

MODELE SYMULACYJNE KANAŁÓW W SYSTEMACH RADIOKOMUNIKACYJNYCH I ICH CHARAKTERYSTYKI

Krystyna Maria NOGA

Akademia Morska w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej
tel: 58 55 86 471, e-mail: k.noga@we.am.gdynia.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia z zakresu symulacji kanałów radiokomunikacyjnych, tj. matematyczne modele propagacyjne, statystyczny opis szybkich zaników i powolnych fluktuacji. W artykule omówiono kanał wielodrogowy, mobilny Rayleigha oraz Wattersona. Jako narzędzie symulacyjne wybrano pakiet Vissim.

Słowa kluczowe: kanał radiokomunikacyjny, modele, tłumienie propagacyjne, zaniki szybkie, powolne fluktuacje.

1. WSTĘP

Propagacja fal radiowych w bezprzewodowym kanale jest złożonym zjawiskiem, zależy między innymi od wielodrogowości, odbić sygnałów od różnych przeszkód oraz dyfrakcji. Opis zjawisk zachodzących w czasie transmisji w kanale propagacyjnym wymaga zastosowania zaawansowanych narzędzi matematycznych, przy czym dobre wyniki uzyskuje się dzięki zastosowaniu metod probabilistycznych.

W ruchomej radiokomunikacji lądowej (RRL) ważną rolę odgrywają zakłócenia radioelektryczne. Szczególnie duży wpływ na jakość transmisji mają addytywne zakłócenia techniczne, których źródłem są urządzenia generujące energię fal radiowych, urządzenia elektroenergetyczne, naukowe, medyczne, technologiczne, które jedynie wytwarzają energię oraz maszyny i urządzenia celowo wytwarzające energię [1]. Istotnym zagadnieniem w analizie systemów radiokomunikacyjnych jest także tzw. tło zakłóceń technicznych. W terenie przemysłowym i zurbanizowanym występują niezależne impulsy, które są wytwarzane przez urządzenia, sieci elektroenergetyczne oraz pojazdy. Impulsy te nakładają się w wyniku czego powstają losowo zmienne przebiegi ciągłe – tzw. powolne fluktuacje, czyli występują zaniki wolnozmienne. Dla odbioru wielodrogowego fluktuacje powolne występują jednocześnie ze zmianami szybkimi (zanikami szybkimi). Do opisu zmian sygnału nadanego często stosuje się np. rozkłady prawdopodobieństwa obwiedni, rozkłady widma.

Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych, na dostęp do informacji, konieczność przekazywania coraz większej ilości informacji, rozwój technik komputerowych i środowisk programistycznych spowodował konieczność poszukiwania nowych metod transmisji danych, umożliwiających zwiększenie przepływności i jakości systemów transmisyjnych oraz ich rozbudowę. Zagadnienia symulacji komputerowej kanałów radiowych o określonych charakterysty-

kach czasowych i częstotliwościowych odgrywają coraz większą rolę.

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia z zakresu symulacji kanałów radiokomunikacyjnych, tj. matematyczne modele propagacyjne, statystyczny opis szybkich zaników i powolnych fluktuacji. Problematyka ta jest istotna nie tylko podczas projektowania nowych systemów w ośrodkach badawczych i projektowych. Jest ona także omawiana na zajęciach wykładowych, laboratoryjnych oraz projektowych z radiokomunikacji i cyfrowego przetwarzania i przesyłania sygnałów. Jako narzędzie symulacyjne wybrano pakiet Vissim.

2. TŁUMIENIE PROPAGACYJNE FALI RADIOWEJ

Systemy radiowe pracujące w paśmie od fal ultrakrótkich wzwyż wykorzystują przede wszystkim propagację w niezjonizowanej troposferze. W tym środowisku główną rolę odgrywa załamanie oraz tłumienie i rozproszenie fali radiowej. Natomiast w systemach bezprzewodowych z wykorzystaniem fal krótkich oraz w systemach satelitarnych wykorzystuje się zjonizowane środowisko jonosferyczne, w którym główną rolę odgrywa zjawisko załamania, absorpcji i Dopplera. Dokładny opis zjawisk zachodzących w troposferze i jonosferze, statystyczny opis zagadnień propagacyjnych w terenie otwartym i zabudowanym oraz opis zjawiska Dopplera został przedstawiony w [2, 3, 4].

Tłumienność trasy w wolnej przestrzeni dla częstotliwości mniejszej niż 1 GHz jest określona wzorem [1]

$$L_0 = 16 \pi^2 d^2 / \lambda^2 \quad (1)$$

gdzie d jest odległością między antenami nadawczymi i odbiorczymi w metrach, λ - jest długością fali radiowej w metrach.

Dla modelu przyziemnej propagacji przestrzennej przedhoryzontowej tłumienność trasy jest określona zależnością

$$L \cong d^4 / (h_n^2 h_o^2) \quad (2)$$

gdzie h_n , h_o określa odpowiednio wysokość anteny nadawczej i odbiorczej. Dokładny opis przyziemnej propagacji przedhoryzontowej został przedstawiony między innymi w pracach [1, 2].

