

# Metody rekonstrukcji kanałów o rzadkiej i kompresowalnej charakterystyce odpowiedzi impulsowej

Grzegorz Dziwoki

Zebranie KTiT

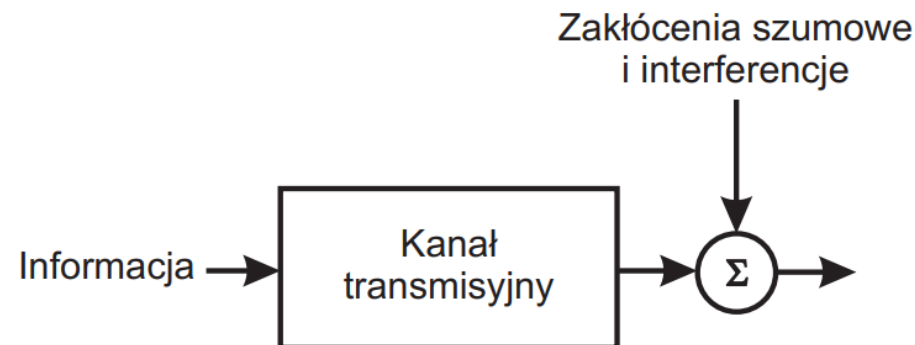
17.10.2023

# Plan

- Charakterystyka kanałów transmisyjnych i modulacji OFDM;
- Kanał o rzadkiej charakterystyce odpowiedzi impulsowej;
- Metoda iteracyjnej rekonstrukcji kanału;
- Kanał o kompresowalnej charakterystyce odpowiedzi impulsowej;
- Algorytm sukcesywnej aproksymacji;
- Badania nad kryterium zatrzymania algorytmu OMP;
- Metody rekonstrukcji oparte o relację między błędem aproksymacji a estymacji.

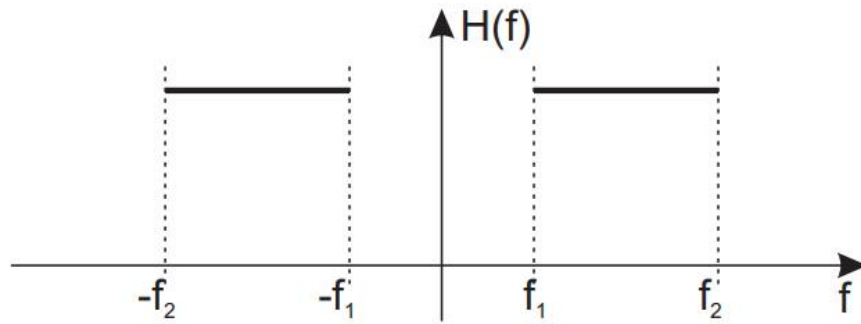
# Kanał transmisyjny

- W centrum zainteresowania jest opis własności kanału transmisyjnego na poziomie warstwy fizycznej systemu – odpowiedź impulsowa w dziedzinie czasu oraz charakterystyka częstotliwościowa;
- Jedno z podstawowych źródeł zniekształceń transmitowanego sygnału;
- Szum i zakłócenia są dodatkowym źródłem zniekształceń transmitowanego sygnału;

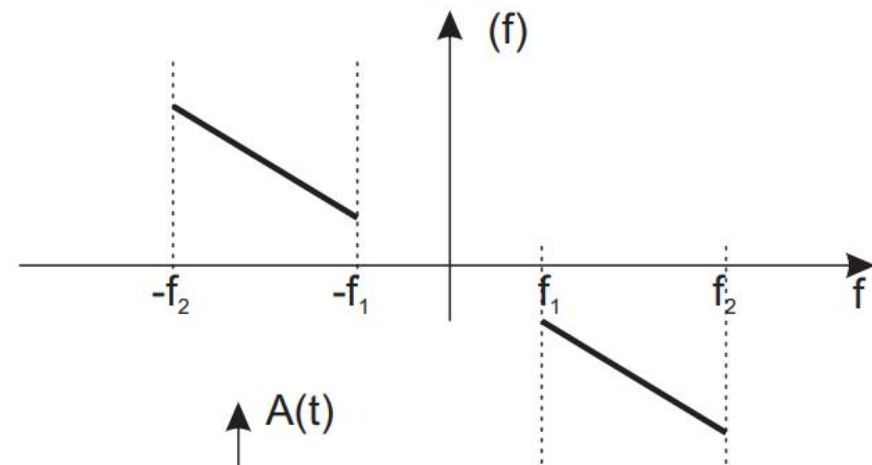


# Kanał niezniekształcający

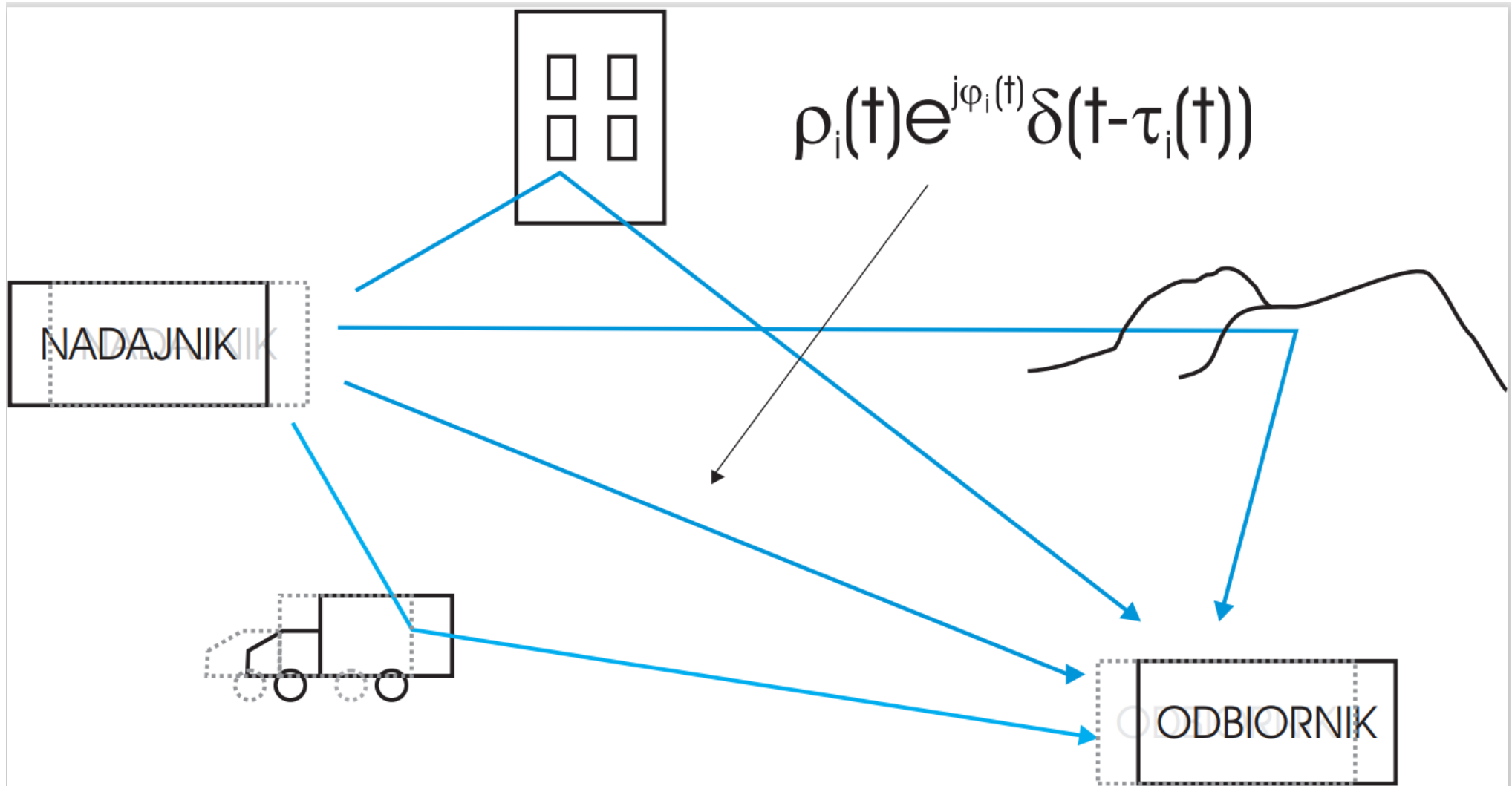
Charakterystyka amplitudowa



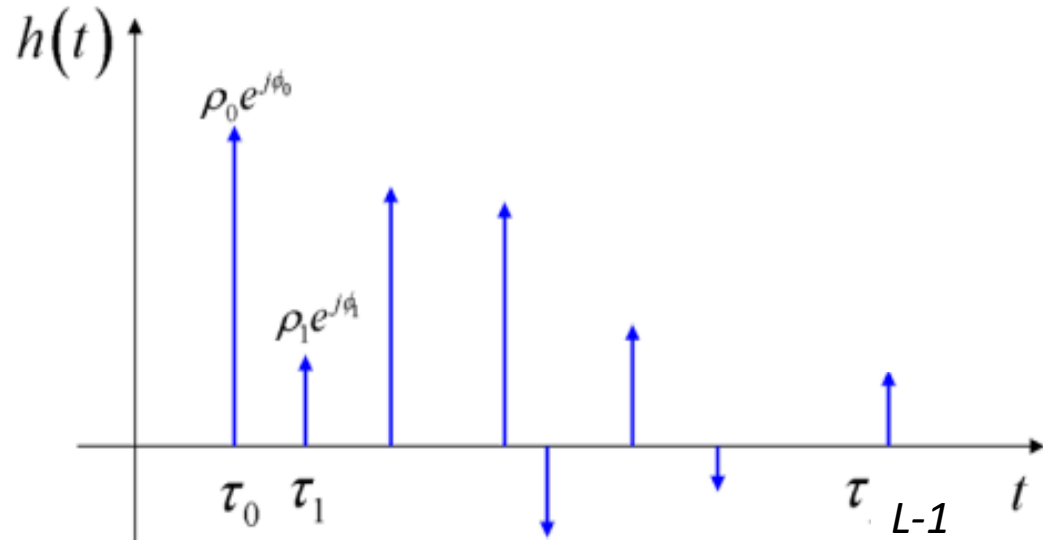
Charakterystyka fazowa



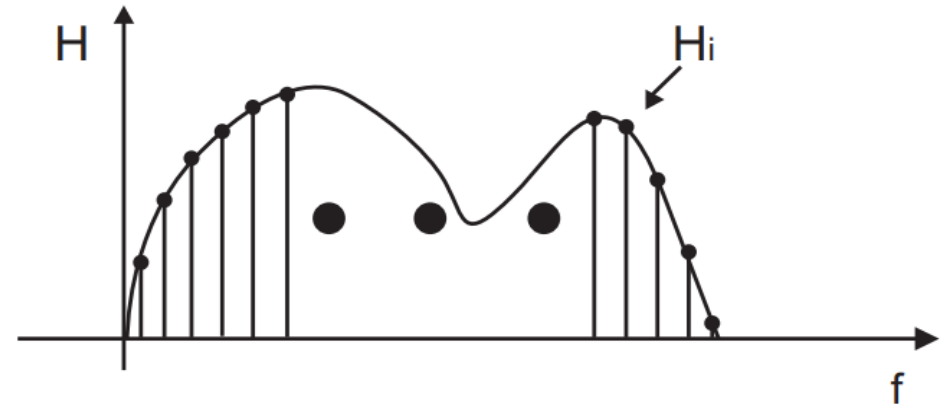
# Bezprzewodowy kanał transmisyjny



# Bezprzewodowy kanał statyczny



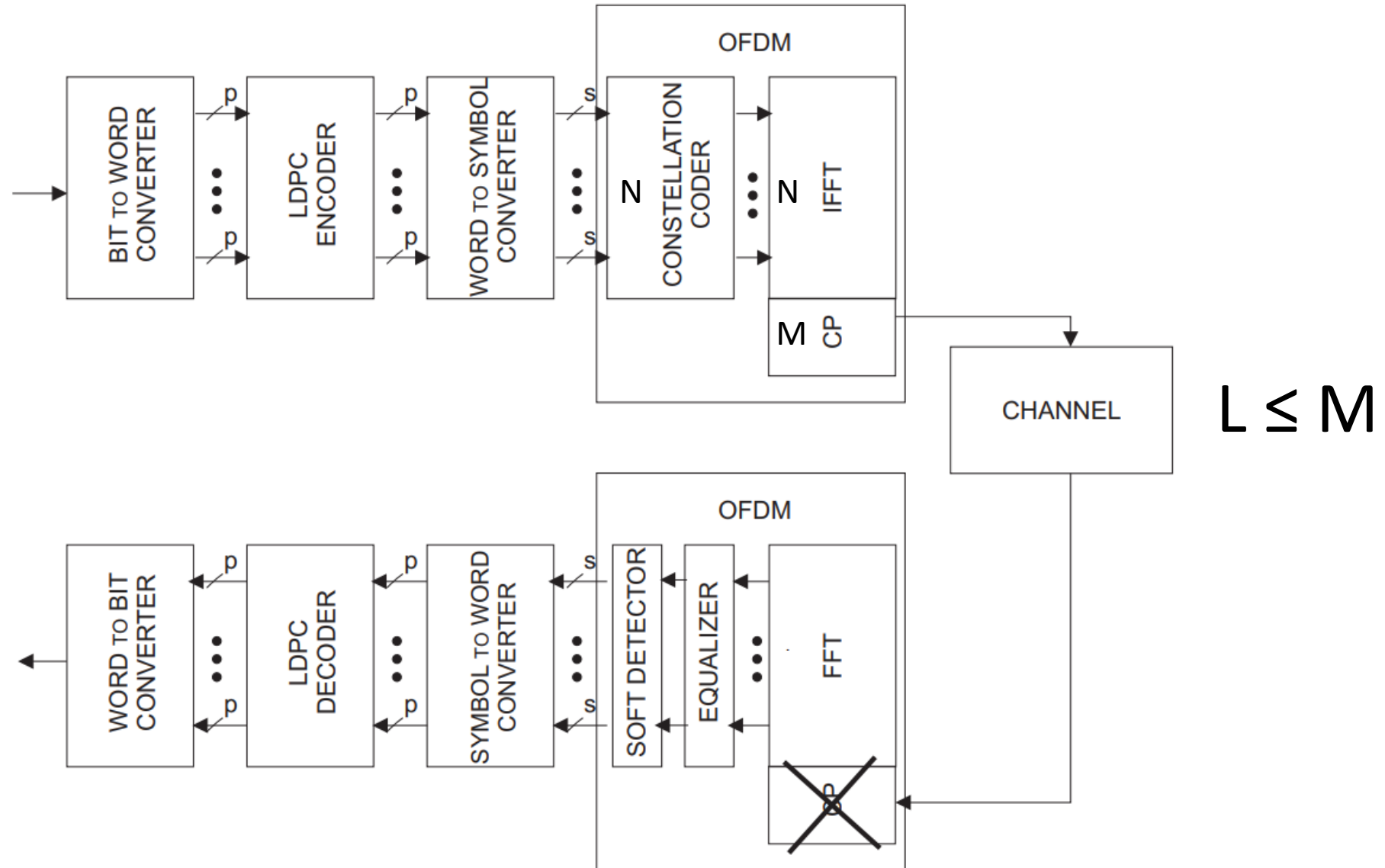
$$\mathbf{h} = [h_0, h_1, \dots, h_{L-1}]$$



$$\mathbf{H} = [H_0, H_1, \dots, H_{N-1}]$$

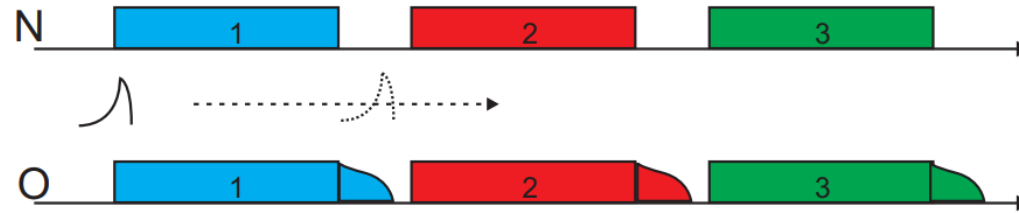
$$\mathbf{H} = \text{N-DFT}(\mathbf{h})$$

