



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica e dell'Automazione

**Proprietà spettrali dei segnali per telemetria nelle
missioni spaziali**

**Spectral properties of telemetry signals in space
missions**

Relatore:

Prof. Franco Chiaraluce

Tesi di Laurea di:

Andrea Bertuccini

Correlatori:

Prof. Marco Baldi

Ing. Massimo Battaglioni

Anno Accademico 2019/20

Introduzione

In questo lavoro di tesi verranno presi in esame i randomizzatori utilizzati nei link spaziali per la trasmissione di dati telemetrici (i cui standard sono riportati in [1]). In particolare, si confronteranno le prestazioni ottenibili utilizzando un randomizzatore classico a 8 celle, da molto tempo presente nello standard emanato dal Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), d'ora in avanti denominato CCSDS 8-celle, con quelle ottenibili da un nuovo randomizzatore a 17-celle, recentemente proposto dalla National Aeronautics and Space Administration (NASA), d'ora in avanti denominato NASA 17-celle.

In particolare, l'obiettivo è di valutare quanto le proprietà randomiche delle sequenze da essi prodotte abbiano un impatto sulle caratteristiche spettrali del segnale trasmesso.

Il randomizzatore svolge un ruolo importante in molti sistemi di comunicazione: esso viene utilizzato per aumentare l'aleatorietà delle sequenze binarie di informazione trasmesse. La maggior parte dei randomizzatori sono realizzati con un Linear Feedback Shift Register (LFSR), un circuito in grado di generare una sequenza binaria con buone proprietà di casualità. Questa sequenza viene aggiunta alla sequenza di informazione binaria in trasmissione, ottenendo come risultato una sequenza binaria pseudo-random che viene trasmessa all'interno del canale. In ricezione, si esegue la stessa operazione ma in verso opposto, recuperando l'informazione originale.

Le proprietà delle sequenze binarie prodotte dal LFSR dipendono fortemente dalla dimensione del registro a scorrimento, poiché il numero di celle e le connessioni implementano la retroazione determinando il periodo della sequenza generata. Tuttavia, di norma il randomizzatore non utilizza l'intero periodo della sequenza, ma solo una porzione, con la stessa lunghezza della sequenza binaria di informazione.

Nei casi d'esame si mostra come il randomizzatore ha un forte impatto sulla Densità Spettrale di Potenza (Power Spectrum Density, PSD) e sul Flusso di Densità di Potenza (Power Flux Density, PFD) la quale è la potenza per area unitaria normale alla direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica).

L'International Telecommunication Union (ITU) regola le norme relative ai servizi di radio-comunicazione e di utilizzo delle frequenze radio, e prevede perciò dei limiti relativi ai valori dello spettro. I collegamenti sono progettati sotto l'ipotesi di informazioni binarie completamente random, che producono spettri ideali e continui, anche se viene riservato un margine di errore per la presenza di non idealità. Tuttavia, se il comportamento del randomizzatore non è ottimale, lo spettro potrebbe mostrare dei forti picchi che emergono dall'andamento continuo dello spettro il quale potrebbe non rientrare nelle norme dell'ITU.

Il valore massimo dei picchi viene indicato con γ e si riferisce alla differenza massima tra spettro ideale e spettro reale ottenuto con il randomizzatore.

In questa Tesi si studia la presenza dei picchi elevati, eseguendo diverse simulazioni in cui si variano i parametri al fine di investigare la loro origine ed i legami con i parametri del sistema, cercando di comprendere quali possano influenzare negativamente o positivamente il valore di picco elevato.

Indice

Introduzione	2
1. Funzionamento di un LFSR	6
2. LFSR CCSDS a 8-celle e NASA a 17-celle	10
3. Vincoli ITU e metodologie di studio	11
3.1. Analisi della densità spettrale di potenza	11
3.2. La massima extra-potenza.....	12
3.3. L'importanza della separazione tra le spurie	13
3.4. Metodologia	15
4. Rappresentazione della densità spettrale di potenza	17
4.1. Confronto tra le densità spettrali di potenza.....	21
4.2. Utilizzo della codifica LDPC (2048,1024).....	26
4.3. Osservazioni e commenti	29
5. Confronto tra le prestazioni del CCSDS 8-celle e del NASA 17-celle	30
5.1 Simulazioni con payload OID a meno di un numero limitato di bit variabili.....	30
5.2. Osservazioni e commenti	36
5.3 Simulazioni con payload random.....	38
5.4 Analisi del comportamento medio	42
5.5. Osservazioni e commenti	45
6. Conclusioni	51
7. Riferimenti bibliografici	53

1. Funzionamento di un LFSR

Prima di soffermarci sui randomizzatori CCSDS 8-celle e NASA 17-celle è necessario conoscere il funzionamento del LFSR, per cui questo capitolo si focalizza sul suo meccanismo. Per eventuali approfondimenti si potrà fare riferimento ad [2].

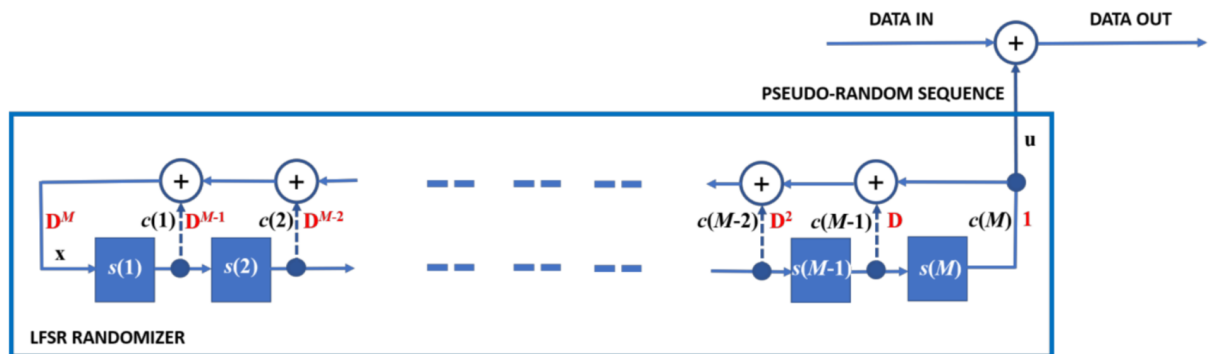


Figura 1.1: LFSR Randomizzatore

Come affermato in precedenza, LFSR è un sistema utilizzato per generare sequenze di bit con caratteristiche molto vicine alla randomicità ideale. Le sequenze prodotte sono pseudo-random e nel caso in cui i rami di retroazione vengano scelti opportunamente, si avrà un periodo massimo di $N=2^M-1$, laddove M è la lunghezza del registro cioè il numero di celle che contiene.

Componenti fondamentali del LFSR.

- *Celle:* contengono i bit che il dispositivo elabora per generare la sequenza in output. Vengono inizializzate con valori iniziali che saranno utilizzati per l'evoluzione della sequenza. Durante il processo di calcolo della sequenza, il contenuto della cella verrà continuamente aggiornato ad ogni colpo di clock. I bit con cui vengono inizializzate le celle compongono il seme iniziale.
- *Collegamenti:* si intende la freccia che termina nei sommatore, visibili in Figura 1.1. I collegamenti devono essere assegnati ed i valori scelti rimarranno fissi per tutto il funzionamento. Nella Figura se una cella ha il collegamento pari a 0 allora la freccia non è presente, al contrario se ha 1 è presente. La scelta dei collegamenti determina fortemente la randomicità del registro. Un altro modo per rappresentare i collegamenti è tramite un polinomio generatore:

$$D^M + D^{M-1} + \dots + 1$$

Ad ogni termine del polinomio, corrisponde il valore di un collegamento. In particolare, nell'esempio precedente, il termine D^M indica che è presente il collegamento della cella M .

- *Tempo*: viene indicato con la variabile k ed è discretizzato, quindi assume solo valori da 0 ad $N-1$ che appartengono al dominio dei numeri naturali. L'incremento della variabile k permette lo shift del registro e l'istante $k=0$ coincide con l'inizializzazione del dispositivo.

Algoritmo di funzionamento

1. Inizializzazione di celle e collegamenti.

Il sistema si trova all'istante iniziale $k = 0$. Il LFSR viene inizializzato con i bit che le celle devono contenere. I collegamenti e lo stato iniziale sono entrambi specifiche assegnate in fase di progettazione del registro.

2. Calcolo del bit di reazione (Feedback Bit).

È fondamentale per lo scorrimento ed aggiornamento del registro e si calcola attraverso la seguente formula:

$$x_k = \sum_{i=1}^M s(i)_k c(i) \quad (1.1)$$

dove $s(i)_k$ è il contenuto della cella i -esima all'istante k -esimo, mentre $c(i)$ è il valore del relativo collegamento. Questa relazione vale per qualunque k .

Infine, le operazioni di somma sono in realtà Exclusive-OR e i prodotti sono AND.

3. Shift

Segue la seguente regola, riportata nelle formule (1.2) e (1.3):

$$s(i)_{k+1} = x_k \quad (1.2)$$

$$\forall j \in [2, \dots, M], s(j)_{k+1} = s(j-1)_k \quad (1.3)$$

Nella (1.3), j si riferisce alla posizione considerata nel registro la quale deve essere compresa tra 2 ed M , poiché il contenuto della prima cella viene aggiornato tramite il bit di reazione.

Perciò lo shift avviene assegnando alla prima cella il valore del bit di reazione. Quindi, se si parte dall'istante k in cui il registro ha una certa configurazione, all'istante $(k + 1)$ la prima modifica che si effettua consiste nell'eguagliare il contenuto di $s(1)$ a x_k .

Si procede poi da $j = 2$, aggiornando i valori a $k + 1$ in accordo con la relazione $s(j)_{k+1} = s(j - 1)_k$. Ovviamente si procede considerando valori di j crescenti fino ad M , dove a questo punto tutto il registro all'istante $k + 1$ risulta popolato.

4. Sequenza di Output

Come bit di uscita, vale a dire quello che andrà ad aggiungersi alla sequenza prodotta dal registro, si prende il bit contenuto nella cella M -esima:

$$u_k = s(M)_k \quad (1.4)$$

Dove u_k è il nuovo bit che si aggiungerà alla sequenza generata fino a quel momento. Ad ogni aumento di k corrisponderà perciò la produzione di un bit della sequenza. È allora facile capire perché la sequenza sia periodica: l'algoritmo di funzionamento permette al più di avere nelle M celle del registro tutte le combinazioni di M bit esclusa quella nulla; di conseguenza il periodo delle sequenze di uscita sarà pari a $N = 2^M - 1$, cioè ogni N bit la sequenza si ripete periodicamente.

Approfondimento LFSR

L'algoritmo descritto permette di generare una sequenza di bit con caratteristiche che si avvicinano a quelle di completa randomicità. Tuttavia, il dispositivo non è in grado di generare sequenze di bit completamente random:

- *Sequenza ideale completamente random*: si tratta appunto di una sequenza infinita di bit casuali la quale non è riproducibile dal LFSR.
- *Sequenze prodotte dal LFSR*: è una sequenza potenzialmente di lunghezza infinita con un punto di inizio. È pseudo-randomica, dal momento che la stessa porzione di sequenza (un periodo) si ripete ogni $2^M - 1$ bit. Non è una sequenza ideale, tuttavia è riproducibile nella realtà.

Quindi nella realtà si riescono a produrre sequenze potenzialmente di lunghezza infinita ma con un punto di inizio ed un periodo più o meno lungo dove la sequenza si riproduce in maniera identica.

Dovendo trattare sequenze reali, viene spontaneo porsi il problema del troncamento, nel momento in cui la sequenza del periodo viene troncata dopo un certo numero di bit.

Per chiarire, consideriamo il seguente esempio:

Sequenza di periodo $N=4$, in cui un periodo è dato dalla stringa di bit 1101.

La sequenza presa in un punto intermedio qualsiasi sarà di questa forma:

...1101110111011101...

Perciò si può definire:

- *Sequenza non troncata*: quella evidenziata in grassetto.

...1101**1101**11011101...

oppure

...1101**11011101**1101...

Quindi una sequenza non troncata rispetta la proprietà in (1.5)

$$L = hN \quad (1.5)$$

Dove L è la lunghezza totale della sequenza, N il suo periodo e h un numero naturale.

- *Sequenza troncata*: quella evidenziata in grassetto.

...1101**11011101**1101...

oppure

...11011101**1101**1101...

Quindi una sequenza troncata non rispetta la proprietà (1.5).

Questo concetto è molto importante per l'analisi sviluppata in questa Tesi, in quanto la presenza o assenza di esso porta ad avere ripercussioni sulla PSD, in quanto il troncamento non permette di avere uno spettro pseudo-ideale. Esempi raffigurativi di questa complicazione vengono riportati nei capitoli successivi e per eventuali approfondimenti si potrà fare riferimento ad [3], [4], [5].

2. LFSR CCSDS a 8-celle e NASA a 17-celle

In questo capitolo si mostra nel dettaglio come sono composti i due randomizzatori nei termini di polinomio generatore, periodo e seme iniziale. Come per il capitolo precedente, per un approfondimento si potrà fare riferimento ad [2].

In Figura 2.1 si riporta il randomizzatore CCSDS 8-celle

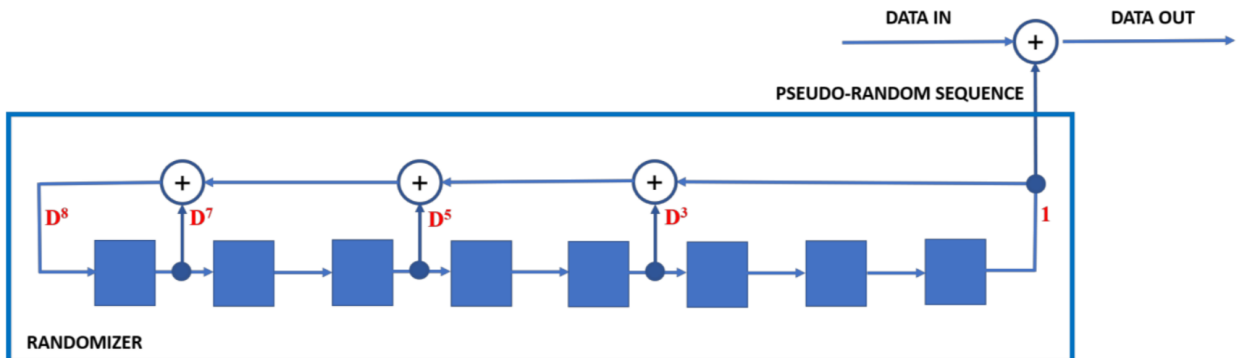


Figura 2.1: Randomizzatore CCSDS 8-celle

Dove le peculiarità di questo randomizzatore sono le seguenti:

- Polinomio generatore: $1+D^3+D^5+D^7+D^8$
- Periodo: $N=2^8-1$
- Seme iniziale: 11111111

Mentre in Figura 3.2 viene mostrato il randomizzatore NASA 17- celle.

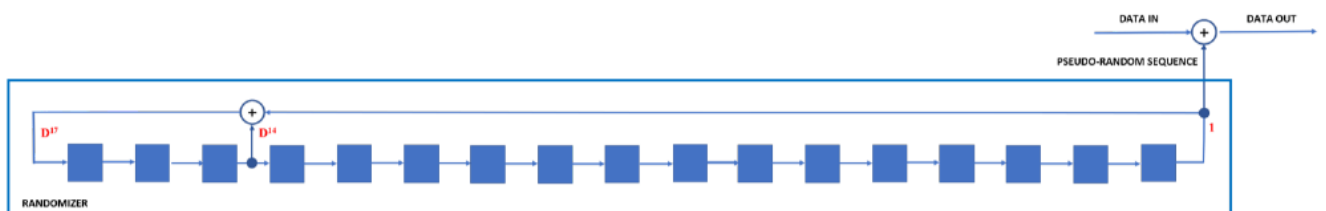


Figura 2.2: Randomizzatore NASA 17-celle

In questo caso, le peculiarità del randomizzatore sono:

- Polinomio generatore: $1+D^{14}+D^{17}$
- Periodo: $N=2^{17}-1$
- Seme iniziale: 11000111000111000

Queste sono le caratteristiche dei randomizzatori usati nelle successive simulazioni, dove viene analizzato il loro comportamento sia con un payload tutti-zeri e sia con un payload random. Tuttavia, prima di analizzare i risultati ottenuti è necessario fissare i concetti di base e conoscere le metodologie di studio applicate, riportate nel capitolo successivo.

3. Vincoli ITU e metodologie di studio

In questa sezione vengono descritti i vincoli ITU di cui il segnale prodotto dal randomizzatore, deve soddisfare. Successivamente viene descritto il metodo di calcolo adottato per l'analisi. Per eventuali approfondimenti si potrà fare riferimento ad [6].

