

Filtracja odebranego sygnału przekształconego do postaci cepstralnej jako metoda redukcji efektu wielodrogowości w kanale radiowym

Streszczenie. W artykule zaprezentowano metodę redukcji replik sygnału wywołanych wielodrogowością w kanale radiowym. Metoda ta polega na filtracji odebranego sygnału po przekształceniu do postaci cepstralnej. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych z użyciem sygnałów emitowanych w rzeczywistym środowisku propagacyjnym w paśmie ISM 2,4 GHz.

Abstract. A method of the reduction of multipath effect in the radio channel is presented. This method consist in filtering the received signal transformed to the cepstrum form. Results of the simulation experiments with the use of signals emitted in real propagation environment in the 2.4 GHz ISM band are shown. (Filtration of the received signal transformed to cepstrum as a method of the reduction of multipath effect in a radio channel).

Słowa kluczowe: cepstrum, odpowiedź impulsowa kanału, wielodrogowa propagacja.

Keywords: cepstrum, channel impulse response, multipath propagation.

Wstęp

Propagacja wielodrogowa jest nieuniknionym zjawiskiem występującym w systemach radiokomunikacyjnych. Zjawisko to jest szczególnie istotne, gdy mamy do czynienia z propagacją w warunkach NLOS (ang. non-line-of-sight), czyli przy braku bezpośredniej widoczności między antenami nadawczą i odbiorczą [4, 11]. Sygnał przesyłany przez kanał radiokomunikacyjny można przedstawić przy pomocy zależności

$$(1) \quad s(t) = a(t) \exp\{j[2\pi f_0 t + \varphi(t)]\} = \tilde{a}(t) \exp(j2\pi f_0 t)$$

gdzie: $a(t)$ - amplituda sygnału, f_0 - częstotliwość nośna, $\varphi(t)$ - faza sygnału, $\tilde{a}(t) = a(t) \exp[j\varphi(t)]$ - amplituda zespolona.

Dla propagacji wielodrogowej sygnał odebrany jest określony zależnością

$$(2) \quad y(t) = \sum_n \beta_n(t) s[t - \tau_n(t)] = \sum_n \beta_n(t) \exp\{j2\pi f_0 [t - \tau_n(t)]\} \tilde{a}[t - \tau_n(t)]$$

gdzie: $\beta_n(t)$ - współczynnik tłumienia sygnału n -tej drogi propagacyjnej, $\tau_n(t)$ - opóźnienie propagacyjne n -tej drogi.

Wielodrogowość może być przyczyną błędów międzysymbolowych szczególnie, gdy opóźnienia replik są większe niż czas trwania symbolu. Wobec powyższego redukcja replik emitowanego sygnału może powodować poprawę jakości transmisji danych.

Opis metody badawczej

Istotą przeprowadzonych badań była znajomość postaci odpowiedzi impulsowej kanału radiowego, czyli znajomość opóźnień pomiędzy kolejnymi replikami nadanego sygnału docierającymi do odbiornika. Wobec powyższego można wyznaczyć składowe cepstrum, które są wynikiem opóźnionych replik odbieranego sygnału. Zgodnie z analizą przedstawioną w [1, 2, 3] cepstrum stanowi następujące przekształcenie

$$(3) \quad C(y(n)) = F^{-1}\left(\ln\left(F(y(n))\right)\right)$$

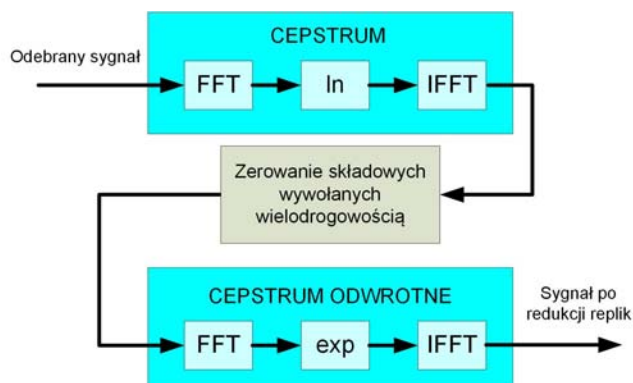
gdzie: F - transformata Fouriera, F^{-1} - odwrotna transformata Fouriera. Cepstrum jest przedstawieniem

sygnału w dziedzinie czasu ale w skali nieliniowej i powszechnie określanej jako quefreny. Transformacja cepstrum jest odwracalna, zatem istnieje możliwość odtworzenia oryginalnego sygnału na podstawie przekształcenia:

$$(4) \quad y(n) = C^{-1}\left(C(y(n))\right) = F^{-1}\left(\exp\left(F\left(C(y(n))\right)\right)\right)$$