Z analizy literatury [2, 3] wynika, że dla propagacji w terenie zabudowanym rozróżnia się dwie kategorie tras:

- NLOS (ang. Non Line of Sight) – występują składowe odbite sygnały, nie ma składowej bezpośredniej,
- LOS (ang. Line of Sight) – występują składowe odbite sygnały oraz składowa bezpośrednia.

Do wyznaczenia tłumienia fali radiowej w środowisku miejskim w warunkach LOS najczęściej wykorzystuje się [2, 3]:

- model COST 231 Walfisha – Ikagemiego, dla którego tłumienie zależy od długości trasy propagacji, częstotliwości oraz tłumienności w wolnej przestrzeni,
- model ITU – RP.1411, dla którego określone jest między innymi tłumienie minimalne oraz maksymalne, które zależy od długości trasy propagacji, przy czym dla krótkich tras propagacyjnych tłumienie rośnie z kwadratem odległości, natomiast dla dłuższych rośnie z czwartą potęgą odległości.

Dla warunków NLOS do wyznaczania tłumienia stosuje się model Okumury - Haty, COST – 231 Haty, COST 231 Walfisha – Ikagemiego, Delisie – Egli. Dokładny opis tych modeli został przedstawiony w pracach [2, 5]. Przykładowo tłumienie dla modelu Okumury – Haty zależne jest od wielkości miast, częstotliwości, wysokości zawieszenia anteny nadajnika i odbiornika. W pracy [5] przedstawiono przykłady matematycznego modelowania rozchodzenia się fal radiowych w terenie zabudowanym, w swobodnej przestrzeni oraz wewnątrz budynków. Autorzy zwrócili uwagę na znaczenie problemu doboru odpowiedniego modelu propagacyjnego do rozpatrywanego środowiska, na konieczność przeprowadzania badań symulacyjnych, które ułatwiają weryfikację analizowanych systemów. Przedstawiona analiza porównawcza modeli umożliwia oszacowanie różnic w określeniu tłumienia, które wprowadza środowisko propagacyjne dla każdego modelu.

3. STATYSTYCZNY OPIS ZANIKÓW I TŁUMIENIA

Sygnały odbierane w RRL podlegają losowym zmianom, są zależne od czasu i miejsca. W analizie najczęściej przyjmuje się, że nie fluktuują losowo tylko sygnały przedhoryzontowe w terenie otwartym [1]. Podczas transmisji występują szybkie (krótkookresowe) zmiany wartości chwilowej odbieranego sygnału (ang. fast fading, short term fading), czyli zaniki szybkie [1, 3, 6, 7]. Dla odbioru wielodrogowego zaniki szybkie występują jednocześnie z powolnymi fluktuacjami obwiedni (ang. slow fading, long term fading). Przykładowo fluktuacje powolne zależne od czasu wynikają z niejednorodności troposfery, które powodują zmienne w czasie rozpraszanie i refrakcję. Fluktuacje zależne od czasu silnie wzrastają wraz z odległością od nadajnika. W analizie ilościowej i jakościowej systemów radiokomunikacyjnych przyjmuje się, że obwiednia sygnału z fluktuacjami zależnymi od czasu posiada rozkład log – normalny. Natomiast fluktuacje zależne od miejsca są spowodowane nieregularnością terenu, przy czym w tym przypadku dużą rolę odgrywa zjawisko interferencji, odbicia, absorpcji i dyfrakcji. Z analizy literatury wynika, że również w tym przypadku do opisu fluktuacji stosuje się rozkład log – normalny.

Niech sygnał odebrany $y(t)$ jest określony zależnością

$$y(t) = a(t) \cos[\omega_o t + \phi(t)] + n(t), \quad -\infty < t < \infty \quad (3)$$

gdzie: $a(t) \geq 0$ jest zmienną losową reprezentującą obwiednię, $\phi(t)$ - jest fazą chwilową, ω_o - pulsacją chwilową, $n(t)$

zakłóceniem addytywnym o normalnym rozkładzie amplitudy.

W dalszej analizie zakładamy występowanie szybkich zaników oraz powolnych fluktuacji, dlatego też

$$a(t) = s(t) w(t) \quad (4)$$

gdzie: $s(t)$ jest zmienną losową reprezentującą obwiednię sygnału z szybkimi zanikami, $w(t)$ - zmienną losową reprezentującą obwiednię sygnału z fluktuacjami.

Do opisu zaników szybkich często stosuje się rozkład Rayleigha. Wówczas obwiednia sygnału posiada rozkład o gęstości prawdopodobieństwa

$$p_s(s) = \frac{s}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right); \quad s \geq 0 \quad (5)$$

gdzie $2\sigma^2 = E[s^2] = s_{sk}^2$ jest wartością średniokwadratową obwiedni sygnału, czyli kwadratem wartości skutecznej, przy czym $E[\]$ oznacza operator uśredniania.

