Sistema di controllo della continuità elettrica delle rotaie da abbinare a sistemi conta assi

Rail electrical continuity monitoring system to be integrated with axle counter systems

Giancarlo Cardarilli [*]
Giuseppe Fazio [**]
Mauro Giaconi [**]
Simone Acciarito [**]
Enrico Fazio [**]

(https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.10.2025.ART.1)

Sommario - In questo documento si illustra una soluzione che, integrandosi ad un sistema di Blocco Conta Assi (BCA) in modo facile, certificabile SIL 4 ed economico, permetta il controllo della continuità elettrica della rotaia in similitudine all'analogo controllo che di fatto svolgono i cdb a circuiti di binario a correnti impresse, nei quali la mancanza di detta continuità viene interpretata come la presenza di rotabili nella tratta da loro controllata.

In questo studio, condotto nell'ambito di un accordo quadro stipulato tra Università di Tor Vergata ed RFI, dopo una verifica dello stato dell'arte e l'individuazione di altre possibili soluzioni tecniche, si è congiuntamente deciso di approfondire la soluzione qui presentata. Sono state inoltre concordate ed eseguita simulazioni, poi confermate sperimentalmente nel circuito sperimentale di RFI sito San Donato volte a identificare i ragionevoli limiti dimensionali delle tratte controllabili dal sistema proposto.

1. Introduzione

Il sistema studiato per risolvere i problemi sopra indicati è progettato per:

1. Controllare, senza dispositivi intermedi, tratte di diversi km (indicativamente 6 km), per non penalizzare una delle caratteristiche dei sistemi BCA, che è proprio la lunghezza delle tratte.
2. Essere installabile senza appesantire notevolmente i tempi, la complessità e i costi richiesti da un BCA.

Summary - *This document illustrates a solution which, by integrating easily with an Axle Counter Block (BCA) system in a SIL 4-certifiable and cost-effective manner, enables the monitoring of rail electrical continuity, in analogy to the function performed by track circuits with impressed currents, where the loss of such continuity is interpreted as the presence of rolling stock within the controlled section. This study, carried out under a framework agreement between the University of Tor Vergata and RFI, included a review of the state of the art and the identification of other possible technical solutions. It was jointly decided to further investigate the solution presented here. Simulations were also agreed upon and performed, later experimentally validated on the RFI test track at San Donato, with the aim of defining the reasonable dimensional limits of the sections that can be monitored by the proposed system.*

1. Introduction

The system designed to address the aforementioned issues is designed to:

1. *Monitor, without intermediate devices, track sections of several km in length (approximately 6 km), so as not to compromise one of the main features of BCA systems, which is the great length of sections.*
2. *Be installed without significantly increasing the time, complexity, or costs typically required for a BCA.*
3. *Not increase the overall cost by more than 20–30% compared to a traditional BCA.*
4. *Avoid interfering with or altering the train presence detection part of the BCA, particularly its SIL 4-certified*

[*] Direttore Dipartimento Ing. Elettronica, Università di Roma "Tor Vergata".

[**] Dipartimento Ing. Elettronica, Università di Roma "Tor Vergata".

[*] *Director, Department of Electronic Engineering, University of Rome "Tor Vergata".*

[**] *Department of Electronic Engineering, University of Rome "Tor Vergata".*

3. Non influire per più di un 20-30% rispetto ai costi di un BCA tradizionale.
4. Non interagire o alterare la parte di rilevazione della presenza dei treni da parte di un BCA, in particolar modo per quanto riguarda la parte SIL 4. Inoltre, deve poter essere adattato ad un BCA già montato senza richiedere alcun intervento su quest'ultimo.
5. Effettuare controlli ciclici della rotaia in assenza di convogli.
6. Soddisfare in modo semplice i requisiti richiesti dai sistemi SIL 4.
7. Non deve richiedere notevole potenza.
8. Funzionare su rotaia saldata
9. Funzionare sia in presenza di trazione in corrente continua che in alternata.
10. Non richiedere apparati ausiliari atti a favorire la trasmissione quali ad esempio alcuni filtri da posizionare su altri apparati sia di segnalamento che di trazione, o condensatori per evitare di oscurare le bande di frequenza adoperate.

2. Architettura del sistema

Il sistema è composto da due sottosistemi che operano in modo coordinato posizionati lungo le rotaie. Il primo sottosistema è composto da un generatore di segnale elettrico che con tempistiche, frequenze, codifiche ed ampiezze opportune inietta un segnale sulle rotaie. Il secondo sottosistema è caratterizzato da un rivelatore di corrente in grado di leggere e riconoscere con un livello di sicurezza SIL 4 i segnali in un collegamento di cortocircuito tra le due rotaie garantendo così la continuità elettrica tra il generatore ed il ricevitore.

Il sistema presenta le seguenti caratteristiche:

1. Iniezione dei segnali tramite un semplice trasformatore (simile a quelli adoperati nei sistemi BACC) e quindi limitando la banda di frequenze adoperabile a meno di poche centinaia di Hz.
2. Il sottosistema generatore può essere posizionato al centro o ad un estremo della tratta da controllare.
3. Utilizzo come sensore di un semplice sensore toroidale di corrente posizionato, nel caso di iniezione dei segnali al centro della tratta, sui cavi che cortocircuitano i due estremi. Mentre nel caso di alimentazione ad un estremo, un unico sensore viene posizionato sul cavo posto per cortocircuitare l'altro estremo.

È evidente che la presenza dei segnali generati sui cortocircuiti così posizionati indica che vi è continuità elettrica delle rotaie tra il generatore ed il / i cortocircuito / i. Ricordiamo che l'associata presenza dei BCA permette di discriminare in modo certo tra mancanza di segnale a causa dei cortocircuiti impressi dagli assi di un treno da quella dovuta alla mancanza di continuità causata da una eventuale rottura delle rotaie.

section. Moreover, it must be retrofittable to an existing BCA without requiring any modification to the latter.

5. *Perform cyclic checks of the rail in the absence of trains.*
6. *Easily meet the requirements of SIL 4 certified systems.*
7. *Require minimal power consumption.*
8. *Operate on continuous welded rail (CWR).*
9. *Function in the presence of both direct current (DC) and alternating current (AC) traction.*
10. *Not require auxiliary devices to assist signal transmission, such as filters to be installed on other signaling or traction devices, or capacitors to avoid obscuring the frequency bands in use.*

2. System architecture

The system consists of two subsystems operating in a coordinated manner, positioned along the rails. The first subsystem includes an electrical signal generator that injects a signal into the rails with appropriate timing, frequencies, coding, and amplitudes. The second subsystem hosts a current detector capable of reading and reliably recognizing the signals, under SIL 4 safety requirements, within a short circuit between the two rails, thus ensuring electrical continuity between the generator and the short circuit point.

Key characteristics of the system include:

1. *Signal injection through a simple transformer (similar to those used in BACC systems), which limits the usable frequency band to less than a few hundred Hz.*
2. *The generator subsystem that can be placed either at the center or at one end of the section that needs to be monitored.*
3. *The use of a basic toroidal current sensor positioned, depending on the generator's location, either on the cables short-circuiting both ends (central configuration), or on the cable at the far end (end-fed configuration).*

The presence of signals at these short-circuit points indicates that there is electrical continuity between the generator and the short circuit(s). Note that the presence of axle counters ensures the ability to distinguish between signal loss due to train axles shorting the rails and loss due to potential Rail breakage.

Fig. 1 shows the block-diagram of the two subsystems - transmitter and receiver - in the configuration where the generator is placed centrally and two receivers are located at the ends of the monitored section. The generator sends coded signals to both receivers, which decode the signal composed of a sum of multiple modulated frequencies, identifying the transmitted codes. Correct recognition of a minimum number of codes confirms the rail continuity status and thus rail integrity.

3. Analysis of disturbances and carrier frequency selection

To evaluate the actual effectiveness of the proposed system, it was necessary to characterize the various types of disturbances present on the rails.

Si presenta, nella Fig. 1, lo schema a blocchi dei due sottosistemi trasmettitore e ricevitore, nella configurazione con generatore al centro e due ricevitori posti agli estremi della tratta analizzata. Il generatore invia i segnali codificati ai due ricevitori e questi decodificano il segnale, composto dalla somma di diverse frequenze modulate, e identificano i codici presenti. Il riconoscimento corretto da parte dei ricevitori di un numero minimo di codici inviati dal generatore conferma lo stato di continuità della rotaia e si verifica lo stato della rotaia.

3. Analisi dei disturbi e scelta delle portanti

Per valutare l'effettiva validità del sistema proposto, si sono dovuti caratterizzare i vari tipi di disturbi presenti sulle rotaie.

Nella Fig. 2 sono riportati vari grafici sovrapposti relativi a delle prove dinamiche eseguite per l'omologazione dei locomotori atti a funzionare nei sistemi SCMT. Questa scelta è stata effettuata in quanto per rispettare i limiti richiesti per detta omologazione si è avuto a disposizione un'ampia serie di misure certificate [1][2][3].

