



Reti mobili di nuova generazione per le linee ferroviarie del futuro

Next-generation mobile networks for the future railway

Flavio MASCHIETTI ^(*)
Alessio BARBARESI ^(*)
Salvatore RAGO ^(*)
Simone MAMMUCARI ^(*)
Girolamo CLEMENZA ^(*)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.10.2024.ART.2>)

Sommario - Ad oggi più di 100.000 km di linee ferroviarie (11.000 km in Italia) sono fornite di copertura radio GSM-Railway (GSM-R). Tale infrastruttura di rete assicura la fondamentale comunicazione radio (voce e dati) Terra-Treno. Tuttavia, le caratteristiche trasmissive dell'attuale standard GSM-R limitano l'implementazione di quelle nuove tecnologie ferroviarie sostenute dalla *digital transformation*, come ad esempio il monitoraggio o il controllo *real-time* della marcia dei treni e l'*Internet of Things* degli impianti ferroviari, nonché nuove applicazioni per il distanziamento dei treni, in particolare nei nodi ferroviari. Queste tecnologie necessitano infatti di alti livelli di affidabilità, latenza e *throughput*. In quest'ottica, l'introduzione del nuovo standard basato sulle reti mobili di quinta generazione (5G) denominato *Future Railway Mobile Communication System* (FRMCS) si rende necessaria per il superamento dei limiti del GSM-R e per sviluppare il sistema ferroviario del futuro.

Diverse sono le ragioni alla base della scelta della tecnologia 5G per il futuro delle comunicazioni ferroviarie. Oltre a fornire banda larga, le reti 5G possono garantire un'altissima affidabilità e una latenza molto bassa. Inoltre, il 5G offre metodi per costruire reti massive di sensori IoT e di conseguenza permette di ottimizzare i processi e i servizi ferroviari sfruttando i dati collezionati da tale moltitudine di sensori. Infine, ma non meno importante, il 5G e quindi l'FRMCS potranno offrire agli operatori ferroviari una notevole flessibilità nelle comunicazioni, consentendo di dedicare sottoreti virtuali a diverse tipologie di traffico, per esempio critico/non-critico. Un ulteriore grado di flessibilità potrà essere ottenuto tramite l'utilizzo del cloud e del *Multi-Access Edge Computing* (MEC).

Summary - To date, more than 100,000 km of railroads (11,000 km in Italy) are equipped with GSM-Railway (GSM-R) radio coverage. This network infrastructure ensures the fundamental track-to-train radio communication (including voice and data). However, the transmissive characteristics of the GSM-R limit the adoption of new rail technologies associated with the digital transformation. These technologies include real-time train operations monitoring and control, the Internet of Things (IoT) for rail facilities, as well as novel applications for train spacing, especially in rail junctions/hubs. Indeed, these technologies require high levels of reliability, latency, and throughput. To overcome the limitations of GSM-R and develop the future railway system, a new standard based on fifth-generation (5G) mobile networks known as the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) must be implemented.

There are several reasons for choosing 5G networking for the future of rail communications. In addition to bandwidth, 5G networks can offer extremely high reliability and minimal latency. Furthermore, 5G provides methods for building massive networks of IoT sensors, allowing for the optimization of railway processes and services by leveraging the data acquired from such a multitude of sensors. Finally, 5G and hence FRMCS will provide significant flexibility in communications to rail operators by allowing virtual subnets to be dedicated to different categories of traffic, such as critical/non-critical. A further degree of flexibility can be achieved using cloud networking and the so-called Multi-Access Edge Computing (MEC).

^(*) Italferr Direzione Progettazione, Progettazione Tecnologie, S.O. Telecomunicazioni.

^(*) Italferr S.p.A., Tech. Design Department, Telecommunications.

In questo articolo, verranno illustrate le principali caratteristiche del nuovo standard FRMCS/5G e come queste potranno accelerare la trasformazione digitale dell'industria ferroviaria. In particolare, nella prima parte, saranno descritte le novità relative all'accesso radio e alla *core network* di nuova generazione, e il loro potenziale impatto sul sistema ferroviario. Successivamente, saranno esposte le soluzioni adottate in un caso reale di design di una rete mobile FRMCS/5G nel contesto del progetto preliminare per gara della Rail Baltica, una strategica linea ad alta velocità (AV) di 870 km che si estende dall'Estonia fino alla Polonia, percorrendo i 3 Stati baltici (Estonia, Lettonia e Lituania).

Attualmente, il processo di standardizzazione del sistema FRMCS prevede un rilascio delle specifiche tecniche finali per il primo trimestre del 2026. Questo articolo tiene conto delle versioni preliminari di tali specifiche tecniche, di studi teorici e di laboratorio prodotti dall'UITC, e di proposte architetture comunicate dai vendor in diversi incontri. Seppur non definitivi, tali input permettono di trattare gli argomenti esposti nel seguito con un orientamento prossimo a quanto sarà stabilito nelle future direttive.

This article will describe the main features of the new FRMCS/5G standard and how these features can accelerate the rail sector's digital transition. The first part will outline the new features associated with the next-generation radio access and core network, as well as their potential impact on the railway system. Then, the solutions adopted in a real-world design case of an FRMCS/5G mobile network in the context of the Rail Baltica's tender project, a strategic 870 km long high-speed (HS) line stretching from Estonia to Poland, and traversing the 3 Baltic states (Estonia, Latvia, and Lithuania), will be exposed.

At present, the FRMCS standardization process envisions the release of final technical specifications in the first quarter of 2026. This article considers preliminary versions of these technical specifications, theoretical and laboratory studies carried out by the UITC, and architectural proposals presented by vendors at several meetings. Although non-definitive, these inputs allow the topics outlined in the following to be addressed in a manner similar to what will be established in future directives.

Acronimi - Acronyms

5G	<i>Fifth Generation</i>
5GC	<i>5G Core network</i>
ATO	<i>Automatic Train Operation</i>
AV/HS	<i>Alta Velocità – High Speed</i>
DCM	<i>Digital Clutter Model</i>
DL	<i>Downlink</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
ERTMS	<i>European Rail Traffic Management System</i>
ETCS	<i>European Train Control System</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FRMCS	<i>Future Railway Mobile Communication System</i>
gNodeB	<i>Next-Generation Node B</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GSM-R	<i>GSM-Railway</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i>

IoT	<i>Internet of Things</i>
IP-PBX	<i>IP Private Branch eXchange</i>
MANO	<i>Management and Orchestration</i>
MEC	<i>Multi-Access Edge Computing</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
mMIMO	<i>Massive MIMO</i>
NF	<i>Network Functions</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RBC	<i>Radio Block Center</i>
RF	<i>Radiofrequenza - Radiofrequency</i>
RRU	<i>Remote Radio Unit</i>
SPoF	<i>Single Point of Failure</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
UITC	<i>Union Internationale Chemins de Fer</i>
uRLLC	<i>Ultra-Reliable Low-Latency Communication</i>

1. Introduzione

Gran parte delle ferrovie europee effettua le comunicazioni operative Terra-Treno tramite il sistema radio GSM-R, un elemento chiave del sistema di gestione del traffico ferroviario ERTMS. Il *Future Railway Mobile Communication System* (FRMCS) rappresenta la risposta delle ferrovie europee a due elementi di importanza strategica per il futuro dell'industria ferroviaria:

1. L'obsolescenza e l'imminente fine del ciclo di vita del GSM-R, un sistema basato sul 2G e su specifiche rilasciate dall'UITC più di 20 anni fa.

1. Introduction

Much of Europe's rail operators conduct operational track-to-train communications via GSM-R, a central element of the European Rail Traffic Management System (ERTMS). The Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) represents the response of European rail operators to two elements of strategic importance to the future of the rail business:

1. *The obsolescence and impending end of life of GSM-R, which is based on 2G and specifications dated over 2 decades ago.*

2. L'accelerazione della trasformazione digitale delle ferrovie, quindi l'esigenza di trasmettere, ricevere ed elaborare volumi crescenti di dati, per un trasporto più informato e sostenibile.

Per soddisfare i requisiti di alto *throughput* dati, bassa latenza e di connettività massiva delle applicazioni FRMCS, gli enti di normazione ferroviaria hanno promosso la transizione verso la tecnologia mobile di quinta generazione (5G). Le future comunicazioni ferroviarie dovranno fornire una copertura wireless affidabile in un numero maggiore di casi rispetto al GSM-R [1][2][3][4][5][6][7][8][9][10]. In particolare, gli scenari di applicazione dell'FRMCS possono essere suddivisi in 4 categorie principali:

- Esercizio, che include tutti i servizi critici relativi alla circolazione e al distanziamento dei treni, tra cui il segnalamento radio, l'*Automatic Train Operation* (ATO), e tutte le funzioni vocali già definite in ambito GSM-R;
- Manutenzione, come la gestione e l'aggiornamento dei dati delle apparecchiature di bordo e di terra.
- Monitoraggio, che comprende servizi capaci di migliorare la sicurezza del sistema ferroviario, tra cui il monitoraggio in tempo reale dello stato del treno, delle opere infrastrutturali e dell'ambiente.
- Passeggeri, che include l'infotainment multimediale, i sistemi di informazione in tempo reale, la connettività Internet ad alta velocità sul treno e in ambienti ferroviari, previ opportuni accordi con gli operatori di telefonia mobile, e tutti quei servizi che possono migliorare il comfort e l'efficienza del viaggio.

Più specificatamente, la normativa UIC FU-7100 contiene attualmente più di 100 casi d'uso per l'FRMCS [3]. Tali scenari applicativi impongono requisiti elevati e soprattutto *diversi* in termini di larghezza di banda, ritardo, affidabilità e sicurezza del canale radio, per i quali una tecnologia mobile di grande scalabilità risulta necessaria. Inoltre, la stessa UIC FU-7100 pone grande enfasi alla condivisione delle informazioni: si rende indispensabile una piattaforma unificata di informazione e comunicazione per l'interconnessione dell'intero ecosistema ferroviario. In Fig. 1 mostriamo un'architettura di esempio di rete ferroviaria unificata, completamente connessa, con i relativi servizi. Nei paragrafi successivi descriveremo come e perché lo standard 5G rappresenta lo strumento in grado di soddisfare pienamente i requisiti FRMCS. In questo senso, dettaglieremo altresì le innovazioni introdotte da tale standard mobile, nelle sue due parti principali che lo compongono: accesso radio e core.

2. FRMCS/5G Radio Access Network

La *Radio Access Network* (RAN) rappresenta un elemento imprescindibile per costruire una rete mobile, in quanto consente la connessione dei dispositivi mobili alla *core*

2. *The accelerating digital transformation of the rail operation, thus the need to transmit, receive and process increasing volumes of data, for more informed and sustainable transportation.*

To meet the high data throughput, low latency, and massive connectivity requirements of FRMCS applications, railroad standardization bodies have promoted the transition to the fifth generation (5G) mobile networking standard. Future rail communications will need to provide reliable wireless coverage in more cases than GSM-R [1][2][3][4][5][6][7][8][9][10]. In particular, FRMCS application scenarios can be divided into four main categories:

- *Operation, which includes all critical services related to train movement and train spacing, including radio signaling, Automatic Train Operation (ATO), and all advanced voice functions defined under GSM-R.*
- *Maintenance, such as the management and updating of on-board and trackside equipment data.*
- *Monitoring, which includes services capable of improving the safety of the rail system, including real-time monitoring of the train status, infrastructure works and the environment.*
- *Passengers, which includes multimedia infotainment, real-time information, high-speed Internet on trains and in rail environments, contingent upon suitable agreements with mobile operators, and all services that can enhance travel comfort and convenience.*

The UIC specification FU-7100 contains more than 100 use cases for FRMCS [3]. These application scenarios impose high, demanding and above all different requirements in terms of bandwidth, delay, and reliability, for which a highly scalable mobile technology is needed. In addition, UIC FU-7100 places great emphasis on information sharing: a unified information and communication platform for interconnecting the entire railway ecosystem becomes essential. Fig. 1 shows an example architecture of a unified, fully connected railway network and its related services. The next paragraphs describe all the elements that make 5G networking the most effective instrument to meet FRMCS requirements. In this respect, the innovations developed through this mobile standard, in its two major constituent parts—radio access and core network—will also be detailed.

2. FRMCS/5G Radio Access Network

The Radio Access Network (RAN) represents an indispensable element in a mobile network, as it enables the connection of mobile devices to the core network. In particular, the set of RAN components (antennas, converters, baseband processors, etc.) allows for the conversion of digital signals into radio waves, which can then be received and processed. The RAN is designed to cover a geographic area in the most homogeneous manner possible, ensuring ubiquitous/continuous network access for the mobile devices. To achieve this, a set of radio sites, defined under the term gNodeB in the context of 5G networks, are deployed in the relevant area.

network. In particolare, l'insieme dei componenti della RAN (antenne, convertitori, elaboratori digitali in banda base, etc.) permette la conversione dei segnali digitali (come voce e dati) in onde radio, così che possano essere ricevuti ed elaborati dai dispositivi mobili e viceversa. Tale rete di accesso radio viene concepita in modo tale che un'area geografica sia coperta in modo il più possibile omogeneo, per assicurare una connessione ubiqua/continua ai dispositivi mobili. Per raggiungere tale risultato, si distribuiscono nel territorio interessato un insieme di siti radio, definiti col termine *gNodeB* nel contesto delle reti 5G.

