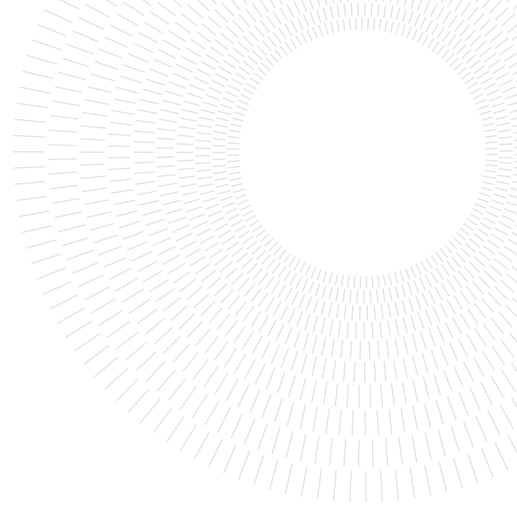




**POLITECNICO**  
MILANO 1863

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
E DELL'INFORMAZIONE



# Predistorsione adattiva

TELECOMMUNICATION ENGINEERING - INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI

Michelangelo Burattini - 10724162

Alessia Gadda - 10619772

Matteo Gramignano - 10717999

Giorgio Messina - 10763872

**Digital Communication**  
Prof. Arnaldo Spalvieri

**Anno accademico:**  
2024/25

**Abstract:** La distorsione non lineare causata dagli amplificatori di potenza è uno degli impedimenti che limitano le prestazioni dei sistemi di trasmissione digitale. In questa trattazione, l'amplificatore di potenza è modellato come un sistema non lineare senza memoria, quindi la sua distorsione può essere compensata ponendo prima dell'amplificatore un predistorsore che, in questo caso, è un sistema non lineare senza memoria che inverte la trasformazione effettuata dall'amplificatore. Naturalmente, affinché l'inversione sia possibile, il segnale di ingresso deve essere nel range dove la trasformazione effettuata dall'amplificatore è invertibile. Verrà discussa l'adattività del predistorsore. L'adattività è comunemente adottata nella pratica perché permette di seguire le lente variazioni temporali della caratteristica dell'amplificatore.



# 1. Introduzione

La predistorsione è una tecnica fondamentale per migliorare le prestazioni degli amplificatori non lineari, ampiamente utilizzati nei sistemi di telecomunicazione. Questi dispositivi amplificano i segnali per la trasmissione su lunghe distanze, ma introducono inevitabilmente distorsioni che allargano lo spettro del segnale e degradano il rapporto segnale-rumore (SNR) e il bit-error rate (BER). La predistorsione riduce tali effetti applicando una trasformazione inversa rispetto alla funzione di trasferimento dell'amplificatore, garantendo che il segnale amplificato mantenga le sue caratteristiche desiderate.

Un aspetto chiave della predistorsione è la modellizzazione matematica dell'amplificatore. Tra i modelli più diffusi vi è il modello di Rapp, che descrive il comportamento non lineare in funzione della saturazione e del guadagno. Per ottimizzare ulteriormente la qualità del segnale, si utilizza la tecnica nota come Crest Factor Reduction (CR). Questa tecnica limita i picchi del segnale, riducendo la differenza tra la potenza di picco e quella media, prevenendo la saturazione e preservando la linearità.

I sistemi moderni integrano la predistorsione adattiva, che aggiorna dinamicamente i coefficienti di correzione per affrontare le variazioni delle caratteristiche dell'amplificatore dovute a fattori esterni (come la temperatura o il deterioramento dei componenti elettronici). Questi sistemi sfruttano algoritmi di apprendimento iterativo per convergere rapidamente verso condizioni ottimali, minimizzando la distorsione e massimizzando il rapporto segnale-distorsione (SDR). Combinando CR, modellizzazione non lineare e predistorsione adattiva, vengono garantite trasmissioni robuste ed efficienti.

## 2. Predistorsione adattiva

### 2.1. Modello Rapp

Il modello Rapp dell'amplificatore di potenza è descritto dal fattore di smussamento  $s$  che delinea la curvatura del corrispondente guadagno. Quando  $s \rightarrow \infty$  la caratteristica di ampiezza input-output dell'amplificatore tende al *soft limiter* ideale con andamento lineare fino alla saturazione a  $|z|^2 = P_{sat}$ .

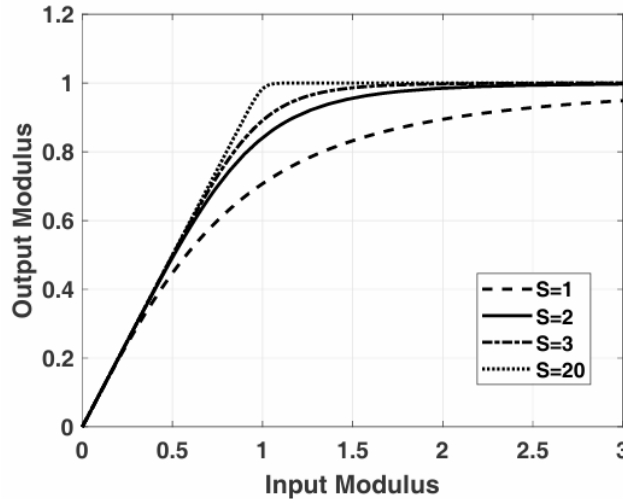


Figure 1: Caratteristica AM-AM input-output del modello Rapp per diversi valori del parametro di smussamento. Il gain  $K_a$  e la potenza di saturazione  $P_{sat}$  sono pari a 1. Per  $s = 20$  il modello è virtualmente quello del soft limiter.