# Model transmisi OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)

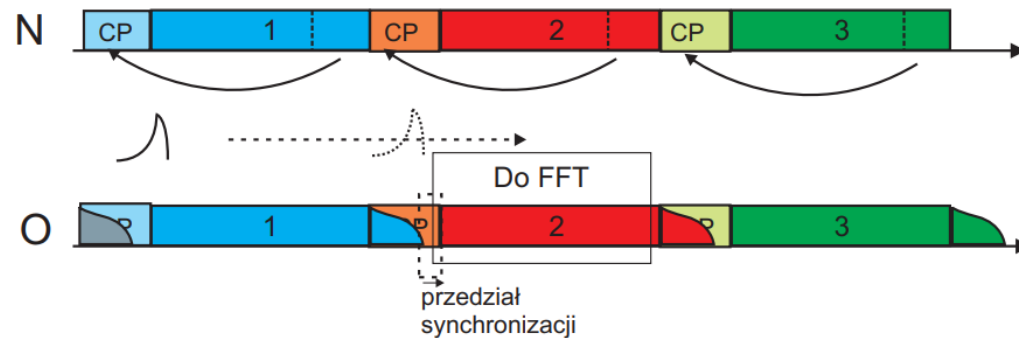


# Rodzaje transmisji OFDM

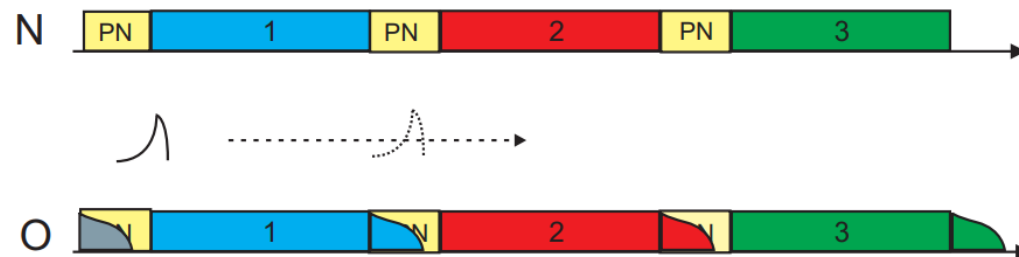
- ZP-OFDM (Zero Padding OFDM)



- CP-OFDM (Cyclic Prefixed OFDM)

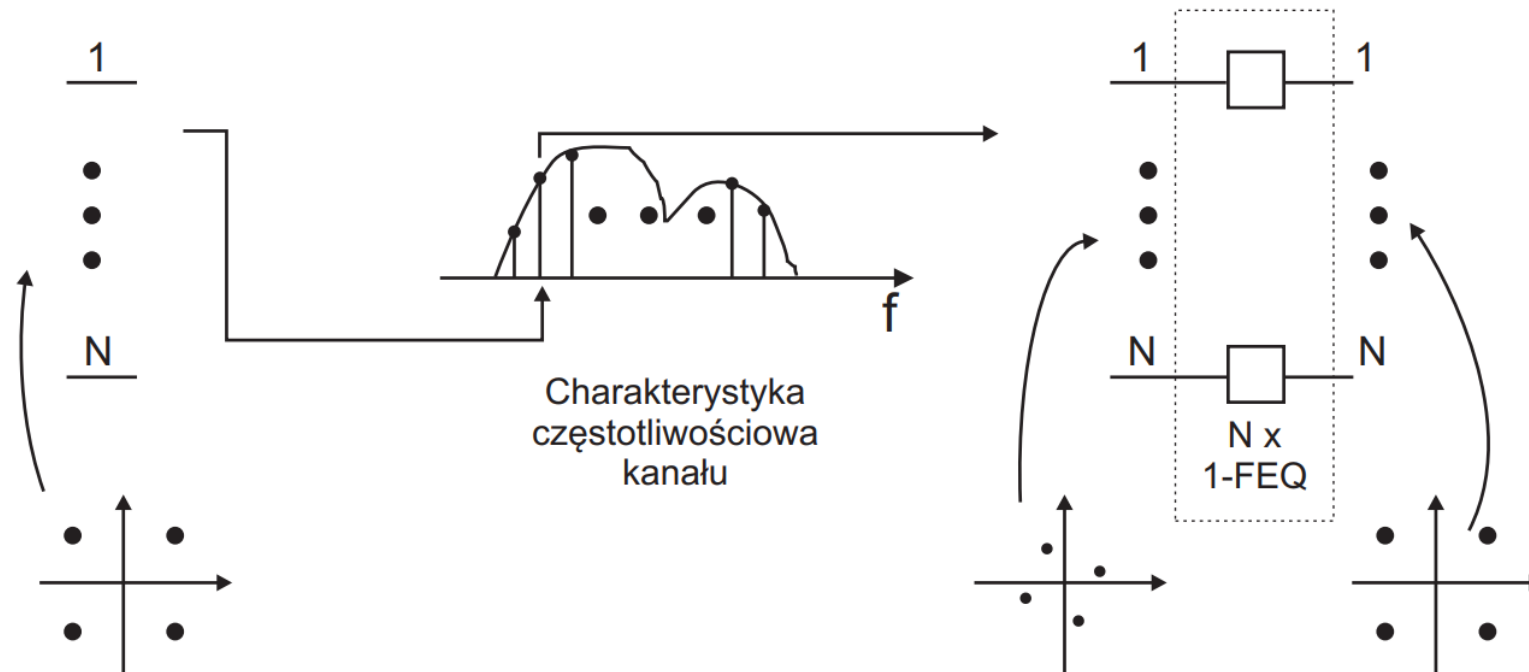


- TDS-OFDM (Time Domain Synchronous OFDM)





# Odtwarzanie informacji



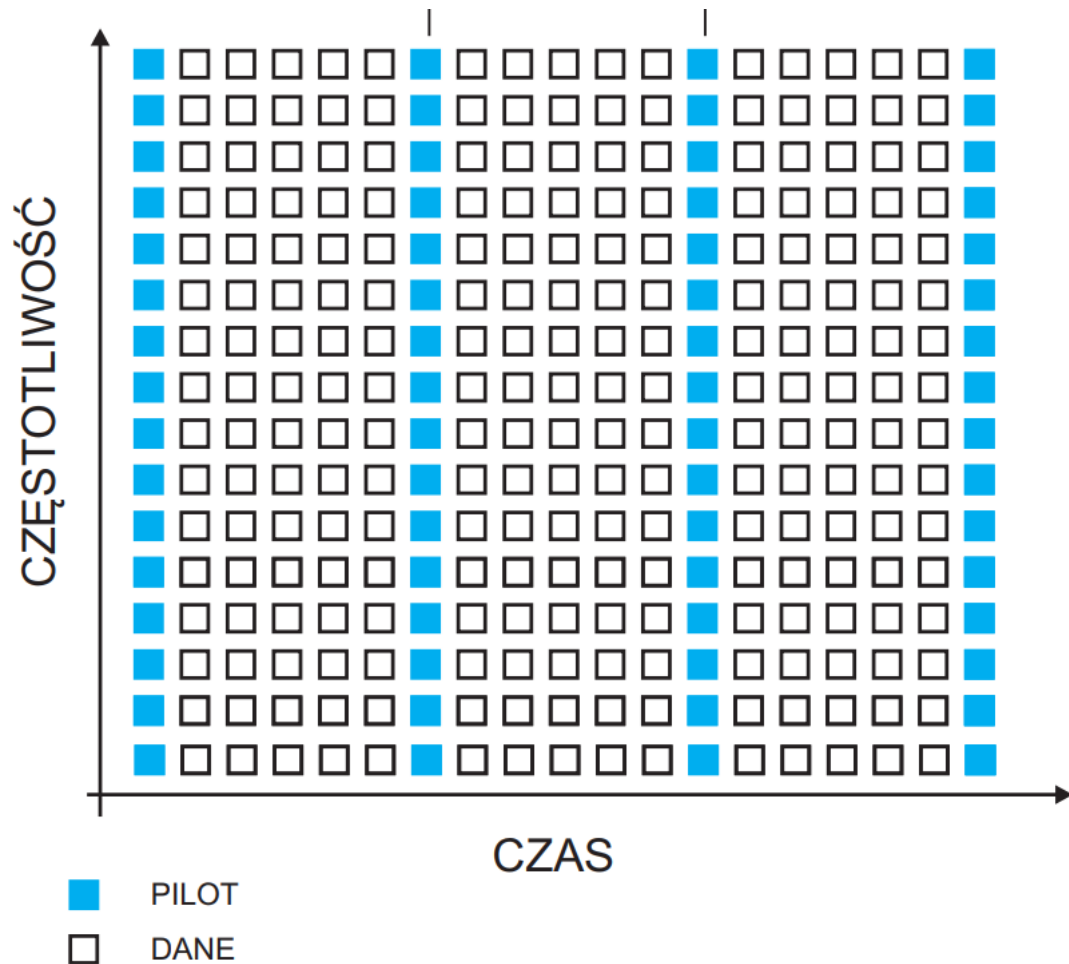
Metoda ZF

$$X_i = \frac{Y_i}{H_i}$$

Metoda MMSE

$$X_i = \frac{H_i^*}{|H_i|^2 + \sigma^2} Y_i$$

# Wybrane metody rekonstrukcji odpowiedzi impulsowej

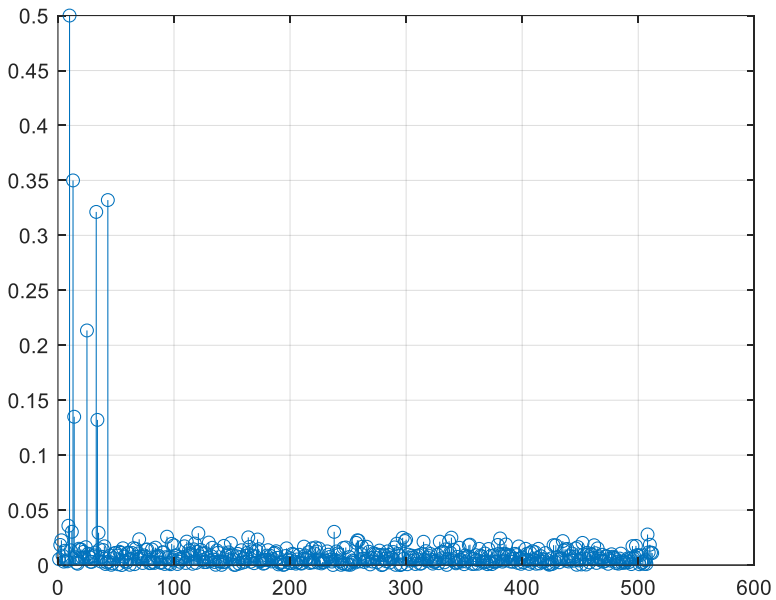


1. LS (Least Squares) – na podstawie sygnału pilota odtwarzanie charakterystyki kanału częstotliwościowego

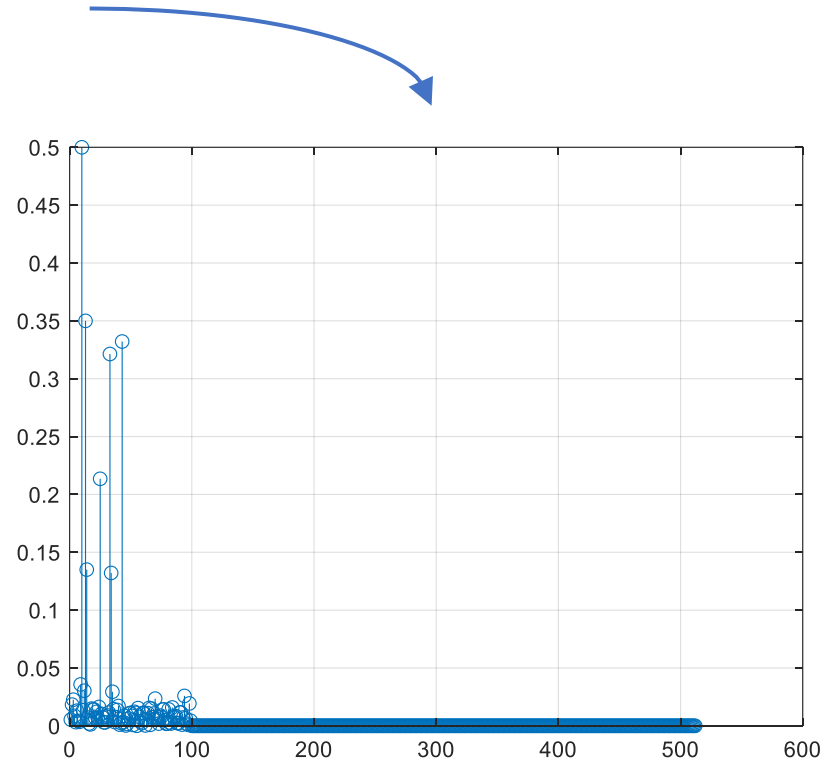
$$\hat{H}_i = \frac{Y_{p_i}}{X_{p_i}}$$

2. Skróconej odpowiedzi impulsowej – wynik z algorytmu LS transformowany do dziedziny czasu (odpowiedź impulsowa) a następnie wszystkie współczynniki powyżej rozmiaru okresu ochronnego są zerowane
3. Wybór tylko znaczących (o odpowiedniej energii w stosunku do mocy szumu) współczynników odpowiedzi impulsowej LS w zakresie rozmiaru okresu ochronnego. Do estymacji szumu wykorzystywane współczynniki powyżej rozmiaru okresu ochronnego.

