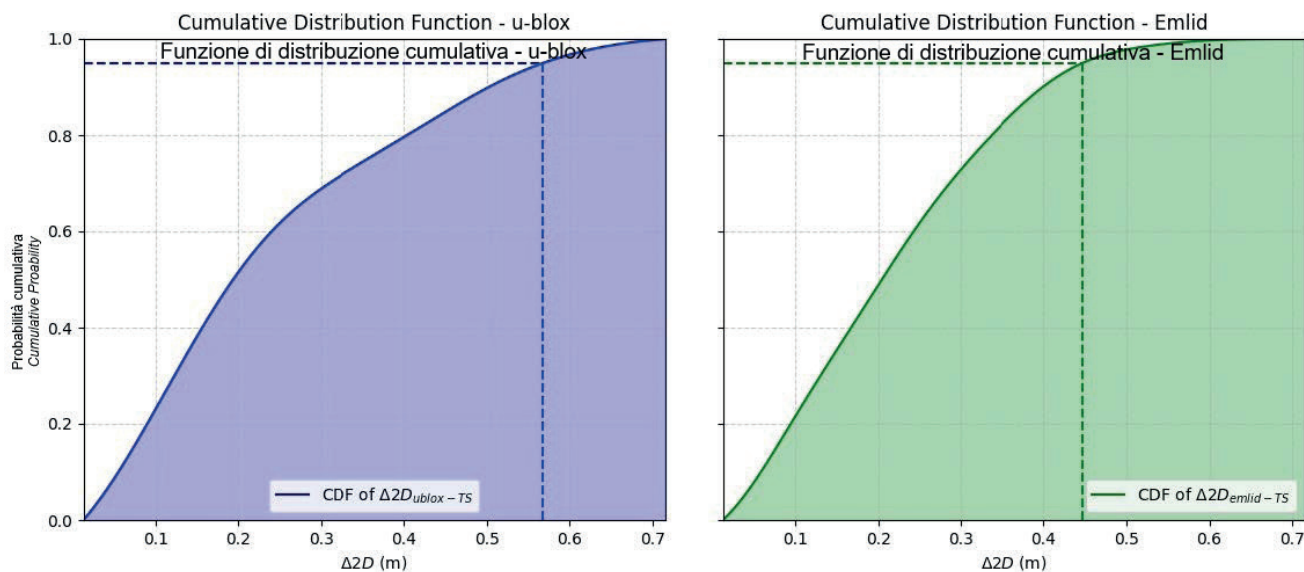


Figura 9 - Funzioni di distribuzioni cumulative (CDF) dei ricevitori u-blox ed Emlid a confronto, Test n.8.
 Figure 9 - Cumulative distribution functions (CDF) of u-blox and Emlid receivers compared, Test No. 8.

sto, affidabile e sufficientemente preciso per soddisfare i requisiti normativi previsti nell'ambito dell'ERTMS, con particolare riferimento all'ETCS di livello 2 (ex livello 3), con applicazione su treni merci innovativi a basse velocità. Gli esiti dello studio confermano pienamente il raggiungimento di tale obiettivo: il sistema è stato in grado di garantire accuratissime decimetriche nelle condizioni ottimali e, anche nei casi in cui non si raggiungeva lo stato di "fix", l'errore medio massimo è sempre rimasto inferiore ai 3 metri, rientrando nei limiti imposti per i *Location Determination Systems (LDS)* [20][21]. La validità del sistema è stata ulteriormente consolidata attraverso il confronto con un ricevitore professionale di fascia superiore, sia in termini di costo che di ingombro. In 6 test su 8, lo scostamento tra i due sistemi si è limitato a pochi decimetri, dimostrando che anche una soluzione low-cost può offrire prestazioni di elevata qualità, se correttamente integrata e calibrata.

Il sistema è stato validato in ambiente urbano su un veicolo stradale, simulando le condizioni operative tipiche di un terminal ferroviario, caratterizzate da basse velocità e manovre frequenti. Tuttavia, per una validazione completa, sarà necessario estendere i test su tracciati ferroviari reali, al fine di analizzare il comportamento del sistema anche a velocità nettamente superiori, tipiche della marcia in linea. È ragionevole ipotizzare che, in condizioni operative reali, le prestazioni si manterranno in linea con quanto osservato in questa fase preliminare.

Un ulteriore sviluppo interessante riguarda la possibilità di estendere il sistema al controllo dell'integrità del treno. Questo potrebbe essere realizzato mediante l'installazione di più antenne GNSS distribuite lungo il convoglio, ciascuna delle quali fornirebbe la propria posizione a intervalli regolari. Confrontando le distanze tra le antenne, sarebbe possibile verificare in tempo reale la continuità e l'integrità fisica del treno, rilevando eventuali anomalie se tali distanze superassero una soglia predefinita. Questa funzionalità rappresenterebbe un'importante evoluzione verso il pieno supporto al blocco mobile e all'automazione nell'ambito dell'ETCS L2.

