

Jerzy GARUS  
Krystyna Maria NOGA  
Ryszard STUDAŃSKI

## WYZNACZANIE ODPOWIEDZI KANAŁU RADIOKOMUNIKACYJNEGO ZA POMOCĄ CIĄGU PSEUDOŁOSOWEGO

**STRESZCZENIE** *W artykule opisano metodę wyznaczania odpowiedzi kanału radiokomunikacyjnego na wymuszenie jakim był sygnał wysokiej częstotliwości zmodulowany ciągiem pseudoprzypadkowym. Odpowiedź impulsowa określana była poprzez wyznaczanie korelacji wzajemnej pomiędzy sygnałem odebrany a sygnałem nadawanym. Ponadto przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych w rzeczywistym środowisku propagacyjnym.*

**Słowa kluczowe:** *kanal radiokomunikacyjny, odpowiedź impulsowa kanału*

### 1. WSTĘP

---

Znajomość transmitancji kanału radiokomunikacyjnego jest niezwykle istotna w zapewnieniu poprawnego odbioru transmisji cyfrowych. Klasyczne wyznaczanie odpowiedzi impulsowej kanału za pomocą sygnałów zbliżonych do delty Diraca jest niezwykle trudne. Przykładowo w pracy [1] odstąpiono od wyznaczania odpowiedzi impulsowej za pomocą wysokonapięciowych impulsów EMD ze względu na konieczność przeprowadzenia odrębnych badań nad metodyką pomiarów. Natomiast wyznaczono właściwości kanału radiowego w dziedzinie czasu i częstotliwości poprzez badania z wykorzystaniem wektorowego analizatora sieci.

---

**dr hab. inż. Jerzy GARUS**

e-mail: j.garus@amw.gdynia.pl

Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej  
ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia

**dr inż. Krystyna Maria NOGA<sup>1)</sup>, dr inż. Ryszard STUDAŃSKI<sup>2)</sup>**

e-mail: [k.noga; r.studanski]@we.am.gdynia.pl

<sup>1)</sup>Akademia Morska, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia

<sup>2)</sup>Akademia Morska, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia

Pomiar odpowiedzi impulsowej kanału propagacyjnego (ang. Channel Impulse Response) odgrywa bardzo ważną rolę przy opracowywaniu nowych systemów radiokomunikacyjnych oraz przy ich udoskonalaniu. Właściwości transmisyjne kanału są zależne od zjawisk w nim występujących, między innymi od występowania propagacji wielodrogowej [1 – 5]. Spowodowana jest ona przede wszystkim odbiciem, ugięciem i rozproszeniem fal radiowych. Propagacja wielodrogowa zależy ponadto od ukształtowania terenu, zmienności tego ukształtowania, zabudowy terenu. Czynniki te powodują, że charakterystyki kanału nie są stacjonarne. W rezultacie tych zjawisk każdy sygnał z nadajnika dociera do odbiornika w postaci wielu składowych o różnych i zmiennych w czasie tłumieniach oraz opóźnieniach.

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, prowadzonych w rzeczywistym środowisku propagacyjnym.

## 2. OPIS KANAŁU RADIOKOMUNIKACYJNEGO

Sygnał przesyłany przez kanał radiokomunikacyjny można przedstawić przy pomocy zależności [2]:

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

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

Dla propagacji wielodrogowej sygnał odebrany jest określony zależnością [2]:

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

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

Ważnym parametrem opisującym kanał jest tzw. pasmo koherencji kanału  $B_c$ . Pasma to definiujemy jako zakres częstotliwości, w którym sygnały wejściowe, odległe na osi częstotliwości o mniej niż  $B_c$ , posiadają na wyjściu kanału skorelowane odpowiedzi amplitudowe i fazowe. Pasma koherencji można zapisać jako [3, 5]:

$$B_c \approx \frac{1}{T_m} \quad (3)$$

gdzie  $T_m$  jest czasem pamięci kanału, czyli miarą rozrzutu opóźnienia z jakim przychodzą do odbiornika, wskutek wielodrogowej propagacji, kolejne kopie sygnału nadanego. Parametr  $T_m$  określa się jako czas, po którym funkcja korelacji maleje, w zależności od definicji, do  $\varepsilon = 1/e$  lub do  $1/10$  swojej wartości maksymalnej [2, 5]. Czas ten często też nazywamy czasem korelacji. Charakteryzuje on w przybliżeniu czas trwania odpowiedzi impulsowej kanału na pobudzenie impulsem w.c. o bardzo małym czasie trwania.