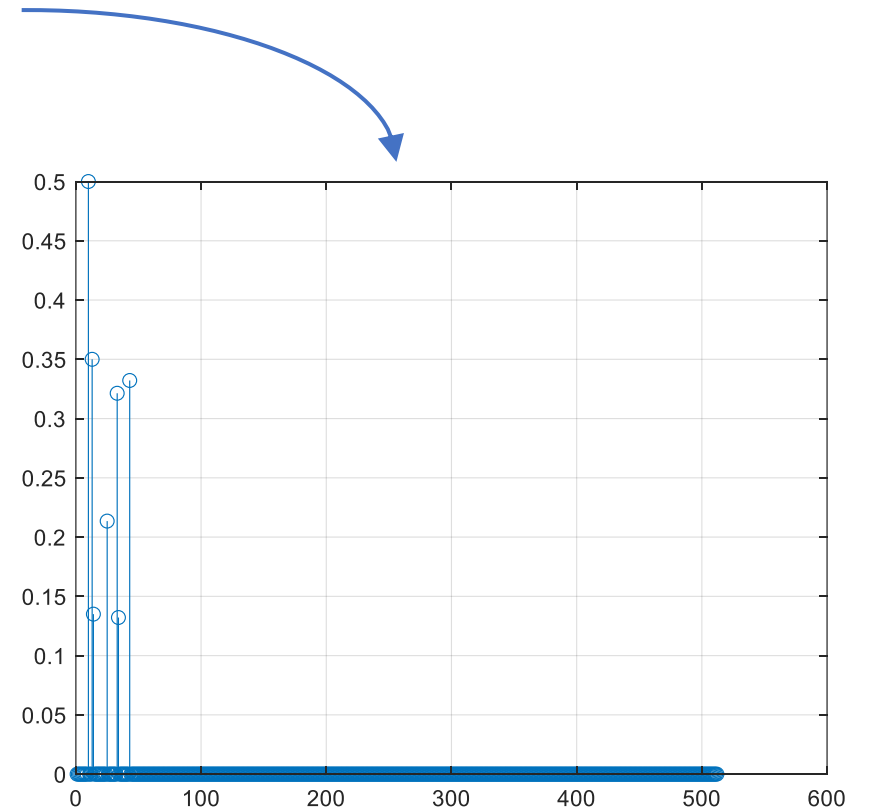
# Wybrane metody rekonstrukcji odpowiedzi impulsowej



1



2



3

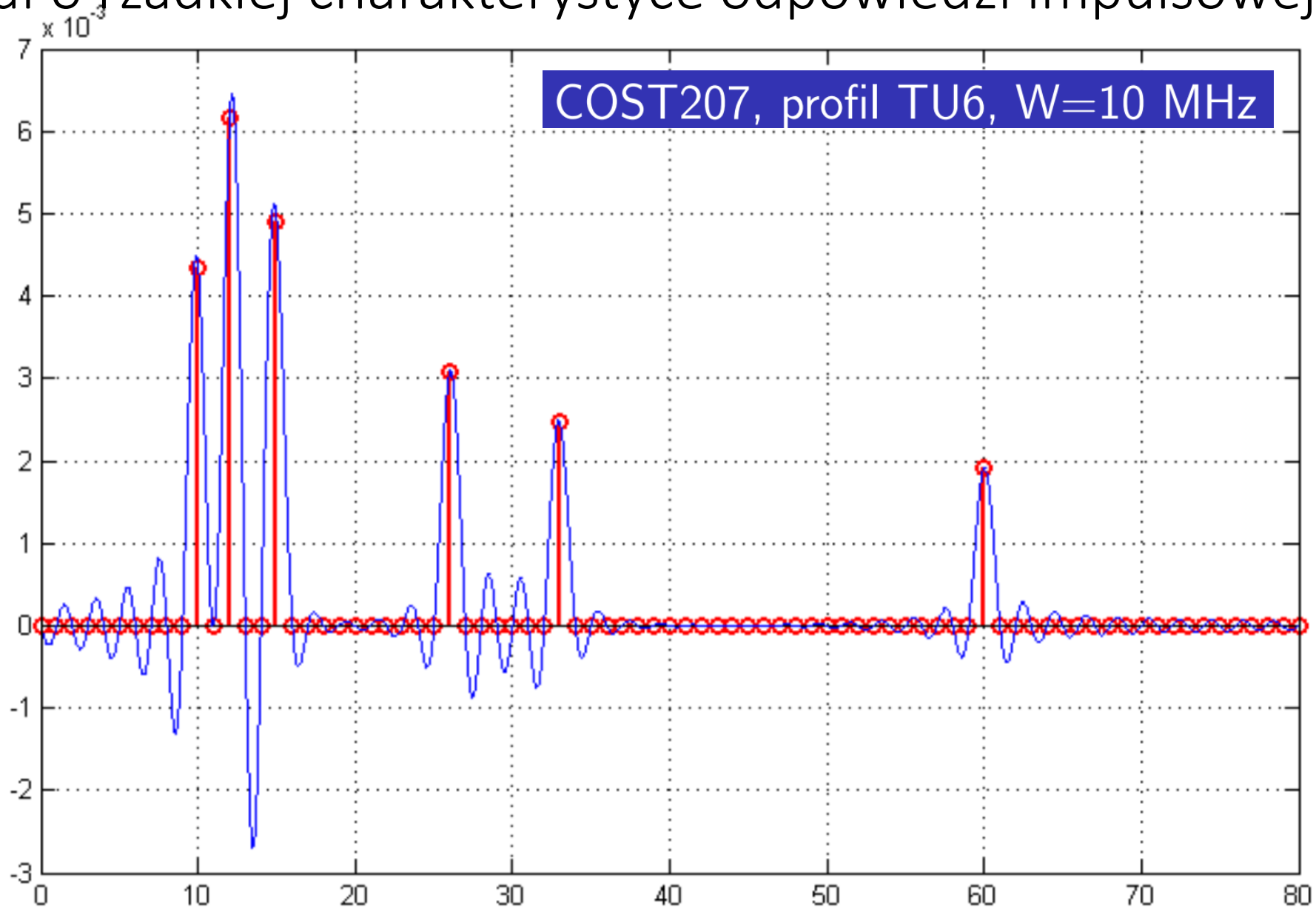
# Kanał o rzadkiej charakterystyce odpowiedzi impulsowej

- **COST 207, "Digital land mobile radio communications,"** *Office for Official Publications of the European Communities, Final report, Luxembourg, (1989)* - opracowany dla systemu GSM, uwzględnia tereny obszarów niezabudowanych (RU), zabudowanych (TU, BU) i górzystych (HT);

Tabela: COST207, profil TU6

Path number	Delay [ $\mu s$ ]	Distance [ $m$ ]	Power [dB]
1	0	-	-3
2	0.2	60	0
3	0.5	150	-2
4	1.6	480	-6
5	2.3	690	-8
6	5	1500	-10

# Kanał o rzadkiej charakterystyce odpowiedzi impulsowej



# Opis matematyczny transmisji sygnału w kanale

Niech kanał transmisyjny opisany jest za pomocą wektora współczynników odpowiedzi impulsowej:

$$\mathbf{h}(t) = [h_0(t), h_1(t), \dots, h_{L-1}(t)]^T$$

Splot odpowiedzi impulsowej kanału z sygnałem transmitowanym  $x$ :

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ y_i \\ y_{i+1} \\ y_{i+2} \\ y_{i+3} \\ y_{i+4} \\ y_{i+5} \\ y_{i+6} \\ \vdots \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ x_i & x_{i-1} & \cdots & x_{i-j} & \cdots & x_{i-L+1} \\ x_{i+1} & x_i & \cdots & x_{i-j+1} & \cdots & x_{i-L+2} \\ x_{i+2} & x_{i+1} & \cdots & x_{i-j+2} & \cdots & x_{i-L+3} \\ x_{i+3} & x_{i+2} & \cdots & x_{i-j+3} & \cdots & x_{i-L+4} \\ x_{i+4} & x_{i+3} & \cdots & x_{i-j+4} & \cdots & x_{i-L+5} \\ x_{i+5} & x_{i+4} & \cdots & x_{i-j+5} & \cdots & x_{i-L+6} \\ x_{i+6} & x_{i+5} & \cdots & x_{i-j+6} & \cdots & x_{i-L+7} \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_j \\ \vdots \\ h_{L-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \\ \vdots \\ n_j \\ \vdots \\ n_{L-1} \end{bmatrix}$$

$x$

# Rekonstrukcja odpowiedzi impulsowej kanału

Splot odpowiedzi impulsowej kanału z sygnałem transmitowanym  $x$ :

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ y_i \\ y_{i+1} \\ y_{i+2} \\ y_{i+3} \\ y_{i+4} \\ y_{i+5} \\ y_{i+6} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ x_i & x_{i-1} & \cdots & x_{i-j} & \cdots & x_{i-L+1} & \\ x_{i+1} & x_i & \cdots & x_{i-j+1} & \cdots & x_{i-L+2} & \\ x_{i+2} & x_{i+1} & \cdots & x_{i-j+2} & \cdots & x_{i-L+3} & \\ x_{i+3} & x_{i+2} & \cdots & x_{i-j+3} & \cdots & x_{i-L+4} & \\ x_{i+4} & x_{i+3} & \cdots & x_{i-j+4} & \cdots & x_{i-L+5} & \\ x_{i+5} & x_{i+4} & \cdots & x_{i-j+5} & \cdots & x_{i-L+6} & \\ x_{i+6} & x_{i+5} & \cdots & x_{i-j+6} & \cdots & x_{i-L+7} & \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_j \\ \vdots \\ h_{L-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \\ \vdots \\ n_j \\ \vdots \\ n_{L-1} \end{bmatrix}$$

$$\hat{\mathbf{h}} = (\mathcal{X}^H \mathcal{X})^{-1} \mathcal{X}^H \mathbf{y}$$

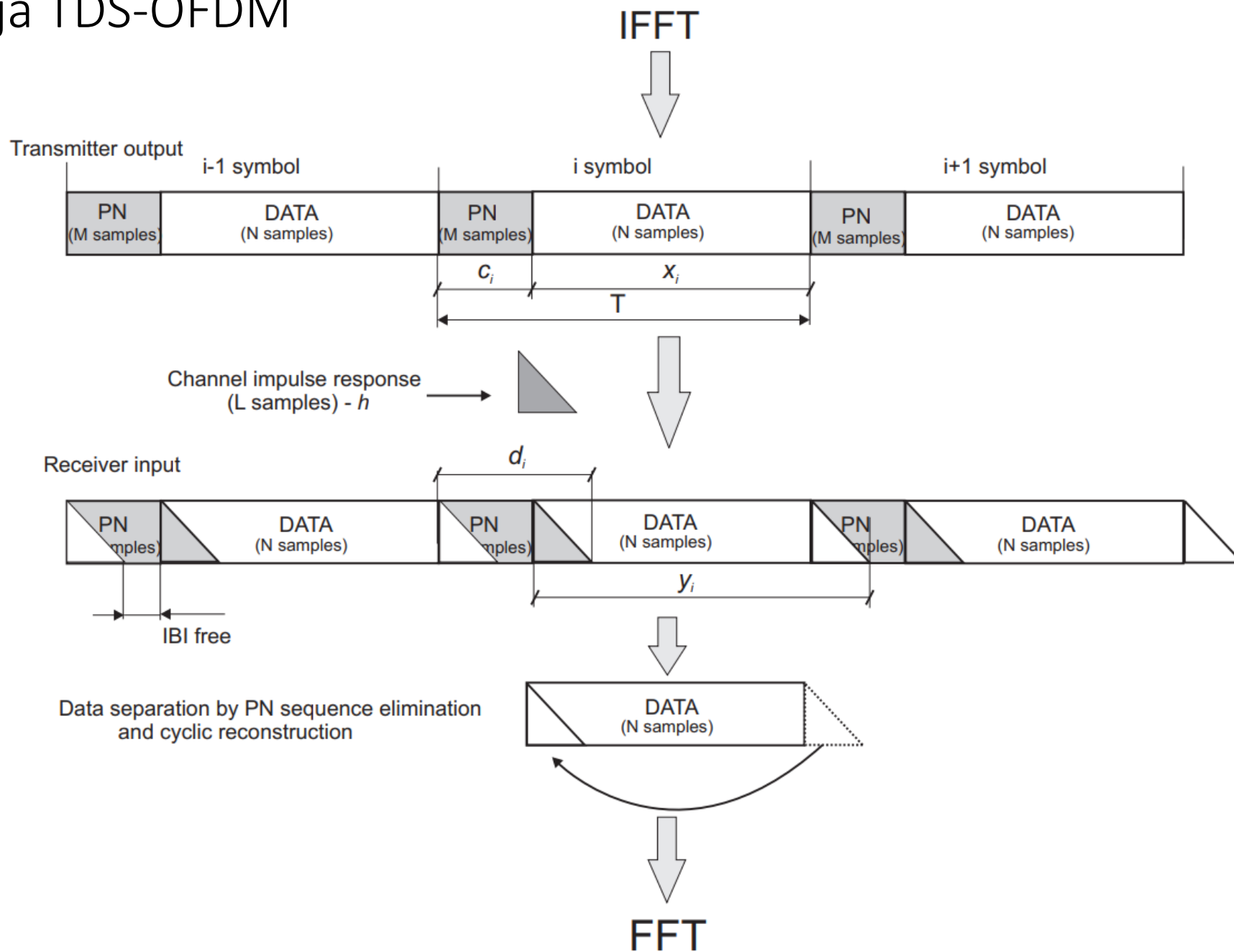
Kanał rzadki – liczba niezerowych współczynników  $S \ll L$