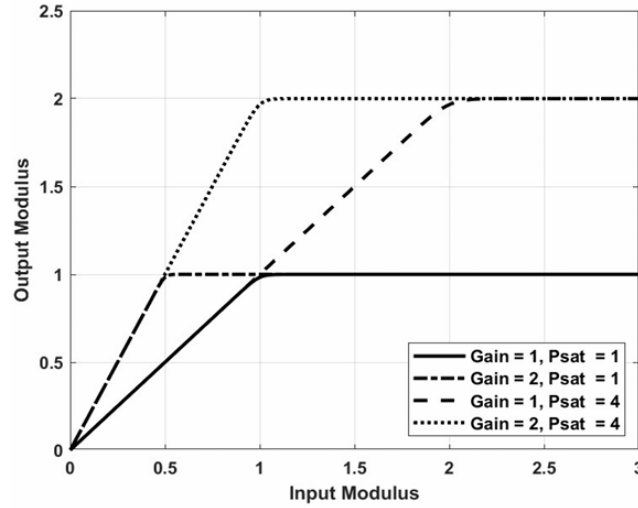


Figure 2: Ruolo del guadagno  $K_a$  e della potenza di saturazione  $P_{sat}$  nella caratteristica AM-AM input-output del modello Rapp. Il parametro di smussamento è  $s = 20$ .

## 2.2. Crest Factor Reduction

Rispetto a un segnale non "limitato" come input del predistorsore, con la *crest factor reduction* il vantaggio è che la distorsione è intenzionale e quindi sotto controllo. Un CF basso induce un'elevata distorsione non lineare, quindi una degradazione del BER in ricezione a causa del rumore di intermodulazione non lineare; con un CF alto tale distorsione non avviene, ma la potenza media di output sarà bassa. Si trova dunque un compromesso tale per cui il CF sia sufficientemente piccolo al fine di assicurare un BER non degradato.

Il blocco della crest reduction agisce come un soft limiter.

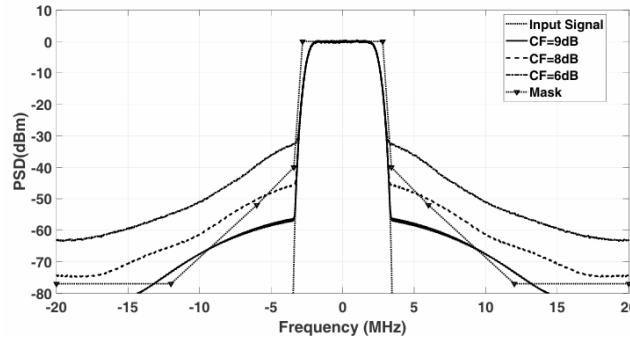


Figure 3: Allargamento spettrale dovuto al crest reduction. Questa maschera spettrale è quella del DVB-T2.

## 2.3. Interpolazione lineare a tratti

La funzione del predistorsore è realizzata considerando una quantizzazione del segnale  $|x|$  in  $2N$  intervalli con grandezza d'intervallo  $\Delta = \frac{|x|_{max}}{2N}$ . La predistorsione è ottenuta dall'interpolazione lineare a tratti tra le  $N + 1$  ordinate  $(a_0, \dots, a_N)$ , generate mappando i valori della sequenza  $|x|$  e gli intervalli di quantizzazione:

$$P(|x|) = \frac{(|x| - (2n + 1)\Delta)(a_{n+1} - a_n)}{2\Delta} + \frac{a_{n+1} + a_n}{2}$$

### 3. Implementazione su Simulink

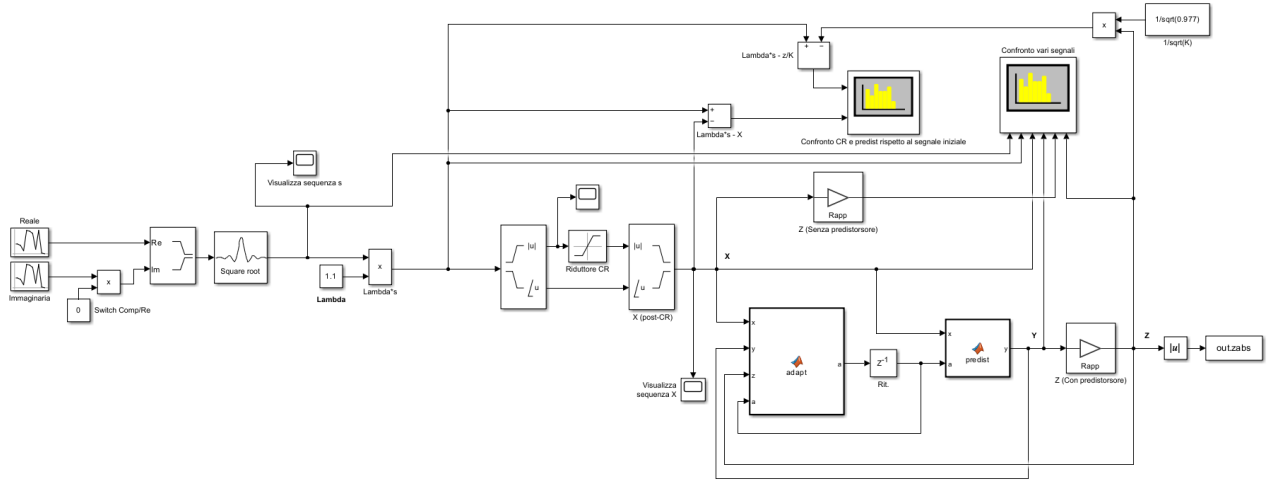


Figure 4: Schema a blocchi Simulink del progetto, dal segnale generato all'uscita dell'amplificatore.

Il segnale in ingresso, derivante dalla somma di due processi gaussiani (reale e immaginario), subisce l'azione di un filtro radice di Nyquist. Viene quindi moltiplicato per un coefficiente  $\lambda$  configurabile manualmente (0.5 nell'immagine, vedasi capitolo 4) in modo da determinare uno specifico CF.

Considerando la distorsione AM-AM indotta successivamente dall'amplificatore non lineare, viene estratto il modulo del segnale filtrato, a cui viene applicata la CR.

La sequenza ottenuta  $\lambda \cdot s$  viene inviata in ingresso a:

- Blocco adattivo (*adapt*);
- Predistorsore (*predist*);
- Nodo sommatore ( $\lambda \cdot s - X$ ).

Per effetto congiunto del predistorsore e dell'amplificatore Rapp, una nuova sequenza  $Z$  viene generata e inviata in retroazione al blocco adattivo; inoltre, viene scalata in ampiezza di un coefficiente  $K$ , che costituirebbe il guadagno di un amplificatore ideale, e trasmessa ad un nodo sommatore al fine di visualizzare il discostamento dovuto all'amplificazione non ideale.