In detta figura in ordinata è riportata la corrente in milliampere mentre in ascissa è riportata la frequenza in Hz.

Come si è detto, l'utilizzo come interfaccia verso le rotaie di un semplice ed economico trasformatore impone l'uso di frequenze inferiori a poche centinaia di Hz e, come si può osservare e facilmente ipotizzare da considerazioni teoriche, in detta banda lo spettro del rumore

Fig. 2 shows a set of overlapping graphs derived from dynamic tests conducted for the homologation of locomotives operating with SCMT systems. This choice was made because, to meet the limits required for such homologation, a wide set of certified measurements was made available [1][2][3].

In this figure, the vertical axis represents the current in milliamperes, while the horizontal axis represents the frequency in Hz.

As mentioned, the use of a simple and economical transformer as an interface to the rails imposes the use of frequencies below a few hundred Hz. As can be observed, and theoretically inferred, the noise spectrum in this band is discontinuous. It varies in both power and time depending on the location and train speed. This means that it is always possible to find frequency bands where signal transmission is feasible, although these bands vary unpredictably over time [4].

Based on these findings, the decision was made to simultaneously transmit codes across multiple frequencies. The correct reception of multiple codes at the same time indicates the presence of electrical continuity in the rails between the generator and a short circuit point. To detect this signal, it is sufficient to place an appropriate sensor around the cable that realize the short circuit.

After careful evaluation, the frequencies (Tab. 1) were selected as carriers for data transmission.

The rationale for selecting the above frequencies is as follows:

1. *Power-line frequency and its harmonics were excluded*

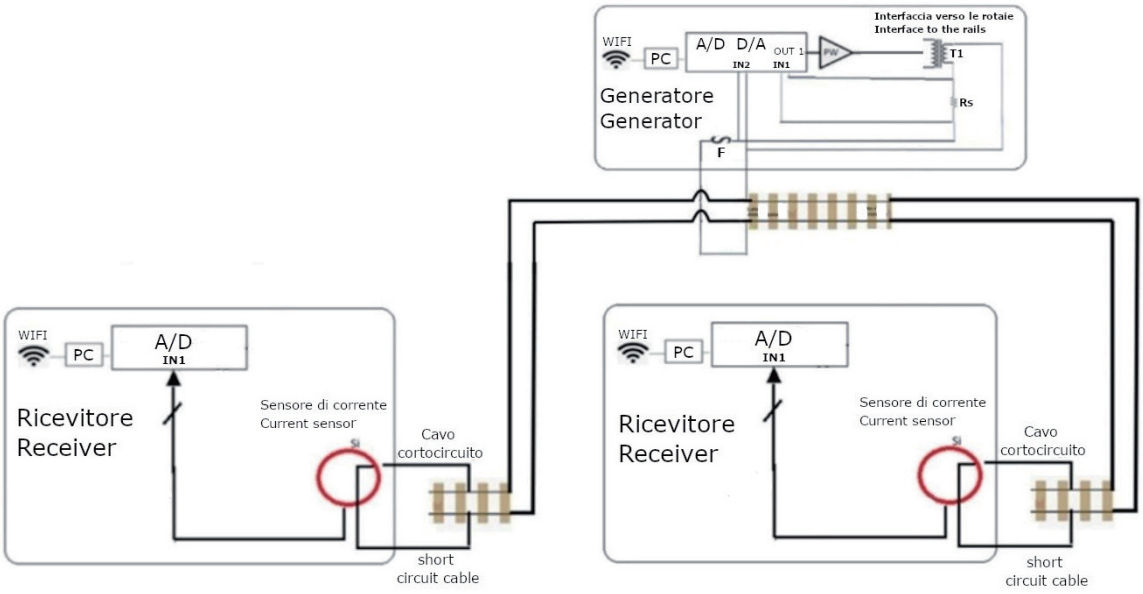


Figura 1 – Schema del sistema presentato in configurazione con generatore al centro e due ricevitori agli estremi.
Figure 1 – Block diagram of the system with the generator at the center and two receivers at the ends of the monitored section.

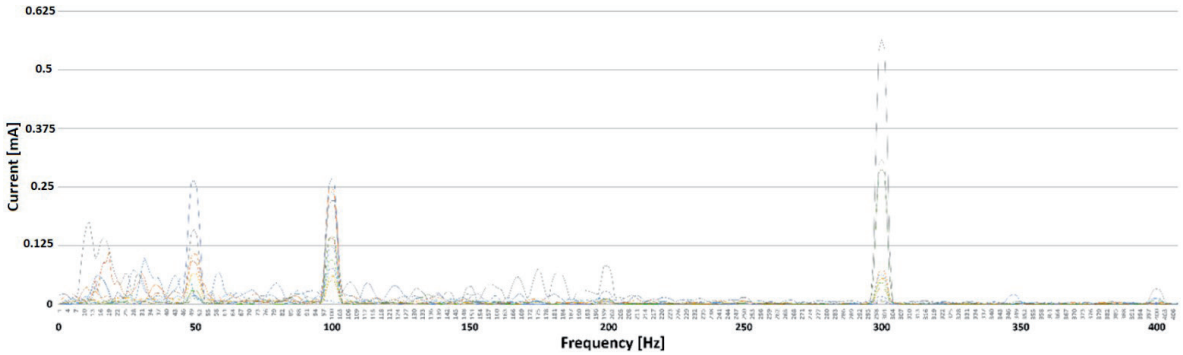


Figura 2 – Analisi dei disturbi presenti su una tratta ferroviaria.
Figure 2 – Analysis of disturbances present on a railway section.

presente è di tipo discontinuo. Esso varia sia in ampiezza che nel tempo in relazione sia al luogo che alla velocità dei convogli. Questo significa che è sempre possibile trovare delle bande di frequenza ove è possibile trasmettere dei segnali, ma queste variano in modo impredicibile nel tempo [4].

In base a quanto detto si è deciso di trasmettere contemporaneamente dei codici su più frequenze e la ricezione contemporanea corretta di più codici indica che vi è continuità elettrica dovuta alle rotaie tra il generatore ed un cortocircuito posto sulle rotaie. Per rilevare detto segnale è sufficiente porre un adeguato sensore intorno al cavo che realizza il cortocircuito.

Dopo un attento esame si è deciso di adoperare le seguenti frequenze come portanti per la trasmissione dei dati.

La scelta delle frequenze soprariportate (Tab. 1) è stata effettuata con la seguente logica:

1. si è esclusa sia la frequenza di rete che le sue armoniche in modo da tagliare gran parte dei disturbi dovuti alla rete elettrica è permettere l'uso anche su tratte ove l'alimentazione è in corrente alternata.
2. Si sono escluse le bande ove nella Figura 2 appariva più frequentemente un alto livello di disturbo.
3. Si è evitato di adoperare frequenze i cui multipli distino da altre frequenze meno della larghezza di banda minima necessaria per la corretta modulazione/demodulazione dei codici da imporre, per evitare che la presenza di un singolo disturbo con le sue armoniche possa oscurare contemporaneamente più di una delle frequenze selezionate.

Per evitare che il rumore presente possa oscurare le singole portanti adoperate si sono adoperati filtri molto stretti sia in trasmissione dopo la modulazione delle singole portanti prima della loro somma, sia in ricezione prima della demodulazione di ogni singola portante.

Per semplicità al posto di normali filtri standard, si è preferito eseguire la trasformata di Fourier del segnale, si

Tabella 1 – *Table 1*
Frequenze portanti selezionate
Selected Carrier Frequencies

Numero ***Number***	**Frequenza [Hz]** ***Frequency [Hz]***
1	64
2	92
3	114
4	134
5	140
6	160
7	216
8	234

to reduce interference from the power grid and ensure functionality in AC-powered sections.

2. *Frequency bands with consistently high noise levels in Fig. 2 were excluded.*
3. *Frequencies whose multiples fall within the minimum bandwidth required for proper code modulation/demodulation were avoided, to ensure that a single interfering signal and its harmonics do not mask multiple selected carriers.*

To prevent noise from masking individual carriers, very narrow filters were used both during transmission (after modulation and before summing) and at reception (before demodulation of each carrier).

For simplicity, instead of standard analog filters, the Fast Fourier Transform (FFT) of the signal was computed, the spectral components outside the selected band(s) were reset to zero, and the inverse transform was applied.

To further reduce the necessary bandwidth for each modulated carrier, the baud rate was lowered—using either 1 baud or 2 baud. This means that transmitting around 20 bits takes at least 20 or 10 seconds, respectively. This duration poses no issue since rapid detection of train movement is already handled by the associated BCA, and cycle times of 30 seconds to a few minutes are perfectly acceptable for rail integrity monitoring. This represents a good compromise between signal-to-noise ratio and acquisition time.

sono poste a zero le componenti spettrali fuori della-e banda-e utilizzata-e e si è eseguita l'anti-trasformata.

