



## Wpływ przemieszczania się węzłów sieci ad-hoc na poziom interferencji

STEFAN JACKOWSKI, BARTŁOMIEJ KOCOT<sup>1</sup>

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki,  
00-903 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

<sup>1</sup>Polska Agencja Żeglugi Powietrznej, Biuro Służb Technicznych,  
02-147 Warszawa, ul. Wieżowa 8

**Streszczenie.** W artykule omówiono model stochastyczny pozwalający wyznaczyć poziom interferencji w bezprzewodowych sieciach typu ad-hoc oraz przedstawiono koncepcję modelu uwzględniającego mobilność węzłów sieci. Zaproponowany model zweryfikowano poprzez badania symulacyjne z wykorzystaniem środowiska Matlab/Simulink.

**Słowa kluczowe:** radiokomunikacja, interferencje, sieci ad-hoc

### 1. Wprowadzenie

Koncepcja bezprzewodowych sieci typu ad-hoc powstała w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Jednak wiele fundamentalnych problemów w ich projektowaniu i implementacji nie zostało dotąd rozwiązanych. W większości publikacji na ten temat rozpatruje się głównie problematykę strukturalną i zarządzającą, poświęcając mało miejsca warstwie fizycznej, a w ramach niej interferencjom w sieciach, które są związane z rodzajem wykorzystywanych systemów modulacyjnych (sygnałowych). Pomija się przy tym aspekt przemieszczania się węzłów (użytkowników sieci). W niniejszym artykule omówiono model matematyczny pozwalający oszacować poziom interferencji w sieciach typu ad-hoc oraz przedstawiono koncepcję modelu uwzględniającego mobilność węzłów sieci.

## 2. Modele interferencyjne

Poziom interferencji w sieciach typu ad-hoc można określić z wykorzystaniem modelu deterministycznego lub stochastycznego. Podział ten wynika z przyjmowanego założenia dotyczącego rozmieszczenia węzłów sieci. W modelu deterministycznym węzły sieci rozmieszczone są w strukturze heksagonalnej, natomiast w modelu stochastycznym przyjmuje się założenie, iż rozmieszczenie węzłów na powierzchni koła o określonym promieniu można przedstawić za pomocą modelu opisanego procesem stochastycznym (w większości przypadków procesem Poissona). Model deterministyczny został szczegółowo omówiony w [1].

### 2.1. Model stochastyczny

Przyjęto następujące, upraszczające założenia:

- Węzły sieci *ad-hoc* są równomiernie rozmieszczone na powierzchni koła o promieniu  $r$ , z gęstością rozmieszczenia  $\rho$  węzłów na jednostkę powierzchni.
- Transmisja między węzłami odbywa się poprzez kanały radiowe z zanikami. Zaniki modelowane są rozkładem logarytmiczno-normalnym (log-normalnym).

Dokonajmy oszacowania poziomu sygnału interferującego docierającego do węzła odniesienia rozmieszczonego w środku koła o promieniu  $r$ . Oszacowanie to można podzielić na kilka zagadnień:

- Oszacowanie liczby węzłów interferujących.
- Oszacowanie rozmieszczenia węzłów interferujących względem węzła odniesienia.
- Oszacowanie poziomów sygnałów interferujących pochodzących z węzłów rozmieszczonych w różnej odległości od węzła odniesienia.
- Oszacowanie wartości średniej oraz wariancji wynikowego sygnału zakłócającego z wykorzystaniem różnych metod aproksymacji (FW — Fenton-Wilkinson, SW — Schwarz-Yeh).

Liczba węzłów interferujących oraz gęstość ich rozmieszczenia  $\nu$  zależy od liczby wszystkich węzłów tworzących sieć (gęstości ich rozmieszczenia na jednostce powierzchni  $\rho$ ), współczynnika propagacji  $\xi$ , definiowanego jako stosunek odchylenia standardowego  $\sigma$  wokół logarytmu ze średniego poziomu mocy odbieranego sygnału do współczynnika zaników  $\eta$  oraz typu protokołu MAC (ang. *Medium Access Control*).