# Algorytm OMP (Orthogonal Matching Pursuit )

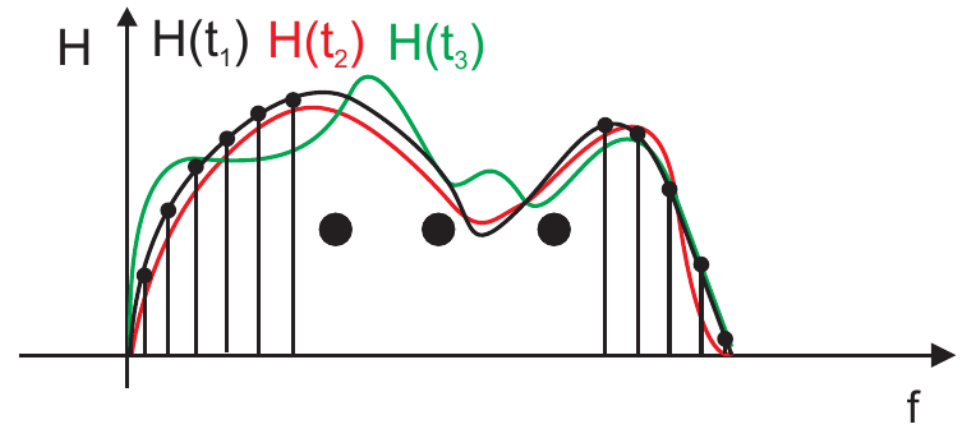
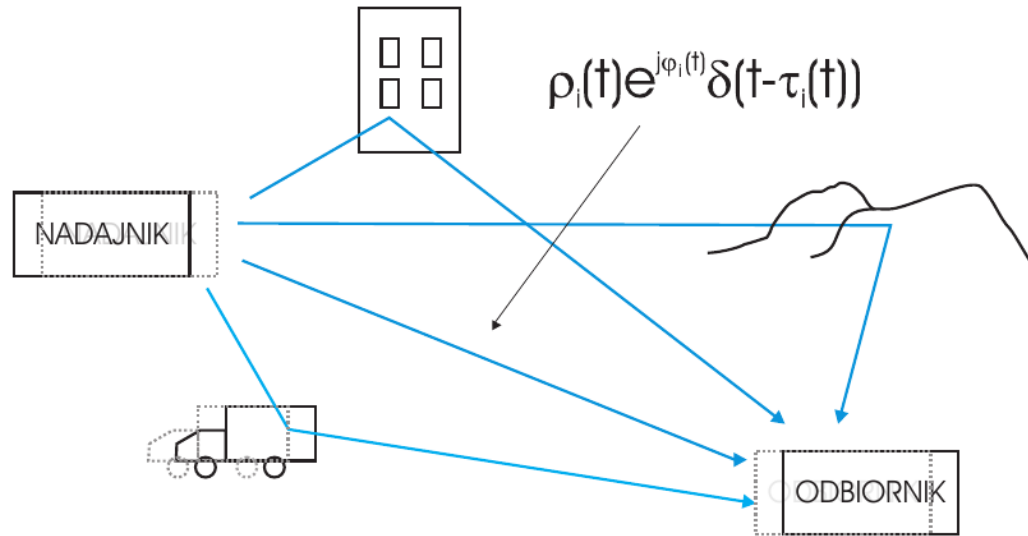
- 1 **Szukane:** sygnał rzadki  $\hat{\mathbf{h}}$
- 2 **Dane:** macierz pomiarowa  $\mathcal{X}$ , pomiary  $\mathbf{y}$
- 3 **Inicjalizacja:**
  - niezerowe indeksy sygnału  $\hat{\mathbf{h}} - \Theta = \emptyset$ ;
  - wektor błędu estymacji  $\mathbf{r} = \mathbf{y}$ ;
  - estymata sygnału rzadkiego -  $\hat{\mathbf{h}} = 0$ ;
- 4  **$i$ -ta pętla iteracji:**
  - iloczyny skalarne  $\mathbf{r}$  z kolumnami macierzy pomiarowej  $\mathcal{X}_{\Omega \setminus \Theta}$ ;
  - wybór indeksu  $k$  kolumny o największej wartości iloczynu skalarnego -  $\Theta \cup \{k\}$ ;
  - $\hat{\mathbf{h}} = (\mathcal{X}_{\Theta}^H \mathcal{X}_{\Theta})^{-1} \mathcal{X}_{\Theta}^H \mathbf{r}$ ;
  - $\mathbf{r} = \mathbf{y} - \mathcal{X}_{\Theta} \hat{\mathbf{h}}$ ;
- 5 **Warunek zakończenia**  
 $i = S$       lub       $\|\mathbf{r}\|_2 < \epsilon$



# Transmisija TDS-OFDM



# Bezprzewodowy kanał dynamiczny



$$\mathbf{h}(t_1) = [h_0(t_1), h_1(t_1), \dots, h_{L-1}(t_1)]$$

$$\mathbf{h}(t_2) = [h_0(t_2), h_1(t_2), \dots, h_{L-1}(t_2)]$$

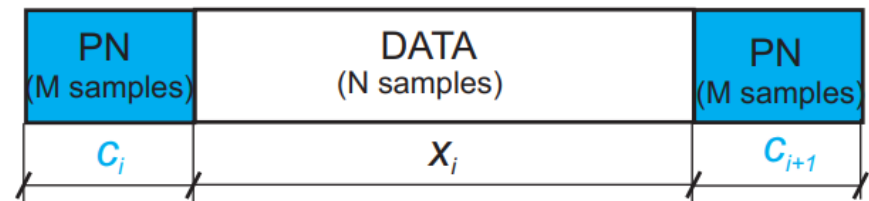
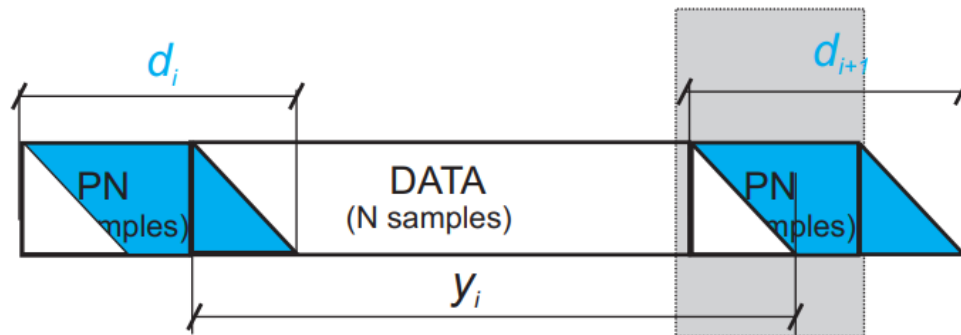
$$\mathbf{h}(t_3) = [h_0(t_3), h_1(t_3), \dots, h_{L-1}(t_3)]$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{0,0} & g_{0,1} & \cdots & g_{0,N-1} \\ g_{1,0} & g_{1,1} & \cdots & g_{1,N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N-1,0} & g_{N-1,1} & \cdots & g_{N-1,N-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = f(\mathbf{h}(t_1), \mathbf{h}(t_2), \dots, \mathbf{h}(t_N))$$

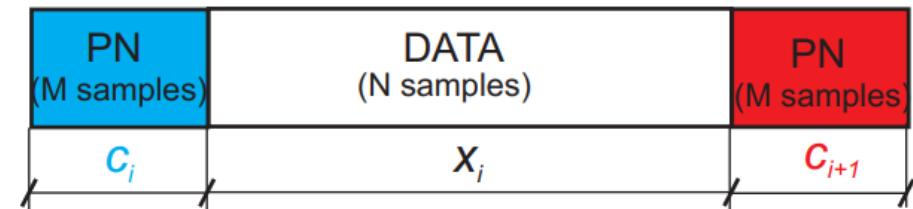
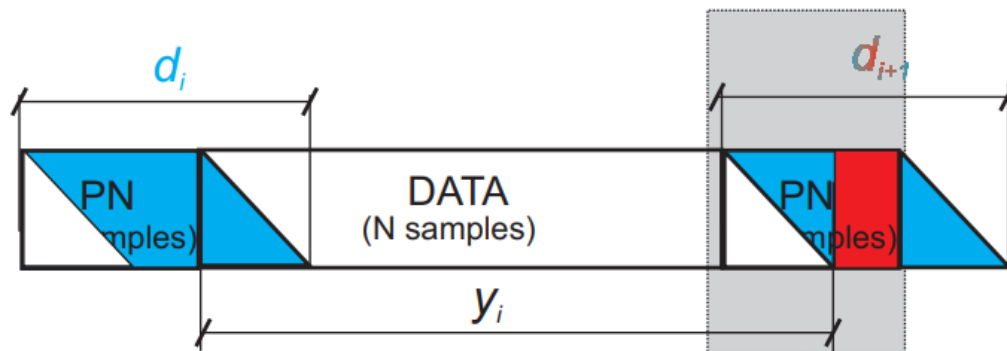
# Odbiór sekwencji treningowej

$$\begin{bmatrix} y_{i,N-1} \\ y_{i,N} + d_{i+1,0} \\ y_{i,N+1} + d_{i+1,1} \\ \vdots \\ y_{i,N+L-1} + d_{i+1,L-1} \\ d_{i+1,L} \\ \vdots \\ d_{i+1,M-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i,N-1} & x_{i,N-2} & \ddots & x_{i,N-L} \\ c_{i+1,0} & x_{i,N-1} & \ddots & x_{i,N-L+1} \\ c_{i+1,1} & c_{i+1,0} & \ddots & x_{i,N-L+2} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \\ c_{i+1,L-1} & c_{i+1,L-2} & \ddots & x_{i,N-1} \\ c_{i+1,L} & c_{i+1,L-1} & \ddots & c_{i+1,0} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \\ c_{i+1,M-1} & c_{i+1,M-2} & \ddots & c_{i+1,M-L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{i+1,0} \\ h_{i+1,1} \\ \vdots \\ h_{i+1,L-1} \end{bmatrix}$$



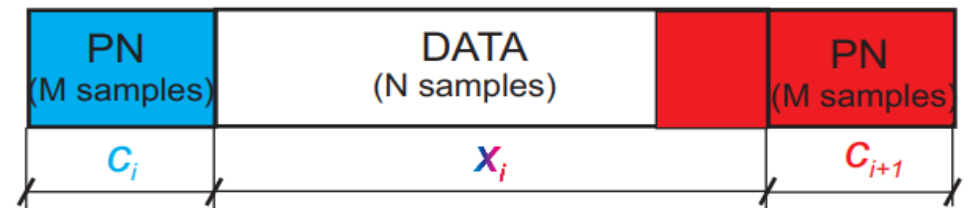
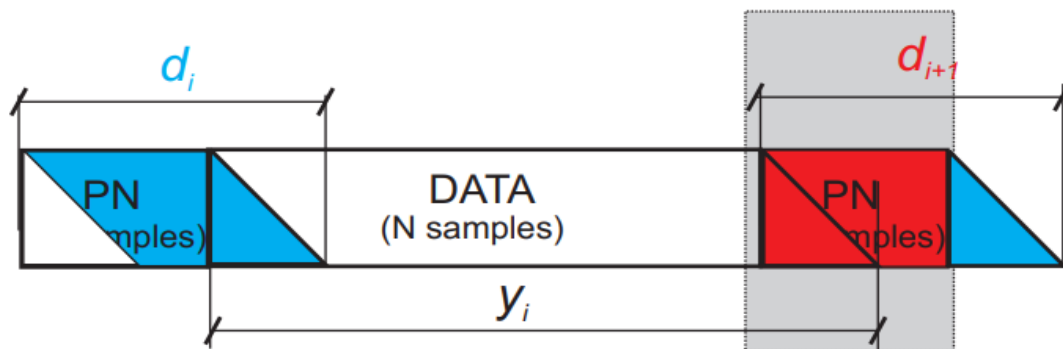
# Wykorzystanie regionu IBI-free

$$\begin{bmatrix}
 y_{i,N-1} \\
 y_{i,N} + d_{i+1,0} \\
 y_{i,N+1} + d_{i+1,1} \\
 \vdots \\
 y_{i,N+L-1} + d_{i+1,L-1} \\
 d_{i+1,L} \\
 \vdots \\
 d_{i+1,M-1}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 x_{i,N-1} & x_{i,N-2} & \cdots & x_{i,N-L} \\
 c_{i+1,0} & x_{i,N-1} & \cdots & x_{i,N-L+1} \\
 c_{i+1,1} & c_{i+1,0} & \cdots & x_{i,N-L+2} \\
 \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \\
 c_{i+1,L-1} & c_{i+1,L-2} & \cdots & x_{i,N-1} \\
 c_{i+1,L} & c_{i+1,L-1} & \cdots & c_{i+1,0} \\
 \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \\
 c_{i+1,M-1} & c_{i+1,M-2} & \cdots & c_{i+1,M-L}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 h_{i+1,0} \\
 h_{i+1,1} \\
 \vdots \\
 h_{i+1,L-1}
 \end{bmatrix}$$

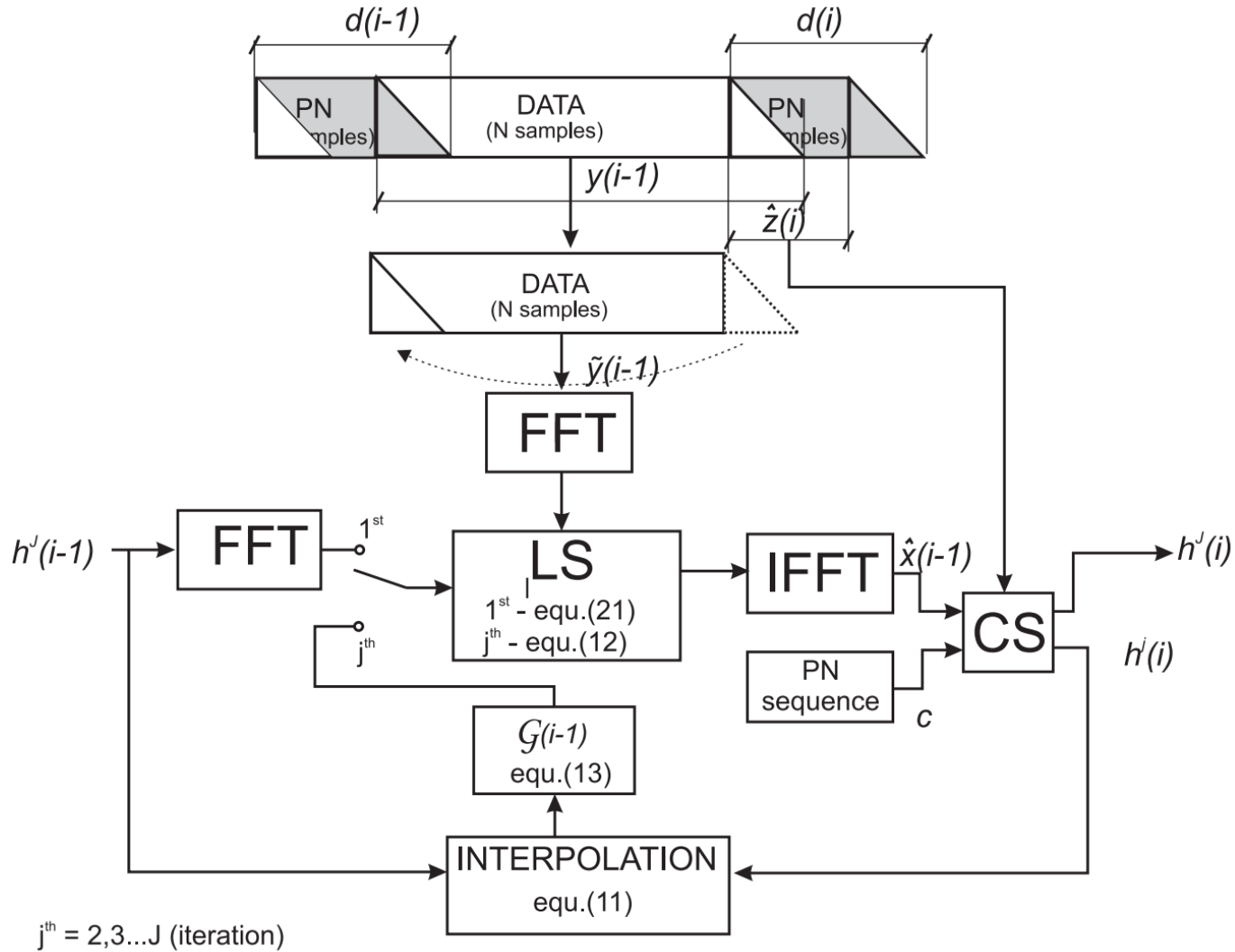


# Wariant rozszerzony

$$\begin{bmatrix}
 y_{i,N-1} \\
 y_{i,N} + d_{i+1,0} \\
 y_{i,N+1} + d_{i+1,1} \\
 \vdots \\
 y_{i,N+L-1} + d_{i+1,L-1} \\
 d_{i+1,L} \\
 \vdots \\
 d_{i+1,M-1}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 x_{i,N-1} & x_{i,N-2} & \ddots & x_{i,N-L} \\
 c_{i+1,0} & x_{i,N-1} & \ddots & x_{i,N-L+1} \\
 c_{i+1,1} & c_{i+1,0} & \ddots & x_{i,N-L+2} \\
 \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \\
 c_{i+1,L-1} & c_{i+1,L-2} & \ddots & x_{i,N-1} \\
 c_{i+1,L} & c_{i+1,L-1} & \ddots & c_{i+1,0} \\
 \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \\
 c_{i+1,M-1} & c_{i+1,M-2} & \ddots & c_{i,M-L}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 h_{i+1,0} \\
 h_{i+1,1} \\
 \vdots \\
 h_{i+1,L-1}
 \end{bmatrix}$$