Prima di passare alla analisi della teoria è necessario conoscere la funzione di autocorrelazione periodica, molto importante per determinare la densità spettrale di potenza, la quale corrisponde alla trasformata di Fourier della funzione di autocorrelazione. Perciò si definisce funzione di autocorrelazione periodica nel seguente modo:

$$c_{pp}(i) = \sum_{k=0}^{N-1} b_k b_{k-1} \quad (3.1)$$

Dove i termini $b_k b_{k-1}$ differiscono da sequenza a sequenza di bit considerata.

Infine, per una migliore terminologia, si utilizza il termine frame per indicare la sequenza di bit in trasmissione.

3.1. Analisi della densità spettrale di potenza

Nelle applicazioni spaziali, l'ITU specifica il vincolo della "banda di misura", vale a dire l'intervallo di frequenza entro il quale si calcola la potenza trasmessa.

In particolare, si pone:

- $B= 4$ kHz per trasmissioni nell'intorno di 8 GHz.
- $B= 1$ MHz per trasmissioni nell'intorno di 26 GHz.

I vincoli ITU si riferiscono alla potenza ricevuta su una data misurazione di banda. Dove i link sono progettati seguendo il fatto che le sequenze binarie in trasmissione producono spettri non ideale. Per cui si introduce un margine per coprire la non idealità. Il margine di 6 dB è tipicamente usato in diverse missioni, ma talvolta si utilizza un margine pari a 3 dB o meno. In generale ogni missione dovrebbe adottare una strategia per avere il margine il più basso possibile.

3.2. La massima extra-potenza

Nel precedente paragrafo si è fatto riferimento al “margine”. Questo valore deve essere soddisfatto dalla massima extra-potenza, la quale è la più grande differenza tra lo spettro ideale e lo spettro ottenuto dal randomizzatore. Essa viene indicata con la lettera γ e si mostra in Figura 3.1, dove la curva rossa rappresenta lo spettro ideale mentre il grafico in blu è lo spettro ricevuto.

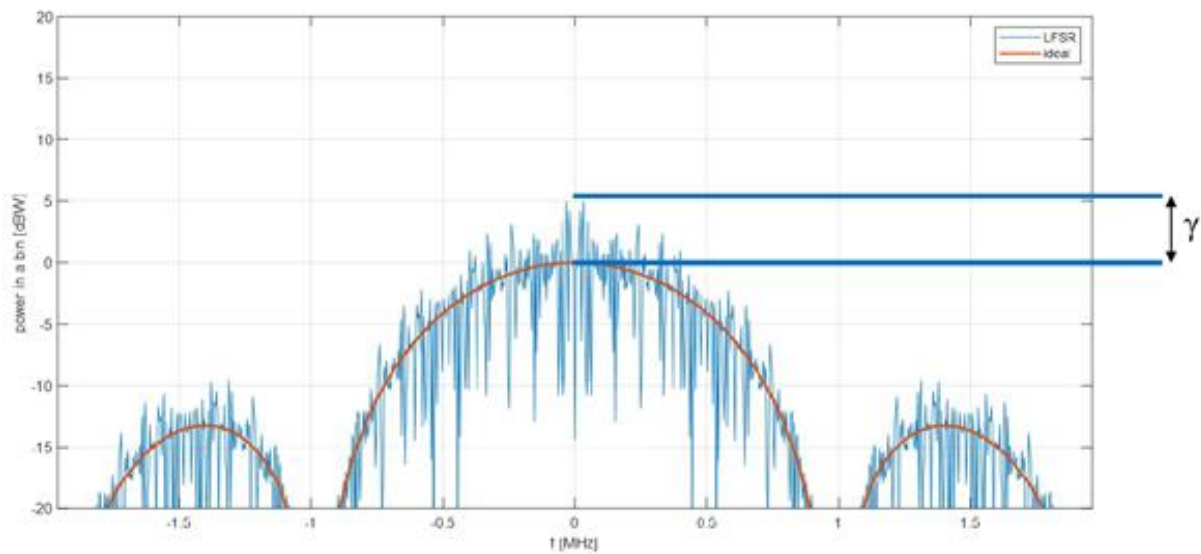


Figura 3.1: Rappresentazione della massima extra-potenza

3.3. L'importanza della separazione tra le spurie

Nei paragrafi precedenti sono stati espressi i vincoli ITU. In questo paragrafo si espone l'importanza della separazione spuria, avvalendoci delle seguenti dichiarazioni “la separazione spuria deve essere minore di 4 kHz” e “l'ampiezza spuria deve essere minore di 6 dB”.

Per spiegare queste definizioni, si prende come esempio una trasmissione di una sequenza di frame OID (frame con payload tutti-zeri) con ASM (ASM è Attached Sync Marker sono i bit volti alla sincronizzazione). Dove il payload trasmesso è sempre lo stesso come è mostrato in Figura 3.2, in questo modo si ottiene una lunghezza totale della sequenza pari a:

$$L_T \text{ bit} = \text{ASM (bit)} + \text{frame randomizzatore (L bit)} \quad (3.2)$$

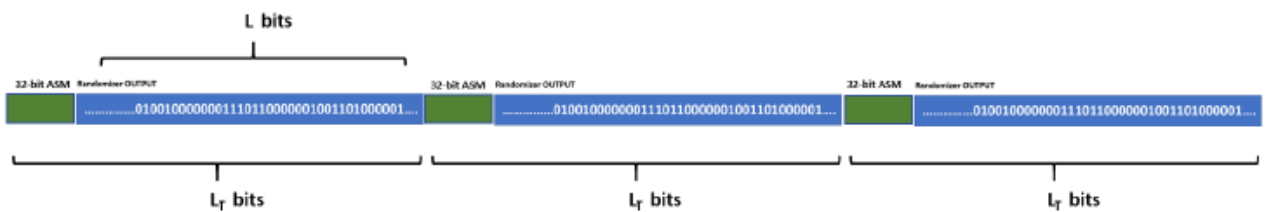


Figura 3.2: Trasmissione di una sequenza binaria di OID con payload tutti-zeri

Poi si indica con P il periodo dominante, il quale corrisponde alla lunghezza della sequenza. Per indicare la bit rate si sceglie il simbolo R_b , supponendo di trasmettere con l'utilizzo di una modulazione bit/Symbol. Arrivati a questo punto si passa all'esempio, dove in Figura 3.3 si mostra lo spettro discretizzato:

- Separazione spurie $\Delta = R_b/P$ Hz
- L'amplificazione delta dipende sul valore locale della funzione di autocorrelazione.

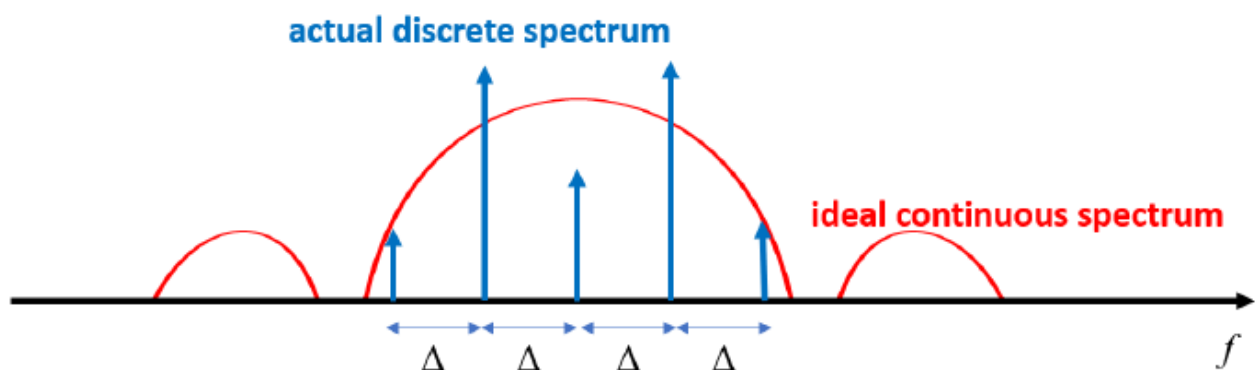


Figura 3.3: Spettro discretizzato e separazione tra le spurie

Per tanto si cerca di avere la situazione più favorevole possibile e dato che B è un valore imposto dai vincoli ITU, si deve avere una separazione spuria minore a 4 kHz al fine di avere un numero elevato di spurie all'interno del bin.

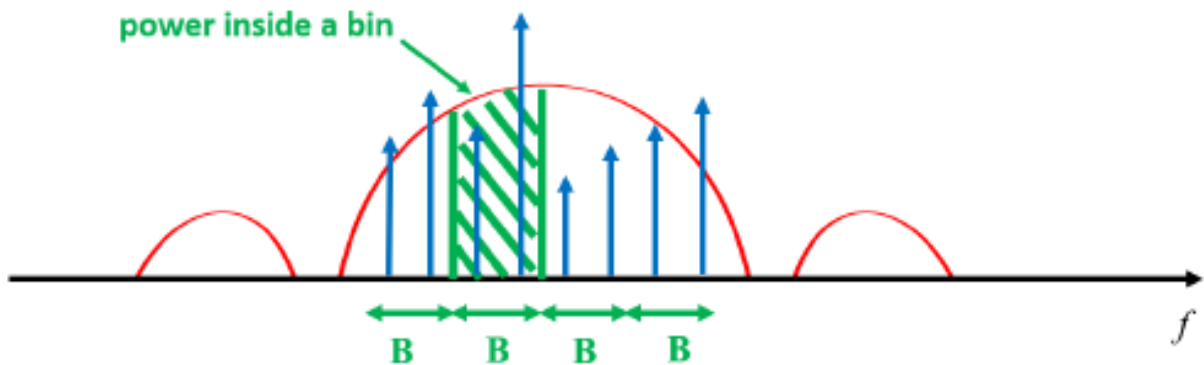


Figura 3.4: Spettro discretizzato con separazione spuria all'interno del bin

Infine, bisogna porre un'accortezza: la condizione non è **né sufficiente né necessaria** per avere picchi non troppo elevati. Tuttavia, comporta l'ottenimento di una situazione più favorevole, dato che normalmente si ricavano valori di γ non elevati.

3.4. Metodologia

In questo paragrafo si presenta il metodo di calcolo adottato per l'analisi della densità spettrale di potenza. Nel metodo applicato, si calcola un singolo FFT (Fast Fourier Transform) su un intero frame e poi si somma la potenza.

In seguito, si analizza lo spettro della sequenza binaria tramite una mappatura dell'intero segnale, dato che la forma del segnale dipenda dalla modulazione usata. Successivamente, si calcola la funzione di autocorrelazione periodica per ogni campione ottenuto. Infine, si calcola la trasformata di Fourier per ottenere la densità spettrale di potenza.

Questo consente di avere un'alta risoluzione che dipende dalla symbol rate e dal numero di symbol considerati all'interno di una data finestra di osservazione. Quest'ultima indicata con la lettera "W". È molto importante comprendere il ruolo della finestra di osservazione W nei casi di trasmissione di sequenze random o non random.

Quando le sequenze non random sono trasmesse, come in Figura 3.5, le proprietà spettrali non dipendono sulla scelta della finestra di osservazione W, ma solamente sulle sequenze di struttura. Perciò, per ogni scelta di W otteniamo lo stesso risultato in termini di potenza ricevuta.

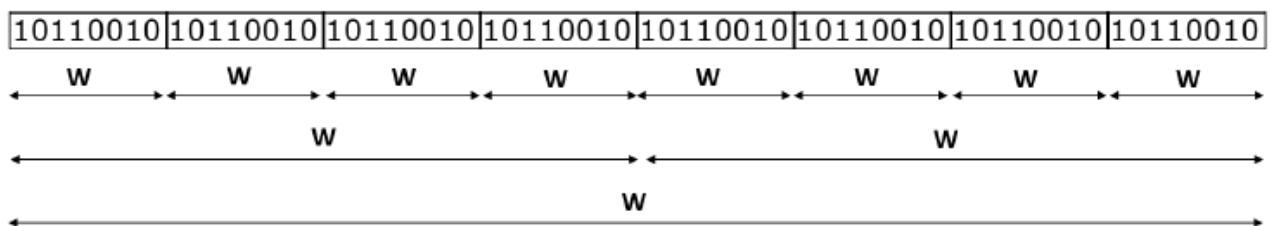


Figura 3.5: Finestra di osservazione per sequenze di frame uguali

Al contrario quando le sequenze di frame random sono trasmesse, come in Figura 3.6, la scelta della finestra di osservazione è determinante.

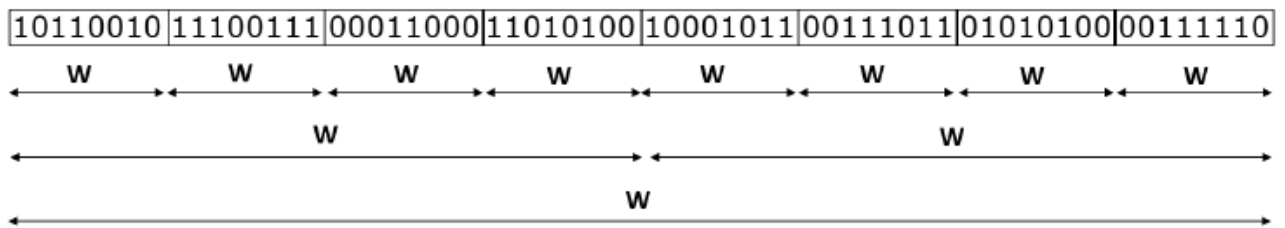


Figura 3.6: Finestra di osservazione per sequenze di frame random

Dato che in questo caso il risultato dipende dalla finestra di osservazione, perciò W deve essere abbastanza grande da osservare lo spettro.

4. Rappresentazione della densità spettrale di potenza

In questo capitolo si riportano esempi di raffigurazione della PSD ottenuti dal randomizzatore CCSDS 8-celle. Al fine di mostrare i parametri espressi nei capitoli precedenti. Per eventuali approfondimenti si può fare riferimento ad [2].

In questi esempi si utilizza un payload composto da zeri e si affianca una modulazione 2-PSK. La finestra di osservazione utilizzata è pari a $W=100\text{ms}$.

Esempio 4.1

Parametri simulazione

- Frame OID con payload tutti-zeri
- Bit rate $R_b= 1.02 \text{ Mbit/s}$
- Randomizzatore CCSDS 8-celle
- Lunghezza frame $L=255 \text{ bit}$
- Lunghezza totale $L_T= 255 \text{ bit}$
- Modulazione 2-PSK
- Banda misurata $B= 4 \text{ kHz}$

Il periodo dominante è $P= 255 \text{ bit}$, mentre la separazione spurie è pari a $\Delta=R_b/P=4 \text{ kHz}$.

Infine, γ è uguale a 0.016 dB .

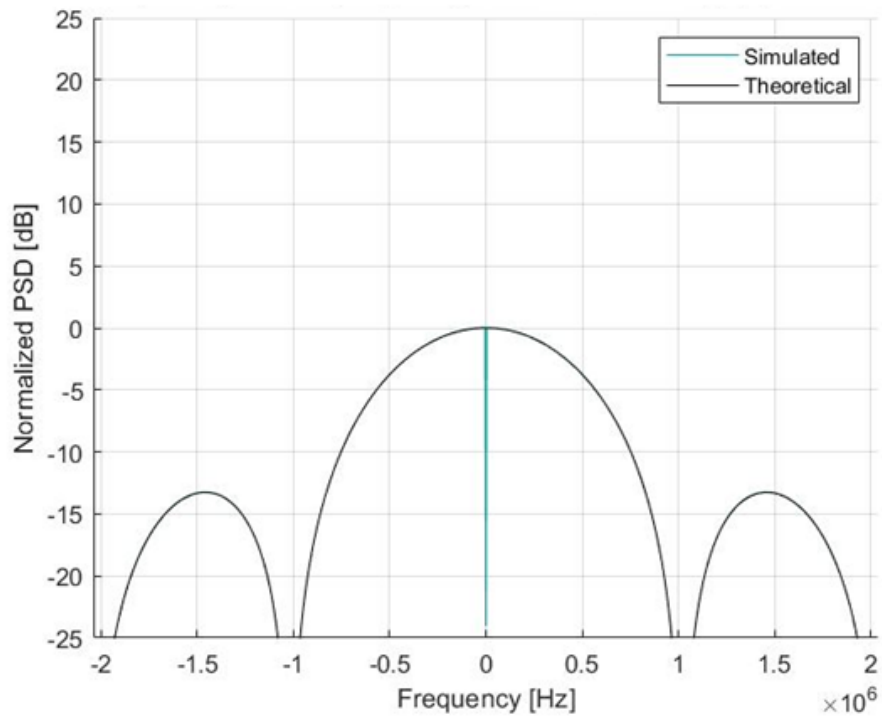


Figura 4.1: Sequenza intera LFSR, con separazione spuria uguale alla banda di misura

In questo caso si ha che la separazione spuria e banda di misura hanno valori identici e come affermato nei capitoli precedenti LFSR utilizza l'intero periodo. Il valore di γ ottenuto è relativamente basso, tanto che si può considerare lo spettro ideale.