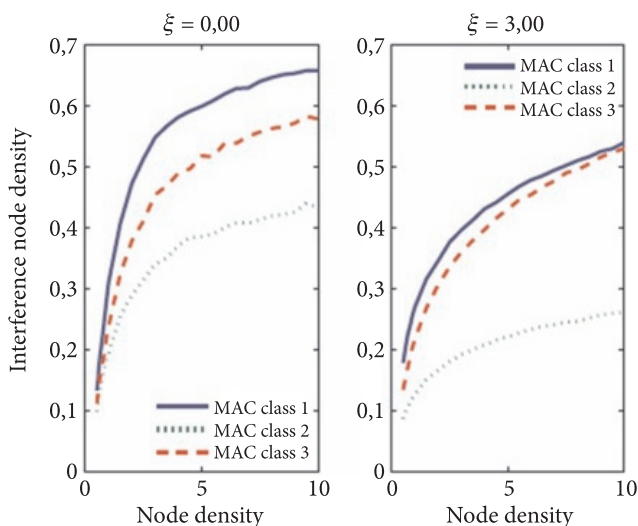
Na podstawie badań oraz przeprowadzonych symulacji [6] gęstość rozmieszczenia węzłów interferujących można wyznaczyć z zależności [6]:

$$\nu \approx \begin{cases} 0,3466 + 0,1658 \log(\rho) & \text{dla MAC klasa I} \\ 0,2403 + 0,0910 \log(\rho) & \text{dla MAC klasa II} \\ 0,2634 + 0,1741 \log(\rho) & \text{dla MAC klasa III.} \end{cases} \quad (1)$$

Protokoły MAC w sieciach bezprzewodowych typu ad-hoc można podzielić na trzy klasy, ze względu na sposoby rozwiązywania przez nie problematyki węzłów ukrytych i odkrytych:

- klasa I — protokoły zorientowane na nadajnik;
- klasa II — protokoły zorientowane na nadajnik i odbiornik;
- klasa III — protokoły zorientowane na odbiornik.

Zależność gęstości rozmieszczenia węzłów interferujących od klasy protokołu MAC w bezprzewodowych sieciach ad-hoc została przedstawiona na rysunku 1.



Rys. 1. Zależność gęstości rozmieszczenia węzłów interferujących od klasy protokołu MAC w bezprzewodowych sieciach ad-hoc

Przyjmijmy, że węzły interferujące są równomiernie rozmieszczone z gęstością  $\nu$  wokół węzła odniesienia. Oznaczmy przez  $r_m$  odległość  $m$ -tego węzła zakłócającego od węzła odniesienia. Na podstawie [6]:

$$E[r_m] \approx \sqrt{\frac{m}{\pi \cdot \nu}}. \quad (2)$$

Sygnal nadawany przez każdy  $m$ -ty węzeł interferujący rozmieszczony w odległości  $r_m$  od węzła odniesienia może nie stanowić interferencji dla węzła odniesienia

z prawdopodobieństwem  $1 - p(r_m)$ , gdzie  $p(r_m)$  jest prawdopodobieństwem połączenia między węzłem interferującym a węzłem odniesienia określonym zależnością [6]:

$$p(r_m) = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( u \cdot \frac{\log(\overline{r_m})}{\xi} \right) \right], \quad (3)$$

gdzie  $u = \frac{10}{\sqrt{2} \cdot \log 10}$ , natomiast  $\overline{r_m}$  jest odległością znormalizowaną, wyrażoną poprzez zależność  $\overline{r_m} = \frac{r_m}{R}$ , gdzie  $R$  jest promieniem obszaru pokrycia węzła odniesienia.