# Algorytm iteracyjnej rekonstrukcji kanału

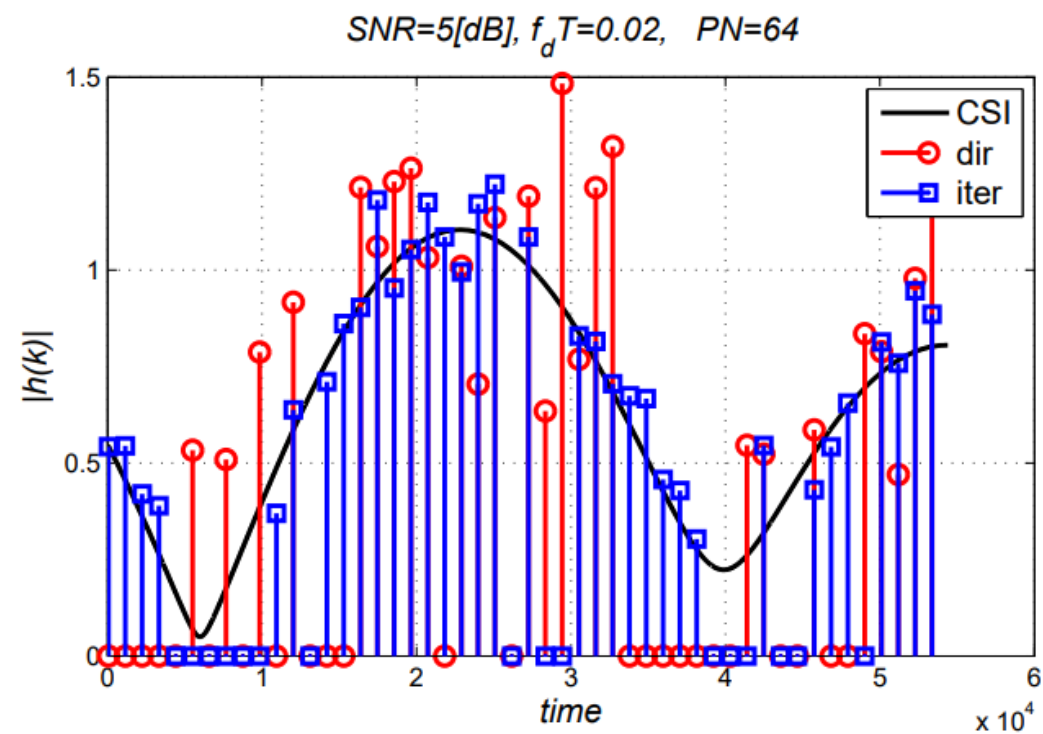
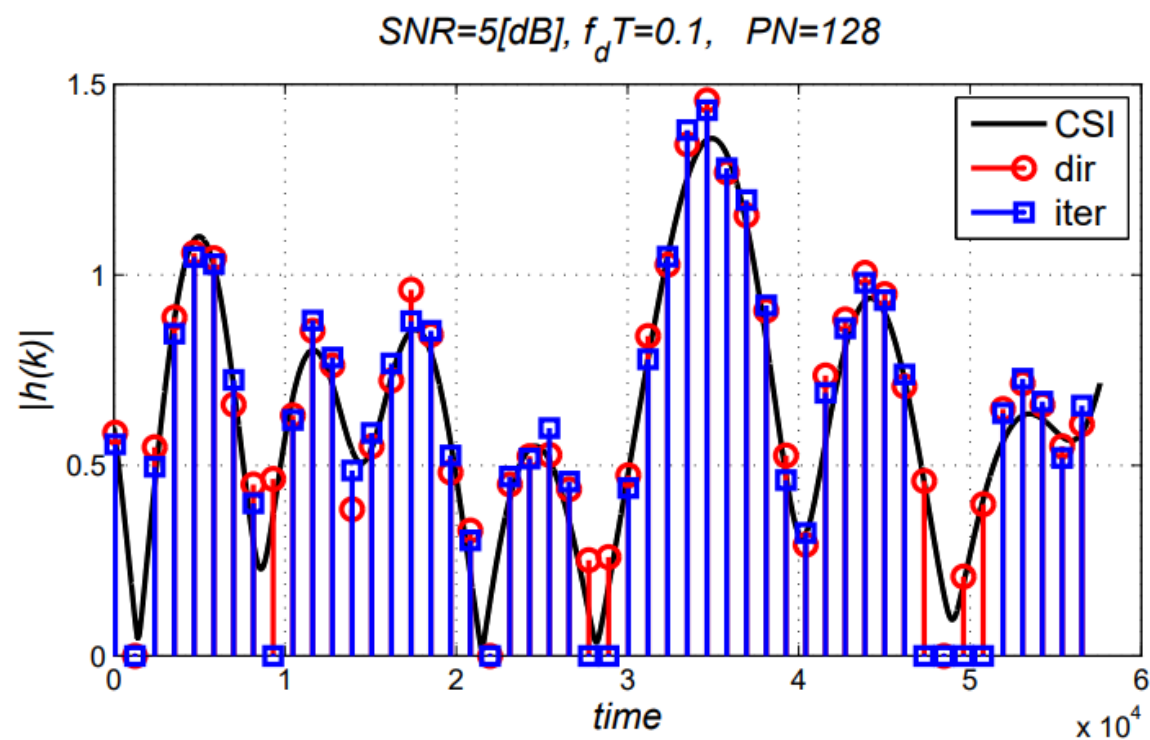


$$h(i)_{l,k} = \frac{h(i+1)_l - h(i)_l}{N}k + h(i)_l, \quad \text{for } k = 0 \dots N-1 \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(i) = \text{IFFT} \left\{ \mathcal{Q} \left[ \mathcal{G}(i)^{-1} \text{FFT} \{ \tilde{\mathbf{y}}(i) \} \right] \right\}, \quad (12)$$

$$g(i)_{p,q} = \sum_l \left( \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} h(i)_{l,n} e^{-j2\pi \frac{p-q}{N} n} \right) e^{-j2\pi q \tau_l}, \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{x}}^{(1)}(i-1) = \text{IFFT} \left\{ \mathcal{Q} \left[ \frac{\text{FFT} \{ \tilde{\mathbf{y}}(i) \}}{\text{FFT} \{ \mathbf{h}^0(i) \}} \right] \right\}, \quad (21)$$

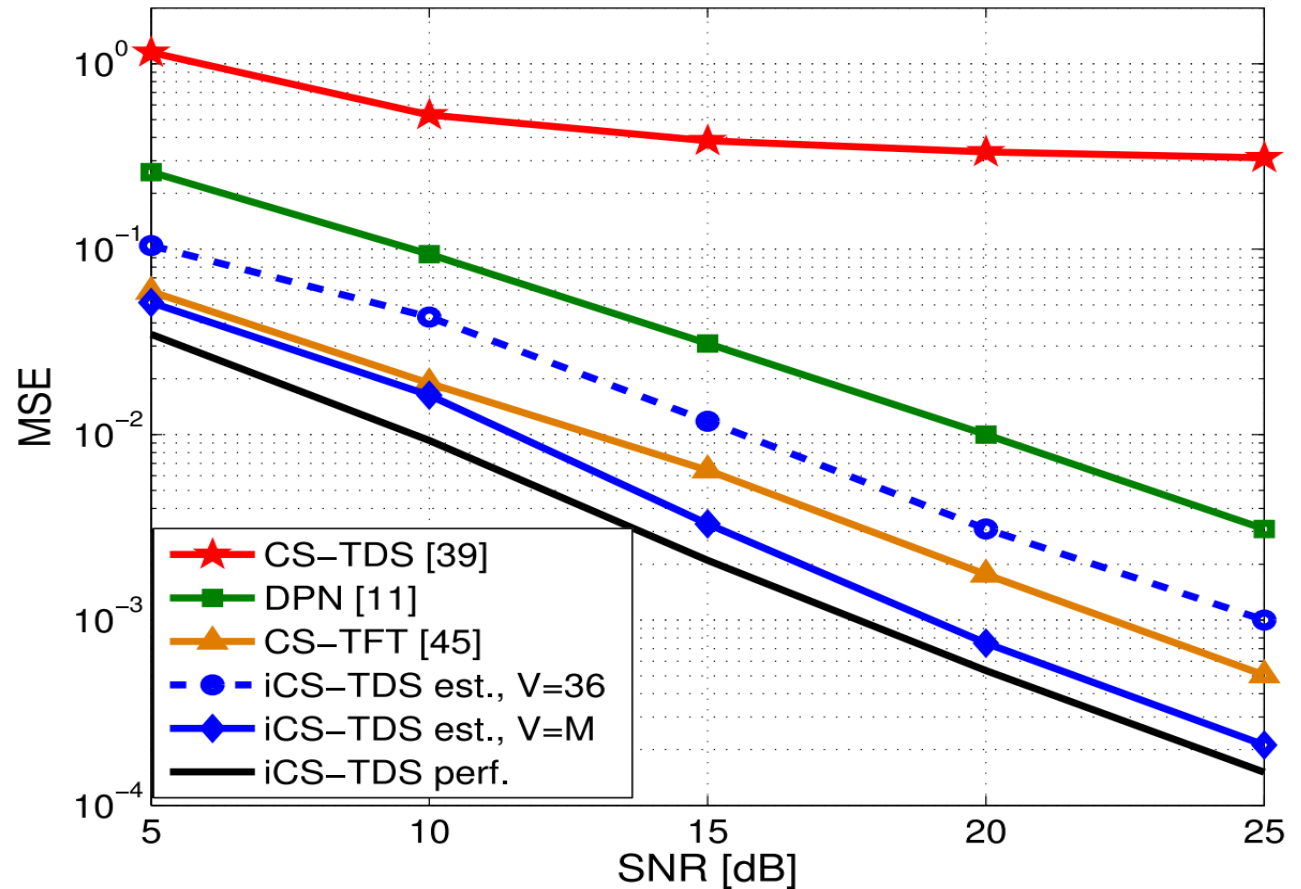


**Rysunek:** Zmienność amplitudy wybranej ścieżki propagacji w zależności od własności kanału i długości sekwencji treningowej.

# Wyniki, porównanie

TABLE I  
AVERAGE PATH GAINS

Path Index	Generated Channels [dB]	SARFT-8 Channel Model [dB]
1	-18	-18
2	0.3	0
3	-19.8	-20
4	-20.3	-20
5	-9.8	-10
6	-0.2	0



G. Dziwoki and J. Izydorczyk, "Iterative Identification of Sparse Mobile Channels for TDS-OFDM Systems," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 62, no. 2, pp. 384-397, June 2016, doi: 10.1109/TBC.2016.2529288.



# Kanał o kompresowalnej charakterystyce odpowiedzi impulsowej

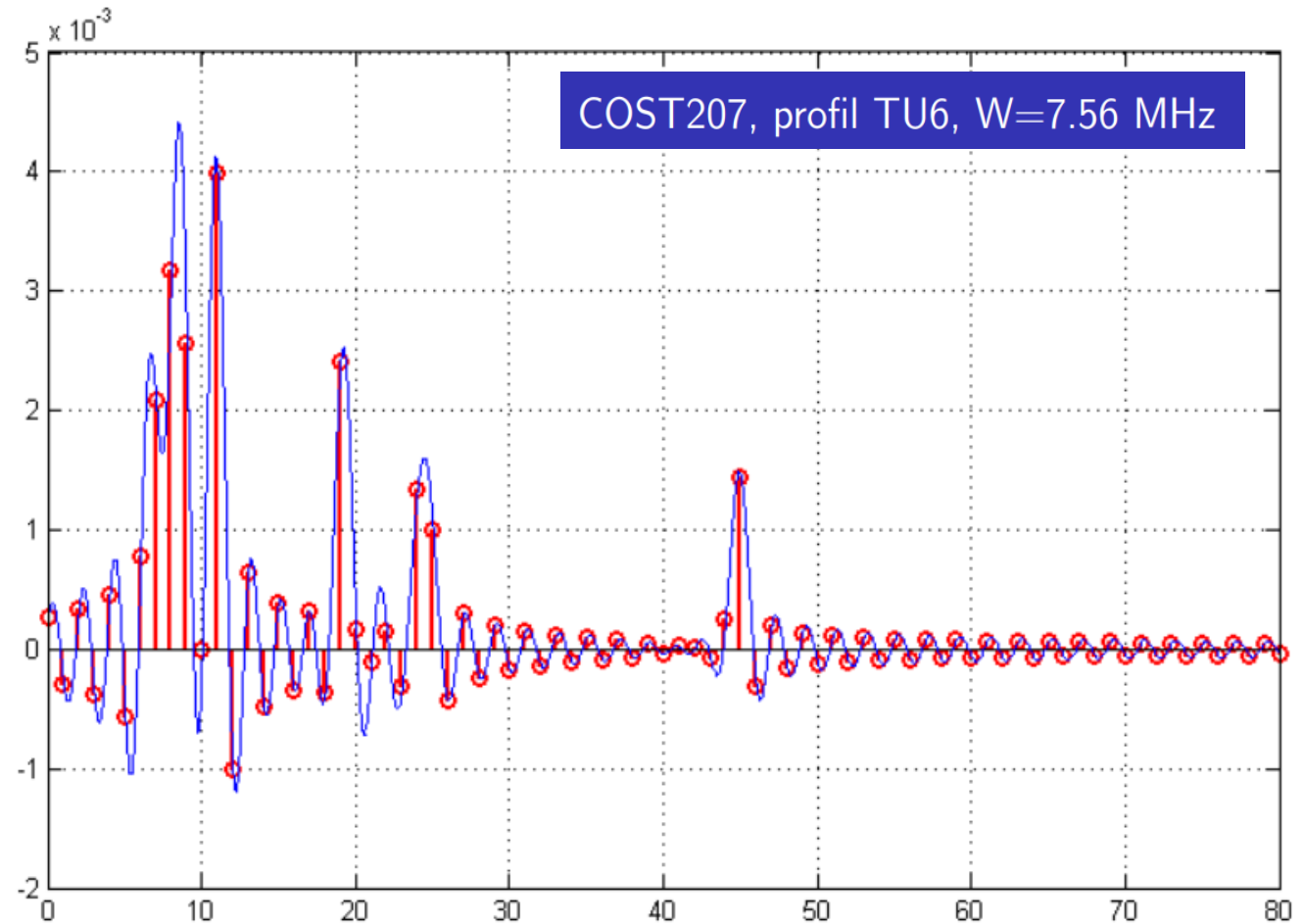
- rezultat splotu charakterystyki ścieżek propagacji z wypadkową odpowiedzią impulsową liniowych bloków przetwarzania nadajnika i odbiornika (dopasowanie do pasma częstotliwości)

$$h_k = \sum_{l=1}^L a_l g(kT_s - \tau_l) \text{ for } k \in \{0, 1, 2, \dots, K - 1\}$$