Due analizzatori di spettro sono stati inseriti nello schema:

- il primo al fine di confrontare gli effetti delle tecniche di CR e di predistorsione (quest'ultima applicata subito prima dell'amplificazione non lineare) rispetto al segnale iniziale;
- il secondo al fine di visualizzare tutti i segnali generati, nelle varie fasi, per un confronto diretto.

### 3.1. Blocco adattivo

```
function a = adapt(x,y,z,a)
    N=64; % Number of intervals
    gamma=0.005; % Step size
    xmax=1; % Max scale value
    K=sqrt(0.977); % Predistortion gain
    delta=xmax/N; % Intervals amplitude
    int_vec=0:delta:xmax; % Interval vector
    n=zeros(1,length(int_vec)); % Positioning vector for every sample
    % of the sequence aprec (size N+1)
    if abs(x)>=xmax
        n(end)=1;
    end
    aux=find(abs(x)>int_vec); % n contains 1 for x>int_vec(n)
    n(aux(end))=1; % Last index is the last value below
    % x: it's the interval!
    index_vec=find(n);
    index=index_vec(1);
    a(index)=real(a(index) - gamma * (z-K*x) * conj(x*z/y));
    % From theory
end
```

1. La formula di  $n$  quando  $|x| \leq x_{max}$  (ramo *else*) serve ad identificare l'indice (del vettore  $a$  di valori da introdurre nel predistorsore) relativo all'intervallo di quantizzazione in cui si colloca  $|x|$ , data la sequenza in ingresso  $x$ ;
2.  $\text{mod}(|x|, \delta)$ : serve a calcolare il discostamento tra  $|x|$  e l'intervallo più vicino ad esso;
3.  $|x| - \text{mod}(|x|, \delta)$ : fornisce il primo valore dell'intervallo a cui appartiene  $|x|$ ;
4.  $\frac{(|x| - \text{mod}(|x|, \delta))}{\delta}$ : ricava il numero di intervalli da "saltare" (a partire da 0) per raggiungere quello identificato precedentemente.

### 3.2. Predistorsore

```
function y = predist(x,a)
    N = 64;                                % Number of intervals
    xmax = 1;                              % Max scale value
    delta = xmax/N;                        % Intervals amplitude
    int_vec = 0:delta:xmax;                % Interval vector
    n = zeros(1,length(int_vec));          % Positioning vector for every
        sample of the sequence a
    if (abs(x)>xmax)
        n(end)=1;                          % Saturation: x>xmax
    end
    aux=find(abs(x)>int_vec);               % n contains 1 for x>int_vec(n)
    n(aux(end))=1;                         % Last index is the last value
        below x: it's the interval!
    index_vec=find(n);
    index=index_vec(1);
    P=1/(2*delta)*((abs(x)-(2*index+1)*delta)*(a(index+1)-a(index))) +
        1/2*(a(index+1)+a(index));
    y=P*x;
end
```

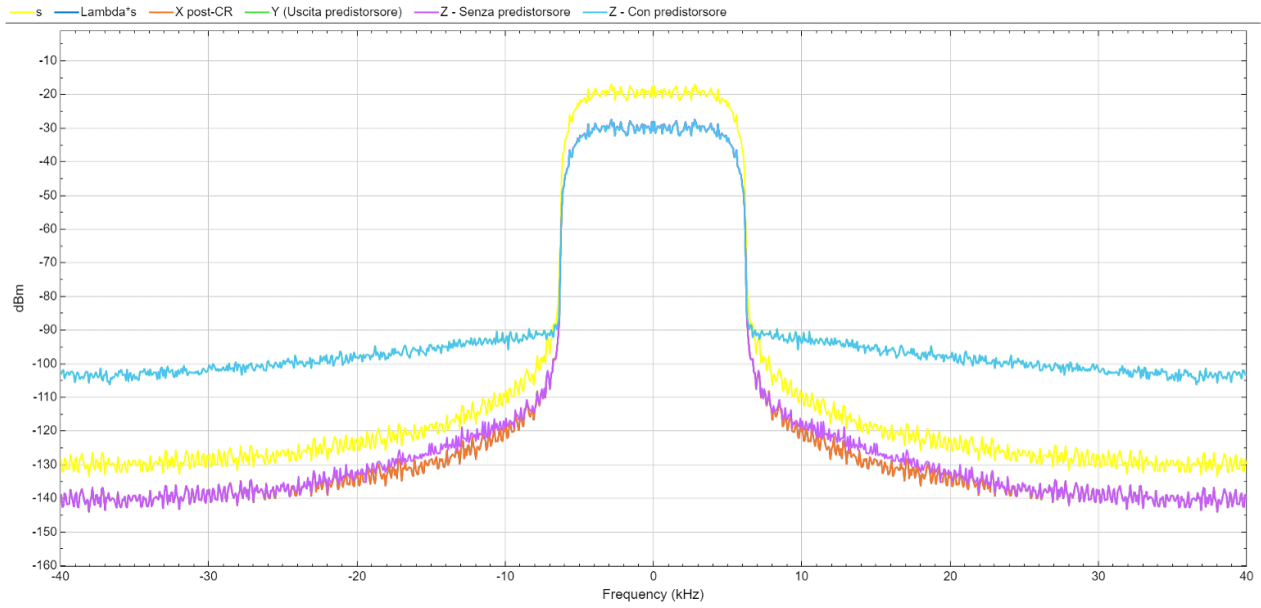
Per la formula implementata nel codice vedasi il Par.2.3.