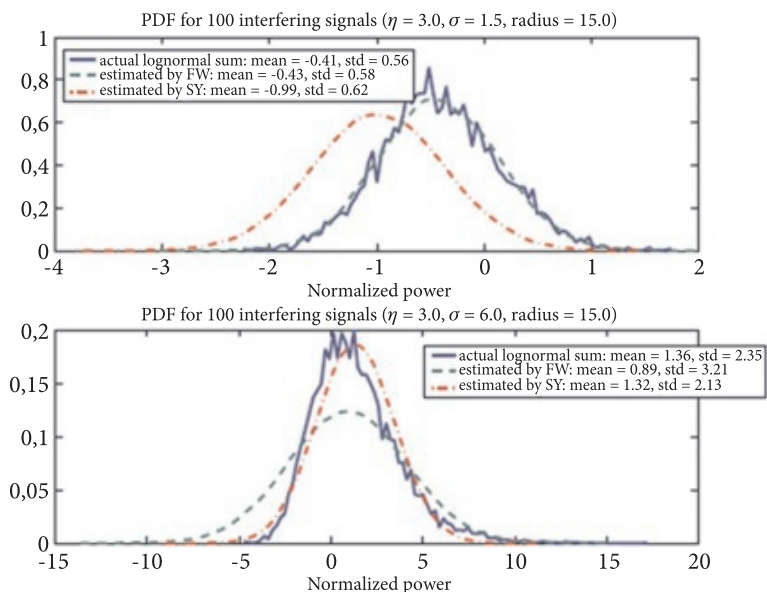
Uwzględniając różne poziomy sygnałów zakłócających docierających do węzła odniesienia, należy więc przy oszacowywaniu całkowitego poziomu sygnału zakłócającego w węzle odniesienia sumować sygnały pochodzące od różnych węzłów zakłócających z odpowiednim współczynnikiem wagowym, proporcjonalnym do  $1 - p(r_m)$ . Na podstawie badań i symulacji przedstawionych w [6] współczynnik ten można wyrazić zależnością  $w = (1 - p(r_m))^\sigma$ . Współczynnik ten zawiera się w przedziale od 0 do 1. Gdy  $r_m$  wzrasta,  $p(r_m)$  maleje, co powoduje zbliżanie się współczynnika  $w$  do wartości 1.

Z przyjętego na wstępie założenia wynika, że poziomy poszczególnych sygnałów zakłócających będą zmiennymi losowymi o rozkładzie log-normalnym. Sumaryczny poziom sygnału zakłócającego docierający do węzła odniesienia można więc oszacować z wykorzystaniem dwóch metod aproksymacji: metody Fentona-Wilkinsona (FW); metody Schwartz-Yeha (SY). Obie metody zakładają, że zmienna losowa stanowiąca sumę zmiennych losowych o rozkładach log-normalnych posiada rozkład log-normalny, natomiast jej wartość średnią i odchylenie standardowe można bezpośrednio wyznaczyć z wartości średnich i odchyłeń standardowych składowych zmiennych losowych. Metoda FW jest stosowana w przypadku, gdy odchylenia standardowe składowych zmiennych losowych spełniają zależność  $\sigma \leq 4$  dB, natomiast metoda SY, gdy  $4$  dB  $< \sigma < 12$  dB.

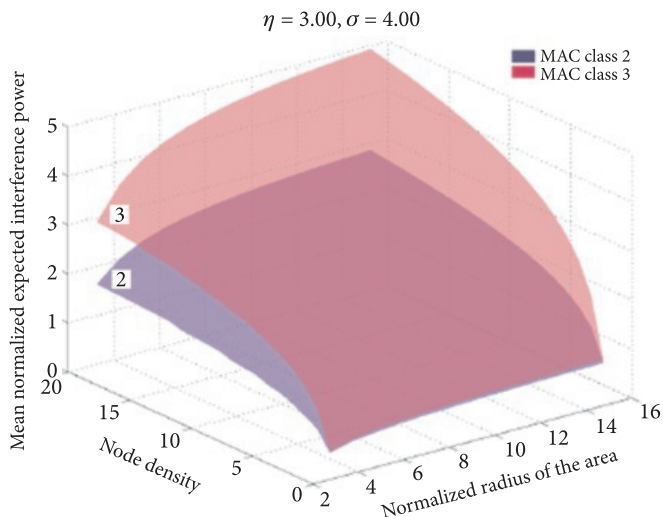
Z wykorzystaniem dwóch wyżej omówionych metod aproksymacji (FW, SY) dokonano oszacowania poziomu interferencji w węzle odniesienia, który znajdował się w środku koła o znormalizowanym promieniu równym 15 (rys. 2). W obszarze takim założono funkcjonowanie 100 węzłów, rozlokowanych w sposób losowy, jednak w znanych odległościach od węzła odniesienia. Oszacowania dokonano dla współczynnika zaników  $\eta = 3,0$  oraz dwóch wartości odchylenia standardowego ( $\sigma = 1,5$ ;  $\sigma = 6,0$ ) zmiennych losowych reprezentujących sygnały zakłócające docierające do węzła odniesienia. Jak wynika z krzywych przedstawionych na rysunku 2, obie metody aproksymacji są bardzo dokładne, zarówno dla niskich, jak i większych wartości  $\sigma$ .