- sygnał odbierany na wyjściu kanału

$$\mathbf{y} = \mathcal{X}\mathcal{G}\mathbf{a} + \mathbf{e},$$

- macierz  $\mathcal{G}$  to macierz splotowa odpowiedzi impulsowej systemu o rozmiarach  $K \times mK$ , gdzie  $m$  to współczynnik nadpróbkowania;
- problem dużej złożoności obliczeniowej podczas wyszukiwania ścieżek w algorytmie CS;



# Algorytm sukcesywnej aproksymacji

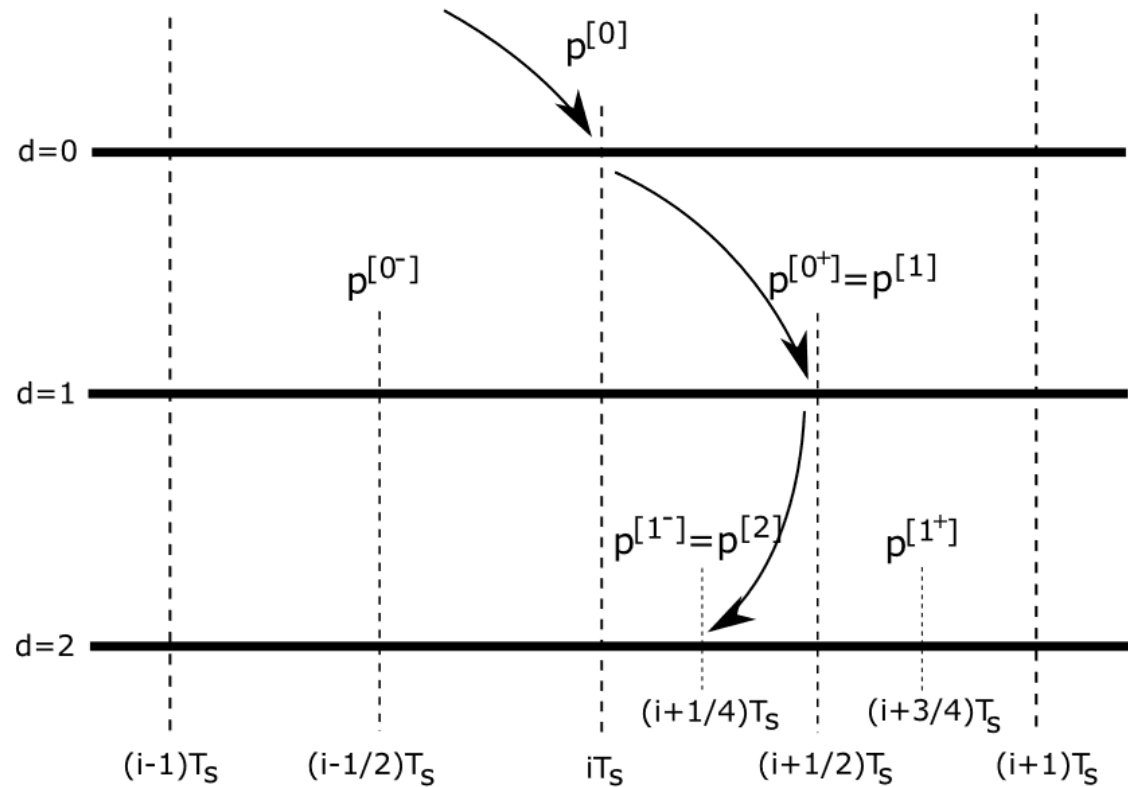


TABLE I  
COMPLEXITY COMPARISON OF THE SELECTION STAGE IN TERMS OF THE  
INNER PRODUCT COMPUTATIONS FOR THE TARGET RESOLUTION  $T_s/m$   
AT  $j$ -TH ITERATION LOOP

classic implementation	SDA modification
$mK - j$	$K - j + 2 \log_2 m$

G. Dziwoki and M. Kucharczyk, "Reconstruction of Sparse Propagation Environment With Complexity Reduced OMP Algorithm," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 8, no. 6, pp. 1559-1562, Dec. 2019, doi: 10.1109/LWC.2019.2927336.

## Analiza kryterium zatrzymania algorytmu OMP (sygnały rzadkie)

- zatrzymanie po ustalonej liczbie iteracji

$$i = S$$

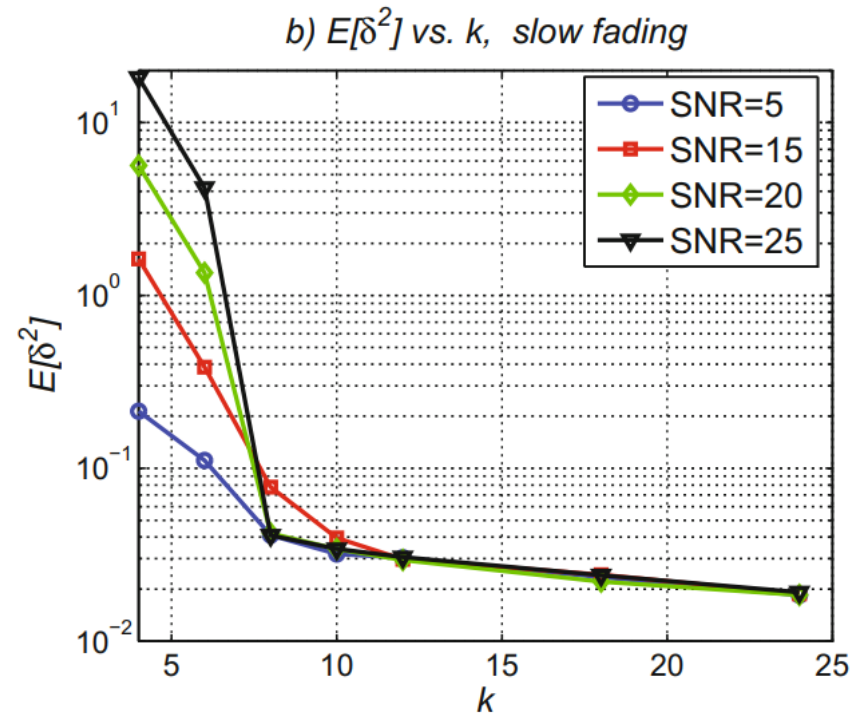
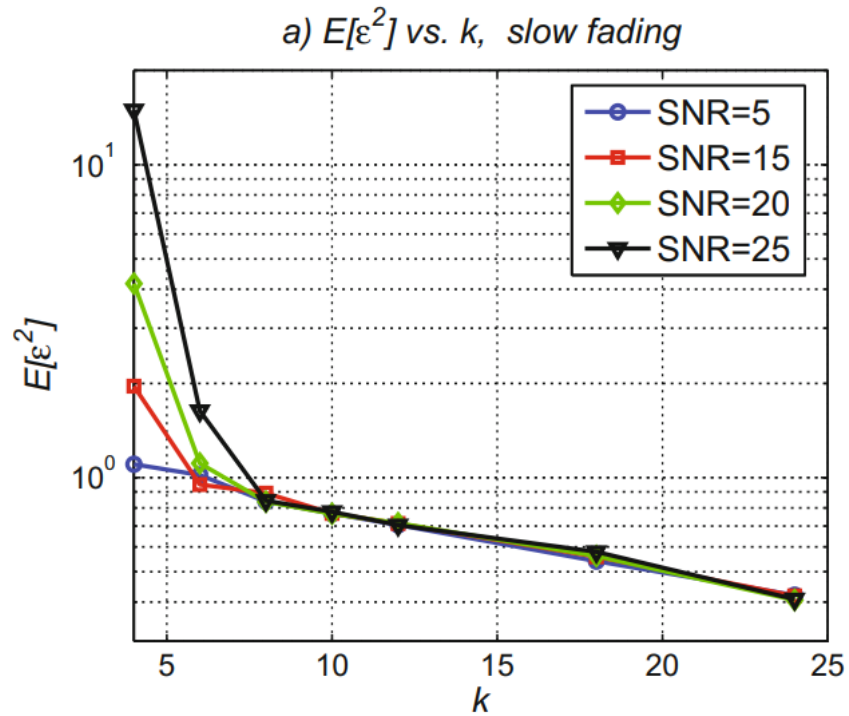
- gdy spełnione jest kryterium energetyczne dla błędu resztkowego

$$\|\mathbf{r}_i\|_2^2 < \epsilon_1$$

- gdy spełnione jest kryterium energetyczne dla różnicy błędów resztkowych

$$\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1}\|_2^2 < \epsilon_2$$

# Analiza kryterium zatrzymania algorytmu OMP (sygnały rzadkie)



$$\text{OFF if } \begin{cases} k > 2S, & \text{any } \mathbb{E}[\varepsilon^2], \mathbb{E}[\delta^2] \\ \mathbb{E}[\varepsilon^2] < m\sigma^2, & \text{any } \mathbb{E}[\delta^2] \\ \mathbb{E}[\delta^2] < 0.1m\sigma^2, & \sigma^2 < \mathbb{E}[\varepsilon^2] < 2\sigma^2 \end{cases} .$$

## Uśrednione własności błędu resztkowego $\mathbf{r}$

- znormalizowana wartość oczekiwana błędu resztkowego dla idealnej rekonstrukcji sygnału rzadkiego

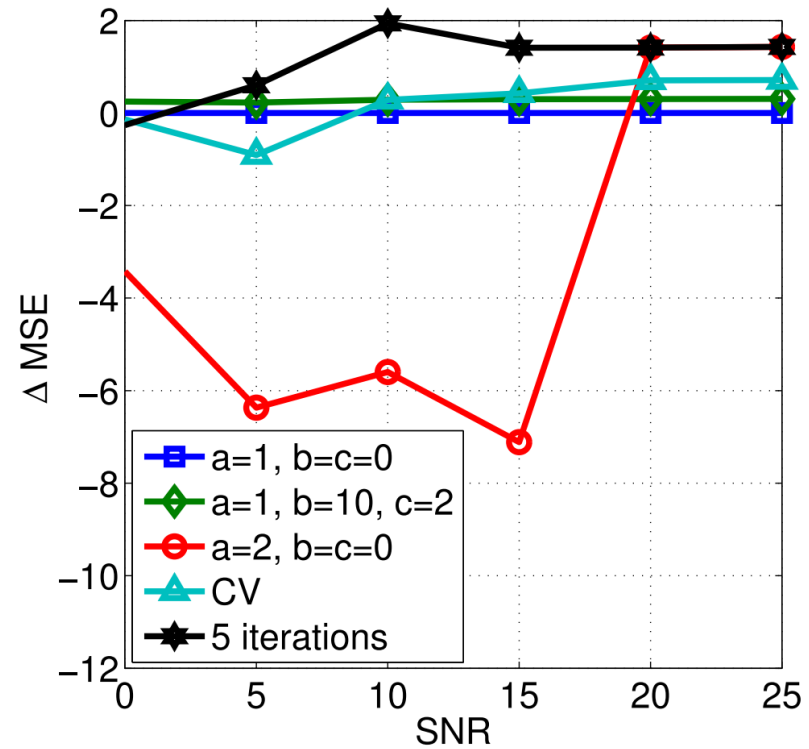
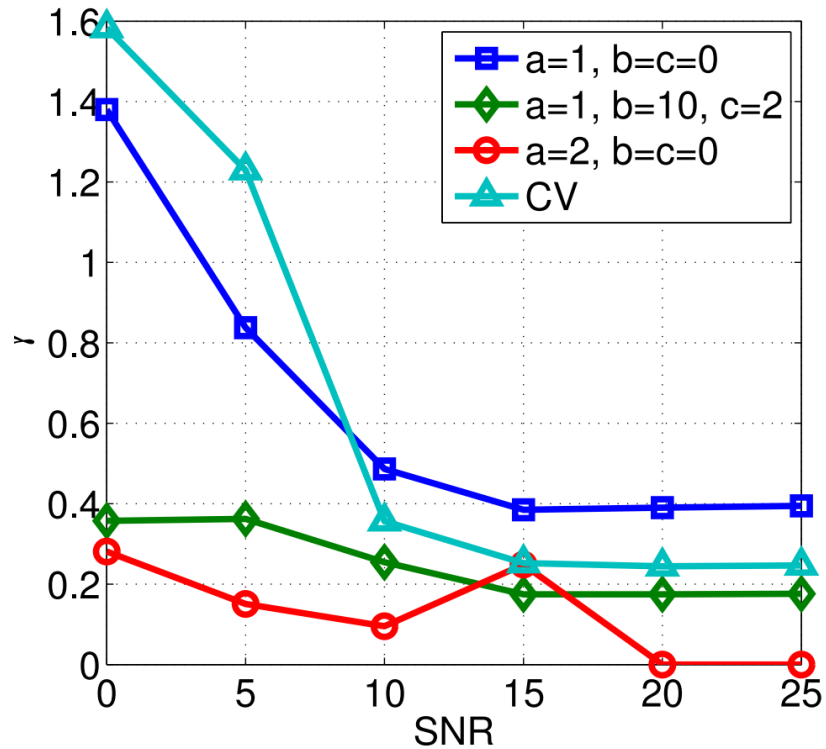
$$\frac{\mathbf{E} [\|\mathbf{r}^{(S)}\|_2^2]}{M\sigma^2} = 1 - \frac{S}{M}.$$

- znormalizowana wartość oczekiwana różnicy błędów resztkowych  $\mathbf{d}^{(k)} = \mathbf{r}^{(k)} - \mathbf{r}^{(k-1)}$  dla idealnej rekonstrukcji sygnału rzadkiego

$$\frac{\mathbf{E} [\|\mathbf{d}^{(S+1)}\|_2^2]}{M\sigma^2} = \frac{1}{M}.$$

# Kryterium zatrzymania

$$\text{STOP if } \begin{cases} k > S_{\max}, & \text{any } \|\mathbf{r}^{(k)}\|_2^2, \|\mathbf{d}^{(k)}\|_2^2 \\ \|\mathbf{r}^{(k)}\|_2^2 < aM\sigma^2, & \text{any } \|\mathbf{d}^{(k)}\|_2^2 \\ \|\mathbf{d}^{(k)}\|_2^2 < b\sigma^2, & aM\sigma^2 \leq \|\mathbf{r}^{(k)}\|_2^2 < caM\sigma^2 \end{cases}$$