## 4. Analisi dei risultati

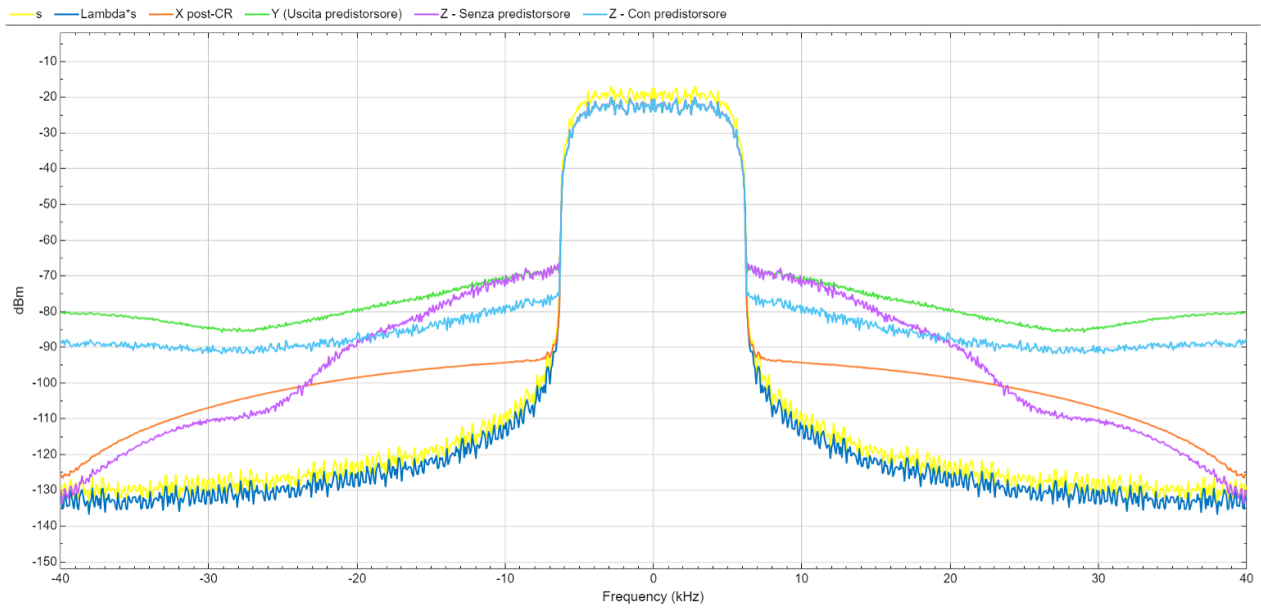
In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni effettuate separando il caso reale da quello complesso. Tutte le simulazioni sono effettuate ponendo  $N = 64$ , con uno *step size*  $\gamma = 0.005$  e scegliendo  $\lambda$  pari a 0.3, 0.7 e 1.1.

### 4.1. Segnale reale

La Fig.5 riportata di seguito permette di fare un confronto tra tutti i segnali reali.

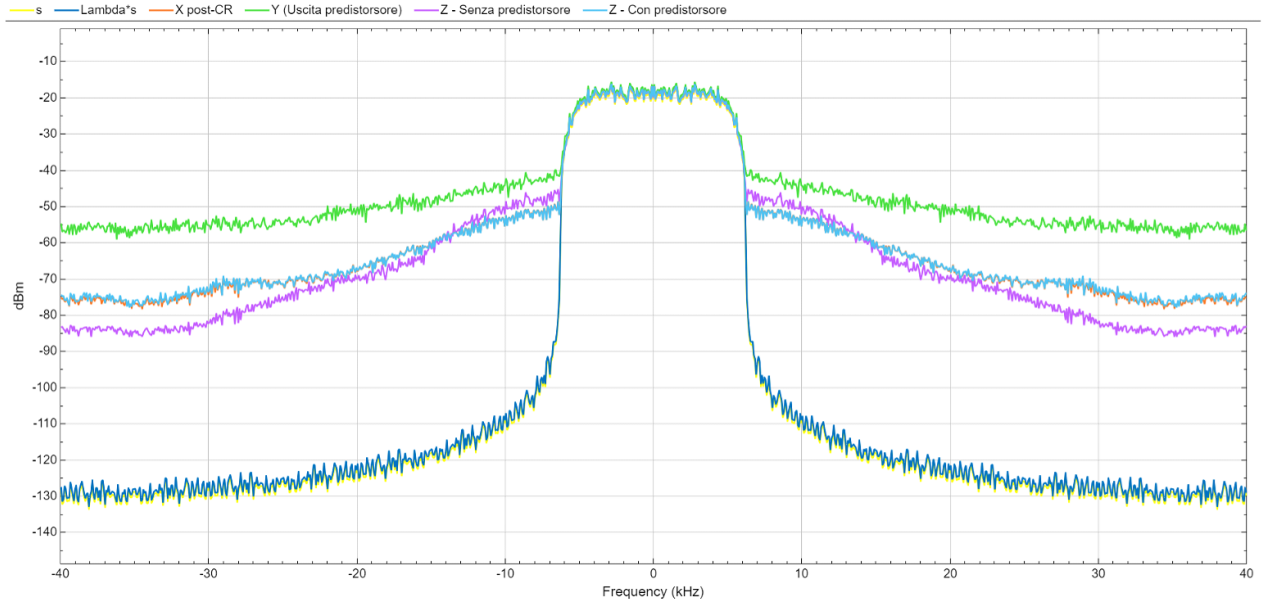


(a)



(b)