Esempio 4.2

Parametri simulazione

- Frame OID con payload tutti-zeri
- Bit rate $R_b = 0.98$ Mbit/s
- Randomizzatore CCSDS 8-celle
- Lunghezza frame $L = 245$ bit
- Lunghezza totale $L_T = 255$ bit
- Modulazione 2-PSK
- Banda misurata $B = 4$ kHz

Il periodo dominante è $P = 245$ bit mentre la separazione spurie è pari a $\Delta = R_b/P = 4$ kHz. In questo caso il periodo non dipende dal circuito LFSR che si sta utilizzando, ma dal fatto che la lunghezza del frame è pari a 245 bit per cui si ha un troncamento di 10 bit. L'effetto del troncamento lo si apprezza nel grafico in quanto lo spettro è fortemente non-ideale.

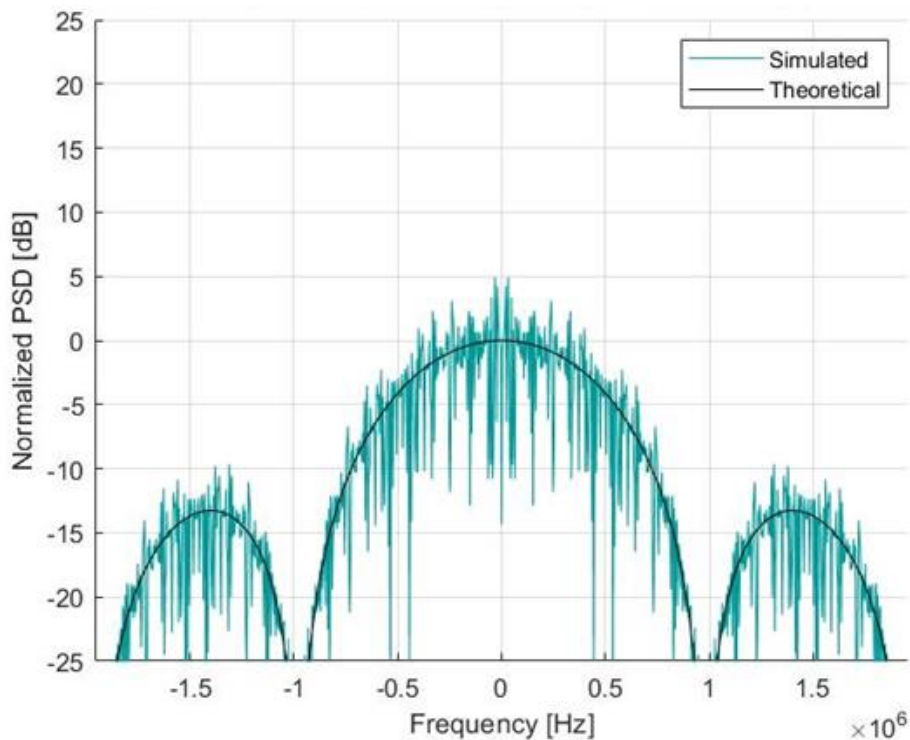


Figura 4.2: Sequenza LFSR troncata, con separazione spuria uguale alla banda di misura

Esempio 4.3

Parametri simulazione

- Frame OID con payload tutti-zeri
- Bit rate $R_b = 1.148$ Mbit/s
- Randomizzatore CCSDS 8-celle
- Lunghezza frame $L = 255$ bit
- Lunghezza totale $L_T = 287$ bit
- 32-bit ASM
- Modulazione 2-PSK
- Banda misurata $B = 4$ kHz

Il periodo dominante è $P = 287$ bit e la separazione spurie è pari a $\Delta = R_b/P = 4$ kHz.

Si ottiene uno spettro fortemente non-ideale. Dato che il periodo non dipende dal circuito LFSR che si sta utilizzando, ma dal fatto che vengono aggiunti 32-bit dell'ASM. Perciò si vede che il ruolo dell'ASM viene amplificato dalla lunghezza ridotta del frame.

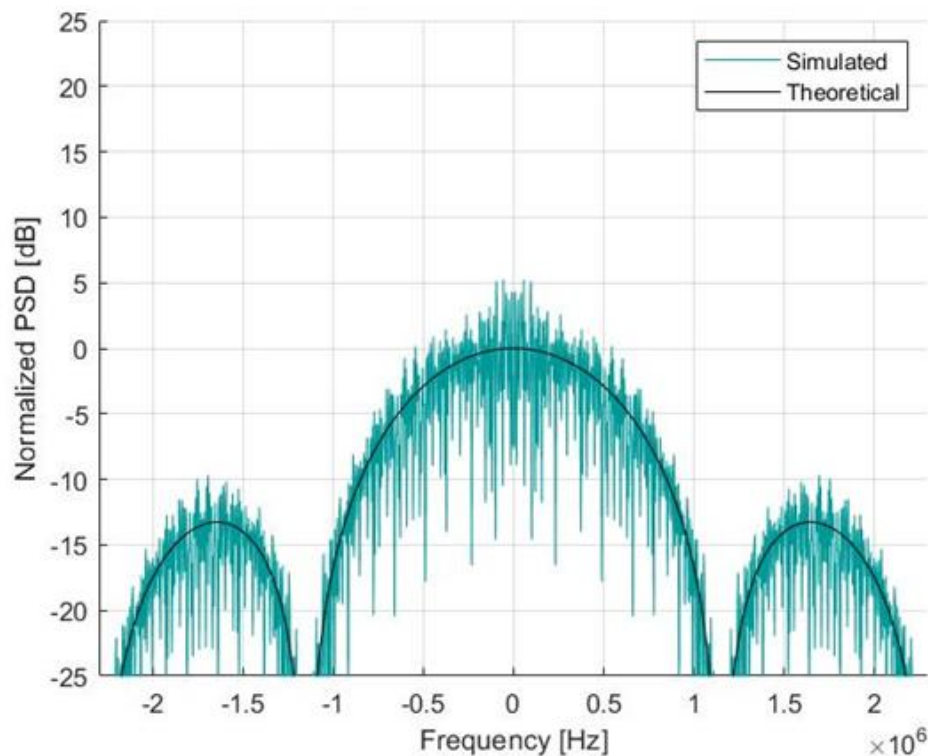


Figura 4.3: Sequenza intera LFSR con ASM, separazione spuria uguale alla banda di misura

4.1. Confronto tra le densità spettrali di potenza

In questo paragrafo viene mostrato il confronto della densità spettrale ottenuta con i due randomizzatori. La sequenza di frame data in input corrisponde a tutti zeri e la finestra di osservazione usata è pari a $W=100\text{ms}$.

Parametri simulazione

- Frame OID con payload tutti-zeri
- 32-bit ASM
- Lunghezza totale $L_T = 10000$ bit
- Modulazione 2-PSK
- Banda misurata $B= 4$ kHz

Tra le varie simulazione, l'unico valore che differisce è la bit-rate, la quale è uguale a 2 Mbit/s nel primo esempio, 5 Mbit/s nel secondo e nell'ultimo corrisponde a 10 Mbit/s.

Esempio 4.4

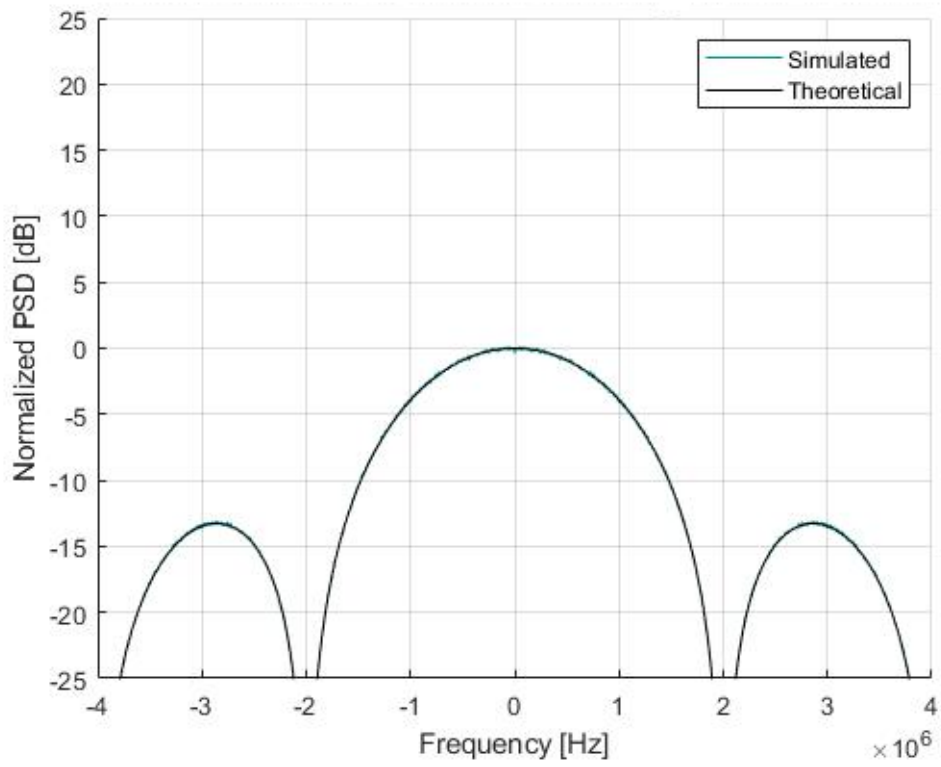


Figura 4.4: PSD con randomizzatore NASA

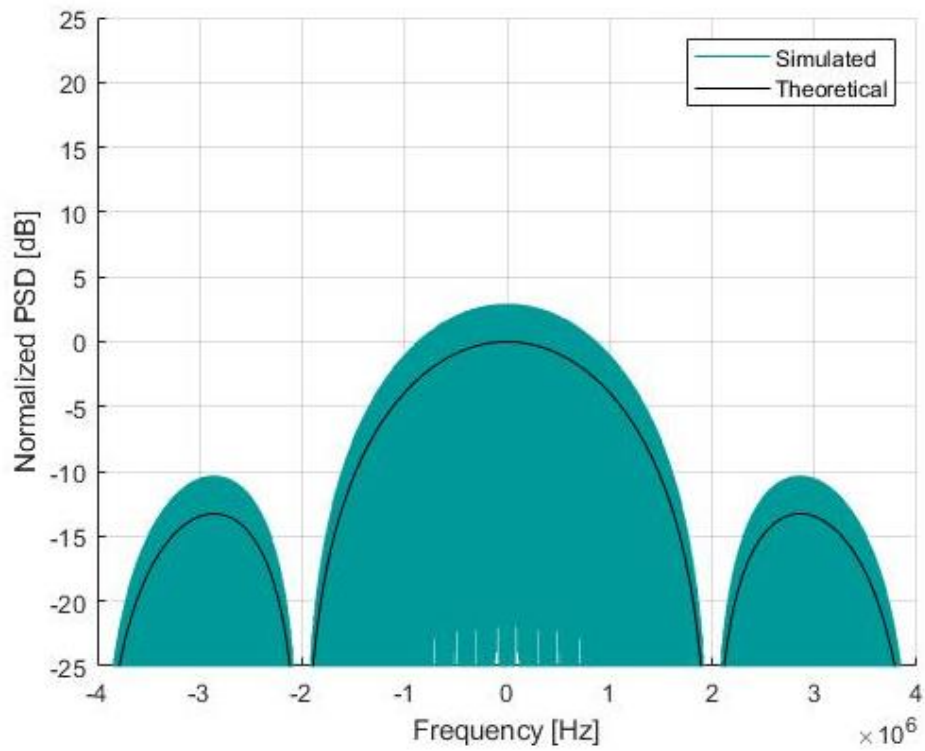


Figura 4.5: PSD con randomizzatore CCSDS

In questo primo esempio, si ritrovano confermate le affermazioni fatte nel paragrafo precedente, in quanto si nota che la densità spettrale ottenuta con il randomizzatore NASA raffigurato nella Figura 4.4 ha un comportamento migliore rispetto al risultato ottenuto con il randomizzatore CCSDS raffigurato nella Figura 4.5. Questo è dovuto alla elevata lunghezza del periodo del randomizzatore NASA, in quanto non si hanno problemi di ripetizione, dato che la sequenza rimane all'interno del suo periodo.

Infine, si trova conferma di quanto affermato in Figura 4.3: essendo la lunghezza del frame elevata, l'effetto dell'ASM è inesistente.

Ulteriori esempi che confermano quanto asserito sono proposti nelle pagine successive.