Wartość średnia i wariancja obwiedni Rayleigha wyrażone są odpowiednio wzorami

$$E[s] = \sqrt{\pi/2} \sigma \quad (6a)$$

$$\text{Var}[s] = \sigma_s^2 = (2 - \pi/2) \sigma^2 \quad (6b)$$

Ponadto dystrybuanta rozkładu Rayleigha jest określona jako

$$P(s \leq s_p) = 1 - \exp\left(-\frac{s_p^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

Dystrybuanta obwiedni sygnału umożliwia oszacowanie prawdopodobieństwa głębokiego zaniku. Wartość progową s_p mierzymy względem kwadratu skutecznej wartości obwiedni, przy czym $s_p^2 = \varepsilon^2 s_{sk}^2$. Dla głębokich zaników, gdy $\varepsilon \ll 1$, słuszne jest przybliżenie $1 - \exp(-\varepsilon^2) \approx \varepsilon^2$, dlatego też $P(s \leq s_p) = \varepsilon^2 = s_p^2 / s_{sk}^2$.

Obwiednia sygnału z fluktuacjami opisana jest rozkładem log – normalnym o gęstości prawdopodobieństwa określonej wzorem [1]

$$p_w(w) = \frac{1}{w \sigma_p \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln w - \mu)^2}{2\sigma_p^2}\right] \quad (8)$$

przy czym $\mu = E[\ln w]$ i $\sigma_p^2 = \text{Var}[\ln w]$ to parametry rozkładu.

Wartość średnia, średniokwadratowa oraz wariancja obwiedni tego sygnału wynosi odpowiednio: [1, 8]

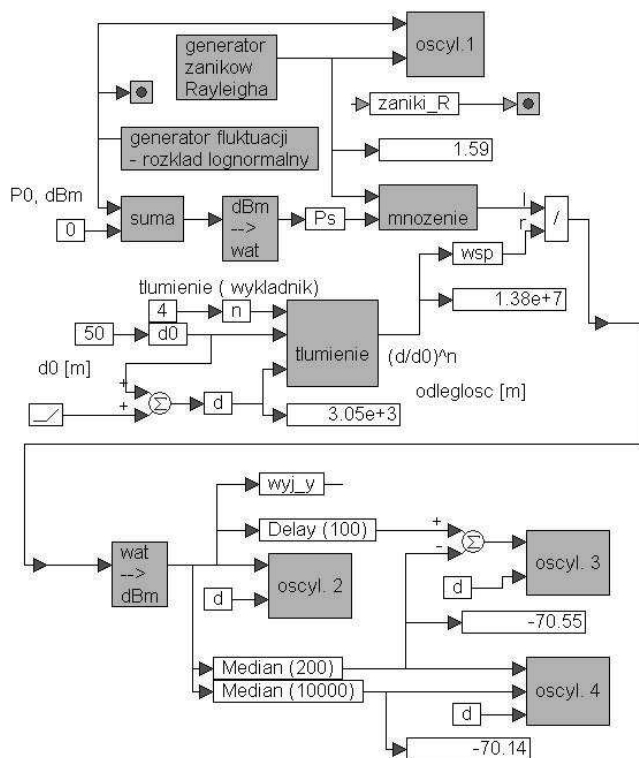
$$\mu_w = E[w] = \exp(\mu + \sigma_p^2/2) \quad (9a)$$

$$E[w^2] = \exp(2\mu + 2\sigma_p^2) \quad (9b)$$

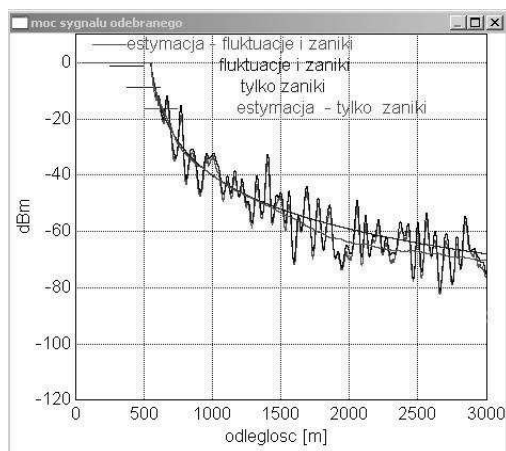
$$\text{Var}[w] = \sigma_w^2 = \exp(2\mu + \sigma_p^2) [\exp(\sigma_p^2) - 1] \quad (9c)$$

Na rysunku 1 przedstawiono model kanału z zanikami i fluktuacjami, przy czym istnieje możliwość niezależnej aktywacji tych zaników. Natomiast na rysunku 2 przedstawiono przykładowe uzyskane przebiegi mocy sygnału odebranego w funkcji długości trasy propagacyjnej (oscylloskop 4 na rys. 1). Do estymacji mocy sygnału odebranego wykorzystano dwa filtry medianowe o różnej wielkości analizowania

wanego okna. Filtr medianowy dobrze usuwa szumy, jednocześnie nie eliminuje ważnych informacji. Podstawową operacją wykonywaną przez ten filtr jest sortowanie zbioru wartości wejściowych i wybór wartości środkowej.