Per poter quindi stringere la banda necessaria per ogni singola portante modulata è stato necessario abbassare il baud rate utilizzato; sono stati utilizzati sia una velocità di un baud che di due baud. Ciò comporta che per la trasmissione di una ventina di bit sono necessari almeno 20 o 10 secondi e questo periodo non crea alcun problema in quanto il compito di inseguire in tempi brevi eventuali convogli è svolto dal BCA associato e tempi di ciclo maggiori di una trentina di secondi o anche di qualche minuto sono perfettamente compatibili per l'analisi dello stato della rotaia, ed offre un buon compromesso tra il rapporto segnale/rumore ed il tempo di acquisizione.

4. Simulazioni

Per progettare correttamente tale sistema sono state quindi effettuate una serie di simulazioni atte a stabilire:

1. L'attenuazione alle varie frequenze ed alle varie distanze nelle due condizioni limite di umidità (secco e umido) del ballast.
2. Le impedenze minime e massime presentate al generatore (trasformatore) tra le rotaie al variare della frequenza, delle condizioni ambientali (umidità) e della/e distanza/e Generatore-Rilevatore; la conoscenza di dette impedenze è necessaria per poter progettare correttamente il generatore del sistema.
3. Il rapporto Segnale/Disturbo minimo da ottenere per ottenere una sufficiente disponibilità.
4. I segnali da utilizzare affinché vengano rispettati i requisiti richiesti dallo standard SIL 4 sia in relazione alle codifiche che alla sequenza delle operazioni da implementare. Chiaramente i segnali devono essere tutti reciprocamente distanti per cui la soluzione è segnali ortogonali (bi ortogonali sarebbe preferibile, ma inutilmente più complicata).

4.1. Parametri considerati

Nelle simulazioni effettuate (Tab. 2 e Tab. 3) per valutare il sistema proposto sono stati adoperati per le rotaie i seguenti parametri estratti dalla letteratura, e preventivamente concordati con RFI.

Per il rumore si è considerato che le correnti in un cortocircuito risultano uguali alla differenza rilevata dai due sensori dei sistemi SCMT, mostrata in Fig. 2

4.2. Risultati delle simulazioni

Le simulazioni sono state effettuate per valutare le attenuazioni massime presentate dalle correnti trasmesse nelle rotaie. Ricordiamo che le rotaie possono essere considerate con buona approssimazione un sistema lineare, per cui, dopo aver valutato il rapporto segnale disturbo

4. Simulations

To properly design this system, a series of simulations were conducted to determine:

1. *Attenuation at various frequencies and distances under two extreme ballast humidity conditions (dry and wet).*
2. *The minimum and maximum impedances presented to the generator (transformer) between the rails as a function of frequency, environmental conditions (humidity), and the generator-detector distance. Knowledge of these impedances is essential for proper generator design.*
3. *The minimum required signal-to-noise ratio (SNR) to ensure sufficient system availability.*
4. *The signals to be used shall comply with the requirements of the SIL 4 standard, both in relation to the coding schemes and to the sequence of operations to be implemented. Clearly, the signals must all be mutually distinct; therefore, the solution is orthogonal signals (bi-orthogonal would be preferable, but unnecessarily more complex).*

4.1. Simulation parameters

In the simulations carried out to evaluate the proposed system, the following rail parameters (Tab. 2 and Tab. 3) were used, extracted from the literature and previously agreed with RFI.

For noise, the short-circuit currents are equal to the difference detected by the two SCMT sensors, see Fig. 2.

4.2. Simulation results

The simulations were conducted to assess the maximum attenuation experienced by currents transmitted along the rails. Given that rails can be reasonably approximated as a linear system, once the required signal-to-noise ratio for correct code recognition is established, with a desired confidence level, it is possible to determine the signal levels that must be injected over the required distances, using the noise assumptions from Section 4.

The following table (Tab. 4) reports, in milliamperes, the values of current measured at the delimiting short circuits of the track sections as a function of distance, frequency, and humidity conditions, based on a 1 Ampere output current from the generator.

4.3. Attenuation table

The next table (Tab. 5) shows, in Ohms, the impedance values presented by the rails to the generator depending on the distance to the delimiting short circuit, the frequency, and the humidity level. This table only accounts for the section between the generator and one short circuit; if the generator is placed centrally between two short circuits, the values should be halved. This data is essential for designing the generator in compliance with IEC 60479-1.

Please remember that according to the technical standard IEC 60479-1 the minimum voltage threshold considered

Tabella 2 e Tabella 3 – *Table 2 and Table 3*
Parametri di riferimento utilizzati per le simulazioni
Reference parameters used for simulations

Ambiente umido – celle 100 mt humid environment – sections 100 mt				
Frequenza [Hz] Frequency [Hz]	R-longitudinale [mΩ] longitudinal-R [mΩ]	L [µH]	C [nF]	R-trasversale [Ω] Transversal-R [Ω]
100	50	210	2900	20
150	60	197	2000	20
200	70	190	1700	20
250	80	180	1500	20
300	88	178	1200	20
350	91	175	1100	20
400	100	170	910	20
500	120	168	750	20
1000	165	158	400	20
2000	240	150	200	20
3000	290	148	140	20
4000	340	146	110	20
5000	380	144	90	20
10000	540	140	50	20
15000	680	139	38	20

Ambiente secco - celle di 100 mt Dry environment - sections 100 mt				
Frequenza [Hz] Frequency [Hz]	R-longitudinale [mΩ] Longitudinal-R [mΩ]	L [µH]	C [nF]	R-trasversale [Ω] Transversal-R [Ω]
100	50	210	230	200
150	60	197	200	200
200	70	190	175	200
250	80	180	155	200
300	88	178	145	200
350	91	175	130	200
400	100	170	125	200
500	120	168	110	200
1000	165	158	75	200
2000	240	150	50	200
3000	290	148	38	200
4000	340	146	30	200
5000	380	144	28	200
10000	540	140	17	200
15000	680	139	13	200

sufficiente per ottenere il riconoscimento dei codici impressi, con il voluto grado di confidenza, si può ottenere il segnale da immettere alle distanze richieste considerando il rumore come descritto nel precedente paragrafo 4.

Nella seguente tabella (Tab. 4) sono riportati in milliampere i valori delle correnti nei cortocircuiti di delimitazione delle tratte in funzione delle distanze, delle frequenze e dell'umidità presente a fronte di una corrente di un Ampere uscente dal generatore.

4.3. Tabella di attenuazione

Nella seguente tabella (Tab. 5) sono riportati i valori in Ohm delle impedenze presentate dalle rotaie al generatore al variare delle distanze rispetto al cortocircuito di delimitazione della tratta, della frequenza e dell'umidità. La presente tabella considera solo l'effetto di una tratta tra il generatore ed un cortocircuito; nel caso che il generatore sia posto centralmente rispetto a due cortocircuiti, i valori riportati dovranno essere divisi per 2. Questa tabella è indispensabile per la progettazione corretta del generatore, progettazione che comunque deve tenere conto delle raccomandazioni IEC 60479-1. Si ricorda che in base alla norma tecnica IEC 60479-1 la soglia di tensione minima considerata pericolosa è di 120 V in corrente continua e 50 V in corrente alternata (RMS).

4.4. Trasmissione portanti con valori associati

Nella Tab. 6 sono riportati i valori di tensione, corrente e potenza necessari per avere in ricezione un segnale di intensità 100mA per ogni corrente modulata.

Associando 100 mA ad ogni portante che si vuole ricevere lungo la linea, basandosi sui valori tabellati, si evidenzia la massima distanza raggiungibile in funzione del numero di portanti inviate; nella seguente tabella le

dangerous is 120 V in direct current and 50 V in alternating current (RMS).

4.4. Carrier transmission with associated values

The next table (Tab. 6) shows the voltage, current and power values required to receive a signal of 100mA intensity for each modulated current.

By associating 100mA to each carrier you want to receive along the line, based on the tabled values, the maximum achievable distance is highlighted based on the number of carriers sent; in the following table, the voltages and currents refer to the transformer output. These results were calculated without taking into account the amplifier's clipping percentage, THD, but by simply adding the voltages and currents required to send the carriers so that a signal of at least 100mA for each carrier is obtained at reception. This analysis takes into account the attenuation values of the different carriers in the humid climate regime, where the attenuation is more marked, which represents the "worst case", since in the dry climate regime, even by increasing the system impedance, maintaining the same voltage it is possible to easily reach 6 km of all the carriers, given the low level of attenuation in this regime.

The current values, if you want to use the configuration with the generator in the center, must be doubled and this would also double the power values.

5. Modulation

After careful evaluation, Binary Phase Shift Keying (BPSK) modulation was selected for injecting signals into the rails. BPSK is currently considered one of the most suitable techniques for signal transmission in noisy environments [5][6].