Esempio 4.5

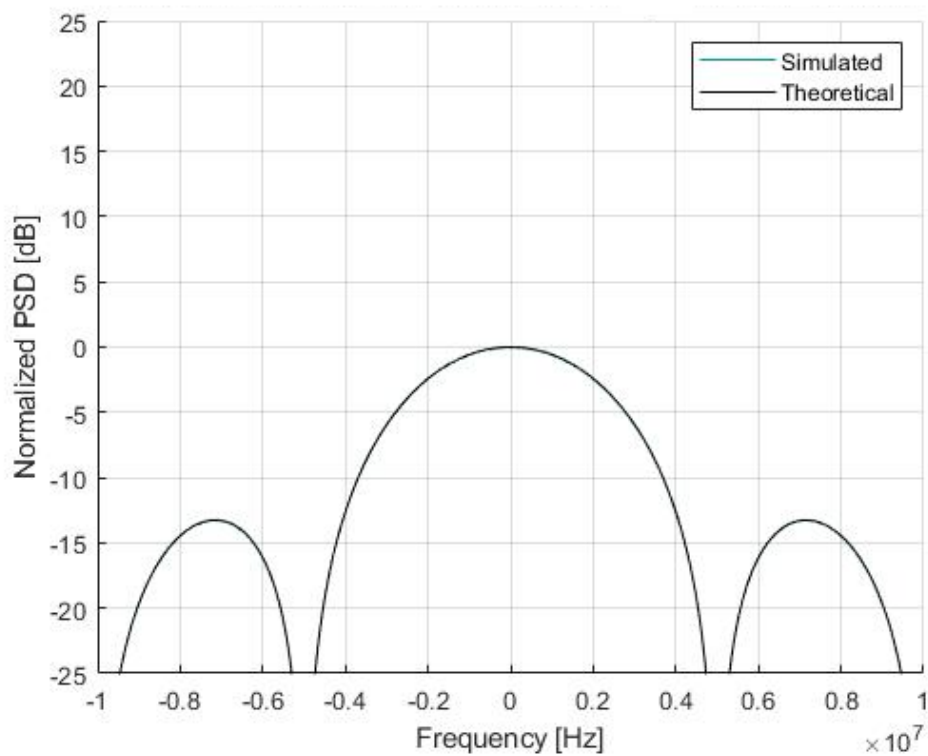


Figura 4.6: PSD con randomizzatore NASA

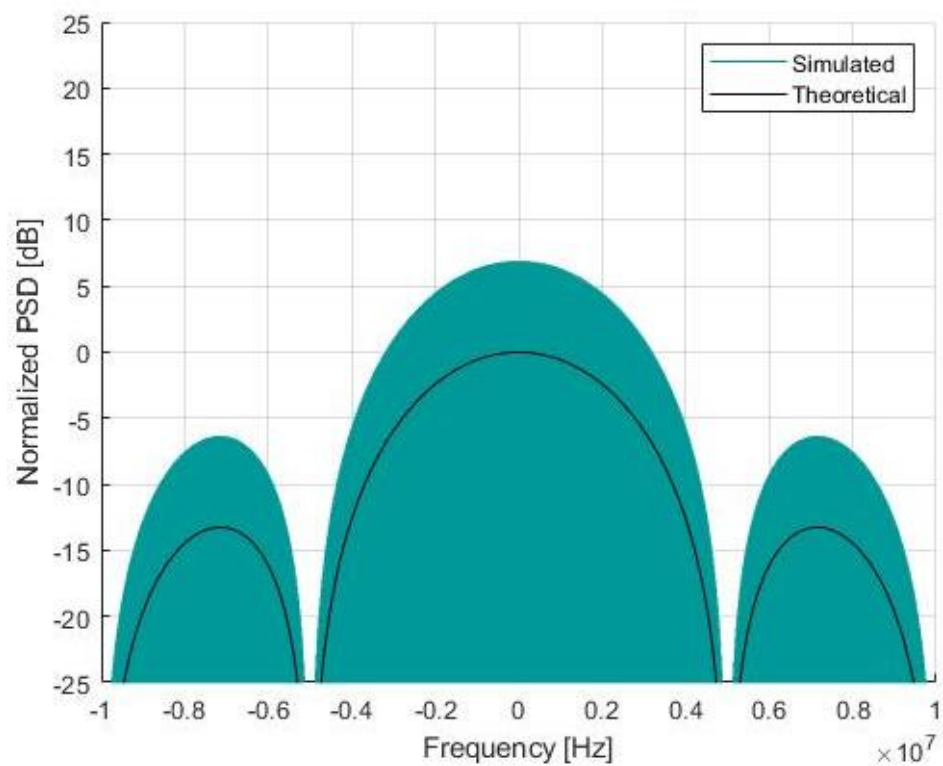


Figura 4.7: PSD con randomizzatore CCSDS

Esempio 4.6

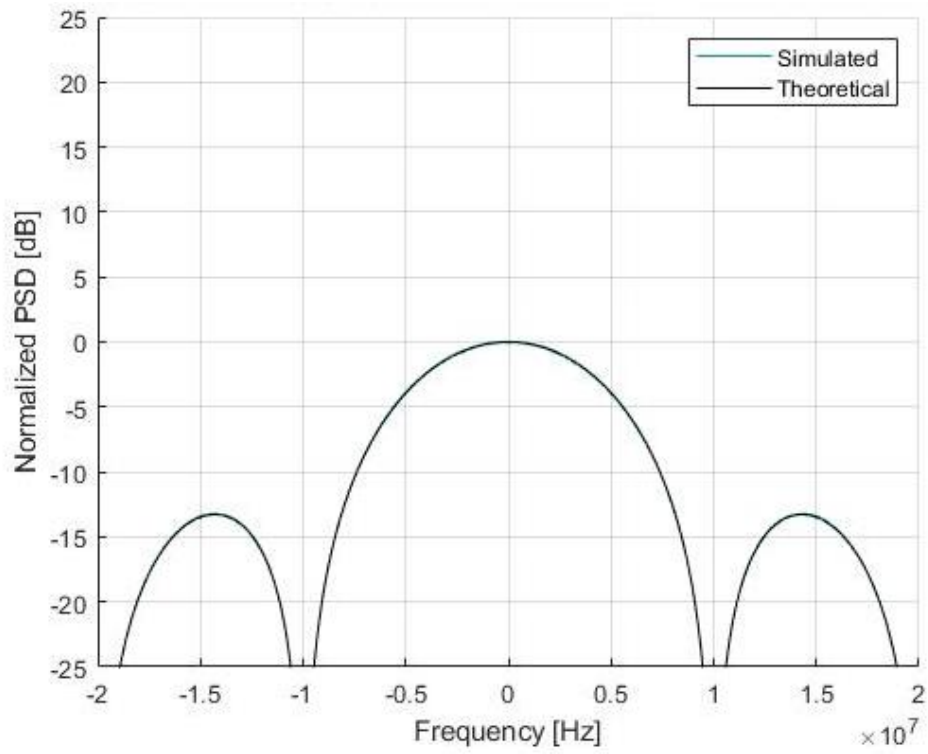


Figura 4.8: PSD con randomizzatore NASA

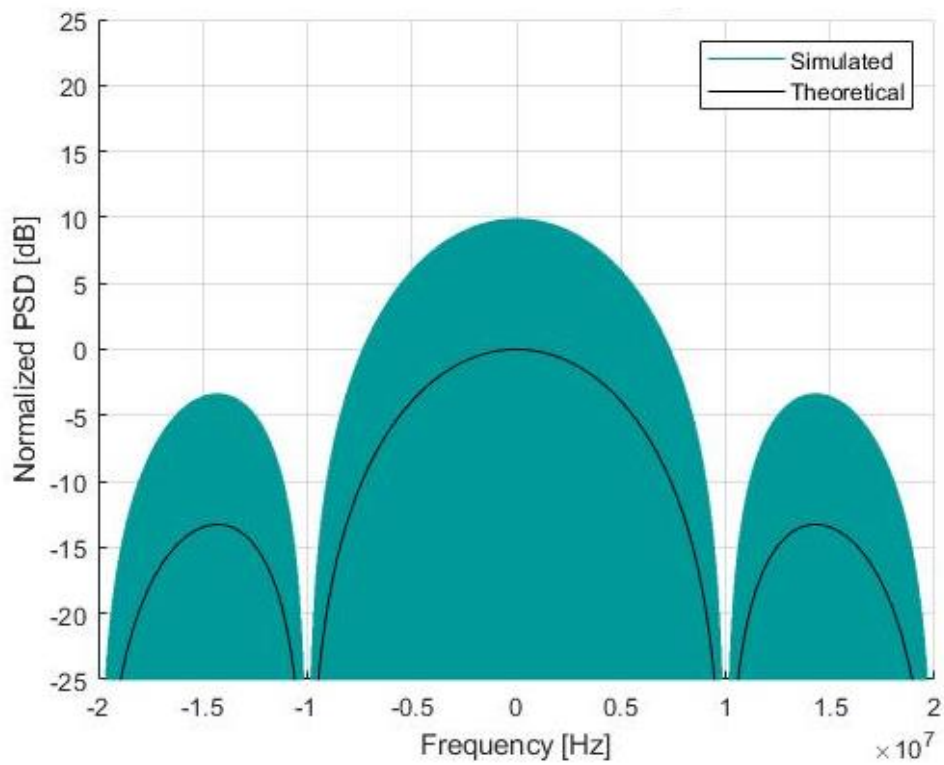


Figura 4.9: PSD con randomizzatore CCSDS

4.2. Utilizzo della codifica LDPC (2048,1024)

In questo paragrafo si utilizza la codifica low-density parity-check (LDPC), la quale è un esempio di codice lineare per la correzione dell'errore presente nel canale in cui viene trasmesso il segnale, dove si riesce a raggiungere prestazioni vicine al limite di Shannon.

La codifica è così composta: LDPC(n,k) con $k=1024$ la quale corrisponde alle sequenze di frame in ingresso al codificatore, mentre $n=2048$ si indica le sequenze di frame in uscita dal codificatore

Ora si riportano due esempi volti a raffigurare la densità spettrale di potenza con l'utilizzo della codifica, il payload dato in ingresso sarà composto da bit random con ASM.

Parametri simulazione

- Frame OID con payload tutti-zeri
- Bit rate $R_b= 1.024$ Mbit/s
- Lunghezza frame $L=1024$ bit
- 32 bit ASM
- Codifica LDPC (2048,1024)
- Modulazione 2-PSK
- Banda misurata $B= 4$ kHz

Il secondo esempio differisce dal primo per il solo fatto che viene utilizzata una bit-rate 10 volte superiore, pari a 10.24 Mbit/s, gli esempi sono riportati nelle pagine successive.

Esempio 4.7

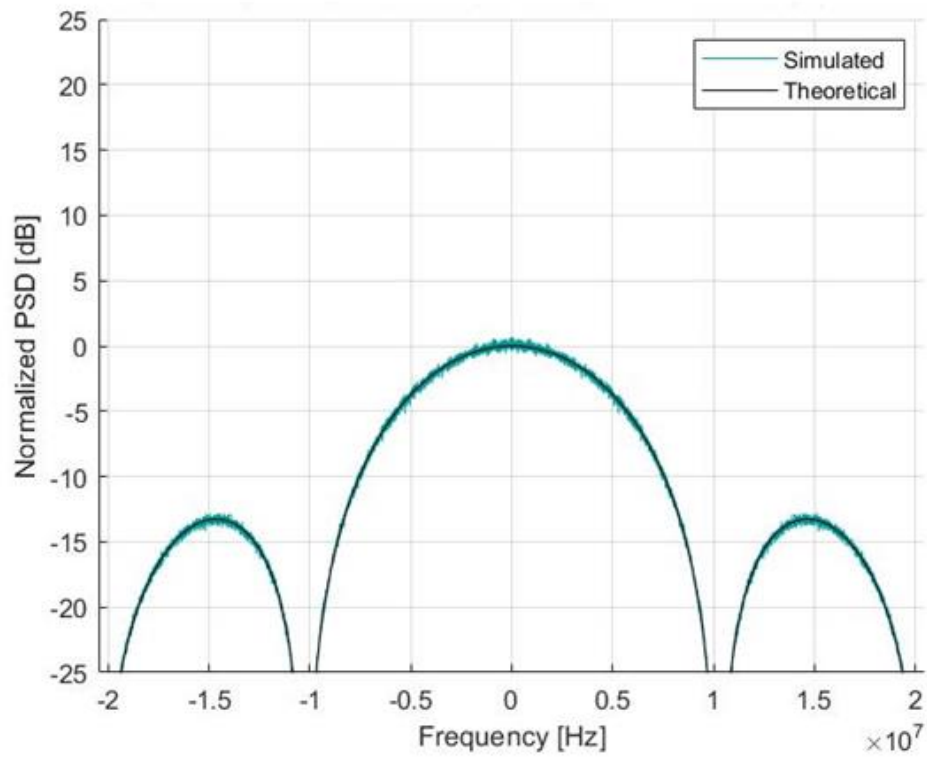


Figura 4.10: PSD con randomizzatore NASA

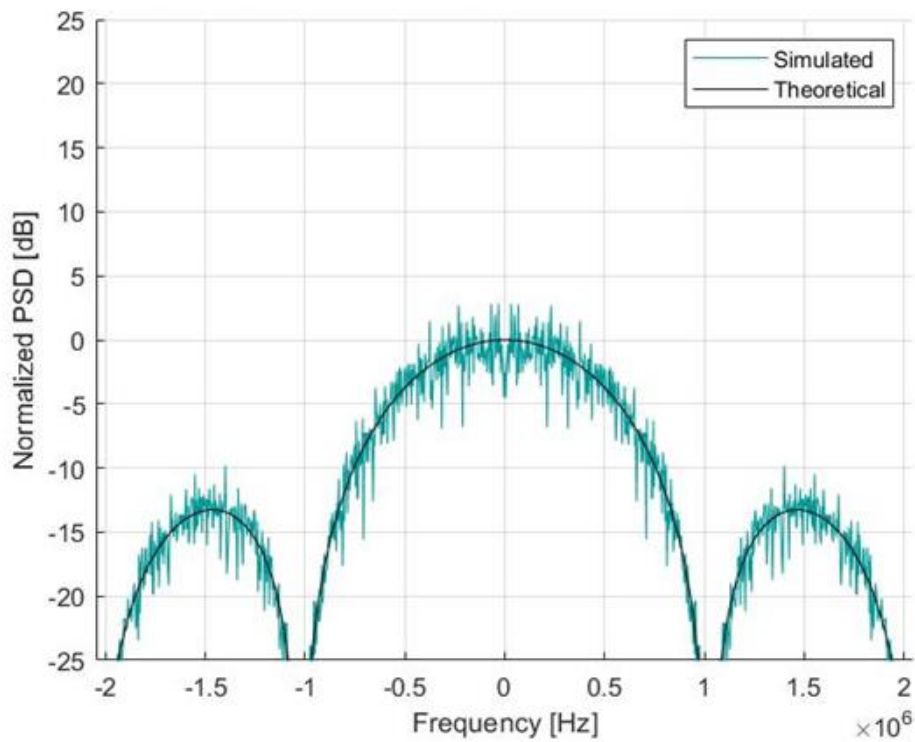


Figura 4.11: PSD con randomizzatore CCSDS

Esempio 4.8

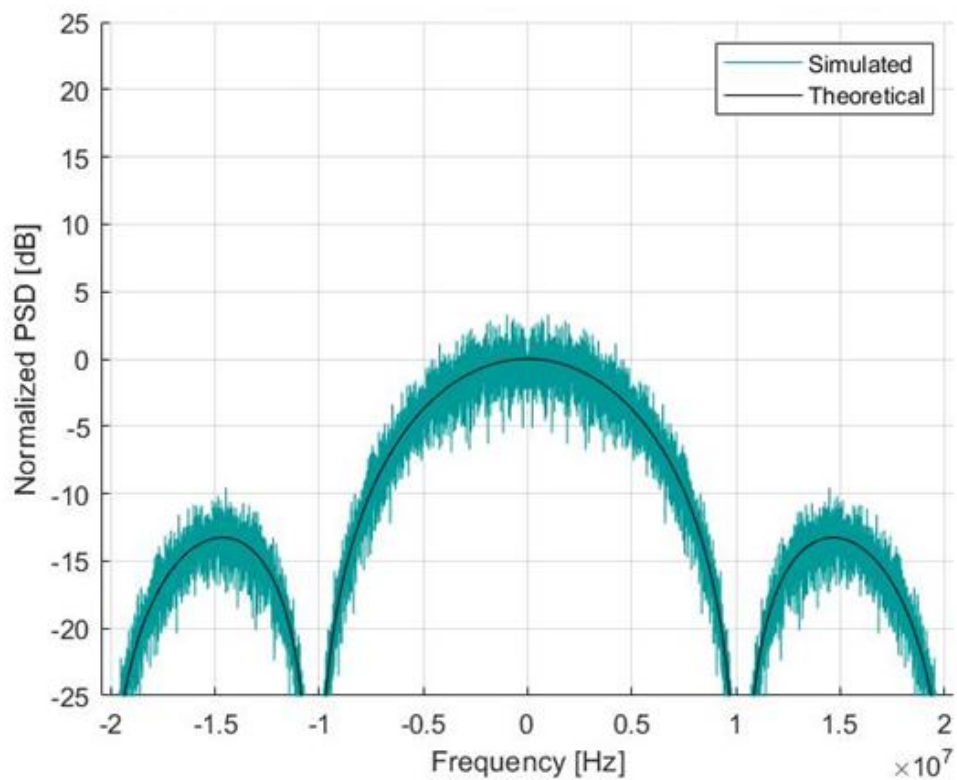


Figura 4.12: PSD con randomizzatore NASA

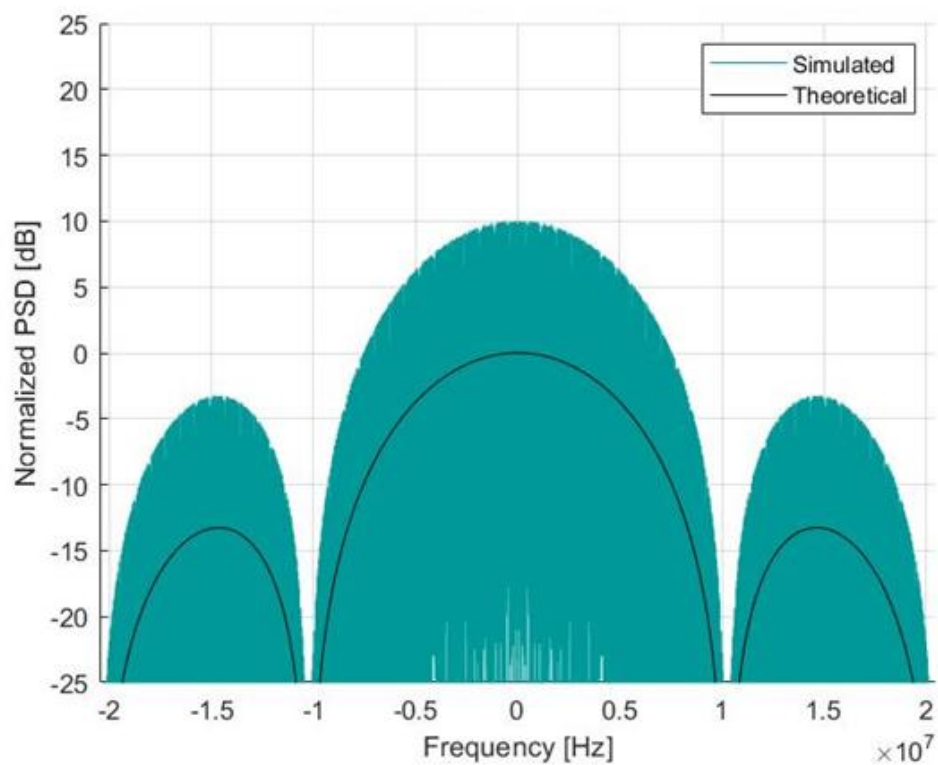


Figura 4.13: PSD con randomizzatore CCSDS

4.3. Osservazioni e commenti

Fino ad ora si sono confrontati i due randomizzatori NASA 17-celle e CCSDS 8-celle studiando i loro comportamenti sulla base della teoria riportata nei primi capitoli. Dove in ogni esempio proposto, il NASA 17-celle ha avuto prestazioni migliori rispetto al CCSDS 8-celle.

1. Dai risultati proposti si nota che il NASA 17-celle ha avuto sempre un valore di γ non elevato con uno spettro che tende ad essere ideale, sia nei casi di differenti bit rate sia quando si è introdotta la codifica LDPC.
2. Nell'utilizzo del randomizzatore CCSDS 8-celle si sono ottenuti pessimi risultati, dove il più delle volte si sono riscontrati valori con uno spettro fortemente non ideale. Questo è facilmente riconducibile al periodo del LFSR, il quale, non essendo elevato come nel caso del NASA 17-celle, produce delle sequenze troncate che danno luogo ad uno spettro non ideale.