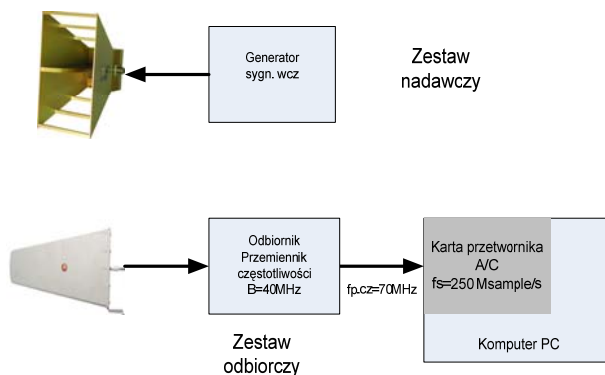
Kolejnym parametrem charakteryzującym kanał radiokomunikacyjny jest czas koherencji  $T_d$ , definiowany jako czas, w którym odpowiedzi impulsowe kanału są skorelowane [5]. Czas ten zależy od pasma częstotliwości wynikającego z efektu dopplerowskiego. Jest on zależny w przybliżeniu od odwrotności maksymalnej częstotliwości dopplerowskiej  $f_{Dmax}$ , czyli [3, 5]:

$$T_d \approx \frac{1}{2 f_{Dmax}} = \frac{\lambda}{2 \cdot v} \quad (4)$$

gdzie:  $\lambda$  jest długością fali,  $v$  to prędkość przemieszczania się stacji ruchomej.

### 3. OPIS METODY POMIAROWEJ

Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie odpowiedzi kanału radiokomunikacyjnego na wymuszenie jakie stanowił sygnał z modulacją BPSK. Sygnał o częstotliwości nośnej 2440 MHz był modulowany z szybkością  $f_{symb} = 25$  Msymboli/s liniowym ciągiem o maksymalnej długości 511 bitów. Sygnał wyjściowy poddany był filtracji za pomocą filtru podniesionego cosinusa o współczynniku roll-off wynoszącym 0,35. Moc sygnału wyjściowego wynosiła 10 mW. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

Część nadawczą stanowiska pomiarowego stanowił wektorowy generator sygnałowy, który był źródłem sygnału transmitującego zadaną sekwencję binarną. Przemiennikiem sygnału była antena tubowa SAS 571 o paśmie roboczym w zakresie od 700 MHz do 18000 MHz, o zysku energetycznym 9 dBi dla częstotliwości 2400 MHz i szerokości wiązki głównej dla polaryzacji pionowej  $48^\circ$  oraz  $30^\circ$  dla polaryzacji poziomej. Część odbiorczą stanowiła antena LPDA-A0075 o paśmie roboczym w zakresie 800 MHz – 2500 MHz, o zysku energetycznym 7 dBi i szerokości wiązki głównej dla

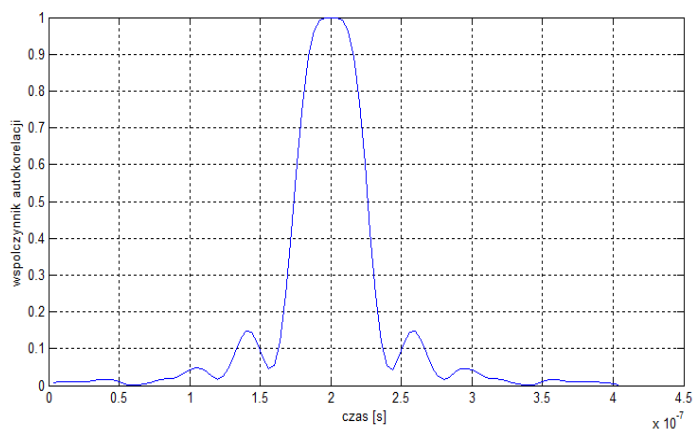
polaryzacji pionowej  $60^\circ$  oraz  $70^\circ$  dla polaryzacji poziomej. Odbiornik zapewniał odbiór sygnałów w paśmie o szerokości 40 MHz i przemianę sygnału na częstotliwość pośrednią 70 MHz. Akwizycję sygnałów przeprowadzono za pomocą 14 bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego.