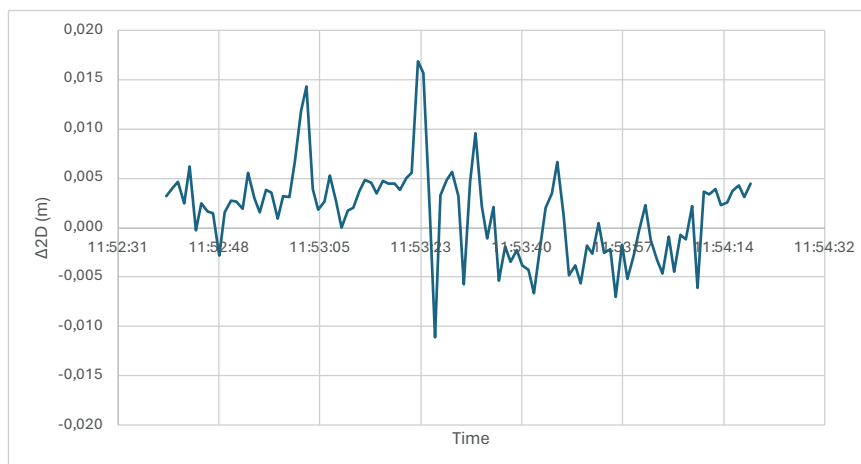


Figura 10 - Differenze tra elaborazione in tempo reale e in post-processamento con la stazione di riferimento TORI situata presso il Politecnico di Torino.

Figure 10 - Differences between real-time and post-processing with the TORI reference station located at Politecnico di Torino.

the limits set for Location Determination Systems (LDS) [20] [21]. The validity of the system was further confirmed by comparison with a higher-end professional receiver, both in terms of cost and size. In 6 out of 8 tests, the difference between the two systems was limited to a few decimetres, demonstrating that even a low-cost solution can deliver high-quality performance when properly integrated and calibrated.

The system has been validated in an urban environment on a road vehicle, simulating the typical operating conditions of a railway terminal, characterised by low speeds and frequent manoeuvres. However, for a complete validation, it will be necessary to extend the tests to real railway tracks in order to analyse the behaviour of the system at much higher speeds, typical of line operation. It is reasonable to assume that the performance in real operating conditions will be in line with what has been observed in this preliminary phase.

Another interesting development is the possibility of extending the system to train integrity monitoring. This could be achieved by installing several GNSS antennas distributed along the convoy, each of which would provide its position at regular intervals. By comparing the distances between the antennas, it would be possible to check the continuity and physical integrity of the train in real time and detect any anomalies if these distances exceeded a pre-defined threshold. This functionality would represent an important evolution towards full support for mobile blocking and automation within ETCS L2.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] Commissione Europea, LIBRO BIANCO (2011), "Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile", Bruxelles, 2011.
- [2] M. BLUMENSCHNIG, D. WILBRING, K. BABILON E B. D. SCHMIDT (2021), "Concept for autonomous shunting with an intelligent and self-actuating freight wagon", in *Proceedings of 3rd International Railway Symposium Aachen*, Aachen, 2021.