First, a carrier was generated and modulated using the

tensioni e correnti si riferiscono all'uscita del trasformatore. Questi risultati sono stati calcolati non tenendo in considerazione la percentuale di clipping dell'amplificatore, THD, ma sommando banalmente le tensioni e le correnti necessarie con cui inviare le portanti affinché in ricezione si ottenga un segnale pari almeno a 100mA per ogni portante. Questa analisi prende in considerazione i valori di attenuazione delle diverse portanti nel regime di clima umido, dove l'attenuazione è più marcata, che rappresenta il *"worst case"*, poiché nel regime di clima secco, pur se aumentando l'impedenza del sistema, mantenendo la stessa tensione si riesce ad arrivare senza problemi ad inviare tutte le portanti a 6 km, visto il basso livello di attenuazione in questo regime.

I valori di corrente, se si vuole utilizzare la configurazione con il generatore al centro, devono essere raddoppiati e ciò raddoppierebbe anche i valori della potenza.

5. Modulazione

Per i segnali impressi alle rotaie, dopo attente valutazioni, si è deciso di adoperare la modulazione BPSK che al momento attuale è considerata come la più idonea per la trasmissione di segnali in ambienti rumorosi [5][6].

Si è prima provveduto a generare e modulare una portante con i codici previsti, ed infine decodificare la portante per controllare il ciclo di codifica e decodifica senza considerare le alterazioni dovute al canale ed al rumore.

Come si vede nella seguente Fig. 3 questo tipo di modulazione prevede l'inversione della fase della portante al variare del bit (0 o 1) trasmesso.

Nella seguente Fig. 4 vengono riportati i grafici relativi ad una singola portante modulata come sopra esposto.

Successivamente si è provveduto a filtrare il segnale modulato per eliminare un allargamento eccessivo della banda occupata a causa della modulazione; inoltre, si è verificato che detto filtraggio non alterasse eccessivamente il riconoscimento esatto del segnale Fig. 5.

Tabella 4 – *Table 4*

Attenuazioni
Attenuation

	Secco ***Dry***				**Umido** ***Wet***			
km	100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz
0.1	998	997	997	997	995	995	995	995
0.5	992	992	991	990	962	955	948	939
1	983	981	978	976	855	816	777	738
2	942	932	919	905	509	424	359	314
3	870	841	808	776	262	197	154	125
4	772	715	660	614	134	92.8	67.5	51.6
5	659	584	518	467	69	44.1	29.8	21.3
6	580	465	398	350	36.2	21.1	13.2	9.1

Tabella 5 – *Table 5*

Impedenza Rotaie (Ohm)
Rail Impedance (Ohm)

	Umido ***Wet***			**Secco** ***Dry***		
km	100 Hz	200Hz	300Hz	100 Hz	200 Hz	300 Hz
0.1	0.14	0.248	0.346	0.141	0.248	0.346
0.5	0.7	1.2	1.66	0.691	1.24	1.72
1	1.4	2.08	2.69	1.27	2.46	3.42
2	2.08	2.35	2.72	1.63	4.71	6.42
3	3.87	2.24	2.63	1.73	6.4	8.34
4	4.73	2.27	2.63	1.69	7.31	8.9
5	5.27	2.23	2.63	1.67	7.56	8.91
6	5.53	2.23	2.63	1.67	7.5	8.67

Tabella 6 – *Table 6*

Valori di tensione, corrente e potenza
Voltage, current and power values

N. Portanti ***Carriers***	**Distanza** ***Distance*** **(m)**	**Tensione** ***Voltage rms*** **(V)**	**Corrente** ***Current rms*** **(A)**	**Potenza** ***Power*** **(W)**
5	6000	37.4	19.8	740.5
3	6000	18.6	10.3	191.6
8	5000	48.5	22.5	1091.3
5	5000	18.3	9.7	177.5
8	4000	21.7	10.1	219.2
5	4000	8.9	4.7	41.8
8	3000	12	5.3	63.6
8	2000	5.3	2.3	12.19
8	1000	2.1	1	2.1
8	500	1	0.8	0.8

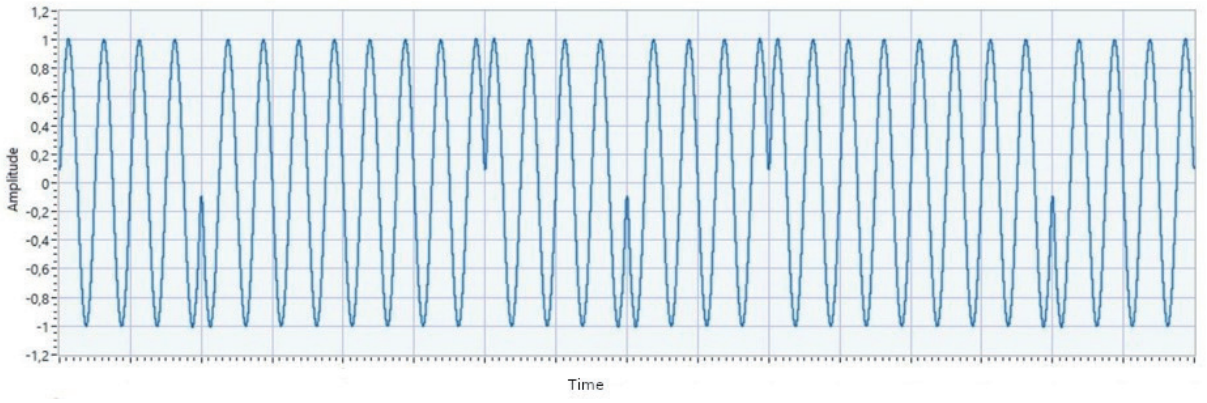


Figura 3 – Segnale modulato nel dominio del tempo, con periodo di bit di 1 s.
Figure 3 – Time-domain modulated signal, with bit period of 1 s.

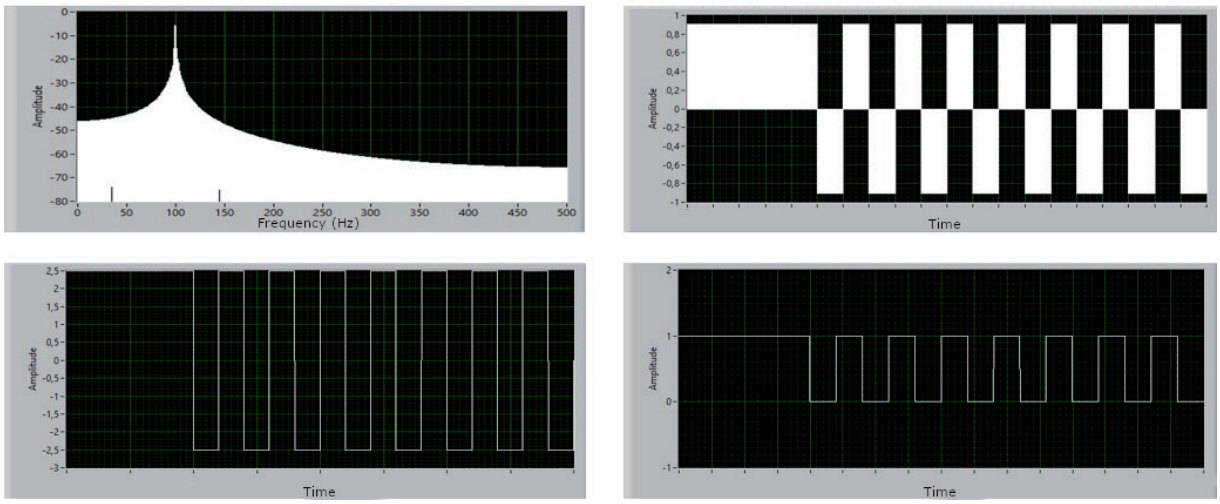


Figura 4 – In senso orario dall'alto a sinistra: FFT del segnale modulato, segnale demodulato, segnale ricevuto, segnale filtrato.
Figure 4 – Clockwise from top left: FFT of the modulated signal, Demodulated signal, Received signal, Filtered signal.

Questa operazione è stata effettuata per confinare la trasmissione di una singola portante modulata in una banda molto limitata di frequenza.

Nell'immagine superiore sono riportati i grafici ottenuti limitando la banda per la trasmissione a 6 Hz, e come è facile osservare, questa limitazione non modifica in modo sostanziale i risultati ottenuti.

Si è infine aggiunto del rumore bianco con ampiezza p-p pari al segnale generato per testare il livello di rumore massimo sopportabile dal sistema per riconoscere i codici (Fig. 6).

Per sicurezza si è provata la codifica / decodifica con codici differenti, la quale non ha mostrato alcun problema, ed infine si è provato ad alzare l'intensità del rumore per verificare il valore del rapporto S/N in ampiezza limite in

desired codes. Then, the carrier was demodulated to verify the correct functioning of the encoding and decoding cycle, without considering channel and noise effects.