Na początku badań dokonano rejestracji sygnału nadawanego. Bezpośrednio z generatora, za pomocą przewodu, wysłano zmodulowany sygnał do odbiornika. Po przemianie sygnału na częstotliwość 70 MHz, dokonano jego spróbkowania z częstotliwością  $f_s = 250$  MHz. Tak przygotowany sygnał cyfrowy, o liczbie 5110 próbek, został wykorzystany jako sygnał wzorcowy. Autokorelację tego ciągu, po odfiltrowaniu składowych wysokiej częstotliwości wynikających z częstotliwości nośnej (70 MHz), przedstawiono na rysunku 2. Czas trwania „impulsu korelacyjnego” wynosi 80 ns, a więc dwukrotność czasu trwania symbolu i jest zgodny z zależnością

$$t_{\text{impkor}} = \frac{2}{f_{\text{symb}}} = \frac{2}{25 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 80 \text{ ns} \quad (5)$$

Uzyskane wartości współczynnika autokorelacji nie tworzą postaci trójkąta, gdyż przyjęty w ostateczności do badań sygnał nie był ciągiem zerojedynkowym o maksymalnej długości, a jedynie sygnałem wysokiej częstotliwości zmodulowanym ciągiem pseudoprzypadkowym.

W kolejnym kroku badań emitowano sygnały w rzeczywistym środowisku propagacyjnym i prowadzono rejestrację sygnałów docierających do anteny odbiorczej. Nadawane sygnały były modulowane przyjętym do badań ciągiem. Odbierany sygnał nie był widoczny jako przebieg zarejestrowany w czasie. Również w analizie widmowej zarejestrowanego sygnału nie zaobserwowano przedziału częstotliwości o zwiększonej widmowej gęstości mocy. Wynika to z faktu, że moc sygnału w punkcie odbioru była mniejsza od mocy szumu.



Rys. 2. Unormowana funkcja autokorelacji sygnału wzorcowego

W celu określenia odpowiedzi kanału radiokomunikacyjnego wyznaczono korelację wzajemną pomiędzy sygnałem wzorcowym a sygnałami odebranymi. Opóźnienia sygnałów odbieranych z poszczególnych dróg propagacji wyznaczano na podstawie

odstępu pomiędzy pierwszym a kolejnymi maksimami funkcji korelacji. Oczywiście skupienie omawianych maksimów funkcji korelacji wzajemnej powtarza się, co czas trwania ciągu rozpraszającego, czyli co 5110 próbek. Stosunki pomiędzy wartościami maksimów funkcji korelacji wzajemnej określają relacje mocy sygnałów odebranych przez antenę z różnych dróg propagacyjnych.

Przedstawione w artykule funkcje korelacji zostały unormowane względem najwyższej wartości wyznaczonego współczynnika korelacji za czas trwania pomiaru.

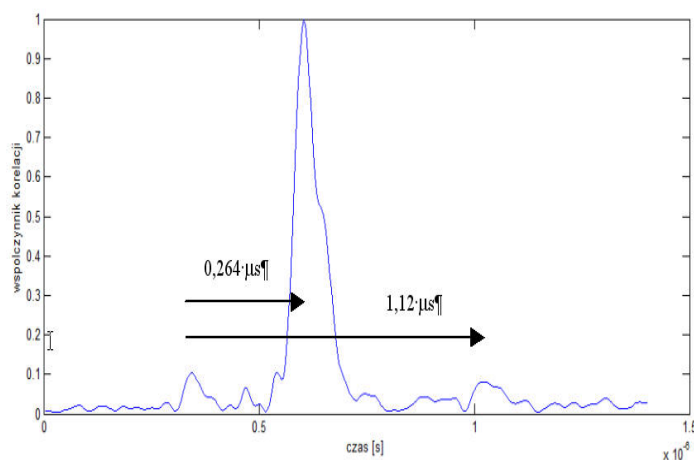
## 4. BADANIA W WARUNKACH RZECZYWISTYCH

Bazując na doświadczeniach zdobytych w trakcie badań w środowisku rzeczywistym i przedstawionych w pracach [1, 2, 4–10] przeprowadzono badania według różnych scenariuszy. Zasadniczym celem praktycznej realizacji pomiarów było wyznaczenie czasów opóźnień pomiędzy odbieranymi sygnałami o różnych drogach propagacyjnych.