A conferma di questo notiamo che nelle Figure 4.10 e 4.11 il valore di γ ottenuto nella Figura 4.11 è quasi tre volte maggiore rispetto alla Figura precedente e questo si ripete anche nelle Figure 4.12 e 4.13.

Nonostante i risultati ottenuti e le osservazioni precedentemente fornite, non si può ancora confermare esplicitamente che il NASA 17-celle possa sostituire l'attuale randomizzatore standardizzato. Per questo passaggio è necessario seguire un adeguato procedimento e riportare un numero maggiore di confronti, dove si dovranno variare i parametri mostrati nei capitoli precedenti.

Perciò nel capitolo successivo si stabilirà il confronto tra i due randomizzatori, tentando di affermare che l'utilizzo del NASA 17-celle conduca all'ottenimento di migliori risultati.

5. Confronto tra le prestazioni del CCSDS 8-celle e del NASA 17-celle

Come anticipato precedentemente, in questo capitolo si esegue il confronto tra i due randomizzatori, verificando se NASA 17-celle si comporta meglio del CCSDS 8-celle. L'analisi si basa sul calcolo e confronto del valore di γ ottenuto mediante le simulazioni. Verranno eseguite due studi separati, il primo rispetto ad un payload OID a meno di un certo numero di bit random ed il secondo rispetto ad un payload random.

5.1 Simulazioni con payload OID a meno di un numero limitato di bit variabili

Per grafici proposti viene utilizzato un'altra modalità di rappresentazione, un esempio viene mostrato nella Figura 5.1.

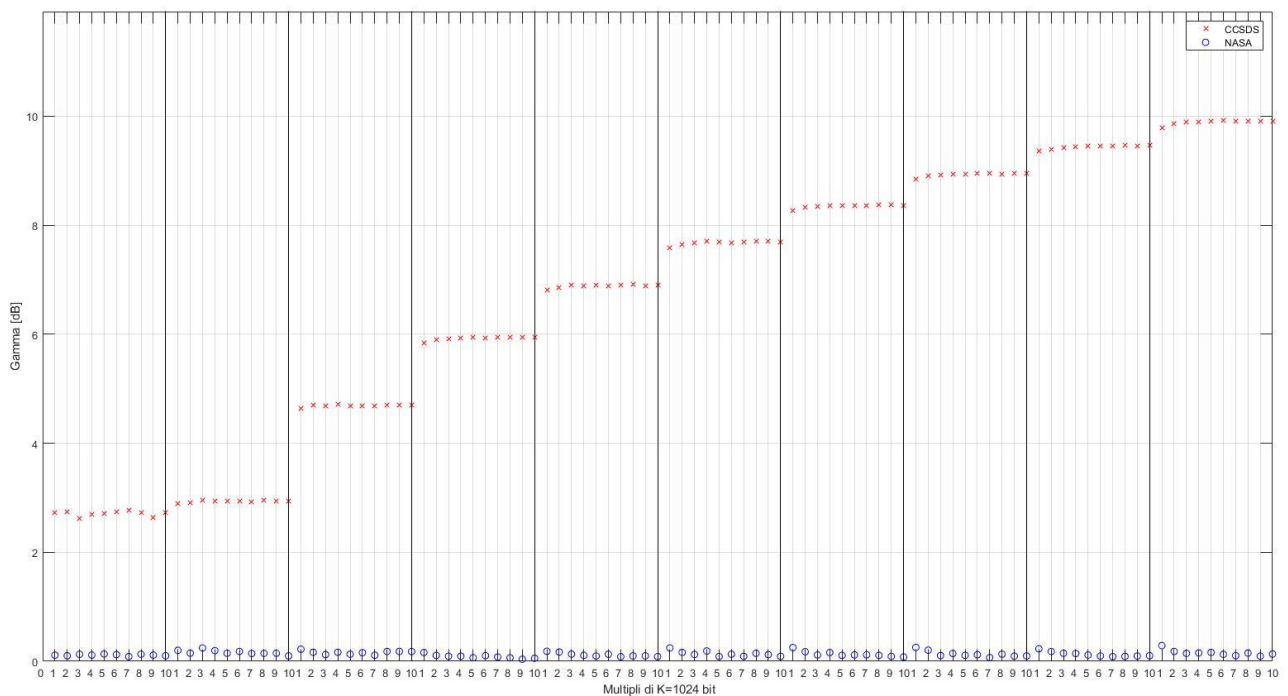


Figura 5.1

Nelle simulazioni si considerano valori di bit rate variabili da $R_b = 1$ Mbit/s a $R_b = 10$ Mbit/s. Ognuna delle bande in Figura si riferisce ad un diverso valore di R_b , crescente da sinistra verso destra. Per ogni banda si considerano lunghezze di frame variabili da 1024 a 10240 bit. Ciò si esprime moltiplicando 1024 per un intero k compreso tra 1 e 10. Infine, risultano cento distinti casi di confronto dove in Figura si riportano i valori di γ ottenuti con i due randomizzatori, i quali sono rappresentati mediante il seguente simbolismo, il marker blue rappresenta il valore NASA 17-celle mentre il marker rosso il CCSDS 8-celle.

Esempi riferiti a diversi scenari operativi sono riportati di seguito.

Parametri simulazione:

- Frame OID con payload tutti-zeri con 20 bit random
- Bit Rate da 1Mbit/s a 10 Mbit/s
- Lunghezza frame multipli $K=1024$ bit
- Modulazione 2-PSK
- Banda misurata $B= 4$ kHz
- Finestra di osservazione $W=100$ ms

Questi sono i parametri comuni degli esempi riportati successivamente. In seguito, viene inserito il reset del seme e la codifica al fine di verificare come possa cambiare il valore di γ .

Esempio 5.1

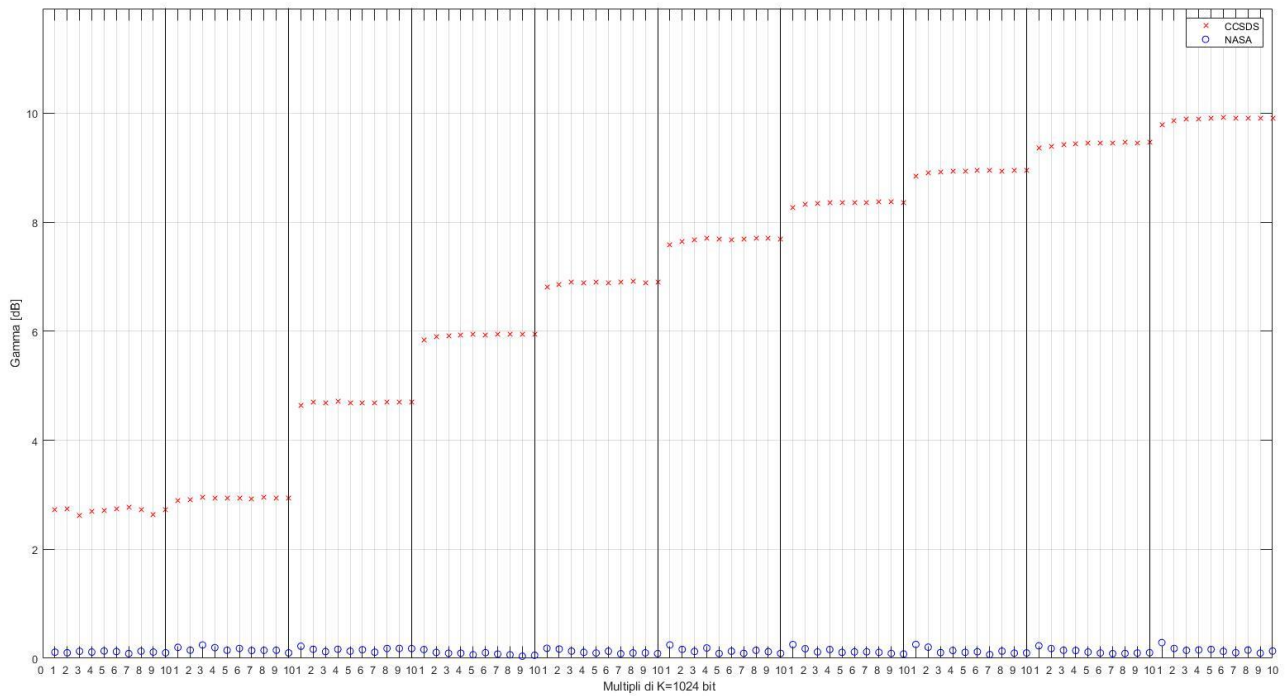


Figura 5.2: Casi di confronto con payload OID

In Figura 5.2 si trova una conferma delle simulazioni riportate nel capitolo precedente, in cui con l'utilizzo di un payload OID a meno di un certo numero di bit, il NASA 17-celle ha sempre un comportamento migliore rispetto al CCSDS 8-celle. Questo è plausibile dall'elevato periodo del NASA 17-celle.

Esempio 5.2

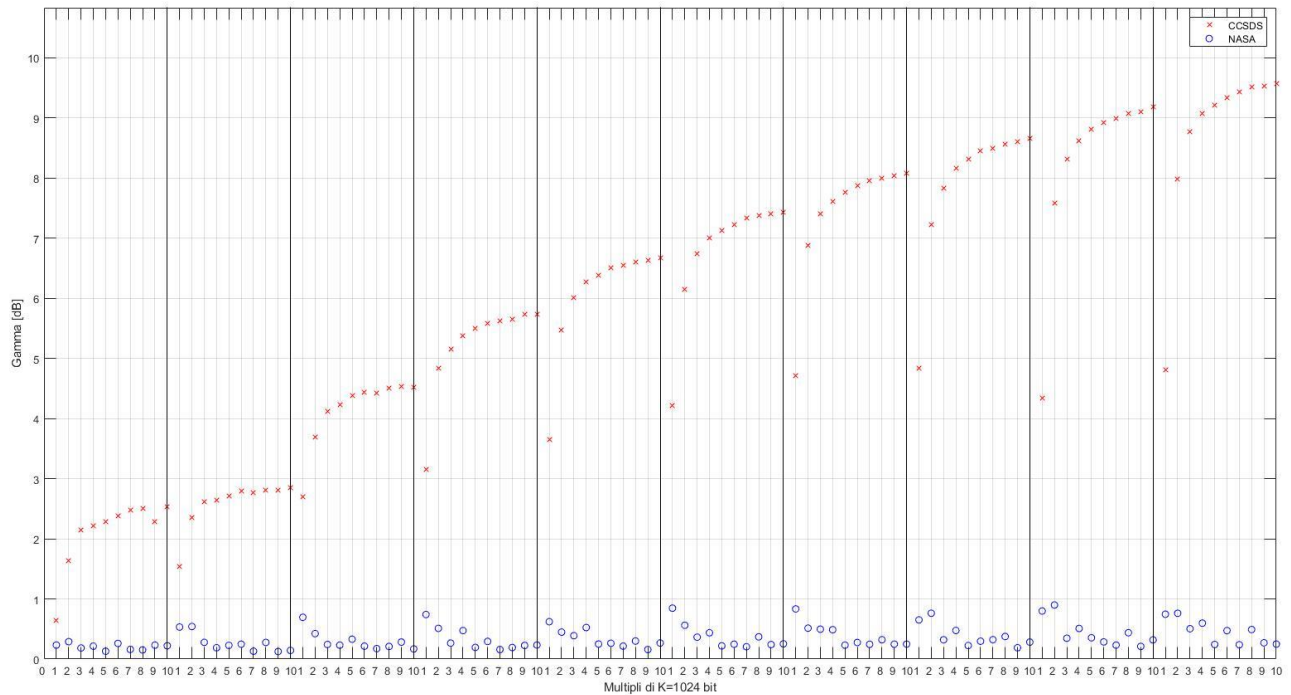


Figura 5.3: Casi di confronto con payload OID con codifica LDPC

In questo esempio rispetto al precedente si è aggiunta la codifica LDPC e si può osservare come il valore di γ sia modificato rispetto all'esempio esposto in precedenza: infatti, considerando il CCSDS 8-celle il valore di γ tende ad aumentare in ogni banda raffigurata mentre il NASA 17-celle non eguaglia questo andamento, ma tende all'opposto.

Esempio 5.3

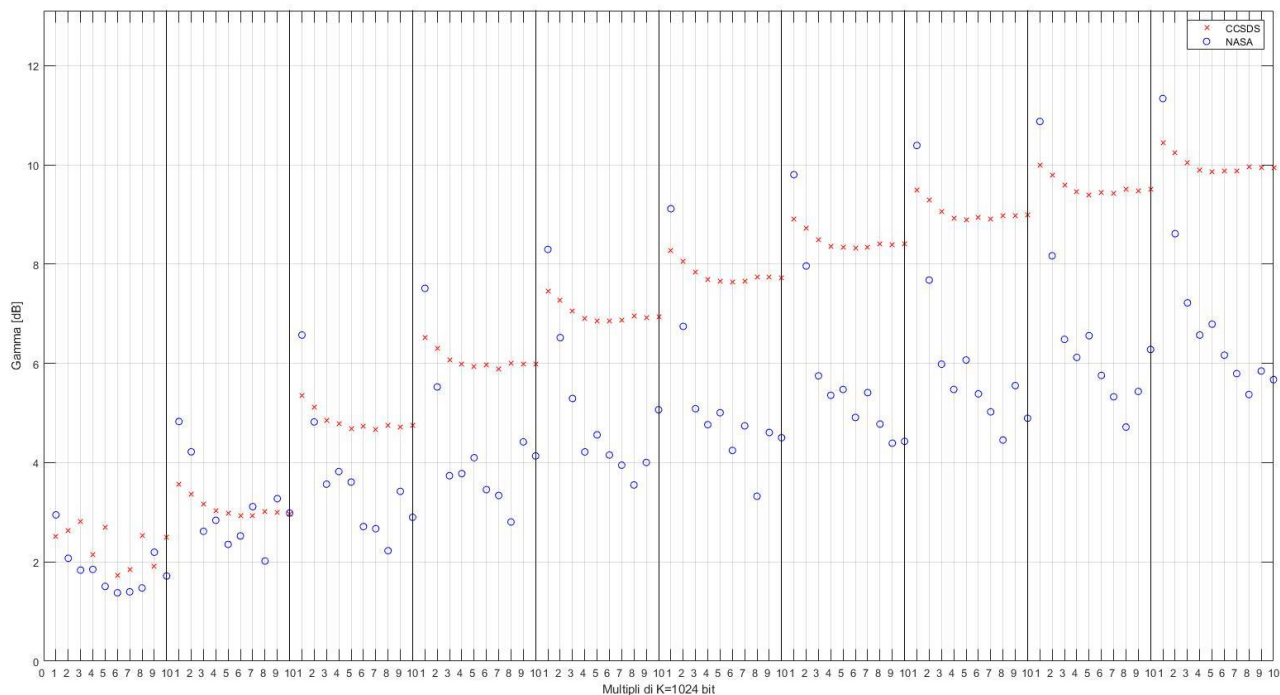


Figura 5.4: Casi di confronto con payload OID con reset del seme

In questa simulazione si aggiunge il reset del seme, il quale comporta che il randomizzatore si resetti ad ogni inizio frame. In Figura 5.4 si può osservare come il valore di γ sia modificato rispetto agli esempi precedenti. Infatti, il valore di γ nel caso del NASA 17-celle è aumentato drasticamente e si ritrovano diversi casi in cui il CCSDS 8-celle ha avuto un comportamento migliore. Questo fatto non si era verificato precedentemente ed avviene perché il periodo del NASA non viene completamente utilizzato, comportando un maggior numero di sequenze troncate.