Sito radio 5G - Una *gNodeB* permette l'accesso alla RAN e nel contesto delle reti 5G consiste dei seguenti elementi:

- Antenne.
- *Remote Radio Unit (RRU)*.
- *Distributed Unit (DU)*.
- *Central Unit (CU)*.
- Connessione alla *core network*.

L'insieme DU/CU esegue l'invio dei dati dalla RRU alla *core network (uplink)*, e viceversa dalla *core network* alla RRU (*downlink*). In particolare, la DU esegue elaborazioni *real-time* in banda base relative ai primi due livelli protocollari: fisico e data link. La CU esegue elaborazioni relative al livello superiore, di rete. Nel GSM-R (2G+) tali funzioni sono svolte da un unico apparato hardware. Diversamente, nell'FRMCS (5G) esistono numerosi modi di separare le funzioni svolte da tali elementi, anche fisicamente [9]. In tal modo, l'architettura della RAN viene resa flessibile e scalabile, in base allo scenario di implementazione, ai vincoli sussistenti e ai casi d'uso da supportare.

Infine, la RRU si occupa dell'elaborazione in radiofrequenza (RF) e le sue funzioni principali sono:

1. In *uplink (UL)*, conversione ottico-elettrica dei segnali, e conversione dei segnali digitali in segnali RF con successiva trasmissione al livello di potenza desiderato.
2. In *downlink (DL)*, ricezione dei segnali RF dall'antenna con successiva conversione in banda base, e conversione elettro-ottica dei segnali.

La RRU si collega al DU/CU tramite cavi ottici e all'antenna tramite un cavo coassiale, il cui spessore dipende dalla distanza RRU-antenna in modo proporzionale.

Spettro frequenziale - Il Report 74 e il Report 76 del CEPT definiscono la quantità di spettro necessaria e identificano le bande frequenziali appropriate per l'FRMCS. In particolare, come mostrato in Fig. 2, le due bande armonizzate a livello europeo, in virtù della Decisione di Esecuzione (UE) 2021/1730 della Commissione Europea, sono [12]:

- Banda FDD 874,4-880 MHz / 919,4-925 MHz.
- Banda TDD 1900-1910 MHz.

5G radio site - A gNodeB allows access to the RAN and consists of the following technical elements:

- *Antenna(s)*.
- *Remote Radio Unit (RRU)*.
- *Distributed Unit (DU)*.
- *Central Unit (CU)*.
- *Connection to the core network*.

The set DU/CU performs the sending of data from the RRU to the core network (uplink), and vice versa from the core network to the RRU (downlink). In particular, the DU performs real-time baseband processing related to the first two layers of the network stack: physical layer and data link layer. The CU performs processing related to the upper, network layer. In GSM-R (2G+) a single monolithic hardware device carries out these functions. In contrast, in FRMCS (5G) there are several modes—referred to as functional splits—to separate such functions [9]. In doing so, the RAN architecture is made flexible and scalable, depending on the deployment scenario, on the existing constraints, and on the use cases to be supported.

The RRU deals with radio frequency (RF) processing, and its main functions are:

1. *In uplink (UL) operation, optical-electrical conversion of signals, and conversion of digital signals to RF signals with subsequent transmission at the desired power level.*
2. *In downlink (DL) operation, reception of RF signals from the antenna with subsequent conversion to baseband, and electro-optical conversion of signals.*

In general, the RRU connects to the DU/CU via optical cables and to the antenna via a coaxial cable, the thickness of which depends on the distance between the RRU and the antenna, in a proportional manner.

Frequency spectrum - CEPT Report 74 and CEPT Report 76 outline the spectrum needs for FRMCS and suggest appropriate spectrum bands to be reserved for it. The spectrum bands harmonized at the European level, under the European Commission's Implementing Decision (EU) 2021/1730, are [12]:

- *FDD band 874,4-880 MHz / 919,4-925 MHz.*
- *TDD band 1900-1910 MHz.*

As a result of such regulation, two FRMCS rollout implementations are envisaged, as shown in Fig. 2: the first, in co-existence with GSM-R in the 900 MHz band (until GSM-R is decommissioned), and the second, independent or stand-alone, in the upper 1900 MHz band.

5G New Radio - The entire 5G radio interface is referred to as New Radio (NR). Although broadband services continue to be the driving force behind the development of a radio interface, NR has much stronger inherent support for verticals such as the rail sector than previous technologies.

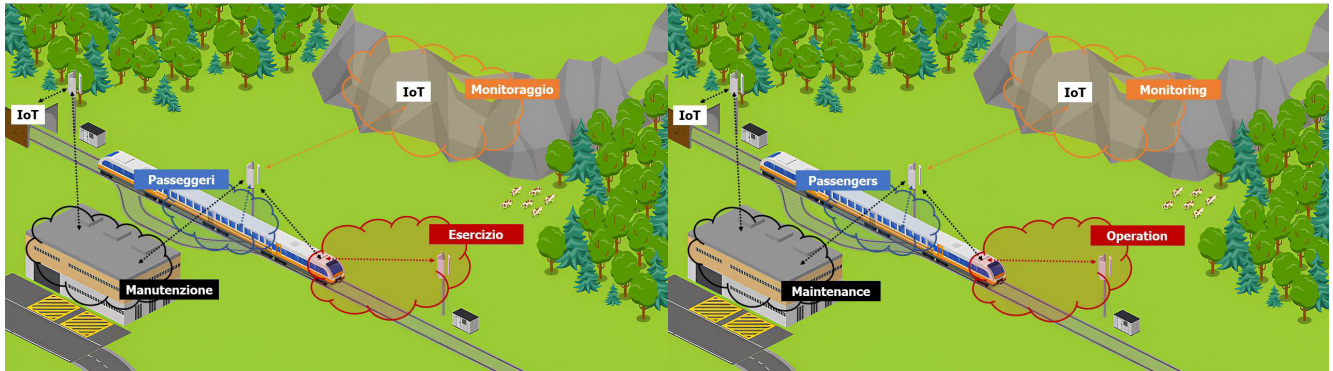


Figura 1 - Architettura di rete ferroviaria 5G completamente connessa.
Figure 1 - Fully connected 5G railway network architecture.

In seguito alle decisioni del CEPT, si prospettano due tipi di utilizzo dell'FRMCS: il primo, in coesistenza con il GSM-R nella banda dei 900 MHz (fino a quando il GSM-R non sarà dismesso), e il secondo, indipendente, nella banda dei 1900 MHz.

5G New Radio - L'intera tecnologia relativa all'interfaccia radio 5G viene definita *New Radio* (NR). Sebbene i servizi a banda larga continuino a essere l'elemento trainante di un'interfaccia radio, l'NR ha intrinsecamente un supporto molto più forte per i settori verticali come l'industria ferroviaria rispetto alle precedenti tecnologie.

Tra le caratteristiche principali dell'NR [12]:

1. Ha un design del livello fisico flessibile e robusto. Ad esempio, supporta diverse spaziatore di sotto-portanti OFDM, riuscendo così a mitigare l'impatto dell'effetto Doppler. Inoltre, consente una stima accurata del canale radio anche in scenari con elevato effetto Doppler, dal momento che dispone di segnali di controllo densi e di diversa natura. Una stima precisa del canale radio rappresenta un passo fondamentale per ridurre il rumore introdotto dal canale stesso.
2. Supporta una bassa latenza, inferiore a 10 ms, tramite meccanismi di preferenza per il traffico critico, ritrasmissioni rapide, e durate di trasmissione più brevi, grazie a una maggiore spaziatura tra le sotto-portanti e al concetto di mini-slot.
3. Offre diverse tecniche per migliorare l'*handover* in scenari particolarmente sfavorevoli, come gli *handover* condizionati e la funzione *Dual Active Protocol Stack*.
4. Dispone di algoritmi di posizionamento radio che integrano e migliorano efficacemente le tecniche di posizionamento puramente satellitari come il GPS.

Nel seguito verranno descritti altri concetti e tecniche proprie del 5G NR che svolgono un ruolo cruciale e lo rendono attraente nelle implementazioni ferroviarie e nella loro evoluzione.

Throughput e Massive MIMO - Con un bitrate trasmissivo massimo di 10 Gbps, il 5G risulta 10 volte più veloce

The main features of NR include [12]:

1. It has a flexible and robust physical layer design. For example, it supports different OFDM sub-carrier spacings, thus being able to mitigate the impact of the Doppler effect, which is strong in rail environments. In addition, it enables accurate radio channel estimation, even in scenarios with high Doppler effect, since it has dense and diverse control signals. Accurate radio channel estimation is essential in reducing the radio channel noise.
2. It delivers data with low latencies—less than 10 ms for most applications—through preemption mechanisms for critical traffic, rapid retransmissions, and shorter transmission durations through increased sub-carrier spacing and the novel mini-slot concept.
3. It offers several techniques to improve handover in unfavorable scenarios, such as conditional handovers and the Dual Active Protocol Stack function.
4. It has effective radio positioning algorithms that complement and enhance pure satellite-based positioning techniques such as GPS.

In the following, other concepts and techniques peculiar to 5G NR that have a crucial role and make it attractive for rail deployments and their evolution will be described.

Throughput and Massive MIMO - With a maximum transmission bitrate of 10 Gbps, 5G is 10 times faster than 4G. Massive MIMO (mMIMO) is among the 5G techniques that increase throughput and spectral efficiency. Massive MIMO allows multiple users to be served in the same time-frequency block, through separating them in the spatial dimension. Implementing mMIMO requires to increase the number of antennas installed at the gNodeB. Thus, it is possible to transmit using highly directional antenna beams focused on the users of interest [13]. As a result, the aggregate network throughput scales in the ideal case according to the number of users being served.

Railway IoT - The Internet of Things (IoT) concept refers to an intelligent network with access to multiple kinds of sensors and devices, sharing relevant information with each other and with external networks. 5G allows sufficient

del 4G. Tra le tecniche 5G che incrementano il *throughput* e l'efficienza di rete si ha il *Massive MIMO* (mMIMO), che consente di servire più utenti contemporaneamente nello stesso blocco tempo-frequenza, separandoli nella dimensione spaziale. Il mMIMO viene implementato aumentando drasticamente il numero di antenne impiegate alla gNodeB: in questo modo, risulta possibile trasmettere utilizzando fasci di antenna altamente direttivi e focalizzati dinamicamente verso gli utenti di interesse [13]. Il *throughput* aggregato di rete risulta quindi idealmente moltiplicato per il numero di utenti serviti.

IoT ferroviario - Il concetto *Internet of Things* (IoT) fa riferimento a una rete intelligente con accesso a più tipi di sensori, dispositivi e sistemi, che condividono informazioni rilevanti tra di loro e con reti esterne. Il 5G consente di disporre di risorse di rete e tecniche di accesso appropriate per gestire l'IoT massivo, in grado quindi di osservare dati da un numero ampio di sensori: si crea così la condizione per conoscere in modo capillare l'ambiente di interesse.

L'IoT potrebbe dunque garantire il monitoraggio dell'intero ecosistema ferroviario in tempo reale, per un esercizio proattivo/predittivo e un'esperienza maggiormente confortevole per i viaggiatori. I principali vantaggi derivanti dall'adozione dell'IoT nel settore ferroviario comprendono:

1. Manutenzione predittiva, ovvero il monitoraggio continuo dello status dei componenti ferroviari e il conseguente planning più informato del ciclo manutentivo.
2. Incremento della sicurezza, tramite il monitoraggio degli asset, del materiale rotabile e dell'infrastruttura, per un rilevamento tempestivo di guasti o pericoli.
3. Efficientamento del processo decisionale, basato sui dati rilevanti dai sensori IoT, per un'allocazione delle risorse ottimale.
4. Riduzione dei costi, come conseguenza importante dei tre punti precedenti.

In conclusione, l'implementazione dell'IoT nelle ferrovie offre molteplici vantaggi, che vanno dal miglioramento della sicurezza e dell'efficienza del trasporto a una migliore esperienza dei passeggeri e a un notevole risparmio economico a lungo termine.

Ultra-Reliable Low-Latency Communication (uRLLC) - Il traffico dati di pacchetti di piccole dimensioni ma con

network resources and multiple access techniques to handle the massive IoT, thus enabling the observation of data from a large number of sensors. In particular, IoT creates the condition for widespread awareness of the environment of interest.