Na rysunku 1 przedstawiono schemat przetwarzania sygnału umożliwiającą analizę cepstralną oraz powrót do dziedziny czasu, odtworzenie sygnału po filtracji w cepstrum.

Cepstrum zawiera składowe związane z sygnałem nadanym wolnym od replik, oraz składowe wynikające z wielodrogowości. Składowe wywołane wielodrogowością, można odfiltrować metodami filtracji liniowej. W tym celu składowe te są zerowane.

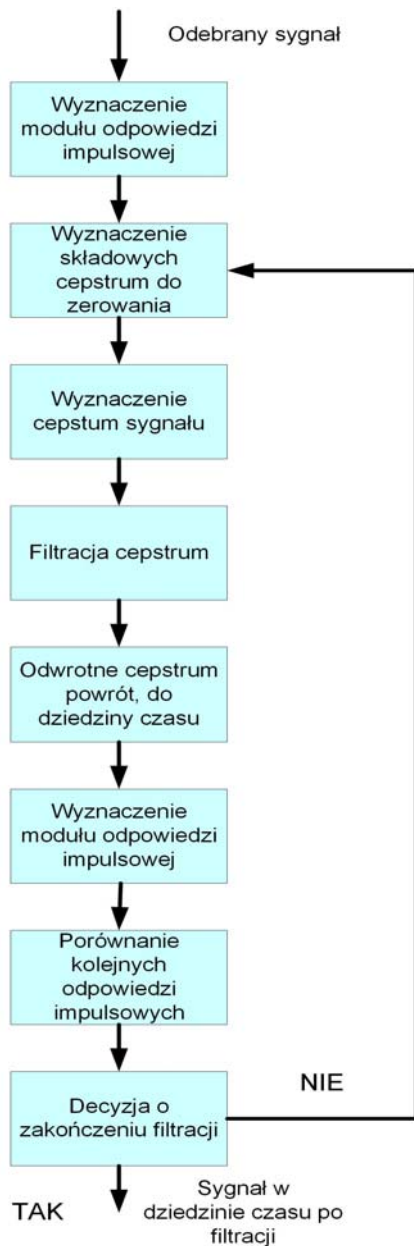


Rys.1. Schemat przetwarzania celem redukcji wielodrogowości poprzez filtrację odebranego sygnału przetworzonego do postaci

Występujące w cepstrum składowe wywołane replikami są o wartościach porządkowych będących wielokrotnością opóźnień między sygnałem pierwszym a każdą z replik. Ponadto dla replik o amplitudach porównywalnych z amplitudą pierwszego sygnału pojawiają się w cepstrum składowe będące kombinacjami liniowymi opóźnień pomiędzy poszczególnymi replikami.

W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych wielokrotnie powtarzano proces filtracji w cepstrum (tzw.

lifteringu) każdorazowo wyznaczając moduł odpowiedzi impulsowej. Na tej podstawie typowano składowe cepstrum podlegające zerowaniu. Algorytm redukcji wielodrogowości w odebranym sygnale przedstawia rysunek 2. Jeżeli kolejne iteracje nie powodowały malenia „impulsów korelacyjnych” wywołanych replikami kończono proces filtracji.