Następnie dokonano oszacowania wartości średniej sygnału zakłócającego w węzle odniesienia w funkcji wielkości obszaru usługowego oraz gęstości

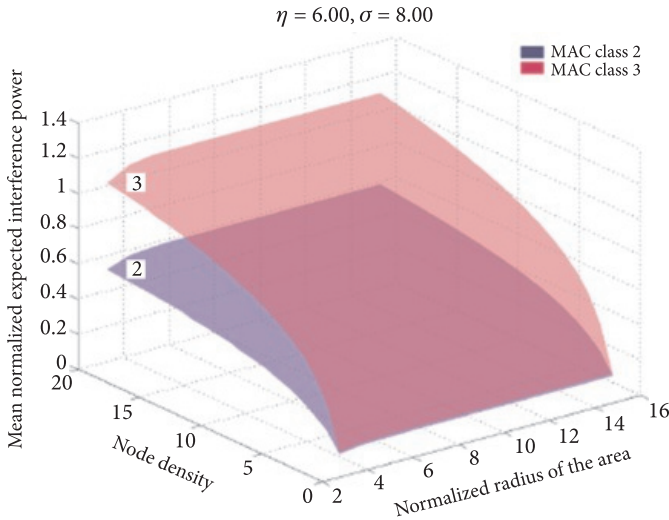
rozmieszczenia węzłów sieci dla dwóch wartości współczynnika zaników ( $\eta = 3,0$ ;  $\eta = 6,0$ ) oraz dwóch wartości odchylenia standardowego ( $\sigma = 4,0$ ;  $\sigma = 8,0$ ). Wyniki przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 2. Porównanie metod aproksymacji (FW, SY) wykorzystywanych do oszacowania poziomu interferencji w sieci ad-hoc



Rys. 3. Poziom interferencji w funkcji wielkości obszaru usługowego sieci ad-hoc oraz gęstości rozmieszczenia węzłów dla  $\eta = 3,0$  oraz  $\sigma = 4,0$



Rys. 4. Poziom interferencji w funkcji wielkości obszaru usługowego sieci ad-hoc oraz gęstości rozmieszczenia węzłów dla  $\eta = 6,0$  oraz  $\sigma = 8,0$

Jak wynika z hiperpłaszczyzn przedstawionych na rysunkach 3 i 4, w sieciach typu ad-hoc wzrost gęstości rozmieszczenia węzłów lub zmniejszenie obszaru usługowego sieci niekoniecznie musi prowadzić do wzrostu poziomu interferencji. Gęstość rozmieszczenia węzłów interferujących zależy od klasy protokołu MAC. Każdy z protokołów MAC w inny sposób ogranicza liczbę sygnałów zakłócających w odniesieniu do jednostki powierzchni obszaru. Dlatego też sumaryczny poziom sygnału zakłócającego nie wzrasta liniowo wraz ze wzrostem gęstości rozmieszczenia węzłów sieci. Gęstość rozmieszczenia węzłów interferujących jest proporcjonalna do logarytmu z gęstości rozmieszczenia węzłów sieci i jest mniejsza od 0,8 [6] dla wszystkich klas protokołów MAC. Zarówno w modelu analitycznym, jak i w stochastycznym poziom interferencji wzrasta wraz ze zmniejszaniem się współczynnika zaników.

### 3. Koncepcja modelu interferencyjnego

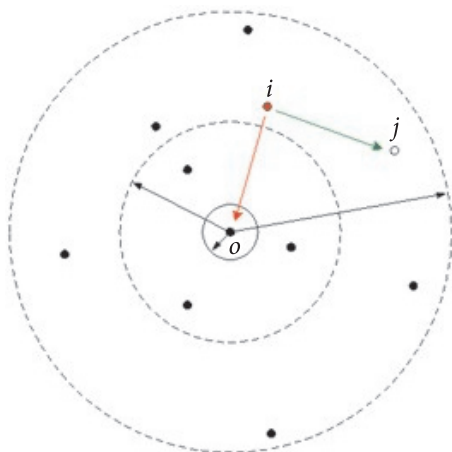
Przyjmijmy następujące założenia:

- każdy węzeł sieci posiada dookólną antenę nadawczo-odbiorczą o takim samym zysku antenowym;
- każdy węzeł sieci wykorzystuje przy nadawaniu mechanizm sterowania mocą polegający na dopasowaniu poziomu mocy nadawczej do odległości od węzła odbiorczego;
- nawiązanie bezpośredniego połączenia między węzłami jest możliwe w przypadku, gdy znajdują się one w odległości nie mniejszej niż  $r_0$  i nie

większej niż  $r_{\max}$ . Węzeł nie może nawiązać komunikacji, jeżeli wokół niego w obszarze o promieniu mniejszym niż  $r_0$  znajduje się jakikolwiek inny węzeł sieci;

- maksymalną odległość, z której odbiornik danego węzła może odbierać sygnały interferencyjne, zdefiniujemy jako zasięg interferencyjny i oznaczymy przez  $r_1$ .