As shown in the Fig. 3, this modulation technique implies a phase inversion of the carrier depending on the transmitted bit (0 or 1).

Fig. 4 shows the graphics related to a single modulated carrier as shown above.

The modulated signal was then filtered to reduce excessive bandwidth expansion due to modulation. It was verified that this filtering process did not significantly alter the accurate recognition of the signal (Fig. 5).

This step was necessary to confine the transmission of each modulated carrier within a narrow frequency band.

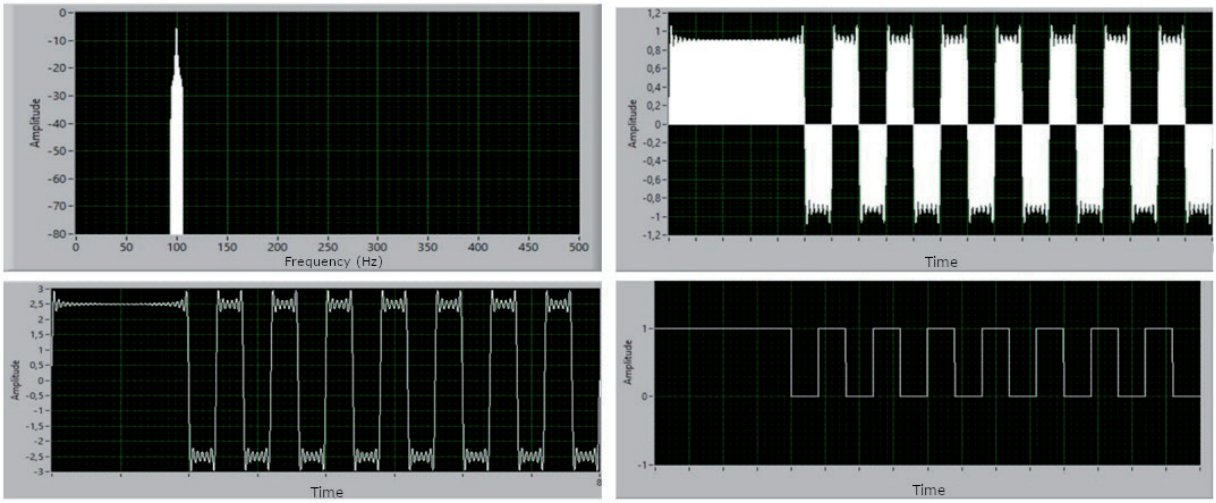


Figura 5 – In senso orario dall'alto a sinistra: FFT della portante modulata filtrata (larghezza di banda 6 Hz), segnale demodulato, codice ricevuto, segnale filtrato.
Figure 5 – Clockwise from top left: FFT of filtered modulated carrier (6 Hz bandwidth), Demodulated signal, Received code, Filtered signal.

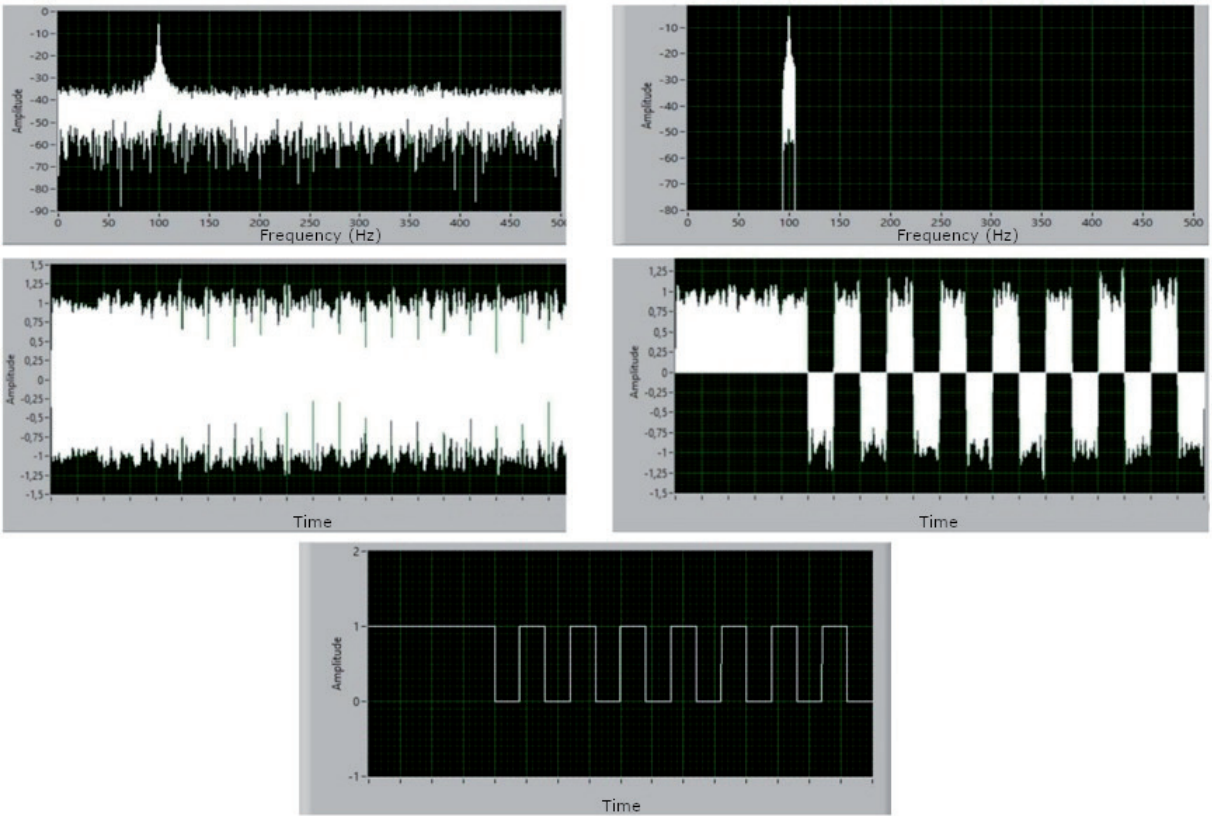


Figura 6 – In senso orario dall'alto a sinistra e terminando in basso: FFT del segnale con rumore, FFT dopo la limitazione della larghezza di banda, segnale demodulato, somma dell'ampiezza del segnale e del rumore, codice ricevuto.
Figure 6 – Clockwise from top left and ending bottom: FFT of signal with noise, FFT after bandwidth limitation, Demodulated signal, Sum of signal and noise amplitude, Received code.

cui si riconosce il segnale. Detto riconoscimento si riesce ad ottenere fino ad un valore pp del rumore bianco sommato pari a circa 3 volte il valore segnale, per cui possiamo ipotizzare un valore minimo del rapporto S/N in ampiezza circa pari a 0.3, senza ricorrere a tecniche particolari di riconoscimento.

Quindi, in base a quanto sopra esposto, per la generazione del segnale da immettere sulle rotaie si è adoperata la seguente procedura: ognuna delle frequenze selezionate è stata modulata col codice prescelto e quindi filtrata con una banda di 6 Hz; le n portanti così generate, modulate e filtrate sono state sommate tra loro, in questo modo si è evitato che vi fosse una interazione tra di loro.

In ricezione il segnale ricevuto è filtrato con i medesimi filtri adoperati dopo la modulazione prima di essere demodulato portante per portante per riconoscere il codice associato.

6. Codici

Per la modulazione delle portanti sono stati scelti 14 codici ortogonali (Tab. 7) a 16 bit dei possibili 16 codici di Walsh-Hadamard di pari lunghezza (in realtà i codici sono definiti per valori di 1 e -1); la scelta è dovuta al fatto che, in presenza di rumore intenso, per confondere un codice con un altro, come si può facilmente verificare modificando i bit nella seguente tabella, si devono alterare esattamente 8 bit, il che rende probabilisticamente molto sicuro il sistema studiato rispetto alla confusione di codici. Dei 16 codici possibili sono stati eliminati quello con tutti 1 e quello con due gruppi consecutivi di 1 e 0, per massimizzare le transizioni. Gli 8 bit di valore differente tra due qualsiasi codici deriva direttamente dalla ortogonalità.

7. Sicurezza

Le considerazioni probabilistiche seguenti sono basate sui risultati delle comunicazioni numeriche [6][7].

Per il calcolo del rumore presente nelle varie bande appartenenti alle singole portanti, supponendo che il rumore sia pressoché costante in quella banda, viene considerato il massimo valore che si può trovare nella banda, preso come caso peggiore.

La probabilità di errore di una trasmissione dati, nel nostro caso, si esegue a partire dalla probabilità di errore relativa al singolo bit ed essa varia al variare dell'energia del singolo bit, dal rapporto Segnale/Rumore e dal tipo di modulazione e demodulazione usata.