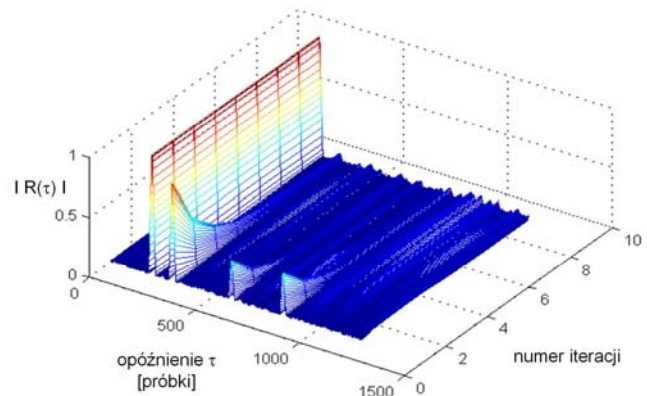


Rys.2. Algorytm redukcji wielodrogowości w odebranym sygnale

W badaniach symulacyjnych przyjęto identyczne warunki jak w eksperymentach, w których wyznaczano estymaty odpowiedzi impulsowej kanału radiowego w paśmie ISM 2,4 GHz opisanych w publikacjach [5, 6, 7, 8, 9, 10]: szybkość próbkowania 250 MS/s; każdą z replik identyfikowano poprzez korelację sygnału w paśmie podstawowym z ciągiem PRBS (ang. pseudo-random bit sequence) o długości 511 chipów; emitowano sygnał o częstotliwości 57,4 MHz (częstotliwość sygnału na wyjściu odbiornika w rzeczywistym środowisku propagacyjnym); emitowano sygnał z modulacją BPSK o szybkości 20 MBd. Symulator pozwalał na zestawianie dowolnej liczby replik o zadanych opóźnieniach i amplitudach.

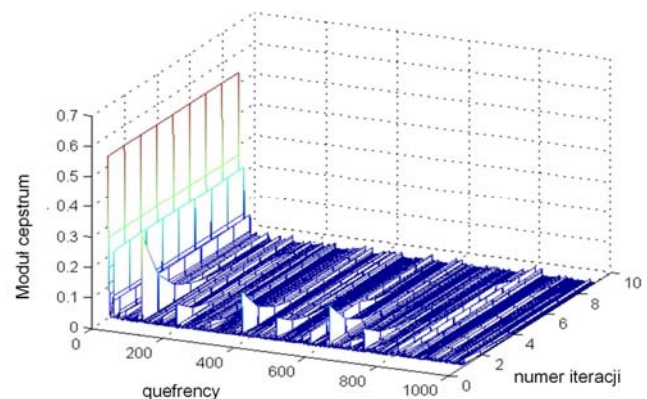
Wyniki badań symulacyjnych

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe zmiany poziomu replik w kolejnych iteracjach lifteringu. Amplitudy kolejnych replik wynosiły: 0,6; 0,3; 0,3 amplitudy sygnału pierwszego a ich opóźnienia: 97, 373, 622 próbek względem sygnału pierwszego. Badania symulacyjne przy takich amplitudach replik wykazały skuteczność zastosowanych procedur eliminacji. Wyraźnie widać, że w procesie redukcji efektu wielodrogowości zasadnym jest odtwarzanie sygnału, czyli powrót do dziedziny czasu a następnie ponowne przekształcenie sygnału do postaci cepstralnej i przeprowadzenie lifteringu.



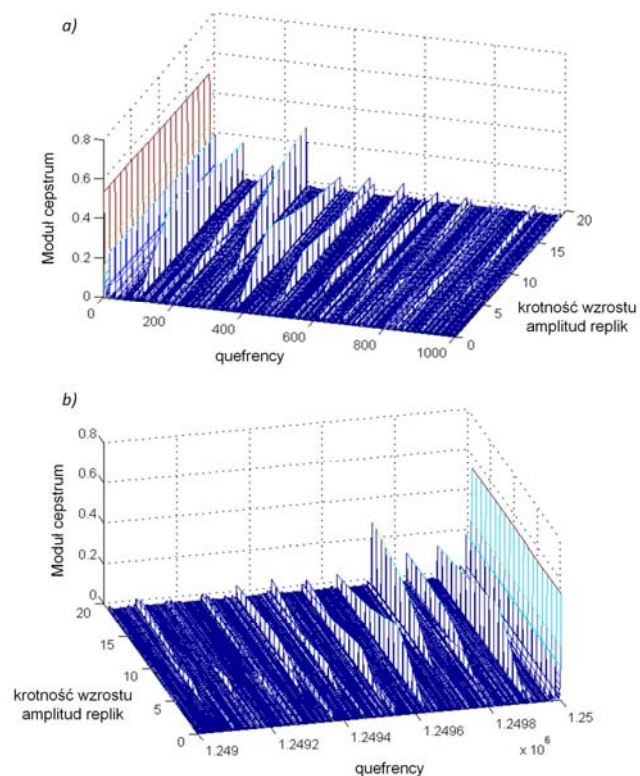
Rys.3. Redukcja replik odebranego sygnału w funkcji wykonanych powtórzeń filtracji w cepstrum