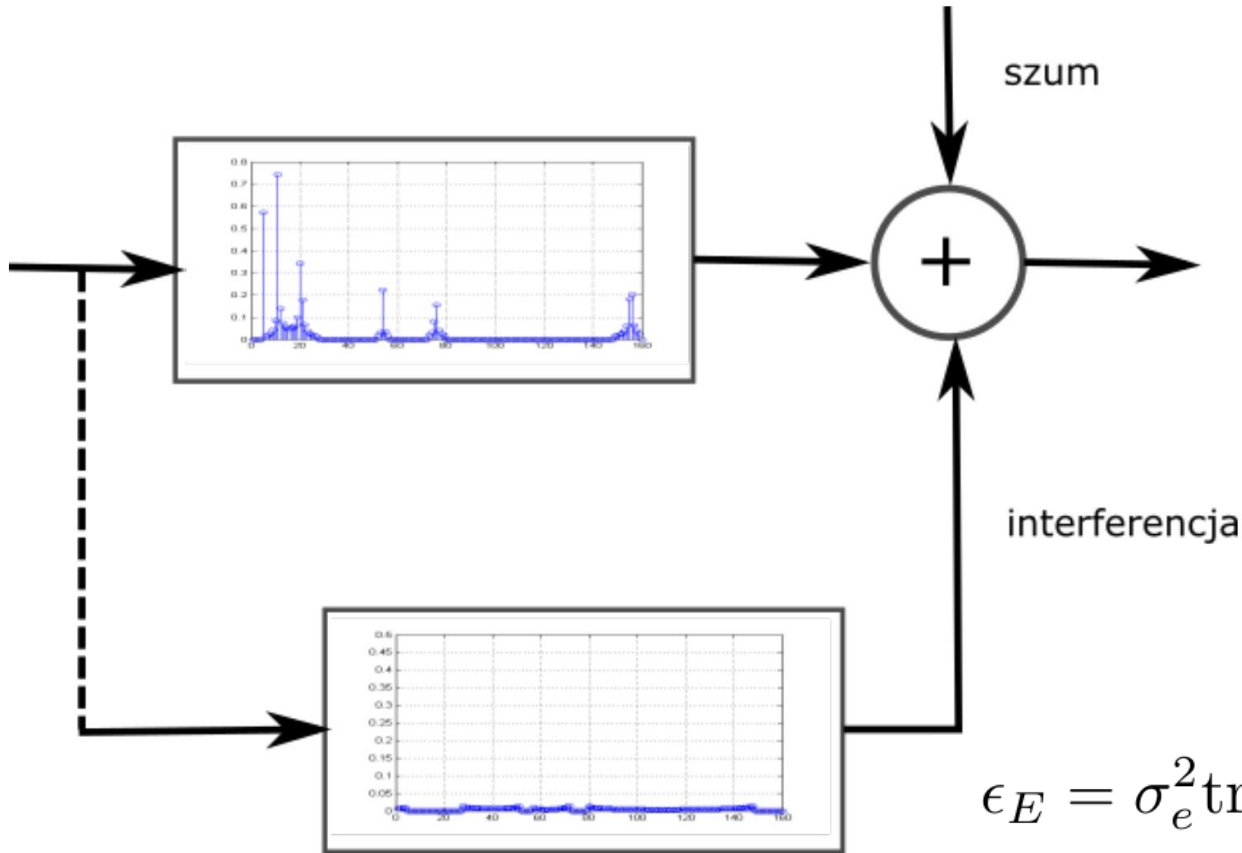


G. Dziwoki, "Averaged Properties of the Residual Error in Sparse Signal Reconstruction," in IEEE Signal Processing Letters, vol. 23, no. 9, pp. 1170-1173, Sept. 2016, doi: 10.1109/LSP.2016.2588728.

## Analiza bezpośredniej rekonstrukcji odpowiedzi impulsowej kanału kompresowalnego algorytmem OMP

- Rzadkość dla sygnałów kompresowalnych nie może być zdefiniowana – wszystkie współczynniki są niezerowe;
- Próba doboru odpowiedniej liczby rekonstruowanych współczynników kanału w zależności od przyjętego kryterium jakości – zastosowano błąd średniokwadratowy;
- W badaniach przyjęto kolejność wykrywania indeksów rekonstruowanych współczynników, od współczynnika o najwyższej amplitudzie do amplitudy najniższej;
- Nie założono charakterystyki zmienności amplitud współczynników kanału

# Struktura błędu średniokwadratowego



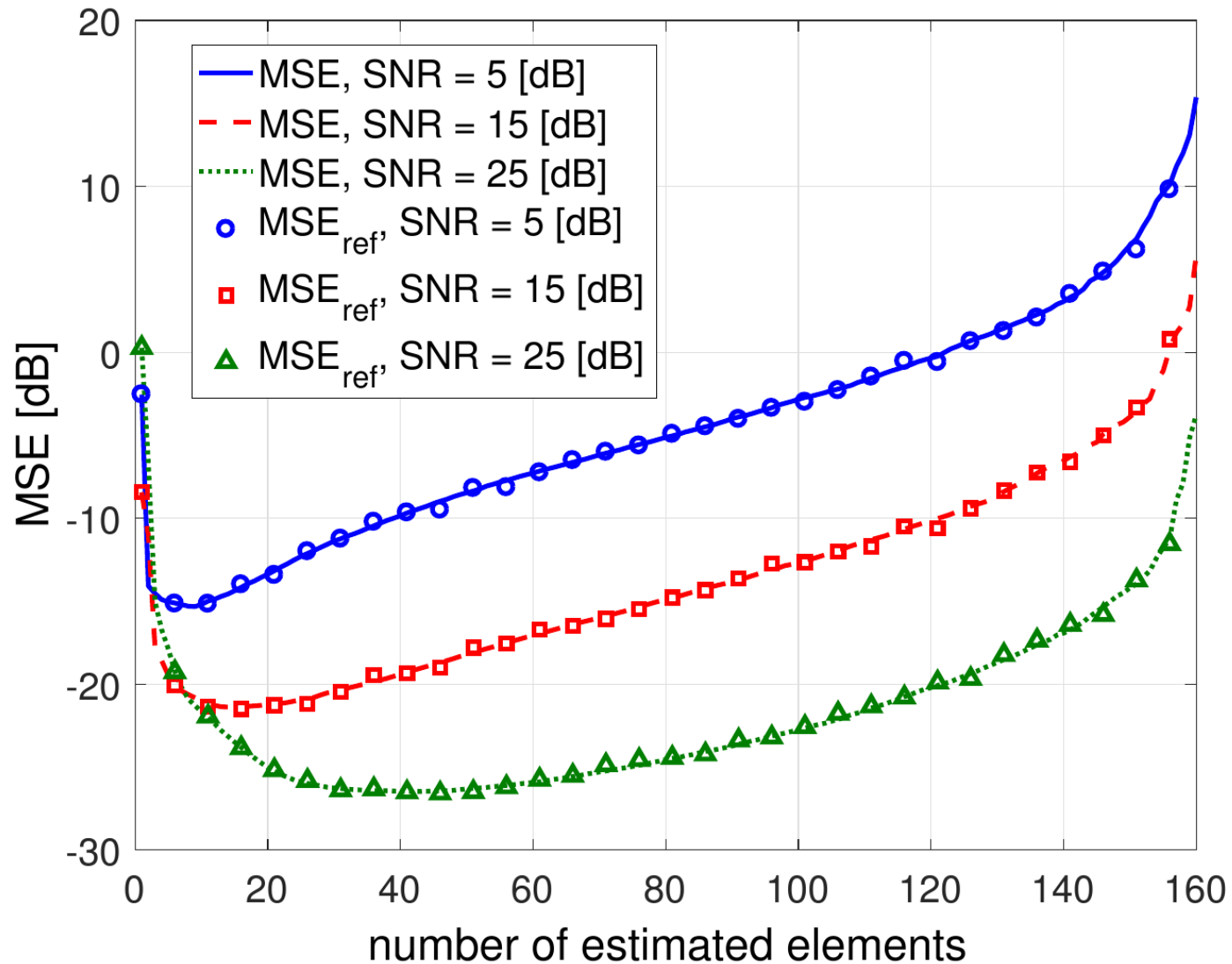
$$\text{MSE} = \mathbf{E} \left[ \|\hat{\mathbf{h}}(E, A)|_{T_{\hat{h}}} - \mathbf{h}\|_2^2 \right] = \epsilon_E + \epsilon_A$$

$$\epsilon_A = \|\mathbf{h}_{T'_{\hat{h}}}\|_2^2,$$

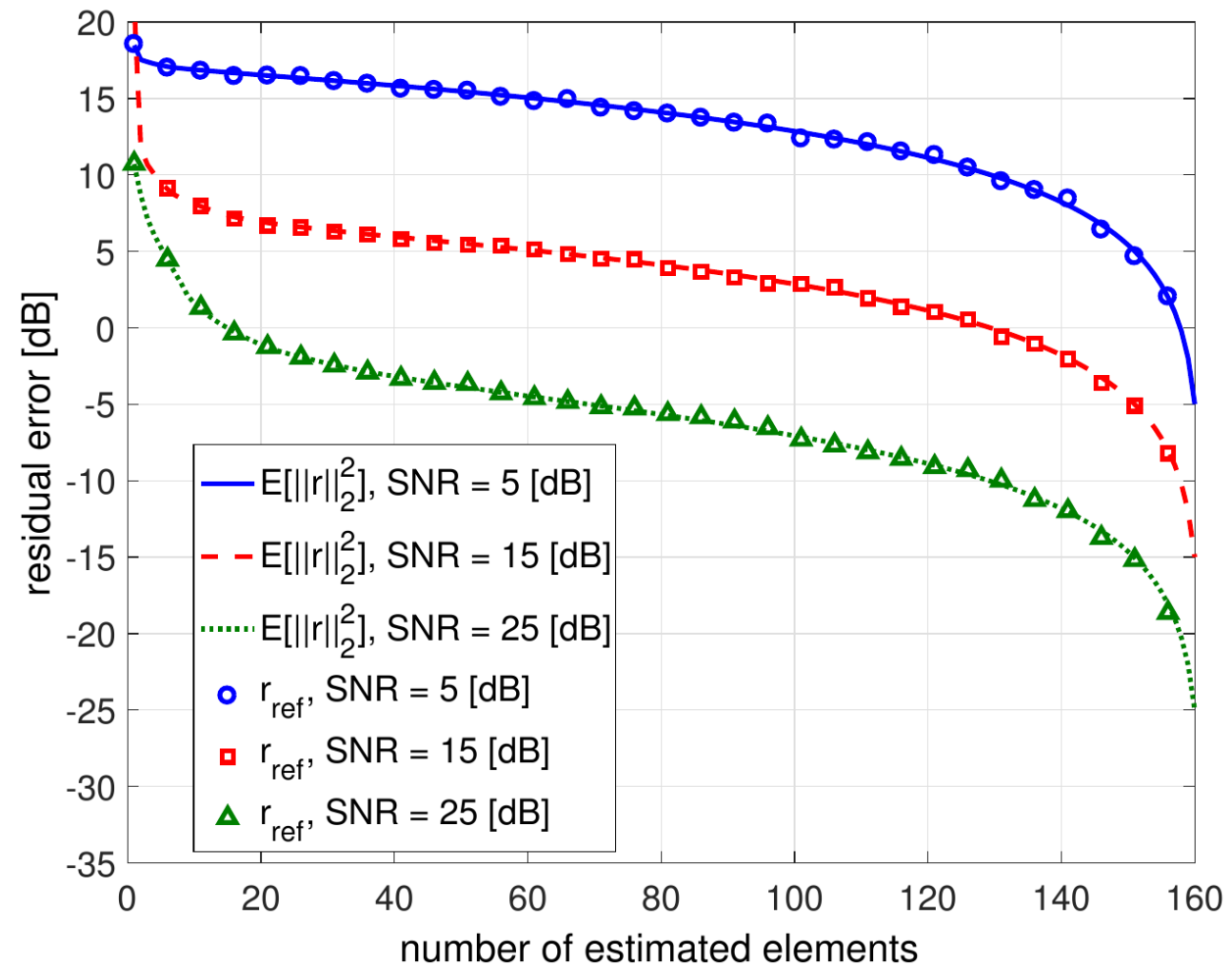
$$\epsilon_E = \sigma_e^2 \text{trace}\{(\mathcal{X}_{T_{\hat{x}}}^H \mathcal{X}_{T_{\hat{x}}})^{-1}\} + \sigma_a^2 \epsilon_A \text{trace}\{(\mathcal{X}_{T_{\hat{x}}}^H \mathcal{X}_{T_{\hat{x}}})^{-1}\}$$



# Struktura błędu średniokwadratowego - porównanie

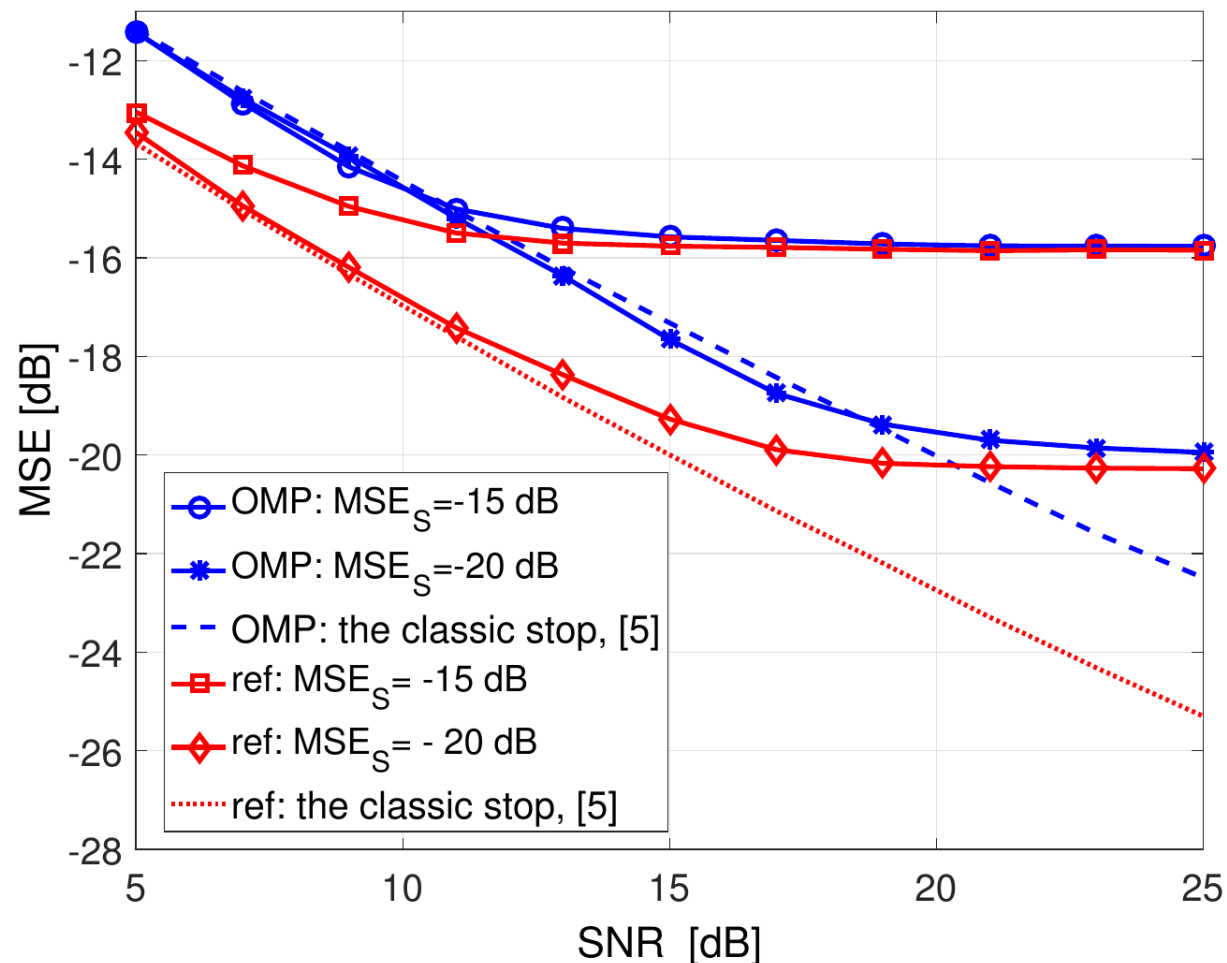


# Błąd resztkowy



$$\mathbf{E} \left[ \left\| \mathbf{r}(E, A)_{T_{\hat{h}}} \right\|_2^2 \right] = (M - |T_{\hat{h}}|)(\sigma_e^2 + \sigma_a^2 \epsilon_A).$$