Esempio 5.4

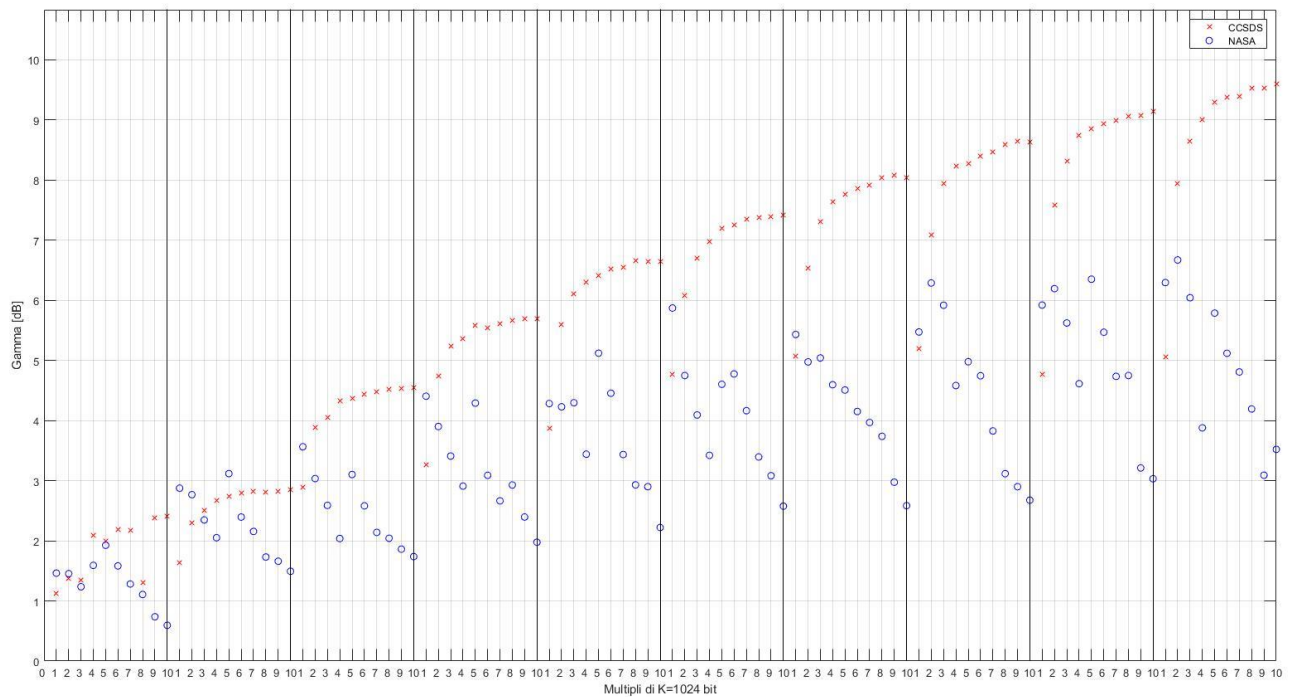


Figura 5.5: Casi di confronto con payload OID, reset del seme e codifica LDPC

In Figura 5.5, si è introdotto la codifica ed il reset del seme. Da questa introduzione otteniamo un andamento dei valori di γ simile a quello delle Figure 5.3 e 5.4. Dove in ogni banda, all'aumentare della lunghezza del frame, il valore di picco massimo ottenuto con il CCSDS 8-celle tende ad aumentare mentre con il NASA 17-celle si ha un comportamento inverso. Allo stesso modo, si ritrovano casi in cui il CCSDS 8-celle ha avuto prestazione migliori. Quest'ultimo aspetto è riconducibile alla introduzione del reset del seme.

5.2. Osservazioni e commenti

Nel paragrafo precedente abbiamo riportato quattro esempi di confronto con l'utilizzo di un payload OID a meno di un numero di 20 bit random. La prima simulazione, rappresentata in Figura 5.2, è usata come base di confronto in quanto si sono utilizzati solamente i parametri basilari, mentre nelle successive si è integrato con l'utilizzo del reset del seme e della codifica LDPC. Non si è tenuto conto dell'ASM in quanto ha un effetto trascurabile per frame di lunghezza elevata.

Nella prima Figura il NASA 17-celle ha avuto sempre un comportamento migliore rispetto al CCSDS 8-celle. Ciò è riconducibile al suo elevato periodo e si ritrova anche una stabilità del valore di γ , dato che i valori ottenuti dai due randomizzatori all'interno di ogni banda tendono a rimanere inalterati.

Nel secondo esempio si è aggiunto la codifica LDPC e si è potuto osservare come il valore di γ sia diverso comparato all'esempio precedente, infatti, considerando il CCSDS 8-celle, in ogni banda il valore di γ non rimane costante, ma invece tende ad aumentare. Allo stesso modo il valore di picco massimo del NASA 17-celle non rimane inalterato, ma tende a diminuire.

Nel terzo esempio si è aggiunto il reset del seme. Comparando il terzo esempio con il primo, si osserva come il valore di γ sia modificato. In questo caso il valore di picco massimo del NASA 17-celle è aumentato drasticamente comportando che in alcuni casi il CCSDS 8-celle ha avuto prestazioni migliori. Questo fatto, non verificatosi precedentemente, è riconducibile alla introduzione del reset del seme che non permette al NASA 17-celle di utilizzare completamente il suo periodo, decretando un maggior numero di sequenze troncate. Perciò si può asserire che l'introduzione del reset del seme comporti che i valori di γ aumentino nel caso di utilizzo del NASA 17-celle.

Nel quarto esempio si sono introdotti entrambi i parametri e si è riscontrato che all'interno di ogni banda, all'aumentare della lunghezza del frame, il valore di picco massimo tenda ad aumentare nel caso di utilizzo del CCSDS 8-celle mentre il NASA 17-celle ha un comportamento opposto. Questo andamento lo si è apprezzato anche nella Figura 5.3, quindi è riconducibile alla codifica LDPC. Mentre si riscontrano casi in cui il CCSDS ha prestazioni migliori del NASA, questo fatto invece è dovuto all'utilizzo del reset del seme.

In conclusione si può affermare ciò a partire dalla precedente esposizione: nel caso di utilizzo di un payload OID è sconsigliato l'utilizzo del reset del seme, in quanto migliora le prestazioni del CCSDS 8-celle, ma peggiora il comportamento del NASA 17-celle, mentre l'utilizzo della codifica migliora le prestazioni del NASA 17-celle, dato che il valore di γ tende a diminuire.

Il prossimo capitolo si focalizzerà sulla seconda parte di analisi, dove viene utilizzato il payload random, tenendo conto delle osservazioni fatte in questo paragrafo.

5.3 Simulazioni con payload random

In questo paragrafo si riportano le simulazioni con l'utilizzo di un payload random, affinché si simuli un possibile caso reale ed in questa analisi si terrà conto delle considerazioni fatte nel paragrafo 5.2, e si utilizza la stessa metodologia di studio. Per cui, il primo esempio proposto si utilizza come base di analisi. Poi le simulazioni successive vengono confrontate con il primo esempio al fine di identificare quali parametri possano influenzare il valore di γ .

Al fine di ottenere un valore corretto, sono state eseguite venticinque simulazioni sempre utilizzando lo stesso payload e da esse si è calcolato il valore medio che viene rappresentato e confrontato.

La Figura 5.6 riporta un esempio di come vengono rappresentate le successive simulazioni. Per un dato scenario, la raffigurazione è divisa in dieci casi di confronto dove ad ognuno è associato un diverso valore di R_b crescente, mentre la lunghezza del frame sarà la stessa per tutte le casistiche. Infine, i valori di γ ottenuti con i due randomizzatori, sono rappresentati mediante il seguente simbolismo, il marker blue rappresenta il valore NASA mentre il marker rosso il CCSDS. Esempi riferiti a diversi scenari operativi sono riportati di seguito.

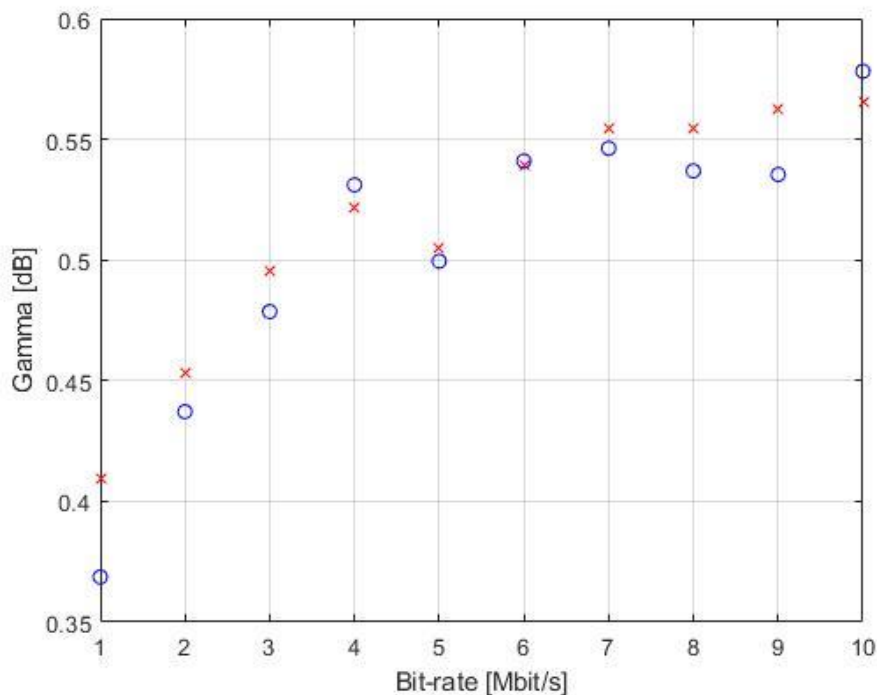


Figura 5.6: Rappresentazione confronto tra randomizzatori

I parametri di base usati nelle simulazioni sono:

- Frame con payload random
- Bit Rate da 1 Mbit/s a 10 Mbit/s
- Lunghezza frame $L_T=10240$ bit
- Modulazione 2-PSK
- Banda misurata $B=4$ kHz
- Finestra di osservazione $W=100$ ms

Come nel capitolo precedente, questi sono i parametri comuni degli esempi riportati successivamente. In seguito, viene inserito il reset del seme e la codifica al fine di verificare come possa cambiare il valore di γ . Dalle conclusioni del capitolo precedente non si è tenuto conto dell'ASM.

Esempio 5.5

La prima simulazione sarà la base di confronto con le altre, dato che si è utilizzato soltanto i parametri base.

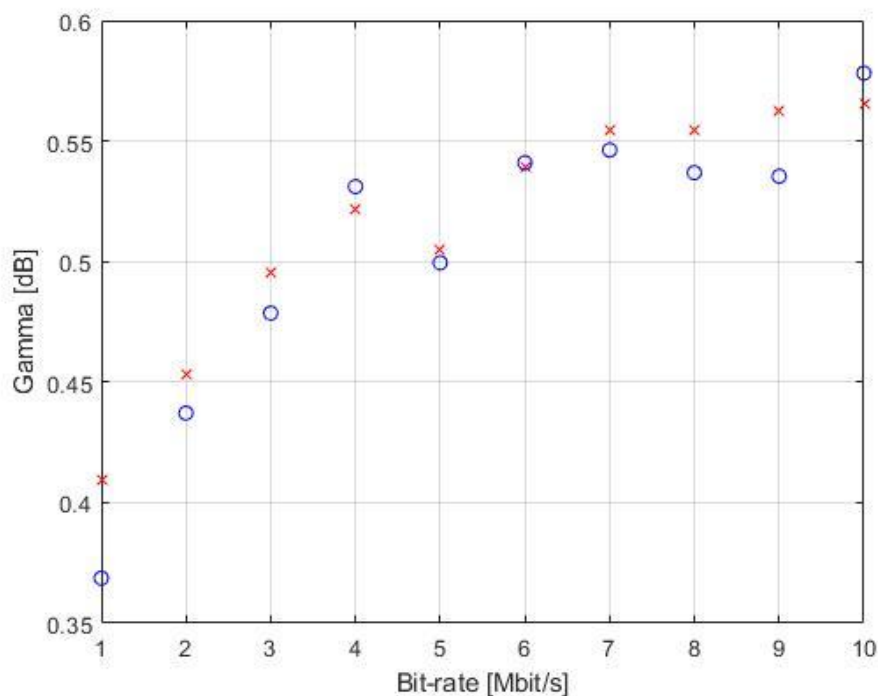


Figura 5.7: Casi di confronto con payload random

A differenza della trattazione precedente, in questo esempio si sono riscontrati diversi casi in cui il CCSDS 8-celle ha avuto prestazione migliori del NASA 17-celle, ma le differenze dei valori di γ non sono elevate e per tanto possono considerarsi trascurabili.

Esempio 5.6

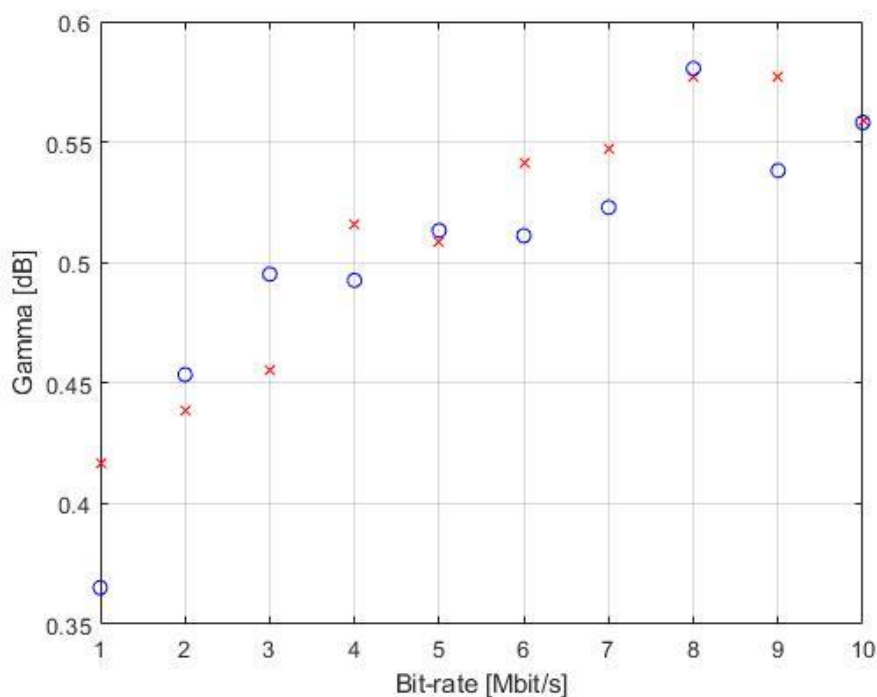


Figura 5.8: Casi di confronto con payload random, reset del seme

Come nella trattazione precedente l'introduzione del reset del seme comporta che i valori di γ aumentino nel caso di utilizzo del NASA 17-celle, mentre diminuiscano nel caso di utilizzo del CCSDS 8-celle. Questo è dovuto perché il periodo del NASA non viene completamente utilizzato, comportando un maggior numero di sequenze troncate. Inoltre, per lo stesso motivo dell'Esempio 5.5, essendo le differenze dei valori di γ infinitesime, si possono considerare trascurabili.

Esempio 5.7

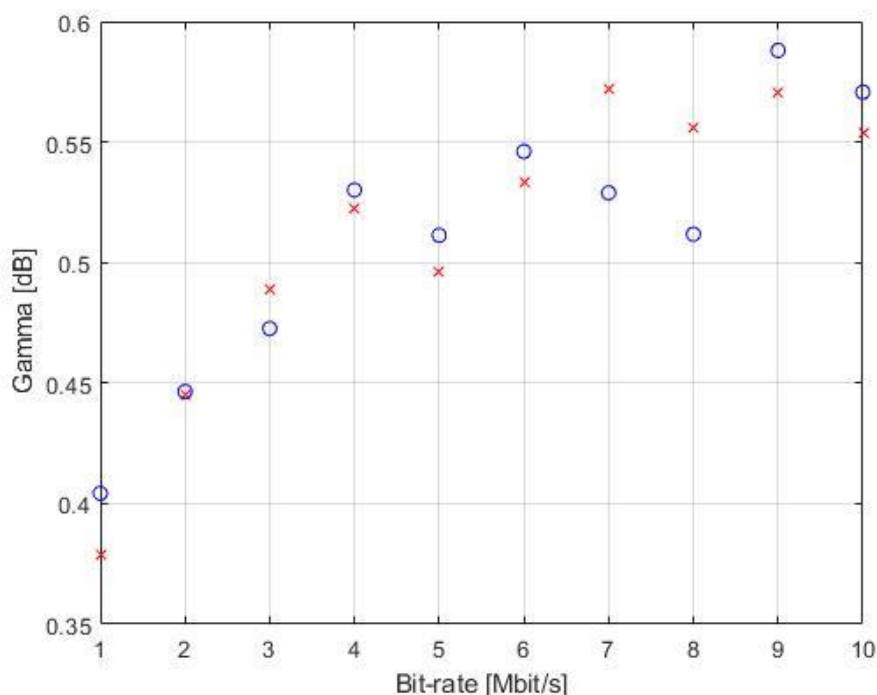


Figura 5.9: Casi di confronto con payload random, codifica LDPC

La Figura 5.9 rappresenta il risultato ottenuto. Si potrebbe pensare che l'introduzione della codifica LDPC abbia comportato un peggioramento del NASA 17-celle, ma dato che le differenze tra i valori di γ sono insignificanti si possono considerare trascurabili.

Perciò a differenza della trattazione precedente, in questi Esempi proposti si ritrovano diversi casi in cui il CCSDS 8-celle ha avuto prestazioni migliori del NASA 17-celle ma sono casi dovuti a differenze infinitesime, tanto da considerarsi trascurabili e di conseguenza accettabili. Per questa ragione, dai risultati ottenuti si può affermare che i due randomizzatori hanno prestazioni comparabili.

Tuttavia risultano esserci pochi dati per confermare questa dichiarazione. Per tale motivo è necessario procedere ad uno studio più accurato verificando se con un numero maggiore di casi il numero dei risultati negati possa aumentare considerando sia diverse lunghezze di frame e sia diverse bit-rate, in assenza e presenza della codifica LDPC (2048,1024).