IoT can ensure monitoring of the entire rail domain in real-time, for proactive/predictive operation and a more comfortable experience for travelers. The main benefits of adopting IoT in the rail sector include:

1. *Predictive maintenance, which is the continuous monitoring of the status of rail components and the resulting more informed planning of the maintenance cycle.*
2. *Increased safety, through monitoring assets, rolling stock and infrastructure for prompt detection of failures or hazards.*
3. *Efficient decision-making, based on relevant data from IoT sensors, for optimal resource allocation.*
4. *Cost reduction, as an important consequence of the previous three points.*

To summarize, the introduction of IoT in the rail sector provides numerous benefits, ranging from enhanced transit to a better passenger experience and significant cost savings over the long run.

Ultra-Reliable Low-Latency Communication (uRLLC) - Small packet data traffic with stringent requirements in terms of transmission latency and error rate is classified as uRLLC. Traditionally, reliability and latency are optimized in an independent manner; nonetheless, they are mutually influenced: increasing one (for example, through redundancy) decreases the other [13]. The combination of these competing requirements—which, in the case of railroads, are expressed in the critical traffic related to train movement and spacing—represents one of the most challenging objectives that 5G has managed to accomplish.

In addition to fast retransmissions and mini-slots, 5G has introduced Edge Computing to achieve minimal latency, a technique that will be explored later in more detail. Whereas the main improvement to enable ultra-reliable communication is so-called dual connectivity, which duplicates user packets and transfers them to the receiver at once via disjointed paths. Redundant packets are then dropped at the receiver. This makes it possible to avoid service interruptions even if packet forwarding through a path is unsuccessful or exceeds transmission requirements.

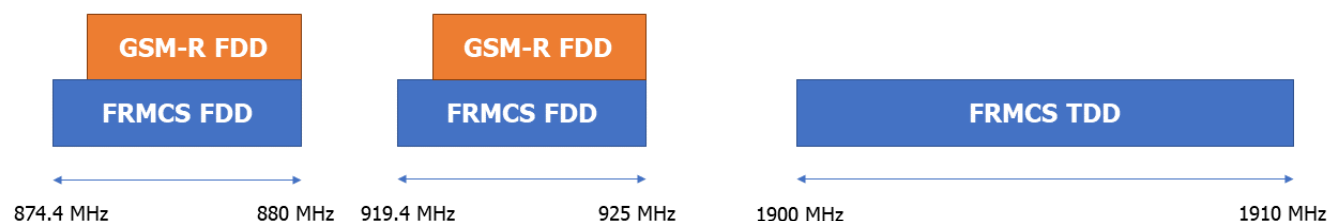


Figura 2 - Allocazione frequenziale FRMCS.
Figure 2 - FRMCS frequency allocation.

requisiti stringenti in termini di ritardo di trasmissione e tasso di errore viene classificato come uRLLC. Tradizionalmente, affidabilità e latenza sono ottimizzate in maniera indipendente, ma nei fatti sono mutualmente influenzate: aumentare l'una (per esempio, introducendo ridondanza) non fa che diminuire l'altra [13]. Uno dei traguardi più ardui raggiunti dal 5G viene proprio rappresentato dall'unione di questi requisiti contrastanti, che nel caso delle ferrovie trovano riscontro nel traffico critico relativo alla circolazione e al distanziamento dei treni.

Nel conseguimento della bassa latenza, oltre alle ritrasmissioni rapide e ai mini-slot, il 5G ha introdotto l'*Edge Computing*, che vedremo in dettaglio più avanti. Mentre per l'alta affidabilità, il principale miglioramento per consentire l'uRLLC viene rappresentato dalla *dual connectivity*: i pacchetti utente vengono duplicati e trasferiti simultaneamente al ricevitore attraverso percorsi logico-fisici disgiunti. I pacchetti ridondanti vengono poi eliminati al ricevitore. In questo modo risulta possibile evitare l'interruzione del servizio anche nel caso in cui la trasmissione dei pacchetti attraverso un percorso fallisca occasionalmente o superi i requisiti di ritardo.

Sidelink - Si tratta di una tecnica introdotta nel 5G che consente ai dispositivi connessi alla rete mobile di comunicare direttamente tra di loro a breve distanza [13]. Un esempio di applicazione ferroviaria potrebbe essere l'accoppiamento virtuale dei treni, citato nella UIC FU-7100. In questo caso, si utilizzerebbero le comunicazioni da treno a treno per condividere i dati relativi al loro movimento (accelerazione, frenata, integrità, etc.), con il fine di ridurre la distanza tra di loro e in modo che questi possano muoversi insieme come se fossero fisicamente accoppiati.

Edge Computing - Migliorare parametri di rete come latenza, numero di connessioni simultanee, sicurezza o consumo energetico non sarebbe possibile senza il *Multi-Access Edge Computing* (MEC). Considerato una tecnica chiave nel 5G, il MEC estende/integra l'intelligenza del cloud al bordo della rete (*edge*) e riduce i requisiti di trasmissione tra il treno e la gNodeB. L'idea principale del MEC consiste nell'utilizzare infrastrutture/data center locali, installati nelle gNodeB vicino all'utente terminale, per eseguire task di rilevante complessità computazionale. Con l'implementazione del MEC, il processo e l'elaborazione dei dati diviene efficiente e in tempo reale, ottenendo come risultato una riduzione di latenza e un'efficiente allocazione elastica delle risorse trasmissive, di calcolo e di memoria.

3. FRMCS/5G Core Network

Il 5G Core (5GC) utilizza un'architettura modulare orientata al cloud, capace di supportare tutte le funzioni di rete o *Network Functions* (NF) previste. Più specificatamente, ogni modulo fornisce un servizio di rete (autenticazione, gestione delle sessioni, delle politiche di trasmissione, etc.): questo aiuta a virtualizzare le NF e a fornire maggiore flessibilità e adattabilità alla *core network*. In

Sidelink - This is a technique introduced in 5G that allows direct communication over short distances between devices connected to the mobile network [13]. An example of a rail application could be virtual train coupling, mentioned in UIC FU-7100. In this case, train-to-train communications would be used to share data about their movement (acceleration, braking, etc.), with the goal of shortening the distance between them and allowing the trains to travel together and act as a physical couple.

Edge Computing - Improving network parameters such as latency, number of simultaneous connections, security or power consumption would not be possible without Multi-Access Edge Computing (MEC). Considered a major technique in 5G, MEC extends/integrates cloud intelligence at the network edge and reduces transmission requirements between the train and the gNodeB. The main idea behind MEC is to use local infrastructure/data centers installed in the gNodeBs near the end user to perform tasks with a significant computational burden. With the implementation of MEC, data processing and processing becomes efficient and real-time, resulting in lower latencies and efficient, elastic allocation of transmissive, computational, and storage resources.

3. FRMCS/5G Core Network

The 5G Core (5GC) uses a modular cloud-oriented architecture capable of supporting all the required Network Functions (NFs). Each module provides a network service (authentication, session management, broadcast policies, etc.). Such modular structure aids in the virtualization of NFs and makes the core network more flexible and adaptable to changing network conditions. Fig. 3 depicts the basic 5GC architecture, including the communication interfaces between the different modules and with the outside world.

Some information about NF modules is provided below.

Authentication Service Function (AUSF) - It supports user authentication for the requesting NF and provides the encoding material to the requesting NF.

Access and Mobility Function (AMF) - It has a fundamental role in managing user security, registration, connection, and mobility. In particular, the AMF knows the location area or cell where the user is located. Moreover, the AMF performs authentication and access authorization and therefore has interfaces with other user databases to ensure that the subscriber is admitted to the network.

Session Management Function (SMF) - It is a function dedicated to the management of user sessions (session creation, modification, and termination). In particular, the SMF interacts with the Policy Control Function (PCF) to determine whether a user session can traverse the network. In addition, for IP-based sessions, the SMF allocates IPv4 and IPv6 addresses and performs DHCP functions.

User Plane Function (UPF) - It is a main component of the 5GC framework, and an interconnection point between

Fig. 3 viene mostrata l'architettura 5GC di base, comprese le interfacce di comunicazione tra i diversi moduli e con il mondo esterno.

Alcuni dettagli sui moduli NF sono riportati nel seguito.

Authentication Service Function (AUSF) - Supporta l'autenticazione dell'utente per la NF richiedente e fornisce il materiale di codifica alla NF richiedente.

Access and Mobility Function (AMF) - Svolge un ruolo chiave nella gestione della sicurezza, della registrazione, della connessione e della mobilità. In particolare, l'AMF conosce l'area di localizzazione o la cella in cui si trova l'utente. Inoltre, l'AMF esegue l'autenticazione e l'autorizzazione all'accesso e pertanto dispone di interfacce con altri database di utenti per garantire che l'abbonato sia ammesso alla rete.

Session Management Function (SMF) - Funzione dedicata alla gestione delle sessioni utente (creazione, modifica e terminazione della sessione). In particolare, la SMF interagisce abitualmente con la *Policy Control Function (PCF)* per determinare se una sessione utente può attraversare la rete. Inoltre, per le sessioni basate su IP, l'SMF alloca indirizzi IPv4 e IPv6 ed esegue funzioni DHCP.

User Plane Function (UPF) - Componente fondamentale dell'infrastruttura 5GC e punto di interconnessione tra l'utente, la rete mobile (RAN) e le reti esterne. Pertanto, l'UPF rappresenta un punto ideale per imporre la *Quality of Service (QoS)* e implementare le politiche di trasmissione appropriate. Inoltre, l'UPF esegue l'ispezione, l'instradamento e l'inoltro dei pacchetti.

Policy Control Function (PCF). Funzione che implementa una politica di controllo *real-time*, unificata e dinamica, basata sulle condizioni della rete (congestione, posizione dell'utente, etc.) e che incorpora il *network slicing*, come vedremo successivamente.

Unified Data Management (UDM). Rappresenta l'archivio centrale dei dati e dei profili degli utenti. In particolare, l'UDM gestisce e genera i dati per l'autorizzazione all'accesso della rete e la registrazione degli utenti.

Network Repository Function (NRF). Elemento chiave dell'architettura modulare del 5GC, fornisce un unico record di tutte le NF disponibili nella *Core network*, insieme al profilo di ciascuna e ai servizi che supportano. Inoltre, l'NRF consente alle altre NF di ricevere notifiche sulla registrazione di nuove istanze NF.

Virtualizzazione - L'architettura modulare permette un concetto implementativo fondamentale per la *core network* 5G: la virtualizzazione dei moduli [10]. In particolare, le NF non sono più blocchi hardware indipendenti, ma processi software in esecuzione su un server/cluster commerciale. In questo modo, le risorse di calcolo, memoria e di rete necessarie per l'esecuzione di tali processi possono essere assegnate dinamicamente. In particolare, la *core network* scala le risorse attribuite ai moduli NF secondo le condizioni della rete, attraverso il cosiddetto strumento di

the user, the mobile network (RAN) and external networks. Therefore, the UPF is an ideal point to enforce Quality of Service (QoS) and implement appropriate transmission policies. In addition, the UPF performs packet inspection, routing, and forwarding.

Policy Control Function (PCF) - A function that implements *real-time*, unified, dynamic control policies based on network conditions (congestion, user location, etc.) and incorporates *network slicing*, a technique which will be discussed later.

Unified Data Management (UDM) - It represents the central archive for user data and profiles. The UDM manages and generates data for network access authorization and user registration.

Network Repository Function (NRF) - It is a critical component of the 5GC modular architecture; it maintains a single record of all NFs available in the core network, as well as their profiles and supported services. Furthermore, the NRF enables other NFs to receive notifications about the registration of new NF instances.

Virtualization - The modular architecture enables module virtualization, an essential implementation concept for the 5GC [10]. With this concept, NFs are no longer independent hardware blocks, but software processes running on a commercial server/cluster. Thus, the computational, data storage, and network resources required to run these processes can be dynamically allocated. In particular, the core network scales the resources allocated to NF modules in response to the network conditions, through the so-called Management and Orchestration (MANO) tool.

Network Slicing - Virtualizing and orchestrating network functions allows for the development of the network slice concept, which is a virtual subnet dedicated to the service or client on a common, shared network infrastructure—a slice of the network with its own well-defined transmission characteristics. Let us consider a future HS train: uRLLC might be required for high-priority critical train control data, as well as monitoring several IoT devices and sensors on board and downloading high-definition video for the information of passengers. All of this is made possible through network slicing, which generates separate and independent subnets for diverse applications/traffic (uRLLC, IoT, broadband, etc.), each with their own transmission requirements and level of QoS.