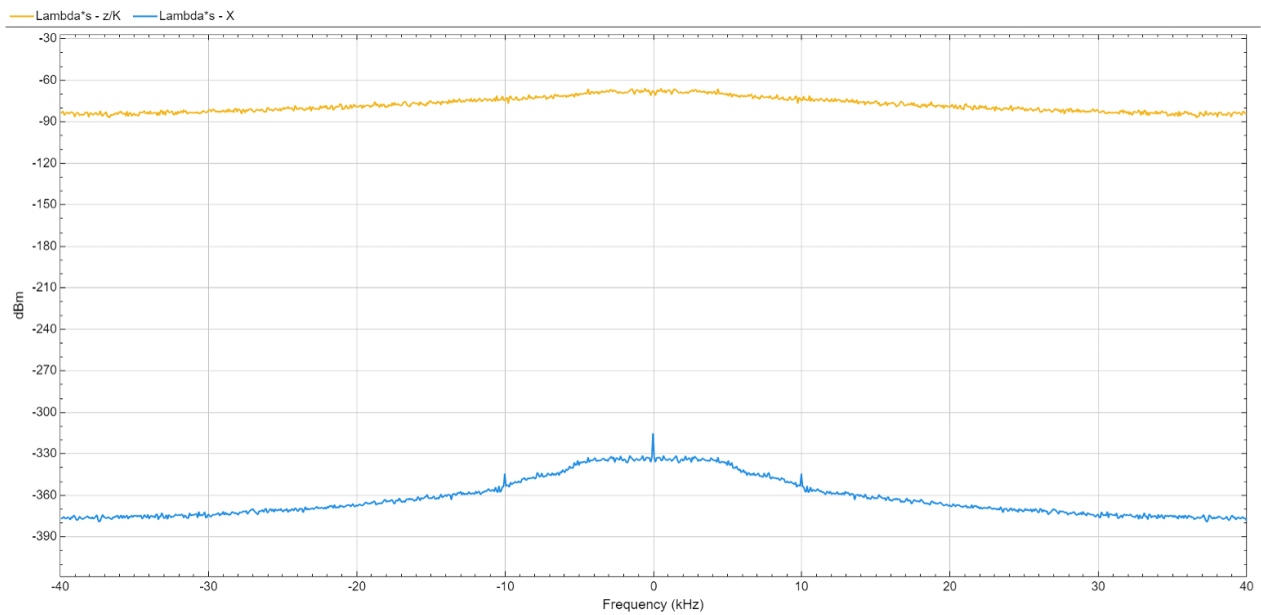




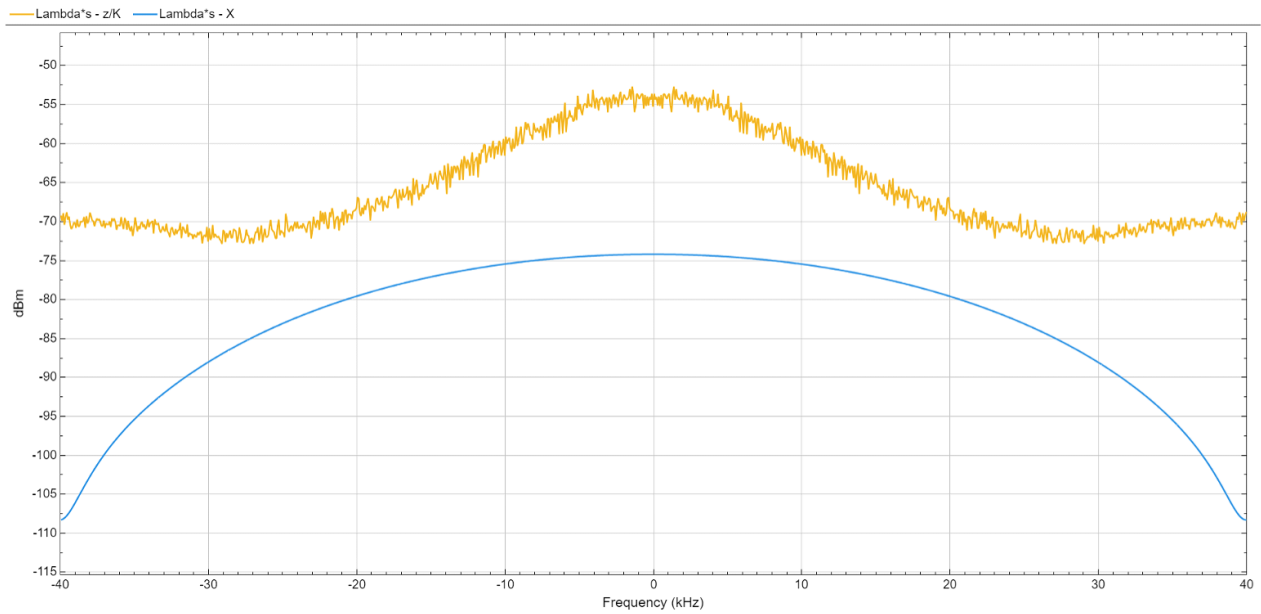
(c)

Figure 5: Spettro dei segnali reali con  $\lambda = 0.3$  (a),  $\lambda = 0.7$  (b) e  $\lambda = 1.1$  (c).

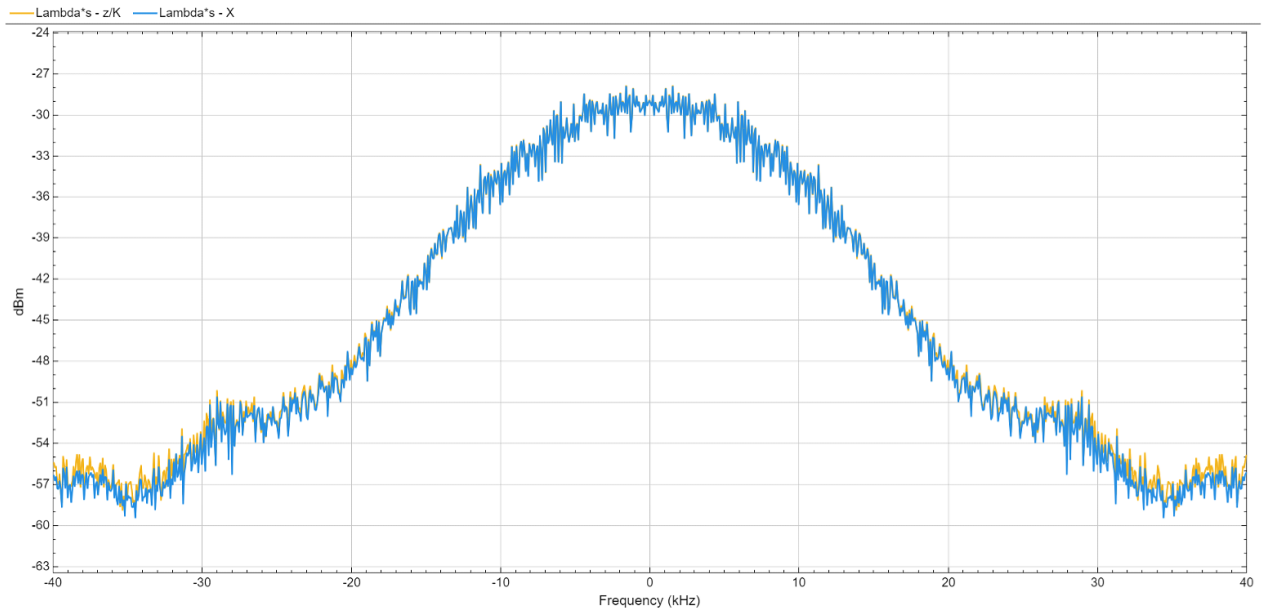
La Fig.6 permette di confrontare gli spettri del segnale reale iniziale, prima e dopo la CR.