5.4 Analisi del comportamento medio

Come anticipato nel paragrafo precedente, si riporta una analisi del comportamento medio considerando un numero maggiore di casi di confronto. Ciò viene effettuato con riferimento ad alcuni scenari operativi (ripresi dalla trattazione precedente). Per ogni coppia Rb-L sono state effettuate 50 simulazioni, per poi calcolare il valore di γ medio. In questo modo si può verificare l'andamento dei valori di γ e quali valori assume mediamente, sia nel caso di utilizzo della codifica LDPC che nel caso di sua assenza.

Parametri simulazione

- Frame con payload random
- Bit Rate da 1Mbit/s a 10 Mbit/s
- Lunghezza frame multipli di $K=1024$ bit
- Modulazione 2-PSK
- Banda misurata $B= 4$ kHz

1) Simulazione con codifica

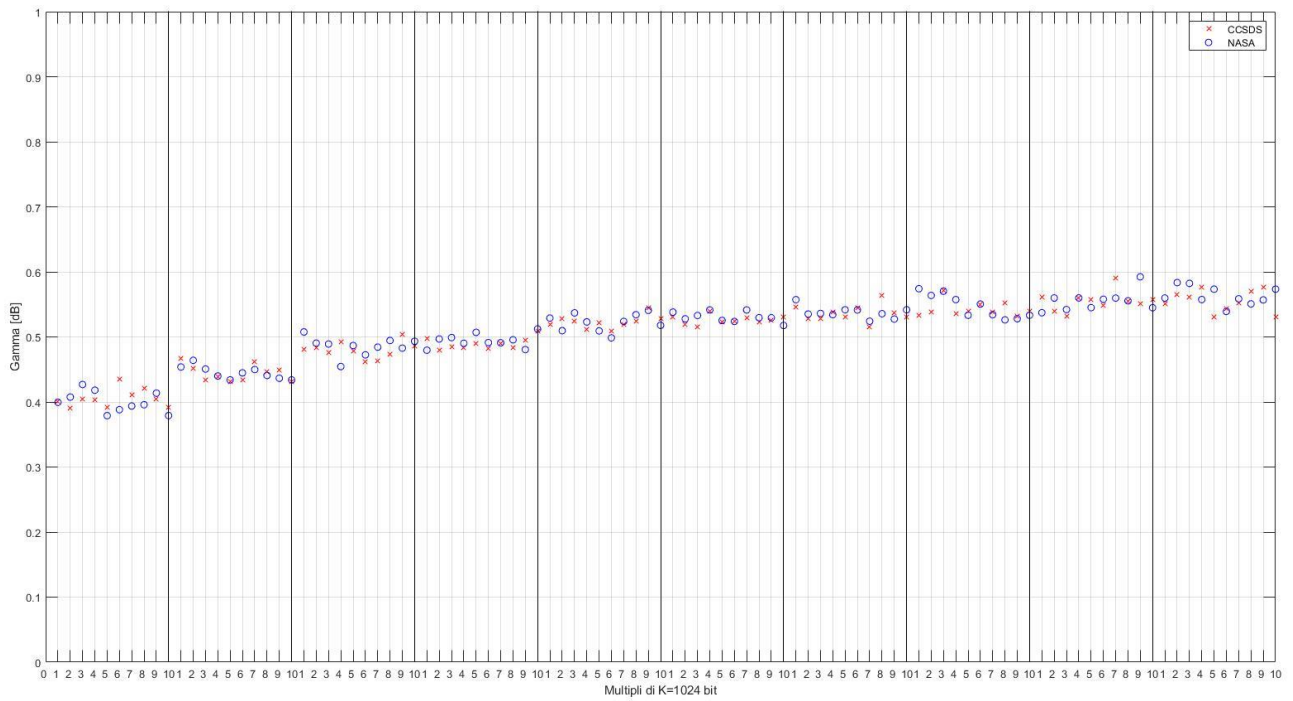


Figura 5.10: Casi medi con payload random, codifica LDPC

2) Simulazione senza codifica

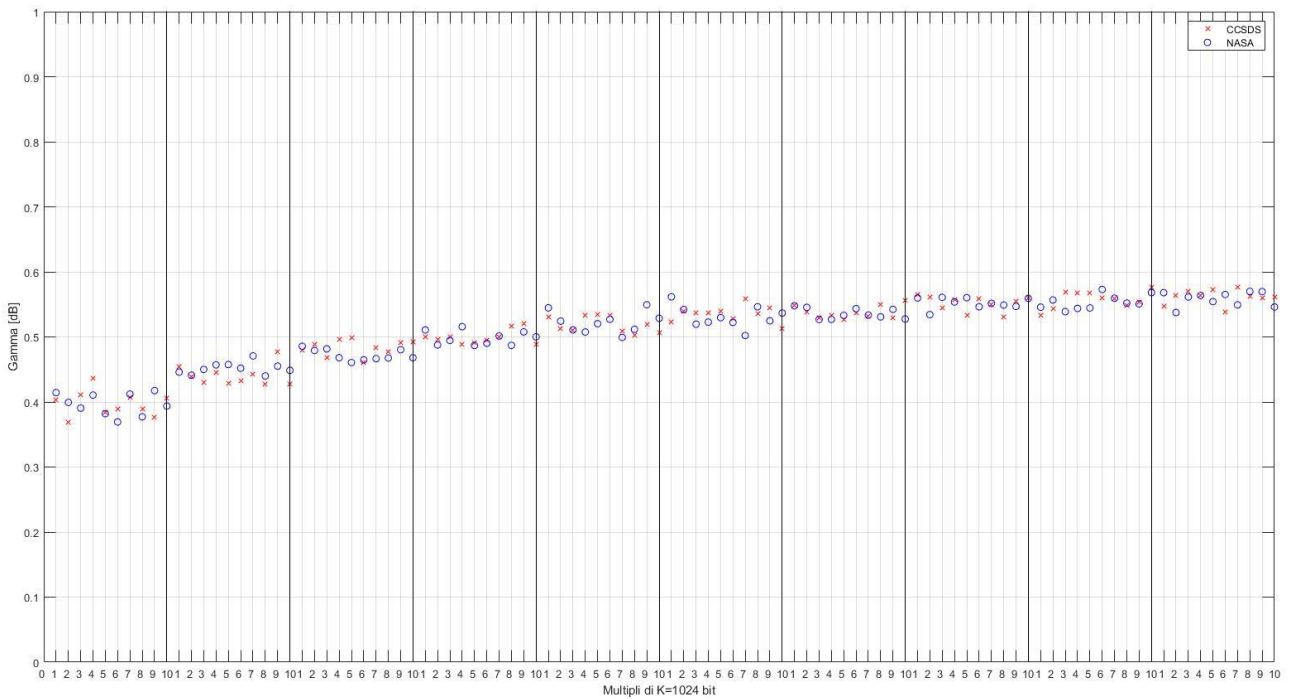


Figura 5.11: Casi medi con payload random, senza codifica LDPC

Nella prima Figura sono presenti i casi medi con payload random dove si è utilizzato la codifica LDPC e i casi in cui il NASA 17-celle ha avuto prestazione peggiori del CCSDS 8-celle sono 51. Tuttavia, è necessario precisare ciò: i valori di differenza dei picchi massimi sono minori di 0.1 dB e pertanto si possono considerare trascurabili.

Nella seconda Figura si trovano i casi medi con payload random in assenza di codifica LDPC. In questo caso il NASA 17-celle ha avuto prestazione peggiori rispetto al CCSDS in 39 casi, si potrebbe pensare che sia un miglioramento rispetto alla simulazione precedente, ma anche in questo caso le differenze dei valori di γ sono esigue tanto da considerarle anch'esse trascurabili. Infine, è possibile affermare che in entrambi i casi i valori di γ ottenuti siano simili e di conseguenza la codifica non altera in alcun modo il valore di picco massimo, confermando in questo modo quanto detto nel paragrafo 5.2.

Allo stesso modo conferma quanto anticipato nel paragrafo 5.3, il fatto che i due randomizzatori potrebbero avere prestazioni comparabili nel caso di utilizzo di un payload random. Per le ragioni espresse nel paragrafo precedente, nel paragrafo successivo segue una analisi più accurata, dove si sono calcolati i valori di varianza e deviazione standard, trovando come il valore di γ -esimo possa discostarsi dal suo valore medio.

5.5. Osservazioni e commenti

In questo paragrafo si riporta l'analisi delle Figure 5.10-5.11 dove nella parte precedente si è dichiarato che le differenze tra i valori di γ dei due randomizzatori sono relativamente basse, tanto che si possono considerare trascurabili ed accettabili. Sebbene sia un ottimo risultato si vuole approfondire questa analisi. Per cui si calcola ad ogni singolo caso di confronto la varianza e deviazione standard, i quali forniscono importanti informazioni. La varianza indica come i valori di γ -esimo si discostino quadraticamente rispetto alla media aritmetica, mentre la deviazione standard ci fornisce l'informazione sulla dispersione dei dati rispetto al valore medio.

Di conseguenza, dai dati presenti nelle Figure 5.10 e 5.11, si sono potuti calcolare i valori di varianza e deviazione standard dei due randomizzatori, sia con codifica e assenza della stessa. Questo permette di fare un confronto incrociato dei dati ottenuti.

Infine, i risultati ottenuti vengono raffigurati per mezzo di una rappresentazione tabellare, dove le colonne rappresentano l'aumento della bit-rate. Mentre le righe rappresentano l'aumento della lunghezza del frame. Per una migliore compressione in Tabella 5.1 si riporta un esempio.

		<i>Bit rate</i>									
		1 Mbit/s	2 Mbit/s	3 Mbit/s	4 Mbit/s	5 Mbit/s	6 Mbit/s	7 Mbit/s	8 Mbit/s	9 Mbit/s	10 Mbit/s
<i>Multipli di k</i>	K=1024 bit	0.0072	0.0138	0.0108	0.0114	0.0086	0.0155	0.0084	0.0076	0.0064	0.0061
	K=2048 bit	0.0148	0.0065	0.0123	0.0082	0.0098	0.0068	0.0091	0.0053	0.0089	0.0049
	K=3072 bit	0.0153	0.0107	0.0084	0.0053	0.0070	0.0063	0.0060	0.0082	0.0060	0.0041
	K=4096 bit	0.0172	0.0156	0.0093	0.0110	0.0094	0.0087	0.0048	0.0081	0.0053	0.0051
	K=5120 bit	0.0095	0.0160	0.0108	0.0054	0.0097	0.0076	0.0082	0.0077	0.0033	0.0064
	K=6144 bit	0.0104	0.0124	0.0059	0.0089	0.0089	0.0073	0.0078	0.0040	0.0092	0.0122
	K=7168 bit	0.0168	0.0101	0.0096	0.0092	0.0062	0.0054	0.0093	0.0061	0.0075	0.0081
	K=8192 bit	0.0145	0.0080	0.0097	0.0077	0.0063	0.0080	0.0074	0.0044	0.0066	0.0086
	K=9216 bit	0.0107	0.0168	0.0086	0.0073	0.0117	0.0072	0.0114	0.0055	0.0065	0.0070
	K=10240 bit	0.0105	0.0113	0.0079	0.0076	0.0080	0.0072	0.0038	0.0060	0.0073	0.0057

Tabella 5.1

1) Varianza

		<i>Bit rate</i>									
		1 Mbit/s	2 Mbit/s	3 Mbit/s	4 Mbit/s	5 Mbit/s	6 Mbit/s	7 Mbit/s	8 Mbit/s	9 Mbit/s	10 Mbit/s
<i>Multipli di k</i>	K=1024 bit	0.0121	0.0077	0.0104	0.0065	0.0070	0.0092	0.0083	0.0121	0.0068	0.0063
	K=2048 bit	0.0115	0.0094	0.0080	0.0066	0.0066	0.0095	0.0046	0.0065	0.0094	0.0075
	K=3072 bit	0.0108	0.0116	0.0101	0.0076	0.0110	0.0057	0.0093	0.0086	0.0068	0.0076
	K=4096 bit	0.0143	0.0070	0.0050	0.0082	0.0058	0.0064	0.0079	0.0078	0.0081	0.0040
	K=5120 bit	0.0098	0.0081	0.0053	0.0104	0.0058	0.0068	0.0086	0.0053	0.0067	0.0062
	K=6144 bit	0.0114	0.0095	0.0062	0.0073	0.0062	0.0096	0.0088	0.0065	0.0095	0.0058
	K=7168 bit	0.0152	0.0090	0.0073	0.0097	0.0148	0.0104	0.0080	0.0072	0.0092	0.0090
	K=8192 bit	0.0099	0.0073	0.0166	0.0088	0.0135	0.0066	0.0064	0.0045	0.0082	0.0061
	K=9216 bit	0.0092	0.0102	0.0078	0.0096	0.0111	0.0067	0.0074	0.0079	0.0118	0.0088
	K=10240 bit	0.0098	0.0081	0.0057	0.0077	0.0126	0.0071	0.0086	0.0053	0.0067	0.0062

Tabella 5.2: Varianza randomizzatore NASA 17-celle con codifica LDPC

		<i>Bit rate</i>									
		1 Mbit/s	2 Mbit/s	3 Mbit/s	4 Mbit/s	5 Mbit/s	6 Mbit/s	7 Mbit/s	8 Mbit/s	9 Mbit/s	10 Mbit/s
<i>Multipli di k</i>	K=1024 bit	0.0072	0.0138	0.0108	0.0114	0.0086	0.0155	0.0084	0.0076	0.0064	0.0061
	K=2048 bit	0.0148	0.0065	0.0123	0.0082	0.0098	0.0068	0.0091	0.0053	0.0089	0.0049
	K=3072 bit	0.0153	0.0107	0.0084	0.0053	0.0070	0.0063	0.0060	0.0082	0.0060	0.0041
	K=4096 bit	0.0172	0.0156	0.0093	0.0110	0.0094	0.0087	0.0048	0.0081	0.0053	0.0051
	K=5120 bit	0.0095	0.0160	0.0108	0.0054	0.0097	0.0076	0.0082	0.0077	0.0033	0.0064
	K=6144 bit	0.0104	0.0124	0.0059	0.0089	0.0089	0.0073	0.0078	0.0040	0.0092	0.0122
	K=7168 bit	0.0168	0.0101	0.0096	0.0092	0.0062	0.0054	0.0093	0.0061	0.0075	0.0081
	K=8192 bit	0.0145	0.0080	0.0097	0.0077	0.0063	0.0080	0.0074	0.0044	0.0066	0.0086
	K=9216 bit	0.0107	0.0168	0.0086	0.0073	0.0117	0.0072	0.0114	0.0055	0.0065	0.0070
	K=10240 bit	0.0105	0.0113	0.0079	0.0076	0.0080	0.0072	0.0038	0.0060	0.0073	0.0057

Tabella 5.3: Varianza randomizzatore NASA 17-celle senza codifica LDPC

		<i>Bit rate</i>									
		1 Mbit/s	2 Mbit/s	3 Mbit/s	4 Mbit/s	5 Mbit/s	6 Mbit/s	7 Mbit/s	8 Mbit/s	9 Mbit/s	10 Mbit/s
Multipli di k	K=1024 bit	0.0150	0.0131	0.0066	0.0070	0.0070	0.0050	0.0066	0.0080	0.0055	0.0071
	K=2048 bit	0.0132	0.0091	0.0103	0.0063	0.0134	0.0050	0.0056	0.0077	0.0041	0.0054
	K=3072 bit	0.0128	0.0106	0.0091	0.0055	0.0069	0.0072	0.0082	0.0066	0.0064	0.0057
	K=4096 bit	0.0186	0.0062	0.0091	0.0060	0.0095	0.0047	0.0069	0.0046	0.0045	0.0163
	K=5120 bit	0.0130	0.0068	0.0118	0.0086	0.0069	0.0090	0.0101	0.0059	0.0099	0.0060
	K=6144 bit	0.0223	0.0095	0.0076	0.0106	0.0080	0.0059	0.0061	0.0078	0.0075	0.0063
	K=7168 bit	0.0131	0.0084	0.0058	0.0076	0.0078	0.0095	0.0051	0.0034	0.0088	0.0050
	K=8192 bit	0.0081	0.0145	0.0063	0.0068	0.0102	0.0068	0.0079	0.0122	0.0067	0.0049
	K=9216 bit	0.0134	0.0086	0.0094	0.0101	0.0113	0.0079	0.0112	0.0044	0.0060	0.0058
	K=10240 bit	0.0130	0.0068	0.0039	0.0087	0.0078	0.0062	0.0101	0.0059	0.0099	0.0060