To be effective, network slicing must be implemented across all network domains, including radio and core, as well as the underlying IP/MPLS and optical transport domains. This is where the network manager comes in, an intelligent coordinator that can communicate to and control the network elements across previously unconnected network domains. In a traditional rail operator's backbone, such coordination is challenging and time-consuming, because operators only have an isolated, independent view of IP/MPLS, optical and microwave topologies. Rethinking the backbone network of rail operators therefore involves the introduction of such a network manager, which realizes

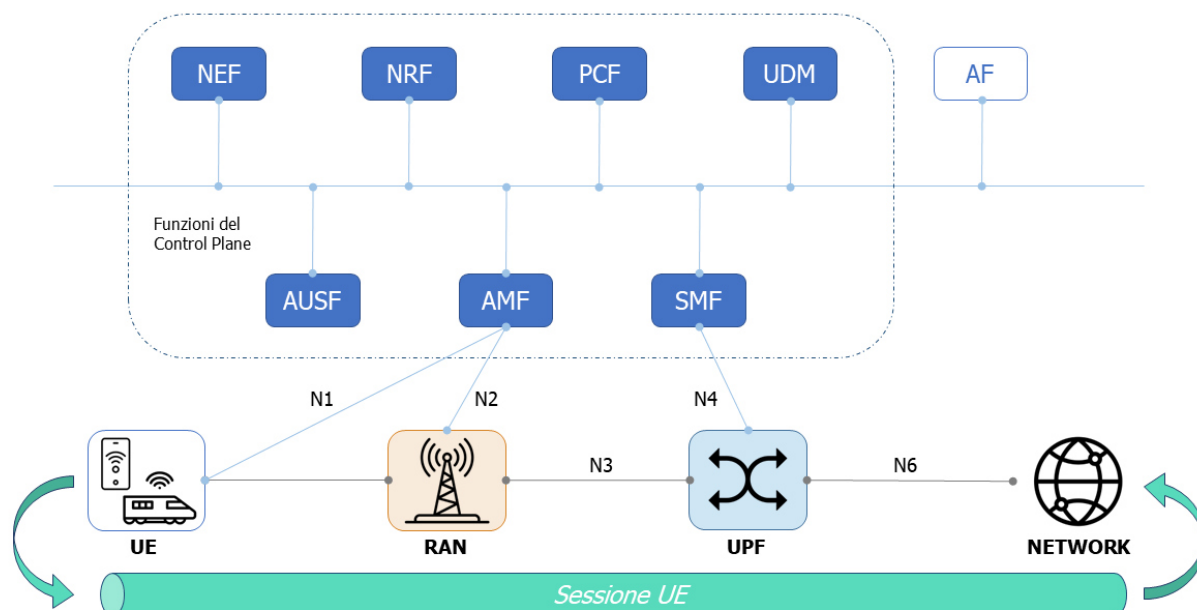


Figura 3 - Architettura 5GC. Una sessione dati contenente diversi flussi di comunicazione con i loro specifici requisiti di QoS viene stabilita tra l'utente o *User Equipment* (UE) e la *Data Network*, ovvero la rete di un fornitore di servizi (e.g., Internet).

Figure 3 - 5G Core architecture. A data session containing several communication flows with their specific QoS requirements is established between the user or *User Equipment* (UE) and the *Data Network*, which is the network of a service provider, such as the Internet.

Management and Orchestration (MANO).

Network Slicing - Virtualizzare e orchestrare le funzioni di rete porta allo sviluppo del concetto di *network slice*, ovvero una sottorete virtuale dedicata al servizio o al cliente su un'infrastruttura di rete comune, condivisa: una fetta di rete con proprie caratteristiche ben definite. Prendiamo l'esempio di un treno: questo potrebbe richiedere comunicazioni ultra-affidabili a bassa latenza (uRLLC) per i dati critici di controllo del treno, ma al contempo anche monitorare decine di dispositivi e sensori IoT a bordo, e scaricare video in alta definizione per l'infotainment dei passeggeri. Il *network slicing* rende possibile tutto questo, con diverse sottoreti dedicate rispettivamente alle applicazioni uRLLC, IoT e a banda larga, ciascuna con qualità, disponibilità e affidabilità indipendente.

Affinché funzioni *end-to-end*, il *network slicing* deve essere implementato nei domini radio, core e nelle reti di trasporto IP/MPLS e ottiche sottostanti: qui entra in funzione il manager di rete, un sistema intelligente in grado di parlare e controllare gli elementi di rete nei diversi domini di rete, storicamente mai collegati. Nella dorsale di un operatore ferroviario tradizionale, questo non avviene in modo facile o istantaneo, perché gli operatori hanno solo una visione isolata, indipendente, delle topologie IP/MPLS, ottiche e a microonde. Ripensare la rete dorsale ferroviaria passa dunque per l'introduzione di tale manager di rete, che realizza i servizi *end-to-end* per ogni sottorete in tandem con il sistema MANO.

end-to-end services for each subnetwork in tandem with the MANO framework.

4. FRMCS/5G network design for the Rail Baltica

4.1. Rail Baltica project

Rail Baltica, an 870 km greenfield rail infrastructure project, including 213 km in Estonia, 265 km in Latvia and 392 km in Lithuania, aims to integrate the Baltic states into the European rail network. The initiative covers five European Union countries—Poland, Lithuania, Latvia, Estonia and Finland. The timeline of the project envisages phased activation, in the time range 2026-2030.

The Rail Baltica project marks a symbolic return of the Baltic states to Europe: since the mid-twentieth century, the Baltic republics have been primarily linked to an east-west rail axis with Russian 1520 mm gauge tracks, which is reflected in current rail traffic flows. To date, most rail transport services are offered on that east-west axis, making interconnection between the Baltic States and the rest of the EU via Poland difficult and expensive. Therefore, this project aims at the full integration of Estonia, Latvia and Lithuania into the Single European Railway Area with the construction of a new fast (250 km/h), double-track, 1435 mm gauge, electrified rail line equipped with ERTMS/ETCS L2 signaling system.

4. Progetto Rete FRMCS/5G della Rele Rail Baltica

4.1. Il progetto della Rail Baltica

Rail Baltica, un progetto di infrastruttura ferroviaria *greenfield* di 870 km, di cui 213 km in Estonia, 265 km in Lettonia e 392 km in Lituania, ha l'obiettivo di integrare gli Stati baltici nella rete ferroviaria europea. Il progetto comprende cinque Paesi dell'Unione Europea - Polonia, Lituania, Lettonia, Estonia e indirettamente anche la Finlandia. La timeline del progetto prevede un'attivazione in fasi, nel range temporale 2026-2030.

Il progetto Rail Baltica rappresenta un ritorno simbolico degli Stati baltici all'Europa: dalla metà del XX secolo gli Stati baltici sono stati collegati principalmente a un asse ferroviario est-ovest con binari russi a scartamento 1520 mm, il che si riflette negli attuali flussi di traffico ferroviario. In particolare, ad oggi la maggior parte dei servizi di trasporto su rotaia sono forniti su tale asse est-ovest, il che rende difficile e costosa l'interconnessione dei Paesi baltici con il resto dell'UE attraverso la Polonia. Pertanto, con questo progetto si mira alla piena integrazione di Estonia, Lettonia e Lituania nell'area ferroviaria unica europea con una nuova linea ferroviaria veloce (250 km/h), a doppio binario, con scartamento 1435 mm, elettrificata e dotata di sistema di segnalamento ERTMS/ETCS L2.

4.2. FRMCS/5G per la Rail Baltica

Rail Baltica ha seguito da vicino lo sviluppo dell'FRMCS per determinarne l'idoneità e l'allineamento con il programma lavori. Con l'obiettivo di garantire un'infrastruttura ferroviaria all'avanguardia, sin dalla prima fase progettuale del sottosistema di Controllo-Comando e Segnalamento (CCS) della Rail Baltica si è scelto di adottare l'FRMCS come sistema radio Terra-Treno. Italferr, in joint venture con SYSTRA ed EGIS, ha vinto la gara di appalto per la fornitura di servizi di ingegneria per la preparazione, l'approvvigionamento e la supervisione lavori del sottosistema CCS. In particolare, Italferr si è occupata del design preliminare per gara della rete mobile FRMCS, del sistema di segnalamento e del sottosistema di alimentazione del CCS. Nel seguito verranno dettagliate le soluzioni tecnologiche adottate per lo sviluppo del sistema FRMCS della Rail Baltica.

Il modello di riferimento per il sistema FRMCS di Rail Baltica si basa sulla presenza di gNodeB disposte lungo i binari per fornire copertura radio ai treni e al personale ferroviario con apparecchiature mobili. L'architettura proposta rispetta il criterio della resilienza al singolo guasto o *Single Point of Failure* (SPoF) e, in alcuni casi, di più guasti. In particolare, i principi di base sono:

1. Core network geo-ridondate, operanti in condivisione di carico (50/50).
2. Copertura FRMCS ridondata geograficamente, garantita dai siti radio adiacenti in caso di guasto.

4.2. FRMCS/5G for the Rail Baltica

Rail Baltica constantly monitored the development of the FRMCS to determine its suitability and alignment with the work program. With the aim of ensuring a cutting-edge rail infrastructure, FRMCS was selected as the track-to-train radio standard. Italferr, in a joint venture with SYSTRA and EGIS, received the contract to provide engineering services for the preparation, procurement and supervision of Rail Baltica's Control-Command and Signaling (CCS) subsystem. Italferr oversaw the tender design for the FRMCS mobile network, signaling and CCS power facilities. The technological solutions adopted for the development of Rail Baltica's FRMCS will be detailed in the following sections.

The reference model for Rail Baltica's FRMCS is based on the presence of gNodeBs strategically placed along the tracks to provide radio coverage for trains and rail personnel using mobile equipment. The proposed architecture adheres to the requirement of resilience to the Single Point of Failure (SPoF), and, in some instances, multiple failures. The basic principles include:

1. *Geo-redundant core networks, operating in 50/50 load sharing.*
2. *Geo-redundant (double) FRMCS coverage, guaranteed by adjacent radio sites in the event of failure.*
3. *Redundant IP/MPLS transport network with multiple paths between backbone nodes.*

The radio coverage analysis and implementation choices for the Rail Baltica's mobile network will be discussed in length below, but no information about the underlying transport network, which is attributable to SYSTRA, will be supplied.

4.3. Radio coverage study

Fundamental inputs for a radio coverage evaluation are the Digital Terrain Model (DTM) and the Digital Clutter Model (DCM). The DTM is a digital representation of the Earth's pure orographical features, which do not include elements like buildings and trees. The DCM identifies and classifies elements (natural or man-made) that influence radio signal propagation. For the Rail Baltica's radio coverage examination, comprehensive digital models (DTM/DCM) of Estonia, Latvia and Lithuania were used, with 25 m resolution. In particular, the DCM is divided into 18 classes, including settlement classes (residential, industrial, commercial sectors, etc.), environmental classes (farmland, forest, desert, water, etc.), and large man-made bodies (roads, railroads, airports, stadiums, etc.). These digital models were incorporated into the ATOLL design tool to derive radio coverage and performance maps.

Due to the time gap between the Rail Baltica project's implementation and the publishing of FRMCS technical-operational specifications, it became important to determine parameters for validating the radio analysis using a theoretical upper limit for these future specifications. With the help of both theoretical and experimental investigations, including those reported in UIC FW-ATwG 1903, a minimum

3. Rete di trasporto IP/MPLS ridondata, progettata con percorsi multipli tra i nodi di backbone.

Nel seguito verranno trattati in dettaglio lo studio di copertura radio e le scelte implementative relative alla rete mobile della Rail Baltica, ma non si forniranno dettagli relativi alla sottostante rete di trasporto, di unica competenza SYSTRA.

4.3. Studio di copertura radio

Input fondamentali per uno studio radio sono il *Digital Terrain Model* (DTM) e il *Digital Clutter Model* (DCM). Il DTM rappresenta digitalmente l'orografia terrestre pura, ovvero non considerando elementi come edifici e alberi per delineare esclusivamente la superficie reale del terreno. Il DCM descrive e classifica gli elementi (naturalisti o artificiali) che influenzano la propagazione del segnale radio. Per lo studio di copertura radio della Rail Baltica sono stati impiegati modelli digitali dettagliati (DTM/DCM) di Estonia, Lettonia e Lituania, con risoluzione di 25 m. In particolare, il DCM contiene 18 classi, tra cui le classi di insediamento (aree residenziali, industriali, commerciali, etc.), le classi ambientali (terreni coltivati, foreste, deserto, acqua, etc.), e i grandi corpi artificiali (strade, ferrovie, aeroporti, stadi, etc.). Tali modelli digitali sono stati incorporati nel tool di design ATOLL per derivare le mappe di copertura e performance radio.

In conseguenza del disallineamento temporale tra l'attuazione del progetto Rail Baltica e il rilascio delle specifiche tecnico-operative dell'FRMCS, si è reso necessario determinare i parametri per convalidare l'analisi radio mediante un limite superiore teorico per tali future specifiche. Con il supporto di studi teorici e di laboratorio, tra cui quelli dell'UIC con risultati descritti nel documento FW-ATwG 1903, si è definito un *throughput* dati minimo per treno capace di garantire i servizi richiesti da Rail Baltica, come indicato in Tab. 1. Integrando tali risultati con un modello di traffico ferroviario, risulta possibile definire con precisione i parametri radio necessari per garantire tali servizi richiesti lungo l'intera linea. In particolare, considerando le caratteristiche di Rail Baltica, si è scelto di adottare un modello di traffico UIC di tipo *high-density*. Questo scenario considera un traffico ferroviario di 0,67 treni per km: essendo la Rail Baltica una linea a doppio binario, ne consegue che il numero complessivo stimato di treni per km è pari a 1,34.