La probabilità di errore, falso riconoscimento o mancata rivelazione, è $P_B = Q\left(\frac{2E}{n_0}\right)$, con ricezione coerente a correlazione, ove:

Tabella 7 – *Table 7*

Tabella codici utilizzati
Table of codes used

NUMERO *NUMBER*	CODICI *CODES*
1	1111000011110000
2	1111000000001111
3	1100110011001100
4	1100110000110011
5	1100001111000011
6	1100001100111100
7	1010101010101010
8	1010101001010101
9	1010010110100101
10	1010010110111010
11	1001100110011001
12	1001100101100110
13	1001011010010110
14	1001011001101001

The graphs above illustrate the results obtained with a 6 Hz transmission bandwidth. It is evident that this bandwidth limitation does not substantially affect the signal recognition (Fig. 6).

Finally, white noise with a peak-to-peak amplitude equal to that of the generated signal was added to test the system's noise tolerance.

The decoding process was repeated with different codes, and no issues were observed. The noise level was increased to determine the amplitude S/N ratio at the decoding limit. It was found that the system can correctly recognize the signal even when white noise has a peak-to-peak value approximately three times that of the signal. This corresponds to a minimum amplitude S/N ratio of about 0.3, even without advanced recognition techniques.

Based on the above, the signal generation procedure requires that each selected frequency be modulated with the desired code and filtered with a 6 Hz bandwidth. The resulting n modulated and filtered carriers are then summed, avoiding interference between them.

At the receiver, the signal is filtered with the same filters used after modulation and demodulated carrier-by-carrier to identify the associated code.

6. Codes

For carrier modulation, 14 orthogonal (Tab. 7) 16-bit codes were selected from the 16 possible Walsh–Hadamard codes of the same length (in fact, the codes are defined by values of 1 and –1). The choice is motivated by the fact that, in the presence of intense noise, confusing one code with another would require the alteration of exactly 8 bits, which makes the studied system probabilistically very robust against code misinterpretation.

Of the 16 possible codes, the one consisting entirely of 1s and the one with two consecutive groups of 1s and 0s were eliminated, in order to maximize the number of transitions. The 8 differing bits between any pair of codes derive directly from their orthogonality.

- E è l'energia del segnale utile ricevuto,
- n_0 è la densità spettrale del rumore,
- Q è la funzione di Marcum, utilizzata in telecomunicazioni per stimare l'errore di bit.

Nel nostro contesto la probabilità di errore per bit utilizzando la modulazione dipolare coerente BPSK è data da:

$$P_B = Q(2\,SNR) = \frac{1}{2}\,erfc\left(\sqrt{SNR}\right) = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\sqrt{SNR}} e^{-t^2}dt\right)$$

con erfc funzione errore complementare di Gauss.

Dalla probabilità di errore per il singolo bit si può risalire alla probabilità di avere un errore nei codici da noi adoperati a 16 bit, questo parametro può essere adoperato come indice per la disponibilità del sistema. Quindi una volta calcolata la probabilità di errore per bit è necessario utilizzare la distribuzione binomiale per trovare la probabilità di interpretare in modo errato esattamente k bit su n bit inviati(P(k)).

$$P(k) = \binom{n}{k}\,(P_B)^k(1 - P_B)^{n-k}$$

Nel nostro caso cerchiamo la soluzione per k=1, quindi la probabilità di non interpretare correttamente un solo bit dei 16, data da:

$$P(1) = \binom{16}{1}(P_B)^1\,(1 - P_B)^{15}$$

Invece, se si volesse calcolare la probabilità di riconoscere erratamente almeno un bit, allora questa sarebbe la somma tra le binomiali per k crescente da 1 a 16 (formula nel prossimo paragrafo "Disponibilità").

Dalla probabilità di errore del singolo bit si può risalire alla probabilità P_P di interpretare erroneamente un rumore o un codice trasmesso, con un altro codice di quelli ortogonali da noi adoperati; questo calcolo è fondamentale per la necessità di dimostrare la rispondenza del sistema allo standard SIL 4 a cui è associata una probabilità di errore minore di $10^{-9}/h$.

Considerando l'uso dei codici sopra esposti, per avere la probabilità di interpretare come valido un codice errato è necessario interpretare erratamente 8 bit su 16, se il numero dei bit errati è maggiore o minore di 8 il sistema riconoscerebbe un errore, e quindi non potrebbe interpretare come corretto il codice.

Per ottenere questo risultato ci siamo basati sulla probabilità di interpretare in maniera errata esattamente 8 bit su 16 e tale probabilità rappresenta un limite superiore della probabilità reale, visto che non tiene conto della specifica posizione di bit che deve essere interpretata erroneamente per riconoscere un codice avendone trasmesso un altro. La probabilità stimata è data dalla seguente formula:

$$P(8) = \binom{16}{8}(P_B)^8\,(1 - P_B)^8$$

Questo risultato come già detto rappresenta un valore

7. *Safety*

The following probabilistic considerations are based on the results of numerical communications [6][7].

To evaluate the noise present in the various bands assigned to each carrier, assuming the noise power is approximately constant within each band, the maximum value that can be found in the band is considered, representing the worst-case scenario.

The probability of error in data transmission, in our case, is calculated based on the probability of error for a single bit, and varies according to the energy of the single bit, the signal-to-noise ratio, and the type of modulation and demodulation used.

The probability of an error, false recognition or missed detection, is given by: $P_B = Q\left(\frac{2E}{n_0}\right)$*, with coherent correlation reception, where:*

- *E is the energy of the useful received signal,*
- *n_0 is the noise spectral density,*
- *Q is the Marcum Q-function.*

$$P_B = Q(2\,SNR) = \frac{1}{2}\,erfc\left(\sqrt{SNR}\right) = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\sqrt{SNR}} e^{-t^2}dt\right)$$

In our context, the bit error probability using coherent BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulation is given by:

where erfc is the complementary Gaussian error function.

From the bit error probability, one can derive the probability of error in the 16-bit codes we use. This parameter can be used as an indicator of system availability. Once the bit error probability is known, it is necessary to use the binomial distribution to find the probability of misinterpreting exactly k bits out of n transmitted bits, i.e.:

$$P(k) = \binom{n}{k}\,(P_B)^k(1 - P_B)^{n-k}$$

In our case, we are interested in the solution for k = 1, that is, the probability of misinterpreting only one bit out of 16:

$$P(1) = \binom{16}{1}(P_B)^1\,(1 - P_B)^{15}$$

If, instead, we wanted to calculate the probability of misinterpreting at least one bit, we would sum the binomial terms for increasing k from 1 to 16 (formula used later in the "Availability" section).

From the probability of a single bit error, it is possible to calculate the probability P_P of misinterpreting a noise or transmitted code with another code from those used by us; this calculation is fundamental for demonstrating the system's compliance with the SIL 4 standard, which is associated with a probability of error of less than $10^{-9}/h$.

Considering the use of the codes shown above, in order to have the probability of interpreting an incorrect code as

più alto di quella realmente cercata; dato che i codici utilizzabili sono 14 e che con errore si intende un riconoscimento di un codice dei 14 pur se esso non è stato inviato, la probabilità di falso riconoscimento è molto minore di quella presentata in precedenza; segue il nuovo calcolo e successivamente la spiegazione:

$$P\ ord(8) = \frac{13}{\binom{16}{8}}\binom{16}{8}(P_B)^8\,(1-P_B)^8 = 13(P_B)^8\,(1-P_B)^8$$

Nel caso in cui si consideri la probabilità di errore con una falsa interpretazione di 8 bit su 16 senza tenere conto della posizione specifica che questi bit devono avere, otteniamo un risultato che tiene in considerazione tutte le combinazioni possibili di 8 bit errati. Nel nostro caso invece si devono considerare solo le combinazioni in cui un codice viene confuso con un altro, riconoscendo erratamente 8 bit di quest'ultimo; questo risultato porta ad una diminuzione drastica della probabilità, scartando quasi tutte le combinazioni presentate in precedenza e lasciando solamente 13 combinazioni (non considerando la confusione del codice con sé stesso, priva di senso).

Con questo approccio più preciso si calcola un range di probabilità di errato riconoscimento di codice che varia da 5,6 x 10^{-7} (caso in cui la probabilità errore di bit sia 0.1) a 2 x 10^{-4} (caso in cui la probabilità di errore di bit sia 0.5, praticamente aleatorio). Come si può notare in entrambi i casi siamo in presenza di una probabilità più bassa di 10^{-3} [7], valore massimo richiesto dallo standard SIL4 per ogni portante, considerando di inviare contemporaneamente 3 portanti, col che si moltiplicano le probabilità rispettive per cui se singolarmente si ha una probabilità minore di 10^{-3}. si ottiene globalmente la probabilità minore di 10^{-9}.