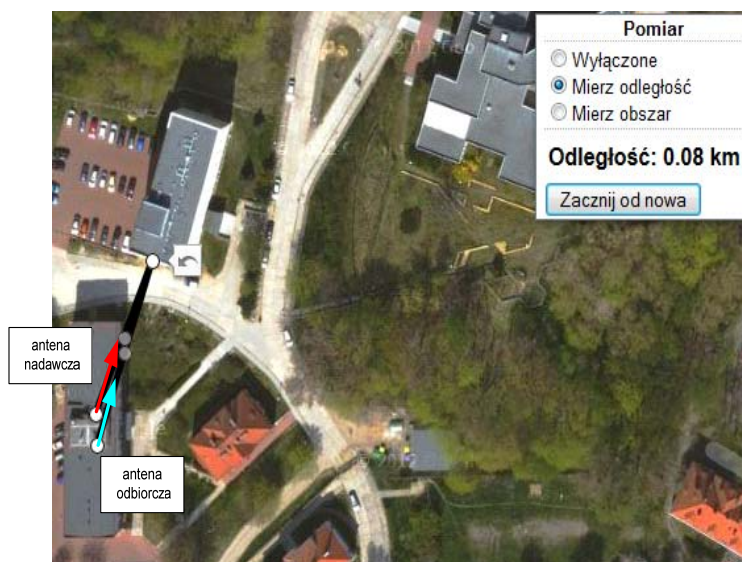
### 4.1. Scenariusz 1

Anteny nadawcza i odbiorcza skierowane były na prostopadłą płaską ścianę dużego budynku usytuowanego w odległości ok. 37 m od anteny nadawczej (rys. 4 i 5). W kierunku tej ściany wysyłano sygnał pomiarowy. Rejestrację odbieranego sygnału prowadzono w sesjach przez czas około 2 sekund.

Jak już wspomniano, wyznaczono funkcję korelacji wzajemnej z sygnałem wzorcowym. Analiza maksymalnych wartości współczynnika korelacji, przedstawionych na rysunku 3, pozwala na porównanie czasu opóźnień między maksimami funkcji korelacji a odległościami anten nadawczej i odbiorczej od przeszkód terenowych.



**Rys. 3. Przykładowa funkcja korelacji wzajemnej pomiędzy sygnałem wzorcowym a sygnałem zarejestrowanym w warunkach scenariusza 1**

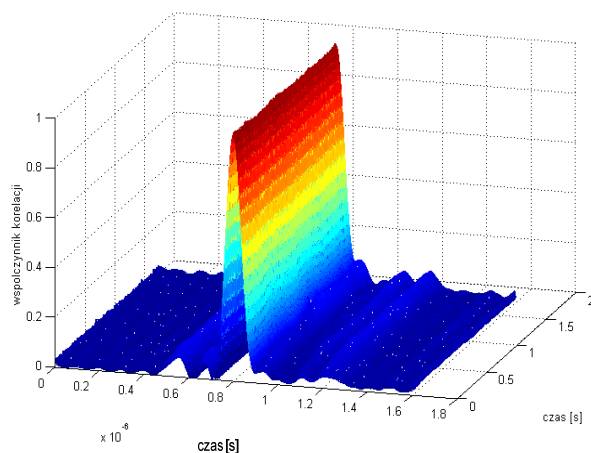


Rys. 4. Orientacyjne wyznaczenie drugiej drogi propagacji sygnału z anteny nadawczej do odbiorczej



Rys. 5. Orientacyjne wyznaczenie trzeciej drogi propagacji sygnału z anteny nadawczej do odbiorczej

Pierwsze maksimum jest efektem odbioru sygnału bezpośrednio z anteny nadawczej. Mała wartość współczynnika korelacji, mimo odległości pomiędzy antenami wynoszącej 7,5 m, wynika z tego, że sygnał z anteny nadawczej pochodził z listka wstecznego a ponadto antena nadawcza schowana była za ścianą budynku.