Le Tab. 2 e Tab. 3 seguenti riassumono i risultati relativi al traffico radio per lo scenario considerato per Rail Baltica. In particolare, la Tab. 2 mostra la stima del traffico per treno.

Il traffico di rete per km nello scenario *high-density* di riferimento si ottiene moltiplicando il numero di treni per km (seconda colonna della Tab. 3) con il traffico per treno di riferimento (indicato nella Tabella 2). Ad esempio, il traffico di rete per km in *uplink* risulta di $1,34 \cdot 3,46 = 4,64$ Mbps.

data throughput per train capable of ensuring the services indicated in Tab. 1 was established. Through combining these findings with a rail traffic model, it is feasible to make accurate predictions of the radio parameters required to ensure these services across the whole line. Given the characteristics of Rail Baltica, a high-density UIC traffic model was selected. This scenario assumes rail traffic of 0.67 trains per km; because Rail Baltica is a double-track route, the predicted total number of trains per km is 1.34.

Tab. 2 and Tab. 3 below summarize the radio traffic results for the scenario considered for Rail Baltica. In particular, Tab. 2 shows the estimated traffic per train.

The network traffic per km in the reference high-density scenario is calculated by multiplying the number of trains per km (second column of Tab. 3) by the reference traffic per train (as stated in Tab. 2). For example, the network traffic · km in the uplink equals $1.34 \cdot 3.46 = 4.64$ Mbps.

It is important to note that these tables are exclusive to long-line coverage. For stations, interchange areas, and intermodal freight terminals, where a higher number of trains than the line is expected, a specified number of trains per cell was defined, based on the size of the stations and terminals themselves.

Simulation parameters - The parameters used for radio coverage simulations are described below [11].

Frequency bands and carriers. Based on CEPT Report 74, the following bandwidth were considered:

- 5 MHz for transmissions in FRMCS 900, operating in FDD.
- 10 MHz for transmissions in FRMCS 1900, operating in TDD.

In this regard, note that although the available bandwidth for FRMCS results in 5.6 MHz for the FRMCS 900 band, 5G standards support at present only multiples of 5 MHz. Therefore, the simulated throughput is conservative compared to the potential utilization of the whole 5.6 MHz bandwidth. Indeed, the future FRMCS standard might introduce ad hoc 5G numerologies capable of exploiting the available 5.6 MHz bandwidth in full.

Terminals (CabRadio). An on-board FRMCS terminal with the following characteristics was defined:

- Maximum power: 31 dBm.
- Noise figure: 5 dB.
- MIMO support: 2x2.
- Antenna model: omnidirectional with 1 dBi gain.
- Antenna height: 4 m above ground level.
- Supported modulation: up to 64 QAM in DL/UL.

Traffic parameters. In accordance with Tab.s 2 and 3, 1.34 trains per km were considered. This number is used to establish the number of trains per radio cell, whose diameter is studied in the simulations, for all rail operation scenarios (normal and degraded, defined below). For a conservative re-

Si fa notare che queste tabelle sono state applicate esclusivamente alla copertura lungo linea. Per le stazioni, le aree di scambio e i terminali merci intermodali, dove di solito si trova un numero di treni più elevato rispetto alla linea, è stato definito un numero specifico di treni per cella, in base alle dimensioni delle stazioni e dei terminali stessi.

Parametri di simulazione - Di seguito vengono descritti i parametri utilizzati per le simulazioni di copertura radio [11].

Bande frequenziali e portanti - In accordo con il rapporto CEPT 74, è stata considerata una larghezza di banda di:

- 5 MHz per le trasmissioni in FRMCS 900, operanti in FDD.
- 10 MHz per le trasmissioni in FRMCS 1900, operanti in TDD.

A questo riguardo si fa notare che anche se la larghezza di banda disponibile per l'FRMCS risulta di 5,6 MHz per la banda FRMCS 900, gli standard 5G supportano attualmente solo multipli di 5 MHz. Per questo, il *throughput* simulato è conservativo rispetto all'ipotetico utilizzo dell'intera larghezza di banda di 5,6 MHz. In effetti, il futuro standard FRMCS potrebbe introdurre numerologie 5G ad hoc in grado di sfruttare completamente i 5,6 MHz di banda disponibili.

Terminali (CabRadio) - È stato definito un terminale FRMCS di bordo con le caratteristiche seguenti:

- Potenza massima: 31 dBm.
- Figura di rumore: 5 dB.
- Supporto MIMO: 2x2.
- Modello di antenna: omnidirezionale con gain di 1 dBi.
- Altezza dell'antenna: 4 m rispetto al livello del suolo.
- Modulazione supportata: fino a 64 QAM in DL/UL.

Parametri di traffico - In accordo con le Tab. 2 e Tab. 3, sono stati considerati 1,34 treni per km. Questo numero viene utilizzato per stabilire il numero di treni per cella radio, il cui diametro viene studiato nelle simulazioni, per tutti gli scenari ferroviari (normale e degradato, definiti nel seguito). Per un risultato conservativo, si è scelto di arrotondare per eccesso il numero stimato di treni in ogni cella: ad esempio, per una cella con raggio di copertura pari a 1,5 km, il numero di treni risultante in tale cella viene assunto pari a 3.

Parametri di cella - Per ogni sito radio, sono state con-

Tabella 2 – Table 2

Throughput di riferimento per il singolo treno
Reference throughput for a single train

Riferimento Reference	Throughput in DL DL throughput	Throughput in UL UL throughput
Treno FRMCS FRMCS train	0,42 Mbps	3,46 Mbps

Tabella 1 – Table 1

Servizi di rete FRMCS per Rail Baltica
FRMCS network services for Rail Baltica

Parametro del modello Model parameter	Throughput
Bitrate voce Voice bitrate	23.85 kbps
Bitrate ETCS Downlink Downlink ETCS bitrate	5 kbps
Bitrate ETCS Uplink Uplink ETCS bitrate	1,25 kbps
Bitrate ATO Downlink Downlink ATO bitrate	1 kbps
Bitrate ATO Uplink Uplink ATO bitrate	0,25 kbps
Bitrate telemetria (uplink) Uplink telemetry bitrate	5 kbps
Bitrate telemetria (downlink) Downlink telemetry bitrate	1 kbps
Bitrate controllo remoto motori Engine remote control bitrate	125 kbps
Bitrate Internet per lo staff di bordo Internet bitrate for on-board staff	6 kbps
Bitrate per allerte di emergenza Emergency alerts bitrate	2 kbps
Aumento del traffico negli anni futuri Increase in traffic in future years	20%
Aumento del traffico nel caso di degrado Increase in traffic in degraded scenario	30%
Risorse dedicate ai segnali di controllo Control signal network resources	10%
Bitrate video HD (supervisione, uplink) Uplink HD video bitrate for supervision	2500 kbps

sult, the estimated number of trains in each cell was rounded up: for example, for a cell with a coverage radius of 1.5 km, the resulting number of trains in that cell is assumed to be 3.

Radio cell parameters - For each radio site, two FRMCS cells were considered, covering the two sides of the tracks with respect to the site location. The parameters of the FRMCS cells were defined as follows:

- Maximum transmission power:
 - a. 46 dBm for FRMCS 900.
 - b. 50 dBm for FRMCS 1900.
- Noise figure: 4 dB.
- Feeder cable losses: 1,01 dB.
- Mast height: 30 m rispetto al livello del suolo.
- OFDM sub-carrier spacing: 15 kHz.
- MIMO support:
 - a. 2x2 for FRMCS 900.

siderate due celle FRMCS, che coprono i due lati dei binari rispetto alla posizione del sito. I parametri delle celle FRMCS sono stati definiti come segue:

- Potenza di trasmissione massima:
 - a. 46 dBm per FRMCS 900.
 - b. 50 dBm per FRMCS 1900.
- Figura di rumore: 4 dB.
- Perdite cavo feeder: 1,01 dB.
- Altezza del palo: 30 m rispetto al livello del suolo.
- Spaziatura tra le sottoportanti OFDM: 15 kHz.
- Supporto MIMO:
 - a. 2x2 per la banda FRMCS 900.
 - b. 4x4 per la banda FRMCS 1900.
- Modello di antenna: diagramma di radiazione come nelle figure seguenti (Fig. 4 e Fig. 5), con tilt elettrico pari a 3 o 5 gradi.

Modello di propagazione - Per le simulazioni di copertura radio sono stati considerati due modelli di propagazione [11]:

- Okumura-Hata, per la banda FRMCS 900;
- COST Hata, per la banda FRMCS 1900.

Secondo questi modelli, l'attenuazione L del segnale radio viene espressa in dB come:

$$L = L_u - A(h_{UE}),$$

dove:

- $L_u = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_{gNodeB}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{gNodeB}) \log(d) - C$, per Okumura-Hata.
- $L_u = 49,3 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(h_{gNodeB}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{gNodeB}) \log(d) - C$, per COST Hata.
- $A(h_{UE}) = (1,1 \log(f) - 0,7) h_{UE} - (1,56 \log(f) - 0,8)$.

Tali modelli sono largamente utilizzati per la previsione del segnale in ambienti radio mobili, e risultano validi per le frequenze f di interesse e per distanze d fino a 20 km. I modelli incorporano gli effetti di diffrazione, riflessione e scattering causati dalle strutture urbane e applica fattori C di correzione per gli ambienti suburbani e rurali. Inoltre, come si evince dalle equazioni, essi tengono altresì conto dell'altezza dell'antenna al trasmettitore h_{gNodeB} e dell'altezza dell'antenna al ricevitore h_{UE} .

4.4. Risultati delle simulazioni radio

In questa sezione verranno presentati i risultati delle simulazioni effettuate per l'intero tracciato della Rail Baltica.

Gli scenari considerati sono i seguenti:

- Scenario normale (tutti i siti sono attivi).

Tabella 3 – Table 3

Throughput di riferimento per scenario high-density
Reference throughput according to the high-density scenario

Riferimento Reference	Numero di treni per km Number of trains · km	Throughput in DL per km Downlink throughput · km	Throughput in UL per km Uplink throughput per km
Alta densità High Density	1,34	0,56 Mbps	4,64 Mbps

- b. 4x4 for FRMCS 1900.

- Antenna model: radiation pattern as in the following figures (Fig. 4 and Fig. 5), with electrical tilt equal to 3 or 5 degrees.

Propagation model - Two propagation models were considered for radio coverage simulations [11]:

- Okumura-Hata, for the FRMCS 900 band.
- COST Hata, for the FRMCS 1900 band.

According to these models, the attenuation L of the radio signal is expressed in dB as:

$$L = L_u - A(h_{UE}),$$

where:

- $L_u = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_{gNodeB}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{gNodeB}) \log(d) - C$, for Okumura-Hata.
- $L_u = 49,3 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(h_{gNodeB}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{gNodeB}) \log(d) - C$, for COST Hata.
- $A(h_{UE}) = (1,1 \log(f) - 0,7) h_{UE} - (1,56 \log(f) - 0,8)$.

Such models have become popular for signal prediction in mobile radio situations, and have been shown to be valid for frequencies f of interest for FRMCS and distances d of up to 20 km. The models account for the impacts of urban structure-induced diffraction, reflection, and scattering, as well as corrective C factors for suburban and rural contexts. Furthermore, as shown in the equations, those propagation models account for the antenna height at the transmitter h_{gNodeB} and the antenna height at the receiver h_{UE} .

4.4. Results of radio simulations

This section will present the results of simulations carried out for the entire Rail Baltica line.

The scenarios considered are as follows:

- Normal scenario (all radio sites are active).
- Degraded scenario (SPoF, even or odd sites active).

The performance was evaluated in terms of:

- Downlink radio coverage, which is the received power of the cell reference signal (RSRP) at the on-board FRMCS terminal, expressed in dBm.
- Effective per-user downlink/uplink throughput, so the transmission bitrate per train in Mbps of digital data (excluding control data), in both downlink and uplink.

- Scenario degradato (SPoF, siti pari o siti dispari attivi).
Le prestazioni sono state valutate in termini di:

- Copertura in *downlink*, ovvero la potenza ricevuta del segnale di riferimento di cella (RSRP) al terminale FR-MCS di bordo, espressa in dBm.
- Throughput effettivo per-utente in *downlink/uplink*, ovvero il bitrate di trasmissione per treno in Mbps dei dati digitali, sia in *downlink* che in *uplink*.