(a)



(b)

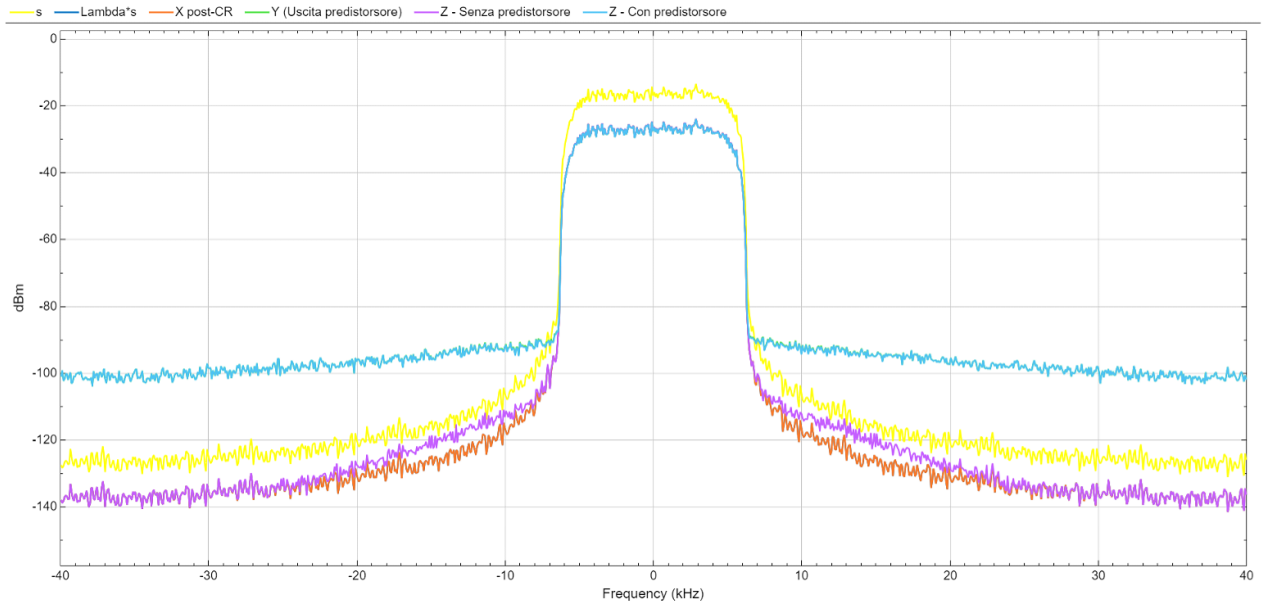


(c)

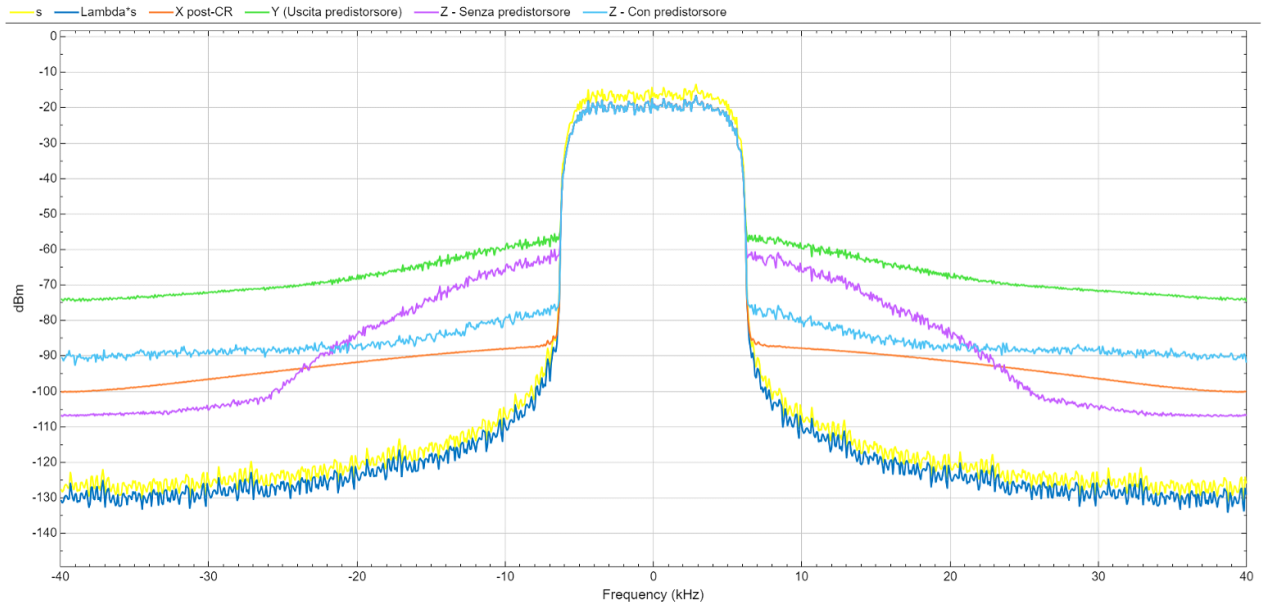
Figure 6: Spettro del segnale iniziale reale prima e dopo la CR con  $\lambda = 0.3$  (a),  $\lambda = 0.7$  (b) e  $\lambda = 1.1$  (c).