Zmiany składowych cepstrum w kolejnych iteracjach dla przykładu z rysunku 3 przedstawia rysunek 4.

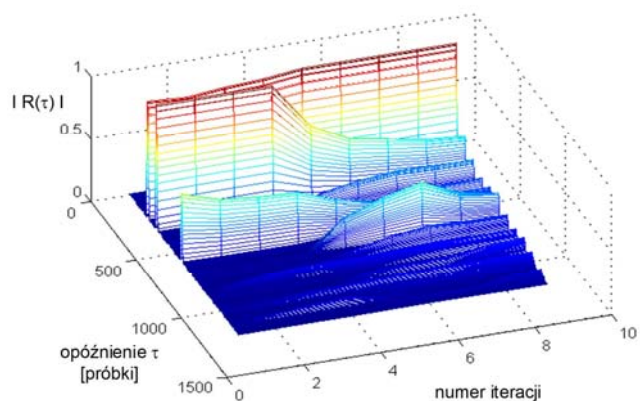


Rys.4. Przykład zmian składowych modułu cepstrum w funkcji kolejnych iteracji filtrowania dla przykładu z rysunku 3

Należy zauważyć, że moduł cepstrum jest symetryczny względem osi odciętych przechodzącej przez środkową składową cepstrum. Rysunek 5 przedstawia moduły pierwszego i ostatniego tysiąca składowych cepstrum. Przedstawiono na nim również zmiany wartości modułu składowych cepstrum w funkcji liniowego wzrostu amplitud replik od zera do 2 dla pierwszej repliki i od zera do 1,6 dla drugiej repliki względem amplitudy pierwszego odebranego sygnału. Opóźnienia replik wynosiły odpowiednio 97 i 373 próbek względem pierwszego sygnału. Jak widać na rysunku 5 moduły wartości składowych nie zmieniają się proporcjonalnie do wzrostu amplitud replik.



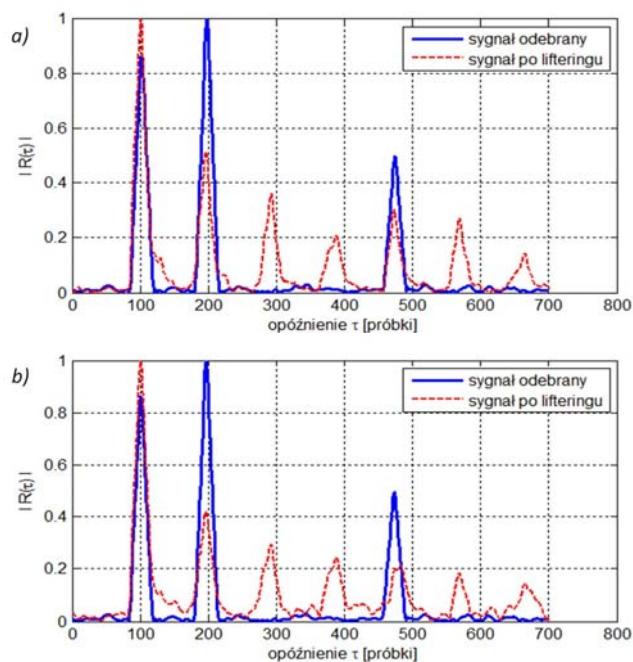
Rys.5. Przykład zmian składowych cepstrum w funkcji wzrostu amplitud replik a) pierwszy tysiąc składowych cepstrum, b) ostatni tysiąc składowych cepstrum



Rys.6. Przykład redukcji poziomu replik nadanego sygnału w funkcji kolejnych iteracji filtrowania w cepstrum dla replik o mocach większych od sygnału pierwszego

Rysunek 6 przedstawia zmiany korelacji wzajemnej pomiędzy sygnałem poddanym lifteringowi a ciągiem PRBS, gdy amplituda repliki jest większa od amplitudy sygnału pierwszego. Opóźnienia replik w stosunku do pierwszego sygnału wynosiły 97 i 373 a ich amplitudy odpowiednio 1,1 i 0,6 względem amplitudy sygnału pierwszego. Z rysunku 6 wynika, że skuteczność redukcji replik uległa znacznemu zmniejszeniu.