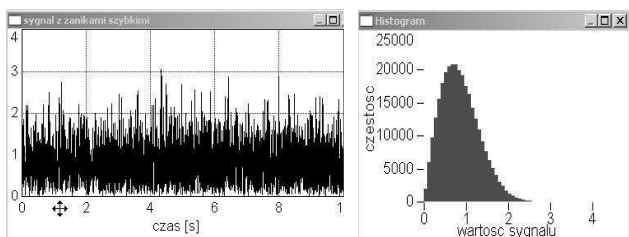


Rys. 1. Model kanału z zanikami szybkimi i fluktuacjami

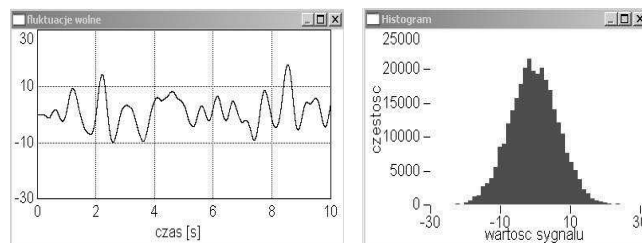


Rys. 2. Moc sygnału odebranego dla modelu z zanikami szybkimi i fluktuacjami

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przebieg obwiedni sygnału i jej histogram odpowiednio z zanikami szybkimi oraz z fluktuacjami (oscyloskop 1 na rys. 1).



Rys. 3. Obwiednia sygnału z zanikami szybkimi i jej histogram



Rys. 4. Obwiednia sygnału z fluktuacjami i jej histogram

Odpowiedź impulsowa kanału w każdej chwili jest ciągiem impulsów o stałych opóźnieniach. Amplitudy tych impulsów są procesem losowym. Przykłady wyznaczenia rozkładu obwiedni sygnału transmitowanego w warunkach statycznych, na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych, przedstawiono w pracy [9], natomiast przykłady odpowiedzi impulsowych w miejskim środowisku propagacyjnym w pracy [10]. Ponadto w pracy [11] zawarto wyniki badań rozkładów prawdopodobieństw sygnałów zakłócających występujących w miejskim kanale radiowym.

Rozkład Rayleigha jest modelem o stałej względnej głębokości zaników. Znacznie szerszą klasę zaników opisują inne rozkłady, np. Rice'a, Nakagami, Weibulla, Suzuki, $\alpha - \mu$, $\eta - \mu$, $k - \mu$ [12 - 19]. Przykładowo rozkład Suzuki dobrze odzwierciedla lądowy mobilny kanał radiowy oraz kanał dla transmisji satelitarnej w środowisku miejskim.

4. STATYSTYKI DRUGIEGO RZĘDU KANAŁU Z ZANIKAMI

Do opisu statystyk zaników stosuje się między innymi średnią częstość przejść obwiedni przez określony poziom s_p . Średnią częstość $\bar{N}(s = s_p)$ jednokierunkowych przejść zmiennej losowej reprezentującej obwiednię sygnału w kanale z zanikami przez określoną wartość progową (ang. LCR - level crossing rate) można obliczyć na podstawie zależności [1, 6, 7]

$$\bar{N}(s = s_p) = \int_0^{\infty} \left| \dot{s} \right| p_{s\dot{s}}(s = s_p, \dot{s}) ds \quad (10)$$

przy czym $\dot{s} = ds/dt$ jest pochodną obwiedni, $p_{s\dot{s}}(s, \dot{s})$ jest łączną gęstością prawdopodobieństwa obwiedni sygnału i jej pochodnej, przy czym zmienne losowe reprezentujące s oraz \dot{s} są niezależne [7, 8].

Dla obwiedni o rozkładzie Rayleigha średnia częstość zaników poniżej s_p jest określona wzorem [1, 6, 20]

$$\bar{N}(s = s_p) = \sqrt{\pi} f_m \frac{s_p}{\sigma} \exp\left(-\frac{s_p^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

gdzie $f_m = v/\lambda$ jest maksymalnym dopplerowskim przesunięciem częstotliwości przy odbiorze fali pojedynczej, v jest składową prędkości ruchu w kierunku zgodnym z trajektorią propagacji, λ jest długością fali radiowej.

W kanale Rayleigha kwadrat unormowanego progu wynosi $\varepsilon^2 = s_p^2/s_{sk}^2 = s_p^2/2\sigma^2$. Wówczas średnią częstość zaników poniżej określonego progu można zapisać jako

$$\bar{N}\left(\frac{s_p}{s_{sk}} = \varepsilon\right) = \sqrt{2\pi} f_m \varepsilon \exp(-\varepsilon^2) \quad (12)$$

Innym parametrem opisującym zaniki jest średni czas trwania $\bar{\tau}$ zaniku obwiedni sygnału poniżej określonej wartości (ang. AFD - average fade duration). Pomiędzy \bar{N} i $\bar{\tau}$ istnieje następująca zależność [1, 6]

$$\bar{\tau}(s = s_p) = \frac{P(s \leq s_p)}{\bar{N}(s = s_p)} = \frac{1}{\bar{N}(s = s_p)} \int_0^{s_p} p_s ds \quad (13)$$

Dla głębokich zaników Rayleigha czas trwania zaniku można określić na podstawie wzoru

$$\bar{\tau}(s = s_p) \approx \sigma \left[\exp\left(\frac{s_p^2}{2\sigma^2}\right) - 1 \right] / (\sqrt{\pi} f_m s_p) \quad (14)$$

Graficzne przedstawienie wymienionych statystyk w funkcji zależnej od wartości progowej obwiedni zostało przedstawione między innymi w pracach [6, 20].