Nel caso in cui l'errore per singolo bit (P_B) sia compreso tra 0.1 e 0.3 si potrebbe pensare di inviare solamente due portanti contemporaneamente; essendo la probabilità di errore di riconoscimento per ogni portante inferiore o uguale a 10^{-5}, il prodotto delle due probabilità porterebbe ad un risultato inferiore a 10^{-9} e quindi, per ottenere tale livello, sarebbe sufficiente inviare due portanti, limitando i consumi energetici da parte degli strumenti.

Considerando i risultati delle registrazioni di rumori tipici presenti su rotaia in nostro possesso, si può notare che dai nostri dati, nelle bande di interesse, il rumore massimo raggiungibile in corrente è 275 mA. Questo valore viene considerato come caso peggiore di rumore e quindi preso come riferimento per calcolare il rapporto segnale rumore, considerando l'ampiezza RMS del segnale in ricezione di 100mA. Il rapporto segnale rumore è stato calcolato come rapporto tra le potenze del segnale e del rumore, rispettivamente calcolate come il quadrato dell'intensità RMS del segnale e il quadrato dell'intensità RMS del rumore.

Visto che il rapporto segnale rumore, considerando 100 mA in ricezione, è 0.13 e quindi la probabilità di errore di un singolo bit è 0.32 si prevede che per ogni

valid, it is necessary to misinterpret 8 bits out of 16. If the number of incorrect bits is greater or less than 8, the system would recognize an error and therefore could not interpret the code as correct.

To compute this, we used the probability of misinterpreting exactly 8 out of 16 bits. This gives an upper bound for the actual probability, since it does not account for the specific positions of the bits that must be misinterpreted to mistake one code for another. The estimated probability is given by:

$$P(8) = \binom{16}{8}(P_B)^8\,(1-P_B)^8$$

As already mentioned, this result represents a higher value than the one actually sought; given that there are 14 usable codes and that an error is defined as the recognition of one of the other 13 codes even if it has not been sent, the probability of false recognition is much lower than that presented previously; the new calculation follows, followed by an explanation:

$$P\ ord(8) = \frac{13}{\binom{16}{8}}\binom{16}{8}(P_B)^8\,(1-P_B)^8 = 13(P_B)^8\,(1-P_B)^8$$

If we consider the error probability with a false interpretation of 8 out of 16 bits without considering the specific position these bits must have, we obtain a result that takes into account all possible combinations of 8 incorrect bits. In our case, however, we only need to consider combinations in which one code is confused with another, incorrectly recognizing 8 bits of the latter; this result leads to a drastic decrease in probability, discarding almost all the combinations presented previously and leaving only 13 combinations (not considering the meaningless confusion of the code with itself).

This more precise approach calculates a range of misrecognition probabilities ranging from 5.6 x 10^{-7} (the case in which the bit error probability is 0.1) to 2 x 10^{-4} (the case in which the bit error probability is 0.5, practically random). As can be seen, in both cases we are dealing with a probability lower than 10^{-3}, [7] the maximum value required for each carrier, since three must be sent simultaneously; therefore if individually the probability is lower than 10^{-3}, the resulting overall probability is lower than 10^{-9}.

As can be observed, in both cases the probability is lower than 10^{-9}, which is the maximum value required for each carrier. Considering the simultaneous transmission of three carriers, the respective probabilities are multiplied10^{-3}; therefore, if the individual probability is lower than , the overall probability results in being lower than 10^{-9}. Consequently, we are well below the maximum required threshold

If the single-bit error (P_B) is between 0.1 and 0.3, one could consider sending only two carriers simultaneously; since the probability of recognition error for each carrier is less than or equal to 10^{-5}, the product of the two probabilities would lead to a result lower than 10^{-9} and therefore it would be sufficient to send two carriers, limiting the energy consumption of the instruments.

portante la probabilità di fraintendimento di codici è circa 5.98 x 10^{-5} . Una volta nota la probabilità teorica di fraintendimento codici è stato necessario calcolare l'intervallo di confidenza del 95% per questa distribuzione, sul quale ci siamo basati per trovare il numero di prove necessarie da effettuare per quanto riguarda il test del fraintendimento dei codici; tale prova ha avuto esito positivo dimostrando zero errori su 50mila prove, considerando il rapporto segnale rumore di 0.13 in potenza. Per capire il numero di prove da effettuare è stata utilizzata la seguente formula:

$$Nbit = -ln\,(0.05)P^{-1}$$

Con

$$P = 5.98\ x\ 10^{-5}$$

Questo calcolo è stato effettuato prendendo come valore di riferimento il rumore massimo raggiungibile in corrente dalle nostre registrazioni, che però è stato registrato ad una frequenza di 100 Hz, da cui noi siamo molto lontani con le nostre portanti, essendo un multiplo della 50 Hz. L'intensità della corrente di rumore più alta nella banda 50-300 Hz, oltre alla corrente presente a 100 Hz, è molto più bassa di quella utilizzata, dell'ordine di 75 mA, che porterebbe ad una probabilità fraintendimento codici molto ridotta, circa 10^{-8} per ogni portante.

Ricordiamo che secondo le specifiche SIL 4 la probabilità di finire in uno stato incognito deve essere compresa tra 10^{-8}/*h* e, 10^{-9}/*h*; un modo semplice per effettuare questo calcolo è quello di moltiplicare la probabilità di fraintendimento per il numero delle volte che viene effettuata la misura. Quindi considerando tre portanti contemporanee questa probabilità è inferiore a: 10^{-8} x 10^{-8} x 10^{-8} x il numero delle misure effettuate in un ora quindi 10^{-24} x n. misure / ora.

Le considerazioni sopra esposte sono altamente prudenziali, un calcolo esatto può essere effettuato a valle di una più ampia statistica sul rumore presente lungo le rotaie, ed un progetto ingegnerizzato di un sistema.

8. Disponibilità

Dalle registrazioni di segnali tipici sulle rotaie in nostro possesso non è possibile effettuare una statistica esaustiva, come dovrebbe essere per effettuare un calcolo che riguardi il rumore quasi aleatorio, non essendoci abbastanza registrazioni per prendere questi risultati come riferimento sicuro. Quindi dai dati in nostro possesso abbiamo ipotizzato che il livello di rumore medio sia superiore alla metà dell'intensità del rumore massimo (nelle bande da noi utilizzate). È stata calcolata la probabilità di indisponibilità del sistema nel caso in cui vengano oscurate dal rumore 3 portanti su 5 inviate e nel caso in cui vengano oscurate 6 portanti su 8 inviate; si ricordi che supponiamo di dover riconoscere tre portanti per raggiungere il livello di sicurezza SIL4, per questo viene calcolata la probabilità di sbagliare il riconoscimento di N-2 portanti su N inviate. Per il calcolo della probabilità nei due casi è stato

Considering the results of our typical rail noise recordings, we can see that, in the bands of interest, the maximum achievable RMS current noise is 275 mA. This value is considered the worst-case noise and therefore used as a reference to calculate the signal-to-noise ratio, considering the RMS amplitude of the received signal of 100 mA. The signal-to-noise ratio was calculated as the ratio between the signal and noise powers, calculated respectively as the square of the RMS signal intensity and the square of the RMS noise intensity.

Since the signal-to-noise ratio, considering 100 mA in reception, is 0.13 and therefore the probability of a single bit error is 0.32, it is expected that for each carrier the probability of code misinterpretation is approximately 5.98 x 10-5. Once the theoretical probability of code misinterpretation was known, it was necessary to calculate the 95% confidence level for this distribution, which we used to find the number of tests necessary to perform for the code misinterpretation test; this test was successful, demonstrating zero errors out of 50 thousand tests, considering the signal-to-noise ratio of 0.13 in power. To calculate the number of tests to perform, the following formula was used:

$$Nbit = -ln\,(0.05)P^{-1}$$

With

$$P = 5.98\ x\ 10^{-5}$$

This calculation was performed by taking as a reference value the maximum noise current achievable by our recordings, which however was recorded at a frequency of 100 Hz, from which we are very far with our carriers, being a multiple of 50 Hz. The intensity of the highest noise current in the 50-300 Hz band, in addition to the current present at 100 Hz, is much lower than that used, of the order of 75 mA, which would lead to a very low probability of code misinterpretation, approximately 10^{-8} for each carrier.

It should be recalled that, according to SIL 4 specifications, the probability of reaching an unknown state must lie between 10^{-8}/h and, 10^{-9}/h. A simple way to perform this calculation is to multiply the probability of misinterpretation by the number of times the measurement is carried out. Therefore, considering three carriers simultaneously, this probability is lower than: 10^{-8} x 10^{-8} x 10^{-8} × (number of measurements per hour), that is 10^{-24} × (number of measurements/hour).

The above considerations are highly conservative; an exact calculation can be performed once a broader statistical analysis of the noise along the rails is available, together with the engineered design of a system.