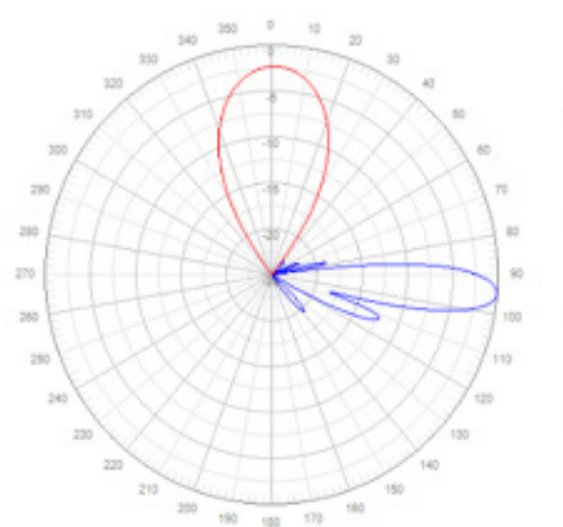
Gli obiettivi da raggiungere (in tutti gli scenari) per le metriche sopra descritte sono i seguenti:

- Copertura in *downlink*: superiore a -95 dBm al 95° percentile, che corrisponde al livello di copertura radio delineato nelle specifiche EIRENE per le linee AV ERTMS/ETCS L2/L3.

The targets to be achieved (in all scenarios) for the metrics described above are as follows:

- *Downlink radio coverage: greater than -95 dBm at the 95th percentile, which corresponds to the radio coverage level outlined in the EIRENE specifications for ERTMS/ETCS L2/L3 HS lines.*
- *Effective per-user downlink throughput: greater than 0,42 Mbps (according to Tab. 2).*
- *Effective per-user uplink throughput: greater than 3,46 Mbps (according to Tab. 2).*

Radio planning - As per Rail Baltica's request, radio sites were planned with the constraint of being located close to station exchange areas and ERTMS block sections, to facilitate their powering. Among the design choices, it was preferred to strengthen the radio service in highly frequented contexts

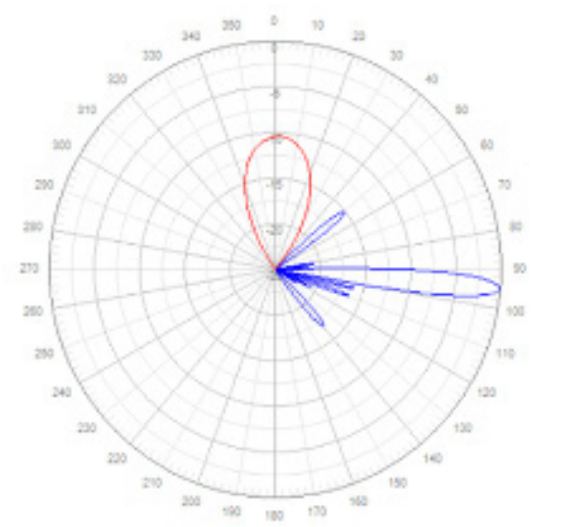


Legend

Description	Port	Frequency	Tilt	Cut	Color
Dual Polarization	Port 1 +45	925	5	V	Blue
Dual Polarization	Port 1 +45	925	5	H	Red

Figura 4 - Diagramma di radiazione per l'antenna FRMCS 900.

Figure 4 - Radiation pattern for the FRMCS 900 antenna.



Legend

Description	Port	Frequency	Tilt	Cut	Color
Dual Polarization	Port 3 +45	1900	5	V	Blue
Dual Polarization	Port 3 +45	1900	5	H	Red

Figura 5 - Diagramma di radiazione per l'antenna FRMCS 1900.

Figure 5 - Radiation pattern for the FRMCS 1900 antenna.

- *Throughput* effettivo per-utente in *downlink*: superiore a 0,42 Mbps (in accordo con la Tab. 2).
- *Throughput* effettivo per-utente in *uplink*: superiore a 3,46 Mbps (in accordo con la Tab. 2).

Planning Radio - Come richiesto da Rail Baltica, i siti radio sono stati pianificati col vincolo di essere installati nelle aree di scambio delle stazioni e nelle sezioni di blocco ERTMS, per facilitare la loro alimentazione. Tra le scelte progettuali, si è preferito irrobustire il servizio radio negli ambienti altamente frequentati (terminal, aree di scambio, etc.) prevedendo dove possibile siti *dual-layer*, ovvero trasmettenti sia in banda FRMCS 900 che in banda FRMCS 1900. Generalmente, il *layer 900* viene utilizzato per garantire il servizio lungo l'intera linea, per le sue migliori caratteristiche propagative, mentre il *layer 1900* viene sfruttato per gestire l'aumento di domanda capacitiva all'interno delle aree altamente frequentate, dove si prevede un numero maggiore di treni e di passeggeri presenti. Inoltre, si è scelto di adottare un tilt elettrico di 3 gradi per tutte le gNodeB trasmettenti in banda FRMCS 900, al fine di massimizzare la copertura lungo tratta, e un tilt elettrico maggiore, pari a 5 gradi, per tutte quelle trasmettenti in banda FRMCS 1900, al fine di migliorare la copertura nei terminal merci/passeggeri.

In Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 sono mostrate le mappe prestazionali negli scenari normale e degradato ottenute nello strategico nodo di Riga, la capitale lettone, e di un tratto lungo linea in Lituania, dove si verifica interferenza da rete GSM-R esistente. Si noti che in quest'ultimo caso l'FRMCS trasmette esclusivamente nella banda dei 1900 MHz, per evitare interferenza mutuale tra GSM-R ed FRMCS. Le didascalie delle figure contengono altresì un'analisi approfondita dei risultati. Infine, in Tabella 4 vengono forniti i dati di sintesi del progetto radio FRMCS per la Rail Baltica, dove per LT, LV ed EE si intende Lituania, Lettonia ed Estonia, rispettivamente. Come si nota dalla Tab. 4, al crescere della frequenza di trasmissione dev'essere ridotta la distanza media inter-sito - e dunque dev'essere incrementato il numero di siti radio - per mantenere i livelli di performance radio desiderati. Più specificatamente, si osserva un *densification rate* dovuto alla trasmissione in banda FRMCS 1900 del 40% circa.

4.5. Core network

Per la *core network* della Rail Baltica, si è scelto di implementare una rete mobile 5G di tipo *stand-alone*. Questa tipologia prevede diversi benefici rispetto ad una rete *non-stand-alone* (ovvero con accesso radio 5G, ma core 4G) in termini di performance radio, come abbiamo visto nei paragrafi precedenti.

Un tema centrale per la *core network* della Rail Baltica riguarda i possibili conflitti in termini di normative internazionali di sicurezza e protezione dei dati. Per ovviare a problemi di questa natura, si è optato per dotare di una *core network* dedicata e indipendente per ogni Stato balti-

(terminals, interchange areas, etc.) by providing where possible dual-layer sites, i.e., transmitting in both FRMCS 900 and FRMCS 1900 bands. In general, layer 900 is used to ensure networking services along the entire line, due to its superior propagation characteristics, whereas layer 1900 is exploited to handle increased capacitive demand in high-traffic areas where more trains and passengers are expected to be present. In addition, an electrical tilt of 3 degrees was chosen for all gNodeBs transmitting in the FRMCS 900 band to maximize coverage along the route, and a greater electrical tilt of 5 degrees for all gNodeBs transmitting in the FRMCS 1900 band to improve coverage at freight/passenger terminals.

In Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 there are shown the performance maps obtained in the normal and degraded scenarios in the strategic node of Riga, the Latvian capital, and of a long line section in Lithuania, where interference from the current GSM-R network occurs. It should be noted that in the latter situation, the FRMCS exclusively broadcasts in the 1900 MHz band to avoid mutual interference with GSM-R. The figure captions also contain a detailed explanation of the results. Tab. 4 summarizes the statistics from the FRMCS radio project for Rail Baltica, where LT, LV, and EE represent Lithuania, Latvia, and Estonia, respectively. As can be seen from Tab. 4, when the transmission frequency increases, the average inter-site distance decreases, and thus the number of radio sites increases, so as to maintain the desired radio performance levels. In particular, transmission in the FRMCS 1900 band results in a densification rate of around 40%.

4.5. Core network

The Rail Baltica core network is planned to be implemented as a stand-alone 5G mobile network. In terms of radio performance, such a configuration offers significant advantages over a non-stand-alone network (that is, one with 5G radio access but a 4G core network), as pointed out in earlier sections.

A central issue for Rail Baltica's core network concerns potential conflicts with international security and data protection laws. To prevent these kinds of complications, it was planned to establish a dedicated and independent core network for each Baltic state. As a result, Rail Baltica's FRMCS core network consists of three redundant 5G core networks.

To protect the core network from SPoFs that could cause service disruption, including infrastructure failure, a geographic redundancy of the core network was chosen as the solution. Two core networks per state were envisaged, with geographically distinct and separate center locations. These core networks operate in load sharing mode (50/50), which means that if one fails, the other remains active and takes over the complete load of all FRMCS radio sites in the network. Fig. 10, depicts the overall architecture for geo-redundancy in the Rail Baltica core network.

Interfaces - Both core networks communicate with the internal and external entities indicated below.

Radio Block Center. The RBC is the train's contact with

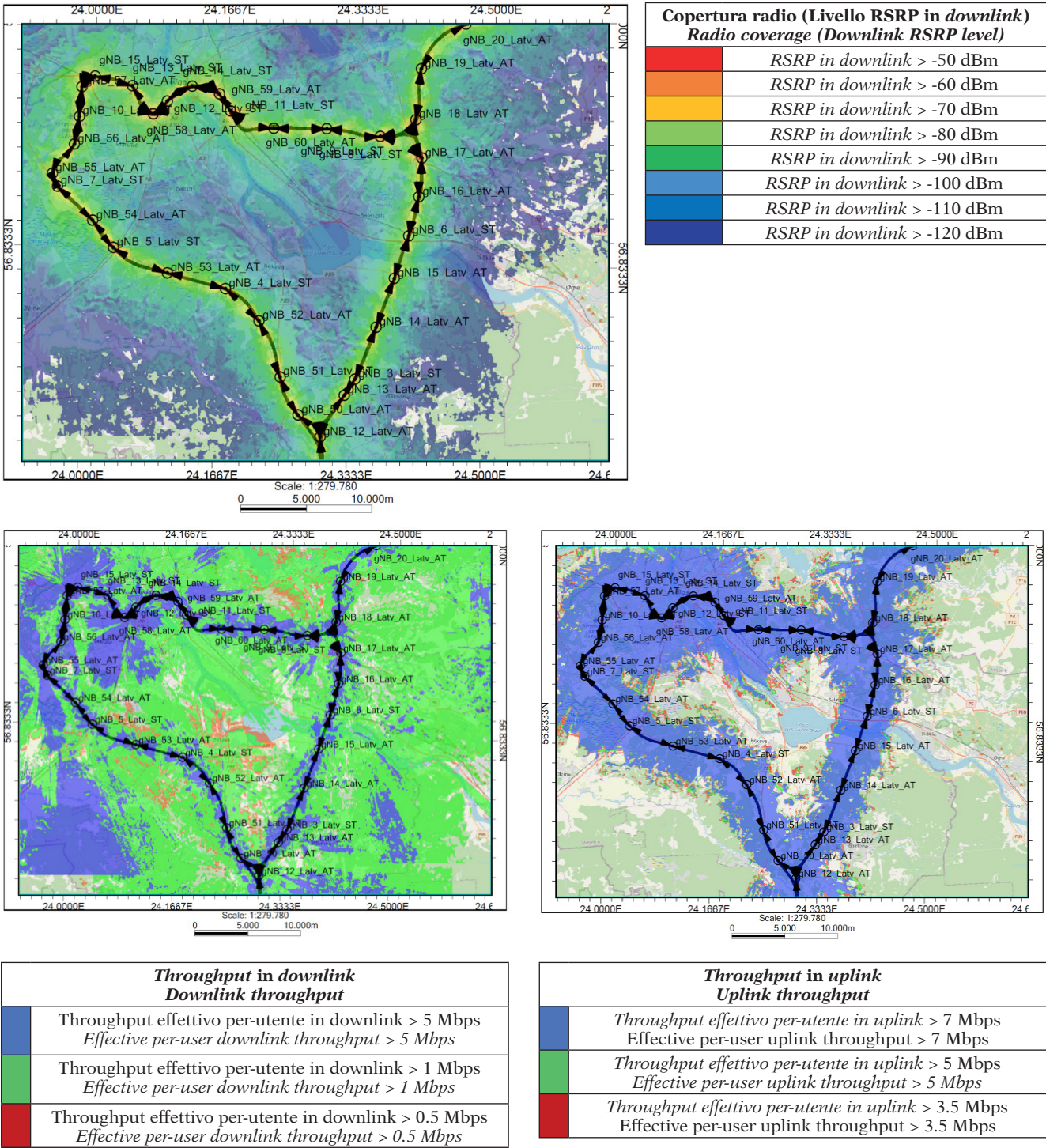


Figura 6 - Simulazioni radio nel nodo di Riga, scenario normale. In alto, livello di copertura in *downlink*. In basso, throughput in *downlink* e *throughput in uplink*. Il tracciato ferroviario risulta completamente coperto con livelli di copertura superiori all'obiettivo di -95 dBm. Il *throughput* effettivo per utente in *downlink* risulta superiore all'obiettivo di 0,42 Mbps in tutto il nodo. Inoltre, il *throughput* effettivo per utente in uplink risulta superiore all'obiettivo di 3,46 Mbps in tutto il nodo.