5. WYBRANE MODELE KANAŁU RADIOWEGO

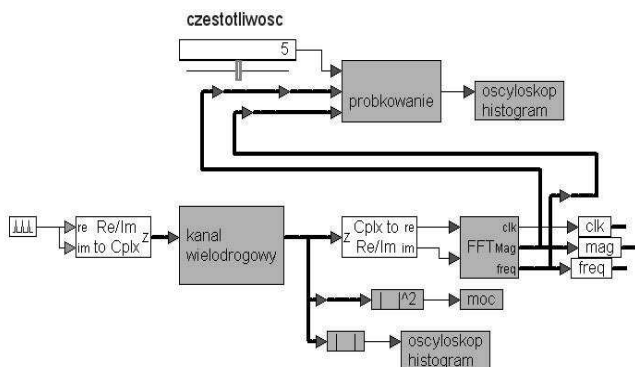
Dla RRL w terenie zabudowanym ważną rolę odgrywa zjawisko propagacji wielodrogowej, dla której występuje odbicie sygnału, dyfrakcja, rozproszenie i absorpcja. Dla modelu wielodrogowego sygnał docierający do odbiornika jest sumą M składowych dochodzących różnymi drogami, przy czym każda ze składowych charakteryzuje się własnym opóźnieniem, fazą i tłumieniem. Ponadto w pobliżu odbiornika każda ze składowych może ulec rozproszeniu na N składowych. Jeżeli odbiornik znajduje się w ruchu, częstotliwość nośna każdej ze składowych rozproszenia jest przesunięta o pulsację Dopplera [4]. Wówczas sygnał odebrany można zapisać jako

$$y(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \alpha_{i,j} k(t - \tau_{i,j}) \exp[j(\omega_0 t - \omega_0 \tau_{i,j} + \omega_{i,j} t)] \quad (15)$$

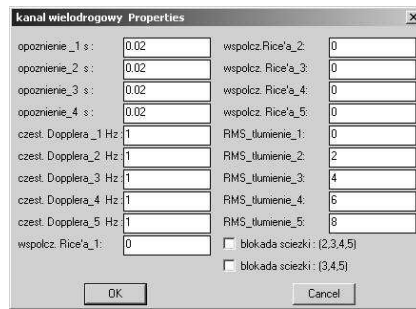
$$k(t) = \sqrt{2E_0} u(t) \exp[j(\Phi(t))] \quad (15)$$

gdzie: E_0 jest mocą promieniowaną, $\phi(t)$ odpowiada modulacji fazy, ω_0 jest pulsacją nośnej, $\alpha_{i,j}$, $\tau_{i,j}$, $\omega_{i,j}$ są odpowiednio: tłumieniem, opóźnieniem i pulsacją dopplerowską i -tej i j -tej fali, $u(t)$ jest sygnałem modulującym.

Wielodrogowy model kanału z efektem Dopplera przedstawiono na rysunku 5. Jego parametrami dla każdej ścieżki są: opóźnienie propagacyjne, współczynnik Rice'a (stosunek mocy ścieżki bezpośredniej do mocy składowych rozproszonych), współczynnik tłumienia oraz częstotliwość Dopplera (rys. 6).