**Rys. 6. Funkcja korelacji wzajemnej pomiędzy sygnałem wzorcowym a sygnałem odbitym w warunkach scenariusza 1**

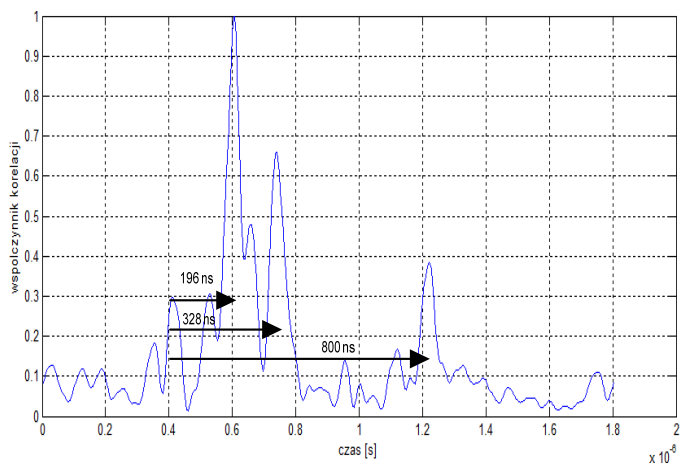
Największe maksimum funkcji korelacji wywołane jest sygnałem odbitym od ściany budynku odległej od anteny nadawczej o około 37 m.

Opóźnienie tego maksimum względem pierwszego wynosi  $0,264 \mu\text{s}$ , co odpowiada drodze sygnału 79,1 m. Uwzględniając odległość pomiędzy antenami nadawczą o odbiorczą (7,5 m) rzeczywista droga od anteny nadawczej do przeszkody terenowej i anteny odbiorczej jest większa o 7,5 m. Odległości wstępnie oszacowane za pomocą strony internetowej Google Maps [11] wskazują na dystans 86,2 m (rys. 4). Kolejne maksimum opóźnione jest względem pierwszego o  $1,12 \mu\text{s}$ , co stanowi dystans 335,8 m. Uwzględniając odległość między antenami, faktyczna odległość: antena nadawcza – przeszkoda terenowa – antena odbiorcza wynosi 343,3 m. Kalkulacja ta jest również zgodna z długością drogi sygnału wyznaczoną, za pomocą strony internetowej Google Maps [11] (rys. 5).

Na rysunku 6 przedstawiono funkcję korelacji wzajemnej pomiędzy sygnałem wzorcowym a sygnałem odbitym zarejestrowaną w czasie wynoszącym 1,7 s. W tym przypadku obserwuje się niewielkie zmiany wartości współczynnika korelacji, co jest efektem wolnozmiennych fluktuacji odbieranych sygnałów. Przedstawione wyniki wskazują na czas pamięci kanału  $T_m$  wynoszący  $1,12 \mu\text{s}$ , czyli pasmo koherencji  $B_c$  dla badanych warunków propagacyjnych wynosi prawie 890 kHz.

## 4.2. Scenariusz 2

W realizacji kolejnego eksperymentu zmieniono kierunek promieniowania sygnału oraz ustawienie anteny odbiorczej. Obie anteny skierowane były na zespół wolnostojących budynków (rys. 8, 9, 10) i znajdowały się na wysokości ich górnych kondygnacji. Rejestrację odbieranego sygnału prowadzono w sesjach przez czas około 2 sekund. Również i w tym przypadku wyznaczono funkcję korelacji wzajemnej z sygnałem wzorcowym.



**Rys. 7. Przykładowa funkcja korelacji wzajemnej pomiędzy sygnałem wzorcowym a sygnałem zarejestrowanym w warunkach scenariusza 2**