Figure 6 - Radio simulations in the node of Riga, normal scenario. Top, downlink radio coverage level. Bottom, downlink and uplink throughput. The railway track is found to be completely covered, with coverage levels exceeding the target of -95 dBm. The effective per-user downlink throughput is higher than 0.42 Mbps in the entire node. Furthermore, the effective per-user uplink throughput exceeds the objective of 3.46 Mbps across the node.

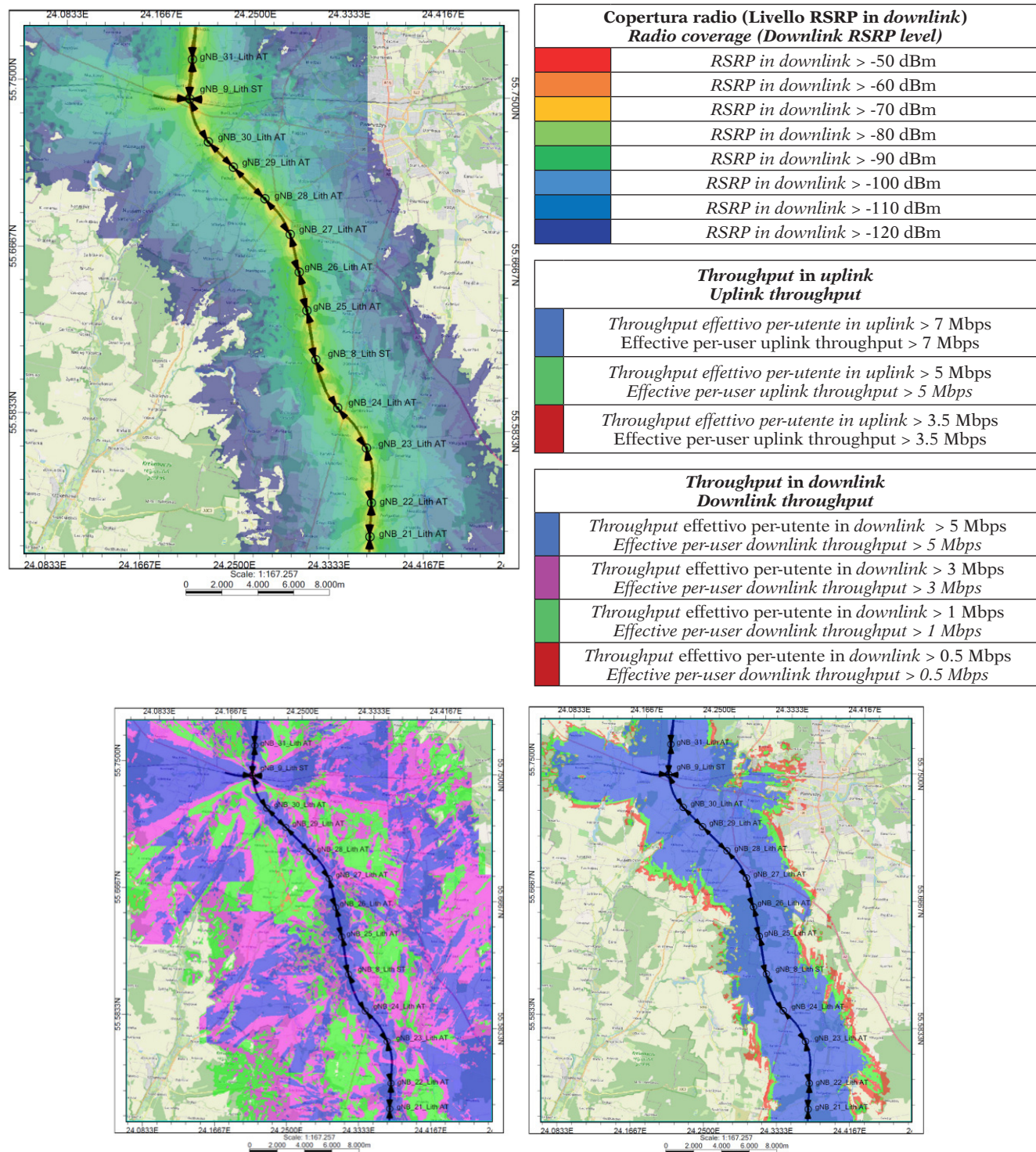
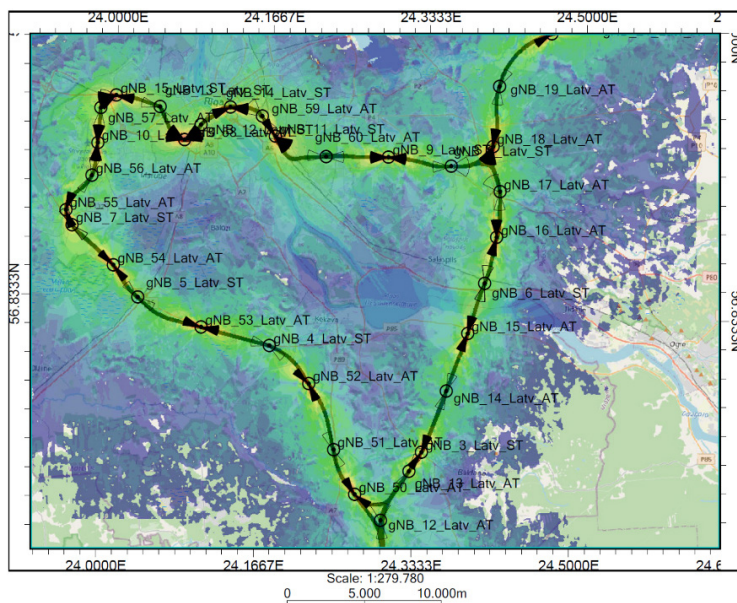


Figura 7 - Simulazioni radio nella tratta lituana tra Panevėžys e Kaunas, scenario normale. In alto, livello di copertura in downlink. In basso, throughput in downlink e throughput in uplink. Il tracciato ferroviario risulta completamente coperto con livelli di copertura superiori all'obiettivo di -95 dBm. Il throughput effettivo per utente in downlink risulta superiore all'obiettivo di 0,42 Mbps lungo l'intera tratta. Inoltre, il throughput effettivo per utente in uplink risulta superiore all'obiettivo di 3,46 Mbps lungo l'intera tratta.

Figure 7 - Radio simulations in the Lithuanian section between Panevėžys e Kaunas, normal scenario. Top, downlink radio coverage level. Bottom, downlink and uplink throughput. The railway track is found to be completely covered, with coverage levels exceeding the target of -95 dBm. The effective per-user downlink throughput is higher than 0.42 Mbps along the entire section. Furthermore, the effective per-user uplink throughput exceeds the objective of 3.46 Mbps across the entire section.



Copertura radio (Livello RSRP in downlink) Radio coverage (Downlink RSRP level)	
	RSRP in downlink > -50 dBm
	RSRP in downlink > -60 dBm
	RSRP in downlink > -70 dBm
	RSRP in downlink > -80 dBm
	RSRP in downlink > -90 dBm
	RSRP in downlink > -100 dBm
	RSRP in downlink > -110 dBm
	RSRP in downlink > -120 dBm

Throughput in downlink Downlink throughput	
	Throughput effettivo per-utente in downlink > 5 Mbps Effective per-user downlink throughput > 5 Mbps
	Throughput effettivo per-utente in downlink > 1 Mbps Effective per-user downlink throughput > 1 Mbps
	Throughput effettivo per-utente in downlink > 0.5 Mbps Effective per-user downlink throughput > 0.5 Mbps

Throughput in uplink Uplink throughput	
	Throughput effettivo per-utente in uplink > 7 Mbps Effective per-user uplink throughput > 7 Mbps
	Throughput effettivo per-utente in uplink > 5 Mbps Effective per-user uplink throughput > 5 Mbps
	Throughput effettivo per-utente in uplink > 3.5 Mbps Effective per-user uplink throughput > 3.5 Mbps

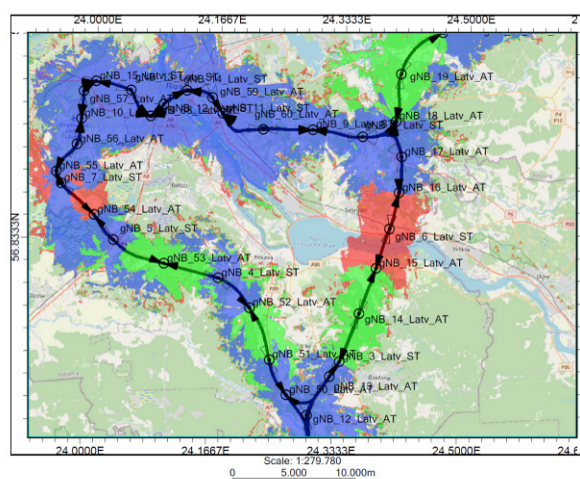
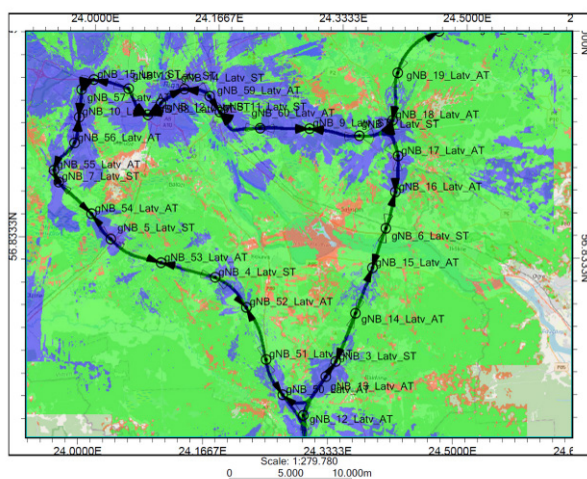


Figura 8 - Simulazioni radio nel nodo di Riga, scenario degradato. In alto, livello di copertura in downlink. In basso, throughput in downlink e throughput in uplink. Il tracciato ferroviario risulta completamente coperto con livelli di copertura superiori al target di -95 dBm, grazie alla ridondanza di copertura geografica. Il throughput effettivo per utente in downlink risulta superiore al target di 0,42 Mbps in tutto il nodo. Inoltre, il throughput effettivo per utente in uplink risulta superiore al target di 3,46 Mbps in tutto il nodo. In particolare, il throughput per utente risulta inferiore rispetto allo scenario normale, poiché gli utenti migrano verso le celle radio rimaste attive (nello scenario degradato, ogni cella gestisce circa il doppio dei treni rispetto al normale scenario).

Figure 8 - Radio simulations in the node of Riga, degraded scenario. Top, downlink radio coverage level. Bottom, downlink and uplink throughput. The railway track is found to be completely covered, with coverage levels exceeding the target of -95 dBm, owing to the geo-redundant (double) radio coverage approach. The effective per-user downlink throughput is higher than 0.42 Mbps in the entire node. Furthermore, the effective per-user uplink throughput exceeds the objective of 3.46 Mbps across the node. In particular, the throughput per user is lower than in the normal scenario, because users migrate to radio cells that remain active (in the degraded scenario, each cell handles about twice as many devices as in the normal scenario).