# Kryterium zatrzymania w funkcji MSE

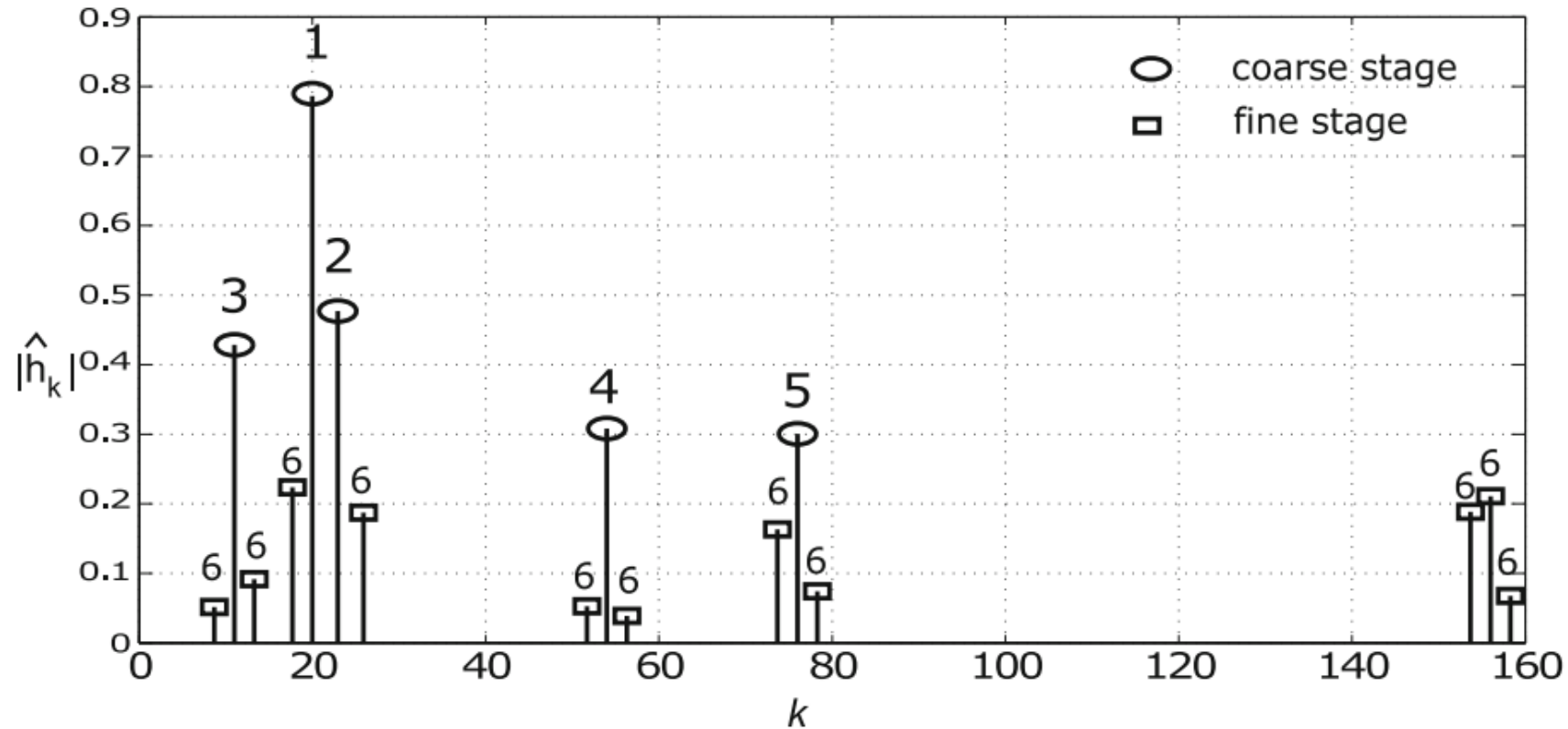


$$\| \mathbf{r}^{(i)} \|_2^2 < \Gamma_S$$

$$\Gamma_S = (M - |T_{\hat{h}}|)\sigma_e^2 + (M - |T_{\hat{h}}|)\sigma_e^2 \frac{\text{SNR} \cdot \text{MSE}_S - \sigma_a^2 \text{trace}\{(\mathcal{X}_{T_{\hat{h}}}^H \mathcal{X}_{T_{\hat{h}}})^{-1}\}}{\sigma_a^2 \text{trace}\{(\mathcal{X}_{T_{\hat{h}}}^H \mathcal{X}_{T_{\hat{h}}})^{-1}\} + 1},$$

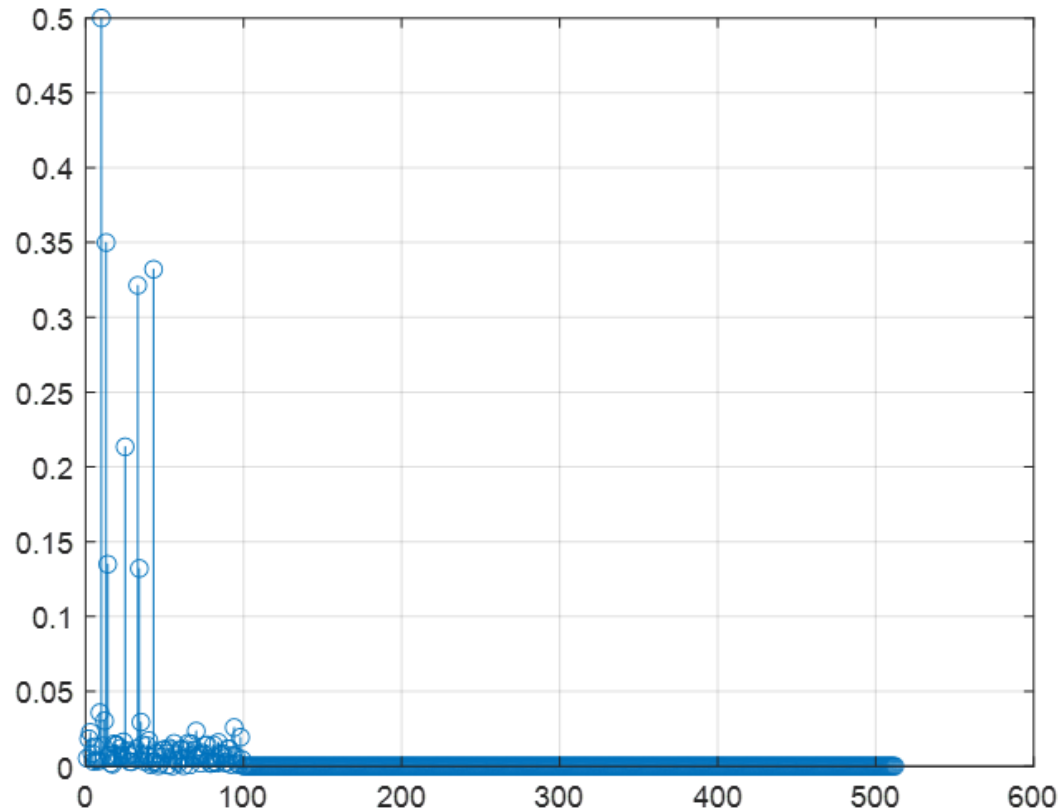
Dziwoki, G., Kucharczyk, M. On a Sparse Approximation of Compressible Signals. Circuits Syst Signal Process 39, 2232–2243 (2020).

# Modyfikacja OMP dla kanałów kompresowalnych



Dziwoki, G., Kucharczyk, M., Izydorczyk, J. (2018). Modified OMP Algorithm for Compressible Channel Impulse Response Estimation. In: Gaj, P., Sawicki, M., Suchacka, G., Kwiecień, A. (eds) Computer Networks. CN 2018. Communications in Computer and Information Science, vol 860. Springer

# Grupowa selekcja współczynników odpowiedzi impulsowej kanału



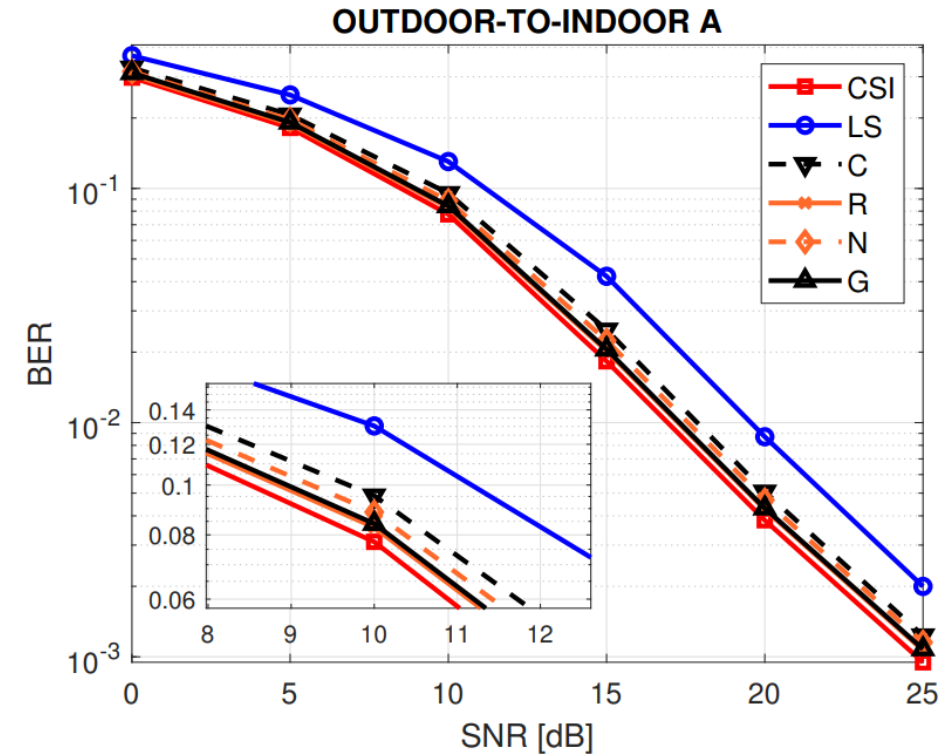
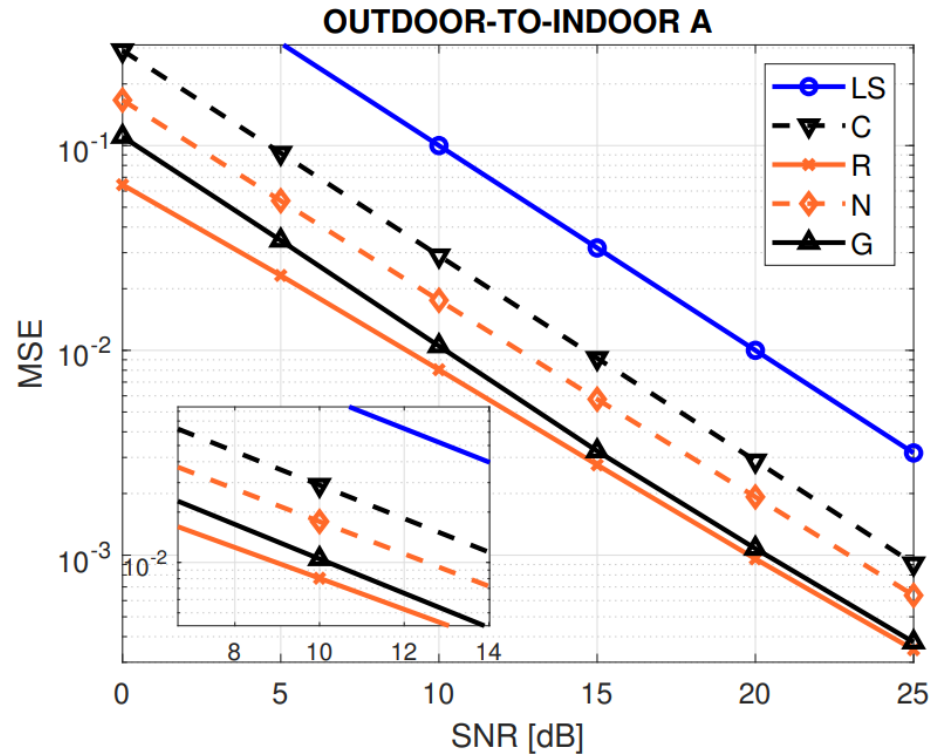
- wstępna filtracja estymowanych współczynników odpowiedzi impulsowej za pomocą filtru średniej kroczącej
- Wybór tych współczynników „n” dla których wynik filtracji spełnia kryterium

$$\sum_{i=n}^{(n+U-1) \bmod N} |\hat{\mathbf{h}}_C(i)|^2 \geq \beta$$

$$\beta = 2U\sigma_W^2.$$

$$U = \min_{u \in \mathcal{N}} (u \mid M\sigma_W^2 \geq \sum_{i=1}^{M-u} |\hat{\mathbf{h}}_C(m(i))|^2 \wedge m \in \mathbb{U}') )$$

# Grupowa selekcja współczynników odpowiedzi impulsowej kanału



Dziwoki G, Kucharczyk M. Estimation of Compressible Channel Impulse Response for OFDM Modulated Transmissions. *Electronics*. 2021; 10(22):2781

## Podsumowanie:

- algorytm iteracyjnej identyfikacji kanału o zmiennej odpowiedzi impulsowej;
- algorytm iteracyjnego przybliżania opóźnień ścieżek propagacji poprzez zastosowanie nadpróbkowania;
- analizę błędów resztkowych w procesie rekonstrukcji kanału rzadkiego i kompresowalnego;
- kryterium zatrzymania algorytmu OMP w zależności od zakładanego błędu średniokwadratowego estymowanego sygnału;
- zmodyfikowany algorytm OMP dla kanałów kompresowalnych;
- reguły grupowej selekcji współczynników odpowiedzi impulsowej dla rekonstrukcji z wykorzystaniem metody LS