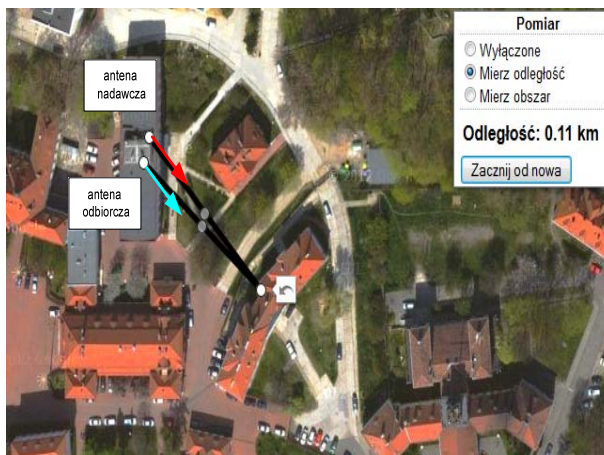


**Rys. 8. Orientacyjne wyznaczenie drugiej drogi propagacji sygnału z anteny nadawczej do odbiorczej**

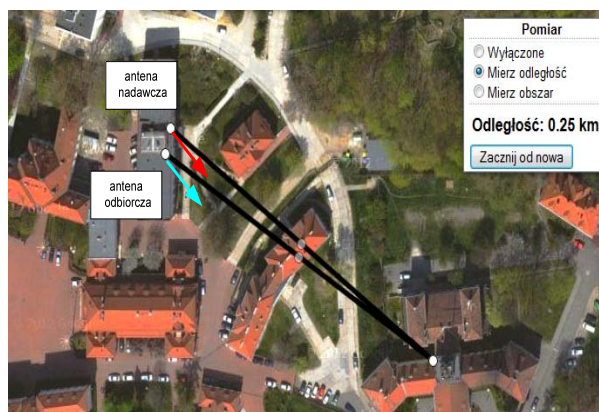
Analiza maksymalnych wartości współczynnika korelacji przedstawionych na rysunku 7 pozwala na porównanie czasu opóźnień między maksimami funkcji korelacji, a odległościami anten nadawczej i odbiorczej od przeszkód terenowych. Pierwsze maksimum pochodzi od sygnału odebranego bezpośrednio z anteny. Największe maksimum funkcji korelacji wywołane jest sygnałem odbitym od dachu budynku usytuowanego najbliżej, tj. w odległości około 30 m. Opóźnienie tego maksima względem pierwszego wynosi  $0,198 \mu\text{s}$ , co odpowiada drodze sygnału  $58,76 \text{ m}$ .

Podobnie jak w scenariuszu 1, uwzględniając odległość pomiędzy antenami nadawczą i odbiorczą ( $7,5 \text{ m}$ ), rzeczywista droga od anteny nadawczej do przeszkody terenowej i anteny odbiorczej jest większa o  $7,5 \text{ m}$ . Odległości wstępnie wyznaczone za pomocą strony internetowej [11] wskazują na dystans  $64 \text{ m}$  (rys. 8).



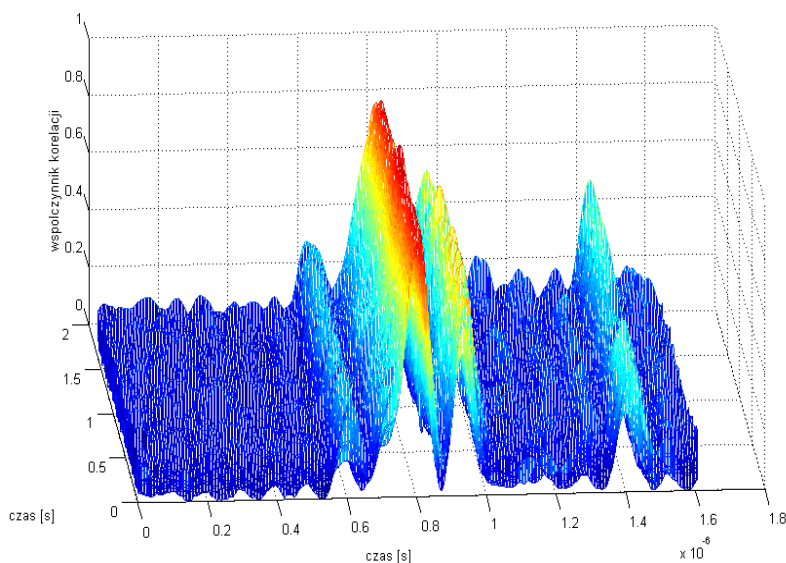


Rys. 9. Orientacyjne wyznaczenie trzeciej drogi propagacji sygnału z anteny nadawczej do odbiorczej



Rys. 10. Orientacyjne wyznaczenie czwartej drogi propagacji sygnału z anteny nadawczej do odbiorczej

Trzecie maksimum opóźnione jest względem pierwszego o  $0,328 \mu\text{s}$ , co stanowi dystans  $98,33\text{m}$ . Po uwzględnieniu odległości między antenami, faktyczna odległość: antena nadawcza – przeszkoda terenowa – antena odbiorcza wynosi  $105,8 \text{ m}$ . Kalkulacja ta jest porównywalna z długością drogi sygnału (rys. 9) wyznaczoną za pomocą strony internetowej Google Maps [11]. Opóźnienie pomiędzy pierwszym a czwartym maksimum funkcji korelacji wzajemnej wynosi  $800 \text{ ns}$ , wobec tego droga pokonywana w tym czasie przez falę elektromagnetyczną wynosi  $239,83\text{m}$ . Uwzględniając czas propagacji na drodze bezpośredniej między antenami obliczony dystans powinien wynosić ok.  $247,3 \text{ m}$ . Wyznaczona za pomocą wspomnianej już strony internetowej Google Maps odległość pokonana przez sygnał wynosi  $250 \text{ m}$  (rys. 10), co potwierdza zgodność obliczeń.