Kolejne badanie za pomocą symulacji komputerowej polegało na porównaniu efektów redukcji replik dla przypadku, gdy zerowano wszystkie składowe cepstrum, których moduł przekraczał zadaną wartość z przypadkiem, gdy zerowano tylko składowe wskazane na podstawie opóźnień pomiędzy replikami i sygnałem pierwszym. Z rysunku 7 wynika, że zerowanie wskazanych składowych cepstrum na podstawie funkcji korelacji wzajemnej pozwala na skuteczniejszą redukcję replik niż w przypadku zerowania składowych przekraczających zadany próg.

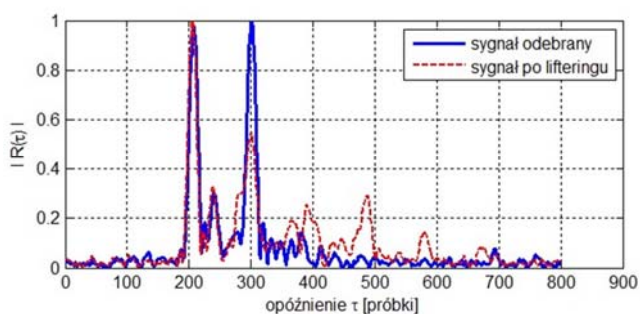


Rys.7. Porównanie modułów korelacji wzajemnej odebranego sygnału z ciągiem PRBS przed i po filtracji w cepstrum: a) gdy zerowano składowe o wartościach większych od zadanego progu; b) gdy zerowano składowe wyznaczone na podstawie powyższej korelacji

Warto zauważyć, że zerowanie składowych znajdujących się na początku i końcu cepstrum (rys. 5b) powoduje bezużyteczność takiej filtracji. Dlatego w badaniach zerowano składowe tylko na początku cepstrum co widać na rysunku 4. Również zaobserwowano pogorszenie skuteczności redukcji replik, gdy składowe podlegające zerowaniu przyjmowały zbyt duże wartości porządkowe. W badaniach ograniczono zasięg zerowania składowych do ok. 0,015 wszystkich składowych (do ok. 18000).

Eksperymenty z użyciem sygnałów rzeczywistych

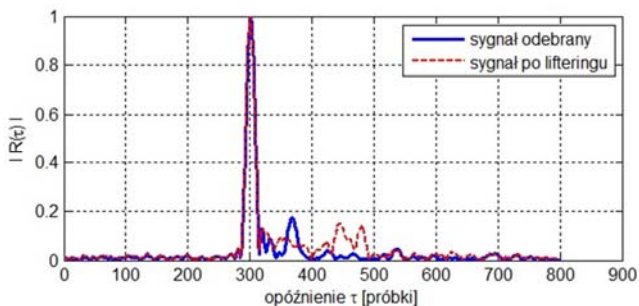
Skuteczność redukcji replik sygnału wywołanych wielodrogowością winna być zweryfikowana z użyciem sygnałów w rzeczywistym środowisku propagacyjnym. W niniejszej pracy wykonano testy eksperymentalne, których wyniki przedstawiono na rysunkach 8 i 9.



Rys.8. Porównanie postaci modułu korelacji wzajemnej odebranego sygnału w rzeczywistych warunkach propagacyjnych z ciągiem PRBS przed i po lifteringiu (przypadek, gdy moc repliki jest większa od mocy sygnału pierwszego)

Ostateczną oceną skuteczności zaproponowanej metody redukcji replik sygnału powinno być porównanie jakości transmisji danych przed i po redukcji replik. Przeprowadzono eksperyment dla przypadku przedstawionego na rysunku 8. Uzyskano ok. 25%

zmniejszenie stopu błędu BER. W eksperymencie przedstawionym na rysunku 9 przed i po lifteringu nie stwierdzono błędnego odbioru przesłanych danych. Powyższe oceny jakości transmisji są jedynie wstępnymi informacjami i wymagają wykonania dalszych badań eksperymentalnych.