8. Availability

From the recordings of typical signals on the rails in our possession, it is not possible to compile exhaustive statistics, as would be necessary to calculate quasi-random noise, since there are not enough recordings to consider these results as a reliable reference. Therefore, based on the data in our possession, we have assumed that the average noise level is higher than half the maximum noise intensity (in the bands we use).

utilizzato, per sicurezza, un livello pari ai 2/3 dell'intensità rumore massimo presente nelle bande di nostro interesse, cioè 50 mA.

Segue il calcolo effettuato con i rispettivi risultati.

Calcolo del rapporto segnale/rumore SNR considerando l'intensità del segnale pari a 100 mA e del rumore 50 mA:

$$SNR = \frac{I_{segn}{}^2}{I_{Rum}{}^2}$$

Successivamente si utilizza il rapporto SNR per calcolare la probabilità di errore di bit tramite la funzione Q di Marcum:

$$P_B = Q(2\,SNR) = \frac{1}{2}\,erfc\left(\sqrt{SNR}\right) = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\sqrt{SNR}} e^{-t^2}dt\right)$$

Tramite l'utilizzo della probabilità di errore di bit bisogna calcolare la probabilità di avere almeno un errore per ogni codice, ricavabile dalla distribuzione binomiale nel nostro caso, facendo la somma per k crescente delle probabilità:

$$P_p(k) = \sum_k \binom{n}{k} (P_B)^k (1 - P_B)^{n-k}$$

A questo punto è stata ricavata la probabilità di errore di almeno un bit per un singolo codice con il rumore medio scelto in precedenza; per trovare la probabilità di avere errore su N codici inviati, essendo gli eventi indipendenti, bisogna moltiplicare la probabilità di errore di almeno un bit N volte per sé stessa:

$$P_N = (P_p(k))^N$$

Nel nostro caso troviamo:

$$P_B = 2.3\ x\ 10^{-3}$$
$$P_B = 3.7\ x\ 10^{-2}$$
$$P_{N=3} = (P_p)^3 = 5\ \text{x}\ 10^{-5}\ P_{N=6} = (P_p)^6 = 2.6\ x\ 10^{-9}$$

Si ricorda che, se il sistema, per questioni inerenti al rumore, non dovesse essere disponibile è possibile ripetere le misure dopo pochi minuti senza andare ad intaccare la validità della misura.

9. Conclusioni

Il sistema proposto nel presente articolo, si presenta come un valido supporto per i sistemi BCA in grado di fornire le stesse informazioni sullo stato della continuità elettrica delle rotaie fornite attualmente dai tradizionali Cdb (Circuiti di binario).

A conclusione delle simulazioni e delle misure in campo effettuate si conferma che le caratteristiche sistema sviluppato secondo i principi indicati rispettano quelle attese ed elencate al capitolo 2.

Se richiesta si può facilmente diminuire drasticamente i tempi di analisi, aumentando la velocità di trasmissione penalizzando però la lunghezza delle tratte controllabili.

Come detto, l'apparato di misura realizzato, è servito

We calculated the probability of system unavailability in the event that 3 out of 5 transmitted carriers, or 6 out of 8 transmitted carriers, are obscured by noise; it should be noted that we assume that three carriers must be correctly detected to meet the SIL4 safety level, which is why we calculate the probability of incorrectly identifying N-2 carriers out of N transmitted. For these calculations, we conservatively adopted a noise level equal to 2/3 of the maximum noise intensity within our frequency bands of interest, i.e., 50 mA.

The calculation and corresponding results are as follows. Calculation of the Signal-to-Noise Ratio (SNR) assuming a signal intensity of 100 mA and noise intensity of 50 mA:

$$SNR = \frac{I_{sign}{}^2}{I_{noise}{}^2}$$

The SNR is then used to calculate the bit error probability using the Marcum Q-function:

$$P_B = Q(2\,SNR) = \frac{1}{2}\,erfc\left(\sqrt{SNR}\right) = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\sqrt{SNR}} e^{-t^2}dt\right)$$

Using the bit error probability, the probability of having at least one error per codeword can be derived from the binomial distribution, summing the probabilities for increasing values of k:

$$P_p(k) = \sum_k \binom{n}{k} (P_B)^k (1 - P_B)^{n-k}$$

We then calculated the probability of having at least one bit error in a single codeword for the chosen average noise level. To obtain the probability of having errors on N transmitted codewords, assuming independent events, the single-codeword error probability is raised to the power of N:

$$P_N = (P_p(k))^N$$

In our case, the results are:

$$P_B = 2.3\ x\ 10^{-3}$$
$$P_B = 3.7\ x\ 10^{-2}$$
$$P_{N=3} = (P_p)^3 = 5\ \text{x}\ 10^{-5}\ P_{N=6} = (P_p)^6 = 2.6\ x\ 10^{-9}$$

It is important to note that if the system becomes temporarily unavailable due to noise-related issues, the measurements can be repeated after a few minutes without compromising their validity.

9. Conclusions

The system proposed in this article represents a valuable support for Axle Counter Systems (BCA), being capable of providing the same information on the electrical continuity status of the rails that is currently supplied by traditional Track Circuits (CDB).

At the conclusion of the simulations and field measurements, it is confirmed that the characteristics of the system developed according to the indicated principles comply with the expectations listed in Section 2.

per valutare le simulazioni effettuate nel circuito sperimentale di RFI, appositamente allestito per rappresentare le reali situazioni in campo, Questo studio è propedeutico allo sviluppo di sistemi prototipali coordinati con i BCA per operare il controllo della continuità.

Un possibile sviluppo del sistema ipotizzabile al fine di migliorare e semplificare l'installazione del sistema potrebbe essere quello di posizionarlo all'interno di una traversina cava insieme ad un sistema BCA associato. Da detta traversina potrebbe uscire solo un collegamento (ottico o Wireless) verso una postazione centrale e potrebbe richiedere in ingresso una bassa tensione per l'alimentazione sua e del BCA associato

Sembra inoltre realistico ipotizzare di aggiungere la possibilità di far elaborare al sistema proposto dati utili per un ausilio ad una manutenzione programmata (non SIL 4). Ricordiamo che il sistema composto da un generatore programmabile e da un ricevitore posto nei cortocircuiti di delimitazione delle tratte è in grado di valutare la funzione di trasferimento della tratta di rotaie e variazioni di detta funzione, non congruenti con eventuali variazioni climatiche, potrebbero indicare variazioni nello stato delle rotaie tali da richiedere approfondimenti.

Analogo discorso può essere fatto in relazione allo studio dell'andamento di eventuali correnti di riequilibrio della trazione nei cortocircuiti, semplicemente adoperando sensori di corrente in grado di recepire la componente continua (effetto Hall). Se, a successivi passaggi di convogli triggerati dal BCA associato, si verificasse un trend costante su dette correnti, potrebbe essere consigliabile anticipare eventuali controlli.

If needed, analysis time can be greatly reduced by increasing transmission speed, though this limits the length of the sections that can be monitored.

As mentioned, the measuring apparatus that was built served to validate the simulations on the RFI experimental track, specifically set up to represent real field conditions. This study is preparatory to the development of prototype systems coordinated with the ACB, aimed at monitoring rail continuity.

A possible evolution of the system, conceived to improve and simplify installation, could consist in placing it inside a hollow sleeper together with an associated ACB system. From this sleeper, only a single connection (optical or wireless) would extend toward a central station, while requiring only a low-voltage input to power both the system itself and the associated ACB.

It also seems realistic to assume that the proposed system could be expanded to process data useful for scheduled maintenance (not SIL 4). It should be noted that the system, consisting of a programmable generator and a receiver located in the short circuits that delimit the sections, is capable of evaluating the transfer function of the railway section and that variations in this function that are not consistent with any climatic variations could indicate changes in the condition of the rails that require further investigation.

The same applies to the study of the trend of traction rebalancing currents in short circuits, simply by using current sensors capable of detecting the continuous component (Hall effect). If, during the subsequent steps activated by the associated BCA, a constant trend of these currents is observed, it may be appropriate to anticipate any checks.

BIBLIOGRAFIA - *REFERENCES*

[1] RFI TC.PATC ST CM 03 E23 D; 26.11.2010.

[2] RFI TC.PATC ST CM 03 E19 C; 30.09.2016.

[3] Specifica N° 370582 esp. 1.0 Maschera FS 96.

[4] R. Maja (2013), *"Circolazione ferroviaria, dispensa del corso di esercizio ferroviario"*, Politecnico di Milano.

[5] R. Kwan, C. Leung (2002), *"Optimal detection of a BPSK signal contaminated by interference and noise"*, July, IEEE Communications Letters 6(6):225 – 227.

[6] J.G. Proakis, M. Salehi (2007), *"Digital Communications 5th Edition"*, 2007, Principles of Spread-Spectrum Communication Systems, 2022, 5th edition, Don Torrieri.

[7] J. Stern, J. De Barbeyrac, R. Poggi (1967), *"Methodes pratiques d'etude des fonctions aleatoires"*, Verlag: DUNOD, 1967.