**Rys. 11. Funkcja korelacji wzajemnej pomiędzy sygnałem wzorcowym a sygnałem odbitym w warunkach scenariusza 2**

Na rysunku 11 przedstawiono funkcję korelacji w czasie rejestracji sygnału wynoszącym 1,7 s. Zmiany wartości współczynnika korelacji są efektem wolnozmennych fluktuacji odbieranych sygnałów. Przedstawione wyniki wskazują na czas pamięci kanału  $T_m$  wynoszący  $0,800 \mu\text{s}$ , wobec tego pasmo koherencji  $B_c$  w warunkach propagacji scenariusza 2 wynosi prawie 1250 kHz.

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w artykule metoda określenia liczby istotnych dróg propagacyjnych i wyznaczania pasma koherencji jest łatwą w realizacji techniką pomiarową. Jednak niesie dość ostre wymagania, co do parametrów sprzętu badawczego. By pomiar był wystarczająco precyzyjny należy stosować sygnały o możliwie dużych szybkościach modulacji. Zastosowana w badaniach szybkość modulacji BPSK była graniczną dla posiadanego generatora sygnałowego. Również wymagana szerokość odbieranego pasma powyżej 25 MHz dla wielu odbiorników laboratoryjnych jest wielkością przekraczającą ich parametry. Wykorzystywany zestaw pomiarowy posiadał jeden tor odbiorczy i dlatego nie można było wskazać kierunku nadejścia sygnału. W najbliższym czasie przewiduje się rozbudowę zestawu badawczego tak, aby wzbogacić jego funkcjonalność o możliwość określania kierunku nadejścia sygnału dla poszczególnych obserwowanych maksimów. Ponadto aktualnie prowadzone są badania dla anteny nadawczej znajdującej się w ruchu.

**LITERATURA**

1. Więckowski T. W.: Usługi i sieci teleinformatyczne następnej generacji – aspekty techniczne, aplikacyjne i rynkowe, kompatybilność elektromagnetyczna, cz. 1. Politechnika Wroclawska, 2010.
2. Stefański J.: Efektywność odbioru adaptacyjnego w systemie łączności komórkowej GSM. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 2000.
3. Proakis J. G.: Digital Communications. McGraw Hill, New York, 1995.
4. Ambroziak S. J.: Badania i analiza uwarunkowań propagacyjnych w środowisku uprzemysłowionym. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 2012.
5. Niski R.: Efektywność odbiornika RAKE w interfejsie radiowym WCDMA/FDD systemu UMTS. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 2005.
6. Ziółkowski C.: Degradacja jakości transmisji sygnałów w dyspersyjnych kanałach radiowych. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2011.
7. Magiera J, Katulski R. J.: Analiza i badania systemu antyspoofingowego GPS. Przegląd Elektrotechniczny, R. 91, nr 3, s. 66–69, 2015,
8. Kelner J, Ziółkowski C.: Zastosowanie technologii SDF do lokalizowania źródeł emisji BPSK i QPSK. Przegląd Elektrotechniczny, R. 91, nr 3, s. 61–65, 2015.
9. Ambroziak S. J., Sadowski J.: Mobilne stanowisko do badań propagacyjno-zasięgowych. Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 2–3, 58–62, 2011.
10. Sharif Z., Zuri Sha'ameri A.: The application of cross correlation technique for estimating impulse response and frequency response of wireless communication channel. 5th Student Conference on Research and Development, Malaysia, 2007.
11. [www.google.maps](http://www.google.maps)

*Przyjęto do druku dnia 23.02.2016 r.*

DETERMINATION OF RADIO COMMUNICATION CHANNEL  
RESPONDS WITH THE HELP OF A PSEUDORANDOM SEQUENCE

Jerzy GARUS,  
Krystyna Maria NOGA, Ryszard STUDAŃSKI

**ABSTRACT** *The paper describes the method of the determination of a radio communication channel response when a high-frequency signal modulated with pseudorandom sequence is used as the input of channels. The impulse response was calculated by means of a cross-correlation between received and sent signals. Results of experiments in a real-world environment are inserted.*

**Keywords:** *radio communication channel, channel impulse response, multipath propagation*