Rys.9. Porównanie postaci modułu korelacji wzajemnej odebranego sygnału w rzeczywistych warunkach propagacyjnych z ciągiem PRBS przed i po lifteringu (przypadek repliki o relatywnie małej mocy)

Podsumowanie

Przedstawiona metoda redukcji replik sygnału powodowanych wielodrogowością w kanale radiokomunikacyjnym pozwala na ich tłumienie. Jak wykazały badania, metoda ta jest skuteczna dla replik o amplitudach mniejszych od sygnału pierwszego. W przypadku, gdy pierwszy sygnał ma amplitudę mniejszą niż którakolwiek z replik stosowanie tej metody jest niezasadne, gdyż tłumieniu podlegają repliki o największych mocach. Badania wskazują, że na efektywność redukcji replik ma wpływ: głębokość zerowania składowych w cepstrum; sumaryczna moc replik w stosunku do mocy sygnału pierwszego. Przewiduje się wykonanie pełniejszej weryfikacji zaproponowanej metody redukcji replik sygnału poprzez ocenę jakości transmisji danych przed i po lifteringu w środowisku rzeczywistym.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jerzy Mizeraczyk, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Email: j.mizeraczyk@we.umg.edu.pl; dr hab. inż. Andrzej Żak, Akademia Marynarki Wojennej, ul. Smidowicza 69, 81-127 Gdynia, Email: a.zak@amw.gdynia.pl; dr inż. Ryszard Studański, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Email: r.studanski@we.umg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Childers D. G., Skinner D. P., Kemerait R. C., The Cepstrum: A Guide to Processing, *Proceedings of the IEEE*, 65 (1977), No.10, 1428-1443
- [2] Oppenheim A. V., Schaffer R. W., From Frequency to Quefrency: A History of the Cepstrum, *IEEE Signal Processing Magazine*, 21 (2004), 95-106
- [3] Osowski S., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów z zastosowaniem matlaba, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, (2016), 113-120
- [4] Sadowski M, Zankiewicz A., Analiza pracy odbiornika systemu LTE w warunkach propagacji wielodrogowej oraz interferencji wspólnokanałowych, *Przegląd Elektrotechniczny* 02 (2016), 88-90
- [5] Studański R., Noga K. M., Przykłady odpowiedzi impulsowych kanału radiokomunikacyjnego w miejskim środowisku propagacyjnym, *Przegląd Telekomunikacyjny*, (2015.), Nr 8-9, 1414-1418
- [6] Studański R., Distribution of envelope and phase of signals in ISM 2.4 GHz band transmitted in urban environment, *Proceedings of the XI Conference on Reconnaissance and Electronic Warfare Systems, SPIE*. vol.10418 (2016)
- [7] Studański R., Wyznaczanie rozkładu obwiedni sygnału transmitowanego w warunkach statycznych, *Przegląd Telekomunikacyjny*, (2016.), Nr 8-9, 995-999
- [8] Studański R., Wyznaczanie wybranych parametrów kanału radiowego w paśmie ISM 2,4 GHz, *Przegląd Telekomunikacyjny*, (2017.), Nr 8-9, 1086-1089
- [9] Studański R., Wybrane właściwości estymaty odpowiedzi impulsowej kanału radiowego w paśmie ISM 2,4 GHz, *Przegląd Telekomunikacyjny*, (2018.), Nr 8-9, 743-746
- [10] Studański R., Czapiwska A., Selected properties and parameters of radio channel impulse response estimation in ISM 2.4 GHz band, *Proceedings of the XII Conference on Reconnaissance and Electronic Warfare Systems, SPIE*. vol. 11055 (2019)
- [11] Ziółkowski C., Kelner J. M., Influence of the propagation environment on statistical properties of bearing, *Przegląd Elektrotechniczny*, 03 (2015), 96-99