- [3] A. MICHLER, P. SCHWARZBACH, J. M. ENGELBRECHT, O. MICHLER (2023), “*Conceptualization of Communication and Localization Components for Automated Shunting*”, in *8th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, Nice, 2023.
- [4] Alstom (2022), “*Alstom demonstrates fully autonomous driving of a shunting locomotive in the Netherlands*”. [Online]. Available: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2022/11/alstom-demonstrates-fully-autonomous-driving-shunting-locomotive-netherlands>.
- [5] Green Car Congress (2023), “*Parallel systems raises \$50m series a to build autonomous battery-electric rail cars that move freight*”. [Online]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2022/01/20220122-parallel.html>.
- [6] FS News (2024). [Online]. Available: <https://www.fsnews.it/it/focus-on/innovazione/2024/2/16/gruppo-fs-polo-logistica-mercitalia-progetto-smart-train.html>.
- [7] Europe’s Rail (2021), “*Digital Automatic Coupling - Delivery Programme*”, Aprile. [Online]. Available: https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2021/04/DAC-Factsheet_EN.pdf.
- [8] A. GUALCO, N. COVIELLO, B. DALLA CHIARA (2021), “*Requisiti progettuali di treni merci a potenza distribuita: simulazione d’esercizio sulla linea Torino-Savona*”, *INGEGNERIA FERROVIARIA*, n. 4, pp. 257-287.
- [9] S. GURRÌ, M. BOCCHIERI, D. GALASSO, V. OPERTI, B. DALLA CHIARA (2023), “*Analisi della velocità di un elettrotreno merci a potenza distribuita su linee ad alta velocità*”, *INGEGNERIA FERROVIARIA*, n. 5, pp. 393-415.
- [10] S. GURRÌ, G. ZARA, A. DI PAOLA, B. DALLA CHIARA (2024), “*Design of an Integrated Monitoring System for Multiple-Unit Freight Trains*”, in *The sixth international conference on railway technology: research, technology and maintenance*, Praga.
- [11] C. LEGRAND, J. BEUGIN, B. CONRARD, J. MARAIS, M. BERBINEAU, E.-M. EL-KOURSI (2014), “*Causal analysis methodology of multisensor systems based on GNSS*” in *The Second International Conference on Railway Technology: Research, Development,*.
- [12] CORDIS | European Commission (2024), “*ERTMS on SATELLITE – enabling application validation*”, [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/640747/reporting>.
- [13] CORDIS | European Commission (2020), “*ERTMS on SATELLITE galileo game changer*”. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/776039/reporting>.
- [14] ESA - European Space Agency (2016), “*3insat | ESA space solutions*”. [Online]. Available: <https://business.esa.int/projects/3insat>.
- [15] A. NERI (2016), “*RHINOS railway integrity navigation overlay system*”, HORIZON 2020.
- [16] E. GONZÁLEZ, C. PRADOS, V. ANTÓN, B. KENNES (2012), “*RAIL-2: Enhanced odometry based on GNSS*”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 48, pp. 880-887.
- [17] B. ANDÒ, M. CIAFFI, G. EMMANUELE, A. PISTORIO, F. SENESI (2016), “*Metodologia per la sperimentazione di un sistema GPS per la localizzazione del treno*”, *INGEGNERIA FERROVIARIA*, pp. 823-835.
- [18] Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 1: Generic RAMS Process, EN 50126-1:2017, 2017.
- [19] Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling, EN 50129:2018, 2018.
- [20] EUSPA - European Union Agency for the Space Programme (2018), “*Report on rail user needs and requirements - Outcome of the EUSPA user consultation platform*”. [Online]. Available: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Report_on_User_Needs_and_Requirements_Rail.pdf.
- [21] UNISIG - Union Industry of Signalling (2012), “*ERTMS/ETCS, Performance Requirements for Interoperability - Subset 041*”, 1 Marzo 2012. [Online]. Available: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-01/sos2_index014_-_subset-041_v310.pdf.
- [22] E. D. KAPLAN, C. J. HEGARTY (2017), “*Understanding GPS/GNSS - Principles and applications*”.
- [23] Inertial Labs (2024), “*Understanding the Power of the GPS Signal*” [Online]. Available: <https://inertialabs.com/understanding-the-power-of-the-gps-signal/>.
- [24] A. EL-MOWAFY (2012), “*Precise Real-Time Positioning using Network RTK*”, in *Global Navigation Satellite Systems - Signal, Theory and Applications*, Shuanggen Jin.

- [25] SPIN3 GNSS (2025), “Servizio di posizionamento satellitare SPIN3 GNSS”. [Online]. Available: <https://www.spin-gnss.it/>.
- [26] EUSPA - European Union Agency for the Space Programme (2025), “Galileo High Accuracy Service (HAS)” [Online].
- [27] R. PALACIOS (2025) [Online]. Available: <https://it.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10915-deg2utm>.
- [28] S. DE FABRIS, G. MEDEOSI, G. MONTANARO (2018), “Trenissimo: Improving the microscopic simulation of railway networks”. WIT Transactions on the Built Environment,, vol. 181.

L'ALTA VELOCITÀ FERROVIARIA

Il CIFI ha pubblicato L'ALTA VELOCITÀ FERROVIARIA.

Il nuovo volume rappresenta un riferimento unico ed originale della storia e della evoluzione dell'Alta Velocità in Italia, dalle prime direttissime, alla Firenze-Roma, alle nuove linee AV-AC di recente entrate in servizio. Un immancabile “compagno” della *Storia e Tecnica Ferroviaria* già edita dal CIFI e un testo indispensabile per tutti i cultori, studiosi e appassionati del modo delle ferrovie. Una strenna ideale per ... se stessi, oltre che per amici personali, clienti e dipendenti delle aziende.

Volume in pregiata edizione, cartonato, formato A4, pagine 208 a colori ampiamente illustrate.

INDICE

- Ricerca e sviluppo della Velocità ferroviaria
- Le caratteristiche tecniche dell'AV
- Linee AV nel mondo
- Le Direttissime in Italia
- Nasce l'Alta Velocità-Alta Capacità
- Le Nuove Linee
- Milano-Bologna e Bologna-Firenze
- Nuove linee sui valichi alpini

Prezzo di copertina € 40,00. Per sconti, spese di spedizione e modalità di acquisto consultare la pagina “Elenco di tutte le pubblicazioni CIFI” sempre presente nella Rivista.