## 4.2. Segnale complesso

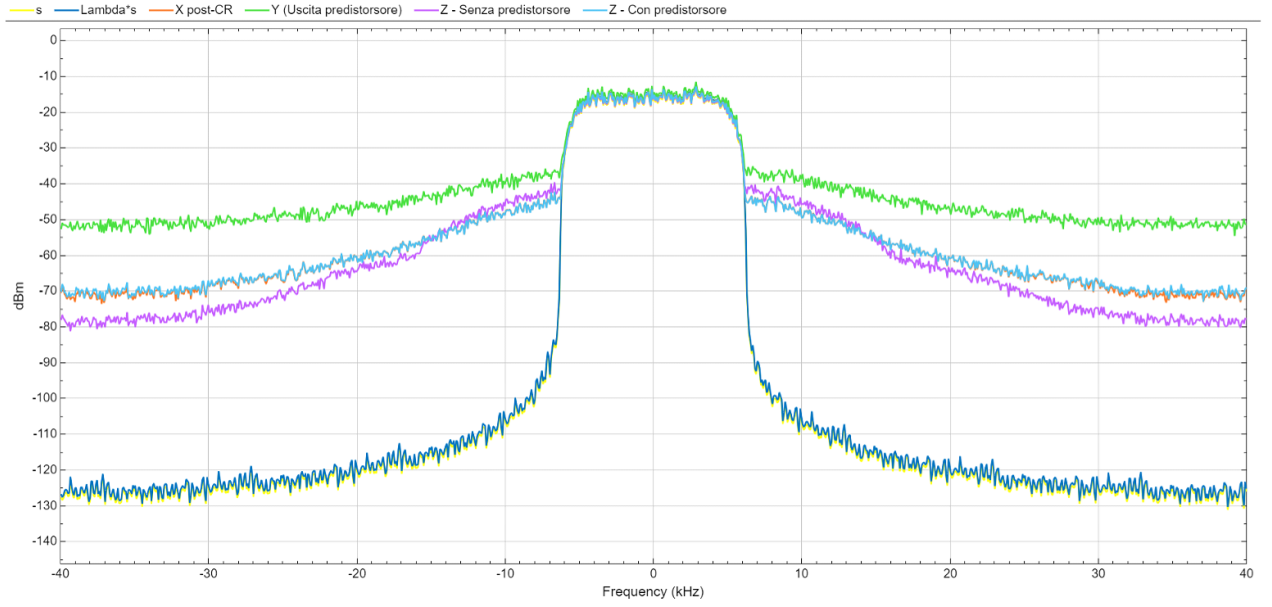
La Fig.7 riportata di seguito permette di fare un confronto tra tutti i segnali complessi.



(a)



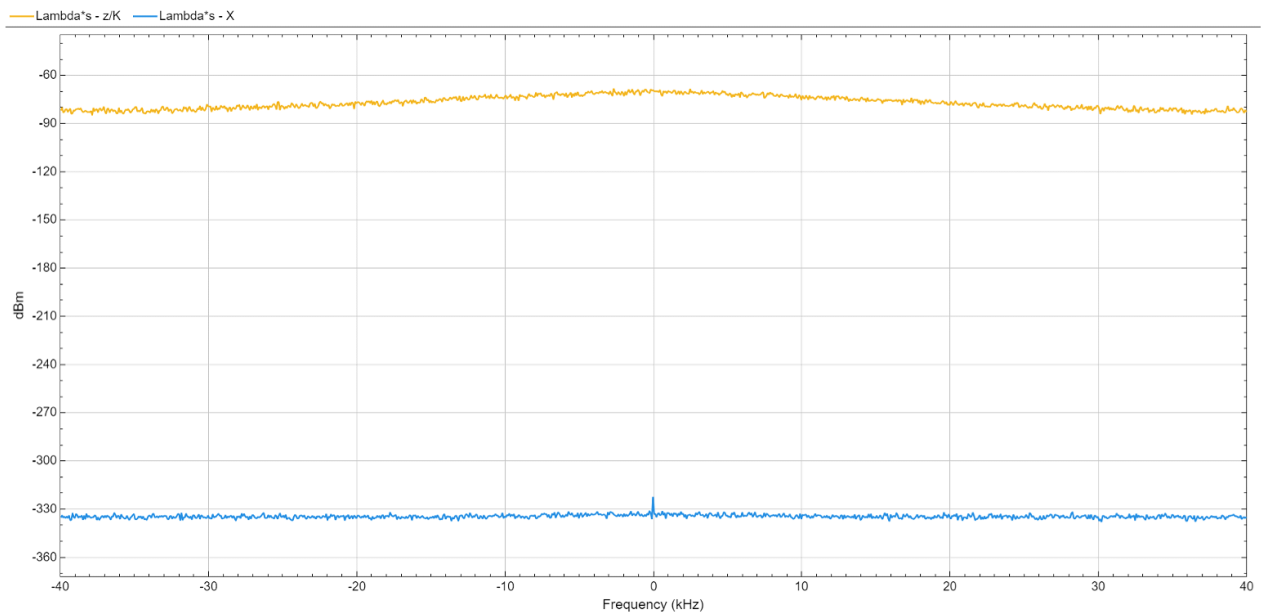
(b)



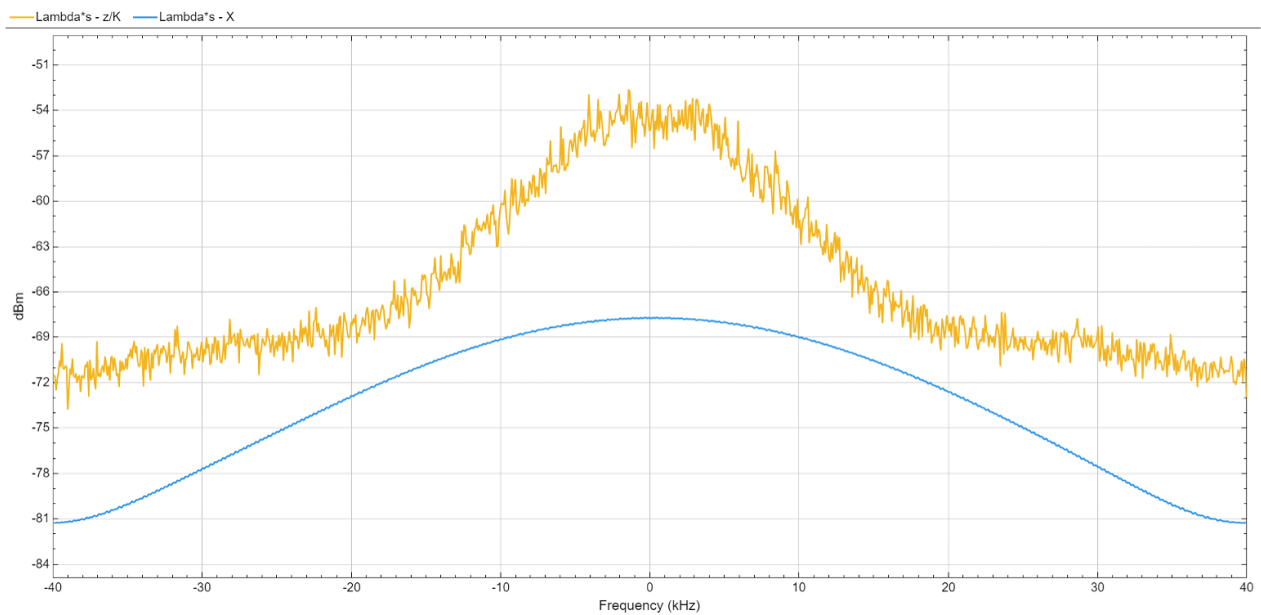
(c)

Figure 7: Spettro dei segnali complessi con  $\lambda = 0.3$  (a),  $\lambda = 0.7$  (b) e  $\lambda = 1.1$  (c).