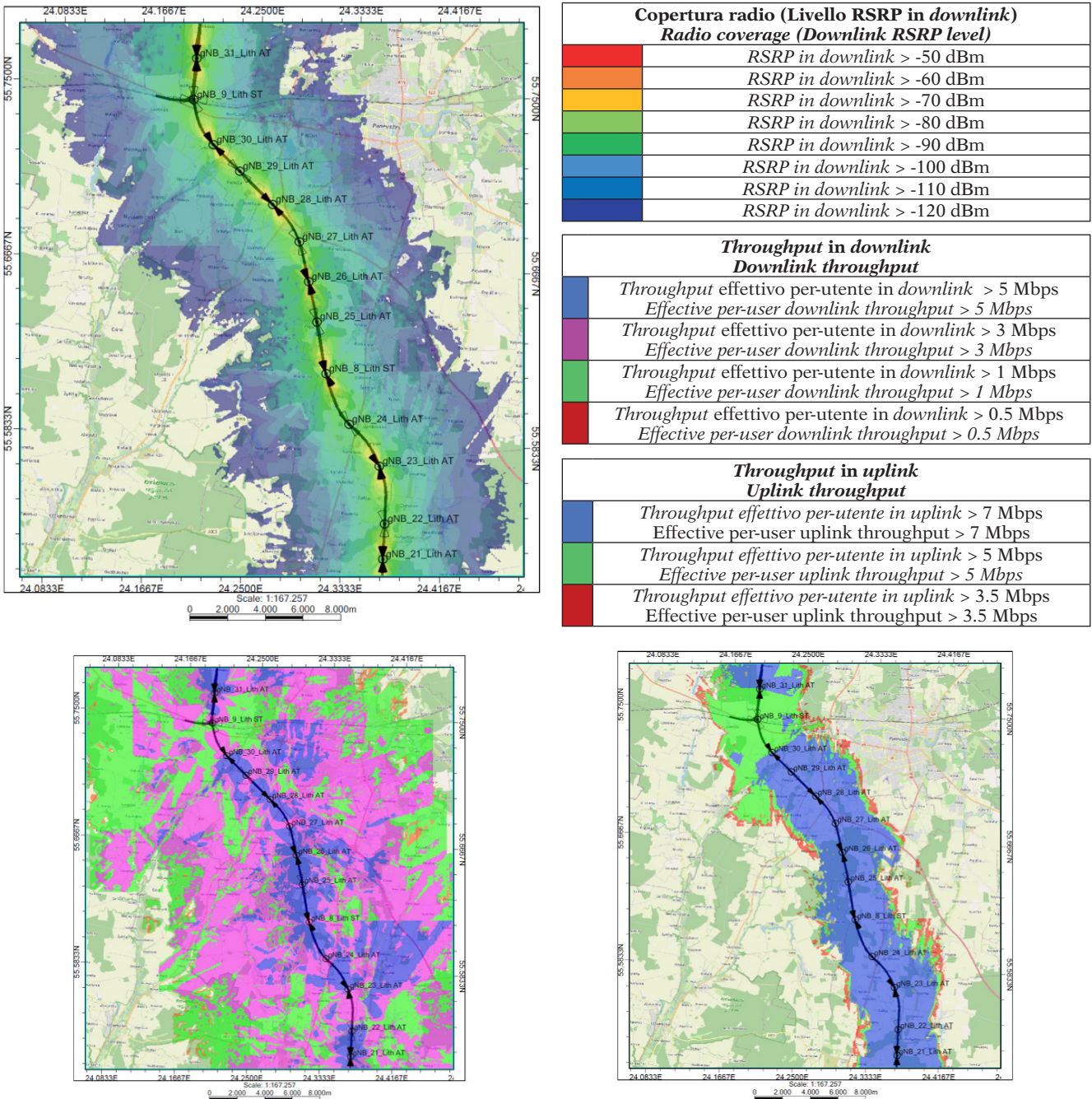


Figura 9 - Simulazioni radio nella tratta lituana tra Panevėžys e Kaunas, scenario degradato. In alto, livello di copertura in downlink. In basso, throughput in downlink e throughput in uplink. Il tracciato ferroviario risulta completamente coperto con livelli di copertura superiori al target di -95 dBm, grazie alla ridondanza di copertura geografica. Il throughput effettivo per utente in downlink risulta superiore al target di 0,42 Mbps lungo l'intera tratta. Inoltre, throughput effettivo per utente in uplink risulta superiore al target di 3,46 Mbps lungo l'intera tratta. In particolare, il throughput per utente risulta inferiore rispetto allo scenario normale, poiché gli utenti migrano verso le celle radio rimaste attive (nello scenario degradato, ogni cella gestisce circa il doppio dei treni rispetto al normale scenario).

Figure 9 - Radio simulations in the Lithuanian section between Panevėžys e Kaunas, degraded scenario. Top, downlink radio coverage level. Bottom, downlink and uplink throughput. The railway track is found to be completely covered, with coverage levels exceeding the target of -95 dBm, owing to the geo-redundant (double) radio coverage approach. The effective per-user downlink throughput is higher than 0.42 Mbps along the entire track. Furthermore, the effective per-user uplink throughput exceeds the objective of 3.46 Mbps along the entire track. In particular, the throughput per user is lower than in the normal scenario, because users migrate to radio cells that remain active (in the degraded scenario, each cell handles about twice as many devices as in the normal scenario).

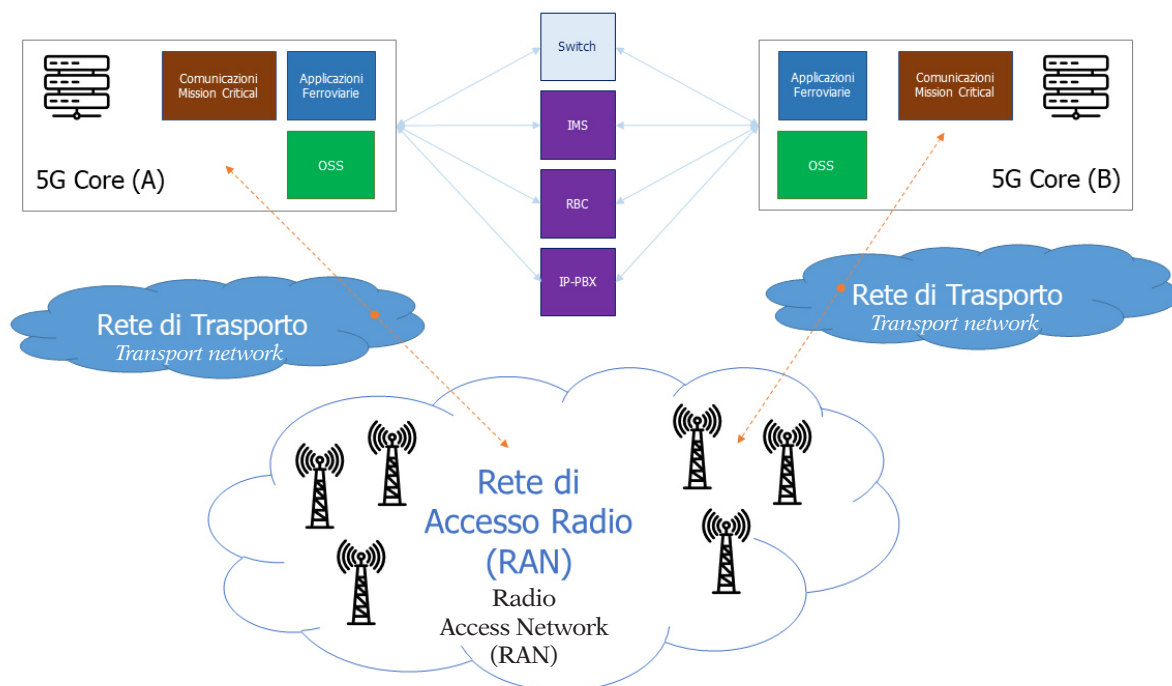


Figura 10 - Core network Rail Baltica e ridondanza geografica.
Figure 10 - Core network for Rail Baltica and its geographical redundancy.

co. Di conseguenza, tre core network 5G ridondate formano la rete centrale FRMCS di Rail Baltica.

Per proteggere la core network da SPoF che potrebbero causare un'interruzione del servizio, compreso il guasto dell'infrastruttura fisica, si è scelto di implementare una ridondanza geografica della core network. In particolare, due core network per Stato sono state previste in posti centrali geograficamente distinti e separati. In particolare, tali core network lavorano in condivisione di carico (50/50): questo significa che se una di esse si guasta, l'altra rimane attiva e assume il carico completo di tutti i siti radio FRMCS della rete. In Fig. 10 viene mostrata l'architettura complessiva per la geo-ridondanza della core network di Rail Baltica.

Interfacce - Entrambe le core network sono interfacciate con i sistemi interni ed esterni di seguito elencati.

Radio Block Center. L'RBC costituisce l'interfaccia tra il treno e l'apparato centrale che regola la circolazione e il distanziamento dinamico dei treni. L'RBC riceve via radio la posizione del treno e invia l'autorizzazione a proseguire la marcia, attraverso una sessione di comunicazione dedicata e sicura.

IP Private Branch Exchange/Dispatcher Server (IP-PBX) - L'IP-PBX rappresenta il sistema di commutazione centrale per le chiamate telefoniche. Tale sistema gestisce il traffico voce interno e funge da gate-keeper verso il mondo esterno.

IP Multimedia Subsystem (IMS) - L'IMS fornisce comu-

the interlocking apparatus that controls its movement. The RBC receives the train's position via radio and issues the authorization to continue running via a dedicated and secure communication session.

IP Private Branch Exchange/Dispatcher Server (IP-PBX)
- The IP-PBX serves as the core switching platform for tele-

Tabella 4 – Table 4

Sintesi del progetto radio Rail Baltica
Summary of the Rail Baltica radio project

Parametro Parameter	LT	LV	EE	Totale Total
Siti FRMCS FRMCS site	137	82	52	271
Siti FRMCS 900 FRMCS 900 site	0	61	38	99
Siti FRMCS 1900 FRMCS 1900 site	137	8	0	145
Siti FRMCS 900 / 1900 FRMCS 900 / 1900 site	0	13	14	27
Lunghezza tracciato [km] Track length [km]	392	265	213	870
Distanza media siti [km] Average site distance [km]	2,86	3,23	4,10	3,21

nicazioni multimediali in tempo reale da persona a persona basate sul protocollo IP (chiamate vocali o videochiamate) e comunicazioni da persona a macchina.

Inoltre, il server per la *Automatic Train Operation* (ATO) e l'*Asset Management System* (AMS), ovvero il sistema di gestione degli asset fisici e digitali di Rail Baltica, sono direttamente interfacciati con il sistema FRMCS.

Infine, la *core network*, mediante il *Broadband Network Gateway* (BNG), si interfaccia esternamente con gli operatori pubblici e con le reti GSM-R esistenti, come ad esempio le reti GSM-R lituane e polacche. Sono altresì previsti sistemi che consentono il filtraggio, il monitoraggio e la restrizione delle connessioni tra le *core network* di Rail Baltica stesse e con le reti pubbliche esterne. In questo senso, il *Security Edge Protection Proxy* (5G SEPP) fornisce una protezione *end-to-end* per i messaggi tra NF appartenenti a *core network* diverse, evitando che vengano esposti o manipolati da altre parti.

5. Conclusioni e prospettive

Questo articolo ha fornito una visione d'insieme del nuovo standard ferroviario FRMCS, basato su tecnologia radiomobile 5G. In particolare, sono stati introdotti gli elementi chiave di tale tecnologia, come l'architettura di rete modulare o l'accesso massivo IoT, e indicato come queste potranno facilitare lo sviluppo del trasporto ferroviario del futuro, con i suoi molteplici requisiti prestazionali. Infine, è stato mostrato un esempio reale di design di una rete ferroviaria 5G, nel contesto del progetto preliminare per gara della Rail Baltica. Tale design, pur presentando dei limiti che saranno superati nelle successive fasi progettuali, man mano che le specifiche complete dell'FRMCS saranno emesse, rappresenta un primo passo concreto verso l'introduzione della tecnologia mobile 5G nell'industria ferroviaria.

phone calls. It manages internal speech communication and serves as a gateway to the outer world.

IP Multimedia Subsystem (IMS) - The IMS enables real-time IP-based person-to-person multimedia communications (voice or video calls), as well as person-to-machine communications.

Furthermore, the FRMCS is linked to the Automatic Train Operation (ATO) server and Rail Baltica's Asset Management System (AMS), which manages its physical and digital assets.

Finally, the Broadband Network Gateway (BNG) connects the core network to public operators and existing GSM-R networks, such as those in Lithuania and Poland. There are also technologies in place to filter, monitor, and restrict connections between Rail Baltica's core networks and external public networks. In this approach, the Security Edge Protection Proxy (5G SEPP) provides end-to-end protection for communications sent between NFs in different core networks, keeping them from exposure or manipulation.

5. Conclusions and perspectives

This article offered an overview of the new FRMCS rail standard, which is based on 5G mobile networking. In particular, 5G-related technological advances, such as modular network architecture or IoT massive access, were introduced, and indicated how these will facilitate the development of future rail transportation, with its multiple performance requirements. Furthermore, a real-world example of a 5G rail network design was shown, in the context of the Rail Baltica tender design. This design, while having limitations that will be overcome in subsequent design phases as the full FRMCS specifications are issued, represents a first concrete step toward the introduction of 5G mobile networking into rail operation.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] EIRENE, FRS 8.1.0, 2023.
- [2] EIRENE, SRS 16.1.0, 2023.
- [3] UIC, FU-7100 5.1.0, 2023.
- [4] UIC, FU-7120 1.0.0, 2023.
- [5] UIC, AT-7800 1.0.0, 2023.
- [6] UIC, MG-7900 2.1.0, 2023.
- [7] UIC, FIS-7970 1.0.0, 2023.
- [8] UIC, TOBA-7510 1.0.0, 2023.
- [9] Nokia (2021), "Highly resilient FRMCS/5G design for future rail operation".
- [10] Huawei (2023), "Future Railway Mobile Communication System".
- [11] ETSI, TR 103 554-2 1.1.1, 2021.
- [12] Ericsson (2022), "5G-powered FRMCS".
- [13] Ericsson Research (2022), "5G New Radio for Automotive, Rail, and Air Transport".