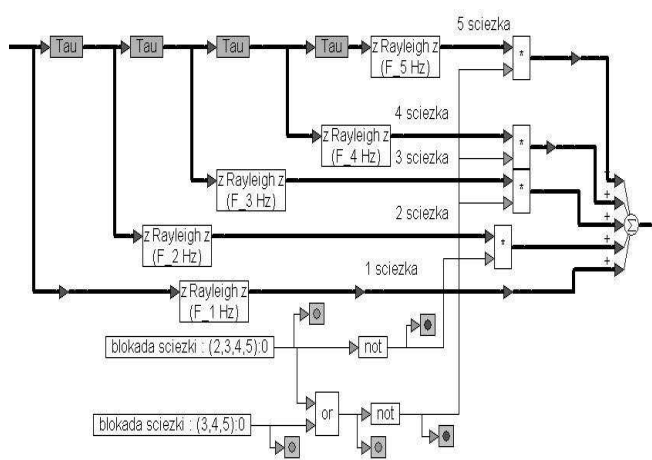


Rys. 5. Model kanału wielodrogowego z efektem Dopplera

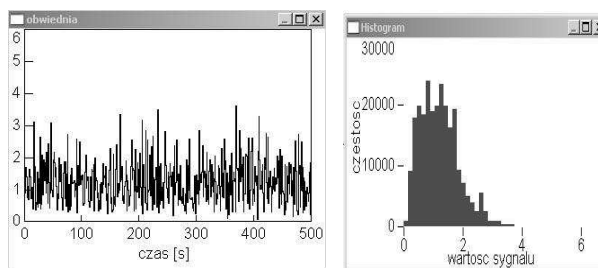


Rys. 6. Parametry wejściowe modelu kanału wielodrogowego

Strukturę bloku *kanal wielodrogowy* przedstawiono na rysunku 7, przy czym do jego budowy wykorzystano moduł opisujący kanał Rayleigha, który jest dostępny w pakiecie Vissim. Dodatkowo w modelu istnieje możliwość blokady określonych ścieżek propagacyjnych. Obwiednię sygnału na wyjściu kanału i jej histogram przedstawiono na rysunku 8.



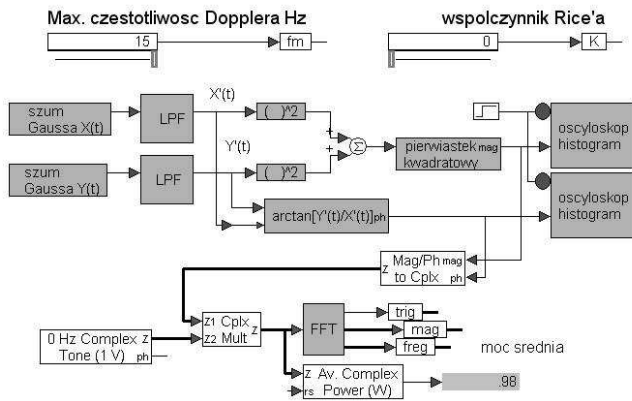
Rys. 7. Budowa bloku *kanal wielodrogowy*



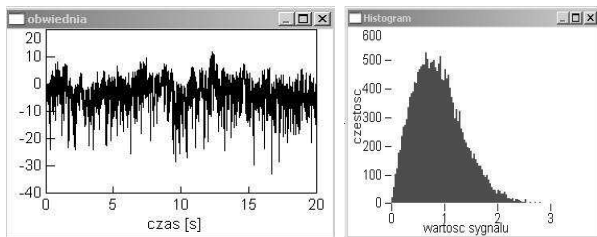
Rys. 8. Obwiednia sygnału na wyjściu kanału i jej histogram

Na rysunku 9 przedstawiono kanał z zanikami Rayleigha, do budowy którego wykorzystano generatory szumu gaussowskiego oraz filtry dolnopasmowe (ang. LPF). W modelu tym należy określić współczynnik Rice'a oraz maksymalną częstotliwość Dopplera. Uzyskany przebieg obwiedni i jej histogram (rys. 10) potwierdzają prawidłowość budowy modelu.

Do modelowania transmisji w paśmie wysokich częstotliwości HF (3 do 30 MHz) wykorzystuje się model Wattersona [21 - 26]. Przykładowo ten zakres częstotliwości jest stosowany w systemach morskich i satelitarnych. Na rysunku 11 przedstawiono część nadawczą układu transmisji danych, tj. model kanału z możliwością wyboru sygnału wejściowego (między innymi fala prostokątna, sygnał losowy) oraz modulacją QPSK. Sygnał na wyjściu kanału można zapisać jako [22, 24, 25]



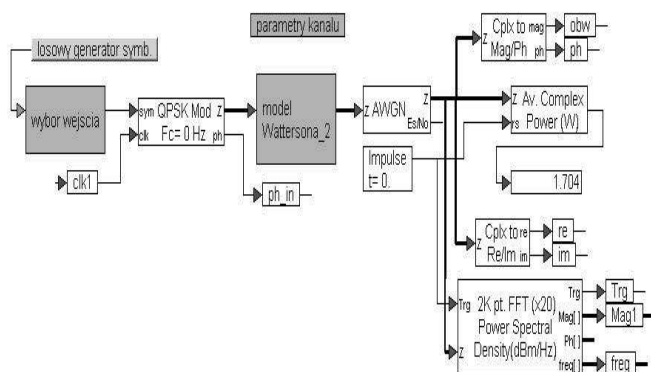
Rys. 9. Model kanału z zanikami Rayleigha



Rys. 10. Obwiednia sygnału na wyjściu kanału Rayleigha i jej histogram

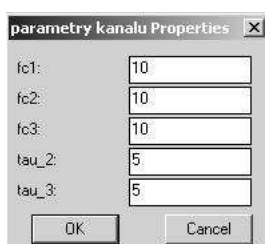
$$y(t, \tau) = \sum_{m=1}^M \rho_m c_m(t) \exp[j(2\pi f_0(t - \tau_m) + f_{Dm}t)] r(t - \tau_m) \quad (16)$$

gdzie: ρ_m jest tłumieniem m -tej ścieżki propagacyjnej, τ_m opóźnieniem, $c_m(t)$ procesem losowym o rozkładzie Gaussa $N(0, 1)$, który reprezentuje współczynniki wagowe, przy czym $|c_m(t)|$ posiada rozkład Rayleigha, f_{Dm} przesunięciem częstotliwości, $r(t)$ sygnałem wejściowym.