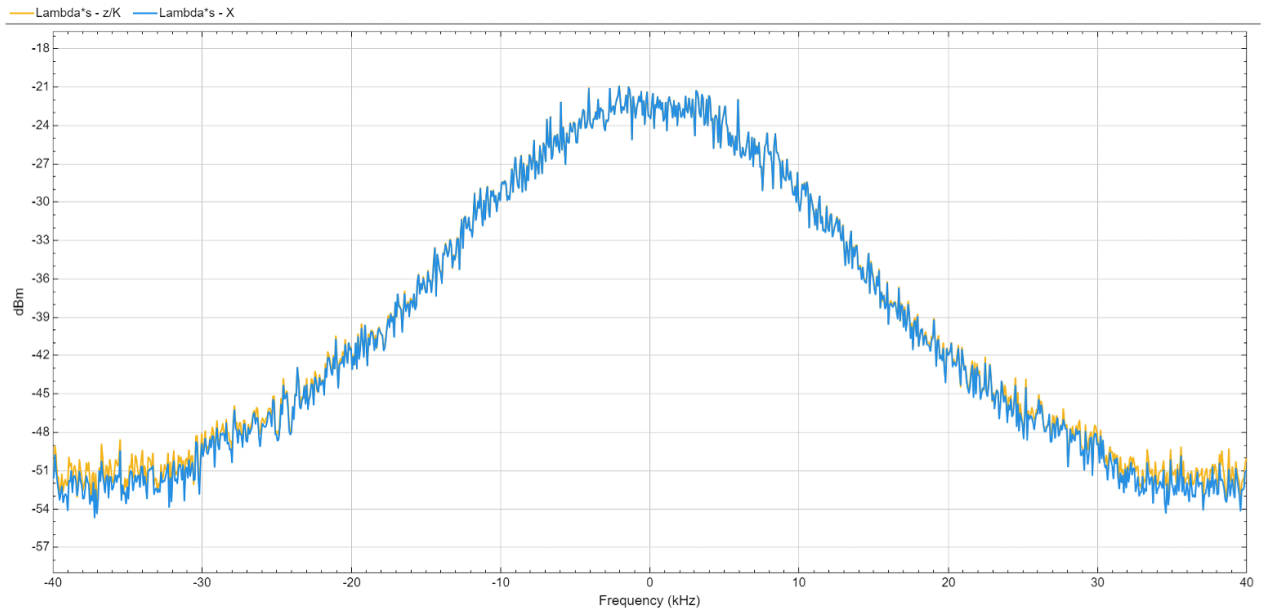
La Fig.8 permette di confrontare gli spettri del segnale complesso iniziale, prima e dopo la CR.



(a)



(b)



(c)

Figure 8: Spettro del segnale iniziale reale prima e dopo la CR con  $\lambda = 0.3$  (a),  $\lambda = 0.7$  (b) e  $\lambda = 1.1$  (c).

### 4.3. Effetto di $\lambda$

Nelle precedenti figure viene mostrato come, scegliendo il valore del parametro  $\lambda$  in un opportuno intervallo, si possa limitare il fenomeno dello *spectral broadening* indotto dall'amplificazione non ideale. Si riscontra che il segnale ottenuto in seguito a predistorsione e amplificazione presenta componenti a bassa frequenza estranee allo spettro del segnale originario, attenuate in potenza rispetto al risultato della sola amplificazione. D'altro canto, a elevate frequenze risultano componenti di rumore più accennate dovute al comportamento lineare a tratti (dunque non lineare) del predistorsore.

Inoltre, si evidenzia come l'aumento di tale valore determina un minore discostamento, in termini di potenza, tra il segnale predistorto e quello non predistorto, in uscita dall'amplificatore.

Il predistorsore garantisce prestazioni ottimali per il sistema per  $\lambda \in (0.5, 1)$ .

Infine si osserva che la tecnica della CR, adottata individualmente, ha prestazioni peggiori rispetto a quelle della predistorsione adattiva per valori elevati di  $\lambda$ .

## 5. Conclusioni

Il progetto ha dimostrato come l'utilizzo della predistorsione adattiva rappresenti una soluzione efficace per mitigare gli effetti della distorsione non lineare introdotta dagli amplificatori di potenza. Attraverso l'implementazione su Simulink, abbiamo verificato come la combinazione di tecniche come la Crest Factor Reduction (CR) e l'interpolazione lineare a tratti possa migliorare significativamente la qualità del segnale trasmesso, preservandone la linearità e riducendo l'allargamento spettrale.

In particolare, l'adozione del modello di Rapp ha permesso di simulare scenari realistici e di evidenziare il ruolo chiave del fattore di smussamento  $s$  nel determinare il comportamento del sistema.

I diversi valori di  $\lambda$  (vedasi paragrafo 4.3) hanno permesso di osservare che il segnale elaborato presenta una forma spettrale più stretta e controllata rispetto al segnale iniziale non linearizzato. Ciò indica che il sistema riesce a limitare efficacemente la distorsione indotta dall'amplificatore, mantenendo la potenza media a livelli accettabili.

Inoltre, per segnali complessi, l'effetto combinato della CR e della predistorsione si è tradotto in un miglioramento visibile dello spettro, che risulta più simile al segnale ideale previsto. Questo conferma che la predistorsione adattiva, in sinergia con la CR, è in grado di compensare le distorsioni non lineari garantendo un SNR e un BER ottimali.