Tabella 5.4: Varianza randomizzatore CCSDS 8-celle con codifica LDPC

		<i>Bit rate</i>									
		1 Mbit/s	2 Mbit/s	3 Mbit/s	4 Mbit/s	5 Mbit/s	6 Mbit/s	7 Mbit/s	8 Mbit/s	9 Mbit/s	10 Mbit/s
Multipli di k	K=1024 bit	0.0111	0.0090	0.0071	0.0098	0.0075	0.0073	0.0084	0.0094	0.0056	0.0064
	K=2048 bit	0.0146	0.0065	0.0070	0.0087	0.0071	0.0100	0.0059	0.0065	0.0061	0.0079
	K=3072 bit	0.0134	0.0084	0.0115	0.0095	0.0095	0.0057	0.0061	0.0072	0.0082	0.0072
	K=4096 bit	0.0153	0.0084	0.0112	0.0084	0.0108	0.0089	0.0079	0.0118	0.0088	0.0057
	K=5120 bit	0.0140	0.0082	0.0090	0.0099	0.0082	0.0066	0.0068	0.0059	0.0071	0.0056
	K=6144 bit	0.0103	0.0089	0.0082	0.0068	0.0154	0.0050	0.0075	0.0093	0.0095	0.0040
	K=7168 bit	0.0204	0.0092	0.0113	0.0067	0.0069	0.0083	0.0079	0.0053	0.0079	0.0102
	K=8192 bit	0.0112	0.0097	0.0054	0.0084	0.0061	0.0090	0.0132	0.0052	0.0048	0.0044
	K=9216 bit	0.0118	0.0113	0.0146	0.0097	0.0134	0.0091	0.0069	0.0071	0.0072	0.0089
	K=10240 bit	0.0125	0.0063	0.0101	0.0070	0.0073	0.0076	0.0077	0.0075	0.0078	0.0056

Tabella 5.5: Varianza randomizzatore CCSDS 8-celle senza codifica LDPC

2) Deviazione standard

		<i>Bit rate</i>									
		1 Mbit/s	2 Mbit/s	3 Mbit/s	4 Mbit/s	5 Mbit/s	6 Mbit/s	7 Mbit/s	8 Mbit/s	9 Mbit/s	10 Mbit/s
<i>Multipli di k</i>	K=1024 bit	0.0960	0.1008	0.0886	0.0982	0.1055	0.0820	0.0861	0.0889	0.1087	0.0939
	K=2048 bit	0.0991	0.0901	0.0731	0.1022	0.0760	0.0824	0.0926	0.0726	0.0817	0.0790
	K=3072 bit	0.0991	0.0901	0.0757	0.0876	0.1121	0.0844	0.0926	0.0726	0.0817	0.0790
	K=4096 bit	0.0993	0.0853	0.1290	0.0936	0.1162	0.0813	0.0801	0.0667	0.0906	0.0781
	K=5120 bit	0.1038	0.1077	0.1003	0.0873	0.1051	0.0753	0.0966	0.0927	0.0826	0.0871
	K=6144 bit	0.1067	0.0976	0.0789	0.0853	0.0785	0.0979	0.0937	0.0809	0.0973	0.0759
	K=7168 bit	0.1074	0.0968	0.0893	0.0813	0.0813	0.0975	0.0682	0.0806	0.0971	0.0864
	K=8192 bit	0.1099	0.0876	0.1020	0.0808	0.0834	0.0957	0.0912	0.1099	0.0826	0.0796
	K=9216 bit	0.1195	0.0836	0.0709	0.0904	0.0764	0.0802	0.0886	0.0883	0.0901	0.0631
	K=10240 bit	0.1232	0.0950	0.0854	0.0986	0.1216	0.1022	0.0895	0.0846	0.0958	0.0949

Tabella 5.6: Deviazione standard randomizzatore NASA 17-celle con codifica LDPC

		<i>Bit rate</i>									
		1 Mbit/s	2 Mbit/s	3 Mbit/s	4 Mbit/s	5 Mbit/s	6 Mbit/s	7 Mbit/s	8 Mbit/s	9 Mbit/s	10 Mbit/s
<i>Multipli di k</i>	K=1024 bit	0.0850	0.1175	0.1037	0.1068	0.0925	0.1244	0.0915	0.0870	0.0801	0.0783
	K=2048 bit	0.1219	0.0804	0.1107	0.0903	0.0988	0.0822	0.0952	0.0726	0.0945	0.0697
	K=3072 bit	0.1238	0.1035	0.0917	0.0731	0.0838	0.0791	0.0776	0.0903	0.0775	0.0644
	K=4096 bit	0.1311	0.1249	0.0963	0.1049	0.0971	0.0935	0.0694	0.0900	0.0728	0.0711
	K=5120 bit	0.0974	0.1265	0.1038	0.0738	0.0983	0.0871	0.0906	0.0877	0.0573	0.0799
	K=6144 bit	0.1022	0.1114	0.0770	0.0945	0.0942	0.0855	0.0881	0.0634	0.0961	0.1107
	K=7168 bit	0.1295	0.1003	0.0980	0.0960	0.0785	0.0734	0.0964	0.0781	0.0864	0.0900
	K=8192 bit	0.1204	0.0892	0.0986	0.0880	0.0795	0.0893	0.0859	0.0666	0.0815	0.0926
	K=9216 bit	0.1032	0.1297	0.0925	0.0856	0.1080	0.0850	0.1070	0.0742	0.0806	0.0839
	K=10240 bit	0.1024	0.1061	0.0892	0.0871	0.0893	0.0847	0.0615	0.0774	0.0853	0.0756

Tabella 5.7: Deviazione standard randomizzatore NASA 17-celle senza codifica LDPC

		<i>Bit rate</i>									
		1 Mbit/s	2 Mbit/s	3 Mbit/s	4 Mbit/s	5 Mbit/s	6 Mbit/s	7 Mbit/s	8 Mbit/s	9 Mbit/s	10 Mbit/s
Multipli di k	K=1024 bit	0.1224	0.1145	0.0810	0.0838	0.0836	0.0704	0.0811	0.0893	0.0739	0.0843
	K=2048 bit	0.1151	0.0952	0.1013	0.0792	0.1156	0.0708	0.0751	0.0878	0.0641	0.0733
	K=3072 bit	0.1130	0.1031	0.0956	0.0740	0.0832	0.0848	0.0905	0.0812	0.0801	0.0758
	K=4096 bit	0.1365	0.0785	0.0953	0.0775	0.0975	0.0682	0.0832	0.0675	0.0673	0.1275
	K=5120 bit	0.1141	0.0823	0.1087	0.0927	0.0833	0.0949	0.1003	0.0769	0.0997	0.0774
	K=6144 bit	0.1493	0.0975	0.0874	0.1031	0.0895	0.0770	0.0782	0.0881	0.0869	0.0792
	K=7168 bit	0.1147	0.0915	0.0761	0.0872	0.0884	0.0974	0.0716	0.0583	0.0937	0.0710
	K=8192 bit	0.0903	0.1202	0.0793	0.0827	0.1008	0.0824	0.0889	0.1103	0.0821	0.0697
	K=9216 bit	0.1158	0.0927	0.0972	0.1005	0.1062	0.0888	0.1059	0.0661	0.0774	0.0762
	K=10240 bit	0.1141	0.0823	0.0624	0.0933	0.0882	0.0785	0.1003	0.0769	0.0997	0.0774

Tabella 5.8: Deviazione standard randomizzatore CCSDS 8-celle con codifica LDPC

		<i>Bit rate</i>									
		1 Mbit/s	2 Mbit/s	3 Mbit/s	4 Mbit/s	5 Mbit/s	6 Mbit/s	7 Mbit/s	8 Mbit/s	9 Mbit/s	10 Mbit/s
Multipli di k	K=1024 bit	0.1052	0.0949	0.0840	0.0990	0.0867	0.0852	0.0919	0.0968	0.0751	0.0803
	K=2048 bit	0.1208	0.0807	0.0835	0.0931	0.0842	0.1002	0.0766	0.0805	0.0781	0.0888
	K=3072 bit	0.1156	0.0915	0.1071	0.0976	0.0975	0.0757	0.0784	0.0849	0.0906	0.0846
	K=4096 bit	0.1236	0.0917	0.1057	0.0916	0.1037	0.0942	0.0889	0.1087	0.0939	0.0755
	K=5120 bit	0.1183	0.0905	0.0946	0.0994	0.0903	0.0812	0.0827	0.0768	0.0845	0.0748
	K=6144 bit	0.1017	0.0941	0.0904	0.0825	0.1241	0.0706	0.0864	0.0966	0.0975	0.0630
	K=7168 bit	0.1429	0.0958	0.1064	0.0820	0.0828	0.0911	0.0889	0.0729	0.0886	0.1010
	K=8192 bit	0.1058	0.0984	0.0737	0.0916	0.0778	0.0949	0.1149	0.0724	0.0695	0.0661
	K=9216 bit	0.1086	0.1064	0.1209	0.0986	0.1155	0.0952	0.0828	0.0840	0.0846	0.0945
	K=10240 bit	0.1116	0.0796	0.1005	0.0838	0.0854	0.0872	0.0879	0.0863	0.0882	0.0749

Tabella 5.9: Deviazione standard randomizzatore CCSDS 8-celle senza codifica LDPC

Sulla base dei dati riportati nelle pagine precedenti si riporta nelle righe successive una analisi delle Tabelle, dove in questa fase si procedete con un confronto a due e due, ricercando se la codifica migliora o peggiora la prestazione dei randomizzatori.

Prima di tutto si confrontano le Tabelle 5.2 e 5.3, dove si trovano delle differenze di valore: la seconda riporta un più alto numero di celle con valori maggiori rispetto alla prima. Tuttavia, esse non sono distribuite seguendo uno schema riconducibile ad un aumento lineare oppure esponenziale. Oltretutto le differenze presenti sono minime.

In secondo luogo. si passa alle Tabelle 5.4 e 5.5. Anche questo confronto conferma le considerazioni fatte nel caso precedente, ma con una piccola differenza: si ritrovano valori maggiori rispetto alle Tabelle precedenti, come ad esempio nella prima colonna riga sesta per la Tabelle 5.4 e prima colonna settima riga per la Tabelle 5.5. Tuttavia, come affermato in precedenza le differenze presenti non sono elevate.

Infine, nelle Tabelle analizzate, i valori alti sono maggiormente presenti nella prima colonna, tuttavia confrontando con i valori di γ delle Figure 5.10 e 5.11, i dati tabellari indicano che il valore di γ -esimo non ha un discostamento quadratico elevato.

Si passa alla seconda parte della analisi. dove si tiene presente delle informazioni ottenute dalla analisi precedente. Sul fatto che la prima colonna contiene i valori maggiori. Anche in questo caso nelle Tabelle 5.6., 5.7., 5.8 e 5.9 questo fatto si ripete. Nonostante ciò, confrontando i valori presenti nelle celle con il valore medio raffigurato nelle Figure 5.10 e 5.11. si può affermare che il valore γ -esimo abbia una dispersione esigua, dato che i valori tabellari sono infinitamente più piccoli comparati al valore medio aritmetico.

Infine si può affermare ciò: il valore di γ si discosta esiguamente rispetto al valore medio aritmetico. Questa asserzione è molto importante da un punto di vista probabilistico: infatti al fine di studio delle Figure 5.10 e 5.11 i dati di γ riportati hanno una dispersione esigua e perciò nella maggioranza dei casi si otterranno quei valori rappresentati.

Ciò conferma che nel caso di trasmissione con un payload random le prestazioni tra i due randomizzatori risultino comparabili.

6. Conclusioni

In questo elaborato di Tesi si è confrontato attraverso alcune simulazioni il comportamento dei randomizzatori CCSDS 8-celle e NASA 17-celle variando i diversi parametri ed opzioni quali ASM, reset del seme e codifica LDPC (2048.1024) nell'utilizzo di bit-rate basse ed elevate.

L'analisi numerica sviluppata ha consentito di verificare che ambedue i randomizzatori hanno prestazioni adeguate e perfino comparabili nel caso di payload random. I vantaggi del randomizzatore NASA emergono invece nel caso di payload costituito da zeri (a meno di un numero limitato di bit che comunque cambiano in accordo con il protocollo di trasmissione). In corrispondenza infatti, i valori dei picchi risultanti dal randomizzatore NASA sono quasi sempre significativamente minori di quelli risultanti dal randomizzatore CCSDS.

Si è verificato che nel caso di utilizzo del payload random o payload OID l'introduzione dell'ASM e l'applicazione della codifica non modificano in modo significativo queste conclusioni. Viceversa, nel caso di utilizzo di un frame OID il problema dei picchi può essere di fatto eliminato rimuovendo uno dei vincoli dell'attuale implementazione vale a dire il reset del seme del randomizzatore alla fine di ogni frame. In questo caso si è verificato che il randomizzatore NASA in quanto caratterizzato da un periodo molto elevato produce valori di γ molto piccoli. Mentre, a parità di modifica il randomizzatore CCSDS non è in grado di ottenere gli stessi benefici.

Gran parte dell'analisi svolta si è basata su simulazioni con stesso payload, dove per alcuni degli scenari considerati è stata impostata un'analisi probabilistica con calcolo del valore medio su più realizzazioni. A questa analisi è seguito uno studio della varianza e deviazione standard in cui si è potuto vedere come il valore di γ -esimo si discosta dal valore medio. In questo studio è emerso inoltre che per entrambi i randomizzatori i valori di varianza e deviazione standard non risultano elevati in comparazione con i valori di γ medi e in aggiunta a questo si è notato che dalle Figure 5.10 e 5.11 i valori medi di γ dei due randomizzatori sono analoghi.

Perciò si può affermare l'analogia tra valori di γ -esimo dei due randomizzatori, confermando ciò che si è detto in precedenza, i due randomizzatori hanno prestazioni affini nel caso di payload random.

In conclusione, è possibile affermare che il NASA 17-celle ha notevoli vantaggi quando si utilizza un payload OID senza la presenza del reset del seme. Invece questa affermazione non è valida nel caso di utilizzo di un payload random dove in questo caso si è riscontrato che i due randomizzatori hanno prestazioni equivalenti.

7. Riferimenti bibliografici

- [1] CCSDS 131.0-B-3. *TM Synchronization and Channel Coding*. Blue Book. Washington DC. Sep. 2017.
- [2] Saverio Pellegrini. *Studio ed implementazione di Linear Feedback Shift Register (LFSR) per applicazioni spaziali*. A.A 2018/2019
- [3] M. Baldi. F. Chiaraluce. G. P. Calzolari. R. Garello. *Some remarks on the problem of spurious frequencies in high data rate space missions*. Proceedings 2009 First International Conference on Advances in Satellite and Space Communications (SPACOM 2009). Colmar. France. Jul. 2009; 107–112.
- [4] M. Baldi. F. Chiaraluce. N. Boujnah. R. Garello. *Impact of truncation on the statistical properties of LFSR sequences*. Proceedings International Conference on Signals, Circuits and Systems (SCS 2009). Djerba. Tunisia. Nov. 2009; 1–6.
- [5] M. Baldi. F. Chiaraluce. N. Boujnah. R. Garello. *On the autocorrelation properties of truncated maximum-length sequences and their effect on the power spectrum*. IEEE Trans. Signal Process. 2010. 58(12): 6284–6297.
- [6] Roberto Garello. Marco Baldi. Franco Chiaraluce. *Telemetry Randomizer for High Data Rates*. 8 December 2019. Private Communication.

Dopo lunghi mesi, si è concluso oggi un periodo di lavoro particolarmente intenso: di profondo apprendimento *in primis*, ma allo stesso tempo di forte crescita personale.

Scrivere la Tesi di laurea di un argomento tanto complesso quanto ampio, nasce da una naturale conseguenza, della mia profonda passione verso le tecnologie spaziali. Per questo motivo dopo aver seguito il corso di studi Teoria dei Segnali ho voluto approfondire la tematica della telemetria, ossia i segnali provenienti da satellite e terra.

Desidero ora ricordare tutti coloro che mi hanno aiutato e supportato durante la stesura attraverso suggerimenti, critiche ed osservazioni.

Prima di tutto, un ringraziamento speciale va al mio Relatore, il professor Franco Chiaraluce. Lo ringrazio per avermi guidato verso la strada giusta per portare a compimento la Tesi ed assistito durante la lavorazione della stessa.

Grazie anche ai miei correlatori il Prof. Marco Baldi e il Dott. Massimo Battaglioni, per i loro preziosi consigli e per avermi suggerito puntualmente le giuste modifiche da apportare alla mia Tesi.

Un ringraziamento va ai miei colleghi Alberto e Riccardo, che hanno condiviso assieme a me il percorso universitario, per l'incoraggiamento o semplicemente il tempo speso per leggere e discutere assieme le bozze dell'elaborato.

Vorrei infine ringraziare le persone a me più care: i miei genitori e mio fratello Alessandro, per il sostegno ed il grande aiuto che mi hanno dato ed in particolare per essere sempre stati al mio fianco.

A loro dedico questo lavoro.

Andrea Bertuccini

Pesaro, 19 ottobre 2020