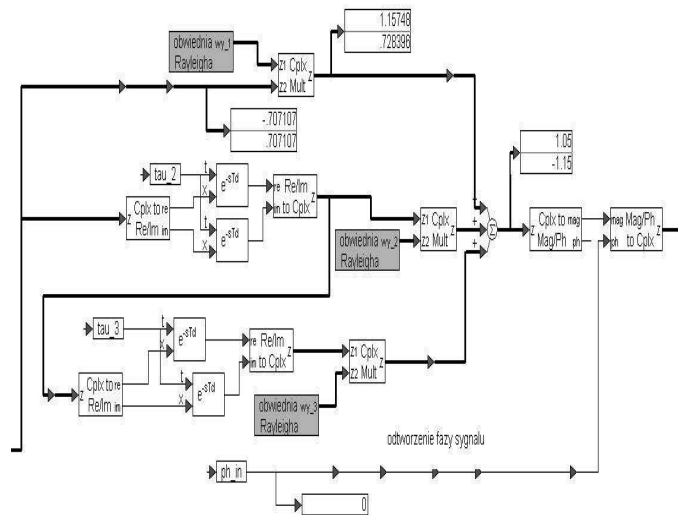
Rys. 11. Schemat układu transmisji z modelem kanału Wattersona

Parametrami wejściowymi dla każdej z trzech zamodelowanych ścieżek modelu są: opóźnienie oraz częstotliwość odcięcia filtra LPF (rys.12).



Rys. 12. Parametry wejściowe modelu kanału Wattersona

Strukturę modelu kanału Wattersona przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Struktura kanału Wattersona

Do modelowania transmisji w paśmie częstotliwości mikrofalowych wykorzystuje się wielodrogowy kanał Rummera, który został opisany w pracy [27]. W pracy tej scharakteryzowano także kanał Jakes'a. Ponadto w [28] przedstawiono model kanału Saleh – Valenzuela, który jest stosowany do opisu fal radiowych rozchodzących się w zamkniętych pomieszczeniach.

6. ZAKOŃCZENIE

Przedstawione przykłady obliczania współczynnika tłumienności trasy, ze względu na różnorodność i złożoność problemów związanych z odbiciem, rozpraszaniem, dyfrakcją sygnałów radiowych, są złożonym zagadnieniem. W procesie projektowania systemów transmisyjnych ważnym czynnikiem w wyznaczaniu tłumienności trasy z wykorzystaniem modeli propagacyjnych jest właściwy wybór określonego modelu. Istotny jest również wybór odpowiedniego modelu zaników. Budowa układu symulacyjnego pozwala na badania, które umożliwiają między innymi pomiary prawdopodobieństwa błędu elementowego, stosunku mocy sygnału do mocy szumu, analizę widma sygnału w zależności od mocy sygnału nadawanego i rodzaju zakłóceń. Jest ponadto możliwe dodanie lub modyfikowanie poszczególnych elementów modelu. Modele symulacyjne stanowią więc bazę do dalszych prac eksperymentalnych i poszukiwań nowych rozwiązań.

8. BIBLIOGRAFIA

1. Wojnar A.: Systemy radiokomunikacji ruchomej lądowej, WKiŁ, 1989.
2. Katulski R.: Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2014.
3. Bogucka H.: Projektowanie i obliczenia w radiokomunikacji, Poznań 2005, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
4. Langowski A.: Modelowanie kanałów radiowych ze zjawiskiem Dopplera, Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne, Poznań 2003.
5. Bugaj M, Wnuk M.: Modelowanie rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w warunkach idealnych i rzeczywistych, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-

- 2097, R. 90, NR 7/2014, str. 152-155, DOI: 10.12915/pe.2014.07.31.
6. Guimaraes D. A.: Digital Transmission. A Simulation-Aided Introduction with VisSim/Comm, Springer, 2009, ISBN 978-3-642-01358-4, DOI 10.1007/978-3-642-01359-1.
 7. Patzold M.: Mobile fading channels. John Wiley & Sons, Ltd., 2002.
 8. Noga K. M.: Charakterystyka kanału z wolnymi zanikami opisanymi rozkładem log-normalnym, Automatyza-cja i Eksploatacja Systemów Sterowania i Łączności, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia, 2005, ISBN 83-87280-79-8, str. 401 – 409.
 9. Studański R., Noga K. M.: Wyznaczanie rozkładu ob-wiedni sygnału transmitowanego w warunkach statycz-nych, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Tele-komunikacyjne, Nr. 8 - 9, 2016, str. 995 – 999, ISSN 1230-3496, e- ISSN 2449-7487, DOI: 10.151.99/59.2016.8.
 10. Studański R., Noga K. M.: Przykłady odpowiedzi im-pulsowych kanału radiokomunikacyjnego w miejskim środowisku propagacyjnym, Przegląd Telekomunika-cyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, Nr. 8 - 9, 2015, str. 1414 – 1418, ISSN 1230-3496, e- ISSN 2449-7487, DOI: 10.151.99/ 59.2016.8.
 11. Noga K. M.: Zastosowanie metod numerycznych do ba-dania rozkładów prawdopodobieństw sygnałów zakłóca-jących, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Nr 98, 2017, str. 202-209, ISSN 1644-1818, e-ISSN 2451-2486.
 12. Noga K. M.: Charakterystyka kanału z zanikami opisa-nymi rozkładem $\eta - \mu$, Zeszyty Naukowe Akademii Ma-rynarki Wojennej, Nr 185A, Gdynia, 2011, str. 295-304, ISSN 0860-8891.
 13. Noga K. M. , Pałczyńska B. - Overview of Fading Channel Modeling, International Journal of Electronics and Telecommunications, nr 4/2010, pp. 339-344, ISSN 0867 6747.
 14. Noga K. M.: Kanał transmisyjny z zanikami opisanymi rozkładem $\kappa - \mu$, Przegląd Telekomunikacyjny i Wia-domości Telekomunikacyjne, czerwiec 2009, str. 619 – 622, ISSN 1230-3496.
 15. Noga K. M - Charakterystyka kanału z zanikami opi-snymi rozkładem $\alpha - \mu$, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, kwiecień 2008, str. 355 – 358, ISSN1230-3496.
 16. Noga K. M, Pałczyńska B.: Simulation of fading in communication channel, Polish Journal of Environ-mental Studies, Vol. 16, No. 4B, 2007, ISSN 1230-1485, pp. 146-150.
 17. Noga K. M., Karagiannidis G. K.: Characterization of Weibull fading channels, Electronics and Telecommuni-cations Quarterly, 2007, Vol. 53, No. 1, pp. 47-62.
 18. Noga K. M - Uogólnione probabilistyczne modele zani-ków w kanale transmisyjnym, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Poli-technika Gdańska, Radiokomunikacja, Radiofonia i Tele-wizja, Nr. 1, KKRRiT, Gdańsk, 13 – 15 czerwca 2007, str. 463 – 466.
 19. Prabhu G. S., Shankar P. M.: Simulation of flat fading using Matlab for classroom instruction, IEEE Transac-tions on Education, Vol. 45, No 1, February 2002, pp. 19-24.
 20. Noga K. M.: Statystyki drugiego rzędu kanału Rayle-igha oraz Nakagamiego, Kwartalnik Elektroniki i Tele-komunikacji, Vol. 52, Nr 4, 2006, str. 617 – 628.
 21. Metelev S. A.: Modification of the Watterson model of the ionospheric HF radio communication channel for adaptive spaced reception, Radio Physics and Quantum Electronics, Springer Science, Vol. 55, No. 4, 2012, pp. 241-252.
 22. Kui Li, Yan Ming: Simulation of digital radio Mondiale, 2011, IEEE 3 rd International Conference on Communi-cation Software and Networks, pp. 325 – 327.
 23. Liu Ming, Li Jiangiang, Jiang Hua : Automatic classifi-cation of modulations in the flat fading HF chan-nel based on Watterson model, 2010, Second Interna-tional Workshop on Education Technology and Com-puter Science, pp. 218 – 221.
 24. Yang Guo, Ke Wang: A real – time simulator of wide-band HF propagation channel, 2009, International Con-ference on Communication Software and Networks, 2009, pp. 304 – 308.
 25. Yang Guo, Ke Wang: An improved simulation of HF channel with Gaussian random time delays and Doppler shifts, 2009, Second International Workshop on Cogni-tive Radio and Advanced Spectrum Management, pp. 122 – 126.
 26. Maxim M. Tolkachev, Evgeniy M. Lobov, Nikolai A. Kandaurov: Algorithm elaboration of iterative process-ing of M-CPSK signals in the ionospheric channel with selective interferences, 2017, Systems of Signal Syn-chronization, Generating and Processing in Telecom-munications, pp. 1 –5.
 27. Noga K.M.: Transmisja danych w kanale radiowym, wybrane zagadnienia w środowisku Vissim, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Poli-techniki Gdańskiej, Nr 40, 2014, s. 77-80.
 28. Noga K. M. - Model kanału Saleh – Valenzuela, Prze-gład Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunika-cyjne, maj 2012, str. 173 – 176, ISSN 1230-3496.

THE SIMULATION MODELS OF CHANNELS IN RADIOCOMMUNICATION SYSTEMS AND THEIR CHARACTERISTICS

The wireless channel can be described as a function of time and space. The received signal is the combinations of many replicas of the original signal. Multipath propagation produces several effects on the received signal, like time and frequency dispersion, amplitude fluctuation. The use of mathematical models describing the propagation of radio waves allows to simulate the propagation of different environment. In this paper fast and slow fading models and their characteristics are presented. A Rayleigh, mobile multipath and Watterson channel model are also described in this paper.

Keywords: radio communication channel, channel models, fast fading, slow fading, attenuation.