Rozważmy sytuację przedstawioną na rysunku 5. Węzeł  $i$  nadaje do węzła  $j$ , generując jednocześnie sygnał zakłócający docierający do węzła odniesienia  $O$ . Celem będzie wyznaczenie poziomu sygnału zakłócającego docierającego do węzła odniesienia w przypadku komunikujących się węzłów  $i$  i  $j$  przemieszczających się w obszarze o środku w  $O$  i promieniu  $r_1$ .



Rys. 5. Sygnał interferencyjny (czerwona strzałka) w węzle odniesienia ( $O$ ) spowodowany transmisją (zielona strzałka) między węzłami  $i$  i  $j$

Moc sygnału nadawanego przez węzeł  $i$  do węzła  $j$  jest zmienną losową, której wartości chwilowe zależą od odległości między tymi węzłami. Zdefiniujemy odległość między węzłami  $i$  i  $j$  jako zmienną losową  $X_{ij}$ . Dystrybuantę zmiennej losowej  $X_{ij}$  określić można z zależności:

$$F_{X_{ij}}(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{x_{ij}^2 - r_0^2}{r_{\max}^2 - r_0^2} & \text{dla } x_{ij} \in (r_0, r_{\max}] \\ 1 & \text{dla } x_{ij} > r_{\max} \\ 0 & \text{dla } x_{ij} \leq r_0. \end{cases} \quad (4)$$

Funkcję gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $X_{ij}$  można zapisać jako:

$$f_{X_{ij}}(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{2x_{ij}}{r_{\max}^2 - r_0^2} & \text{dla } x_{ij} \in (r_0, r_{\max}] \\ 0 & \text{dla pozostałych } x_{ij}. \end{cases} \quad (5)$$

Jako że poziom sygnału w kanale radiowym maleje proporcjonalnie do wzrostu odległości w potęgę  $\eta$  ( $2 < \eta < 6$ ) między nadajnikiem i odbiornikiem, zdefiniujemy zmienną losową  $Y$ :

$$Y \equiv X_{ij}^\eta. \quad (6)$$

Dystrybuanta zmiennej losowej  $Y$  wynosi

$$F_Y(y) = \begin{cases} F_X\left(y^{\frac{1}{\eta}}\right) & \text{dla } y \in (r_0^\eta, r_{\max}^\eta] \\ 1 & y > r_{\max}^\eta \\ 0 & y \leq r_0^\eta, \end{cases} \quad (7)$$

natomiast funkcję gęstości prawdopodobieństwa zmiennej można zapisać jako:

$$f_Y(y) = \begin{cases} \frac{2y^{\frac{\eta}{2}-1}}{\eta \cdot (r_{\max}^2 - r_0^2)} & \text{dla } y \in (r_0^\eta, r_{\max}^\eta] \\ 0 & \text{dla pozostałych } y. \end{cases} \quad (8)$$

Określimy następnie rozkład zmiennej losowej  $P_t^{ij}$  reprezentującej moc sygnału nadawanego z węzła  $i$  do węzła  $j$ . Jeżeli przyjmiemy, że minimalny poziom mocy sygnału nadawanego przez węzeł  $i$  wynosi  $p_m$ , to moc sygnału nadawanego przez węzeł  $i$  powinna zmieniać się w zależności od odległości między węzłami  $i$  i  $j$  zgodnie z zależnością:

$$P_t^{ij} = p_m \cdot X_{ij}^\eta. \quad (9)$$

Przyjmując, że  $p_m$  jest wielkością stałą, a wartości zmiennej losowej  $X_{ij}$  zawierają się w przedziale  $(r_0, r_{\max}]$ , to wartości zmiennej losowej  $P_t^{ij}$  należą do przedziału  $(p_m \cdot r_0^\eta, p_m \cdot r_{\max}^\eta)$ , natomiast funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $P_t^{ij}$  wynosi:

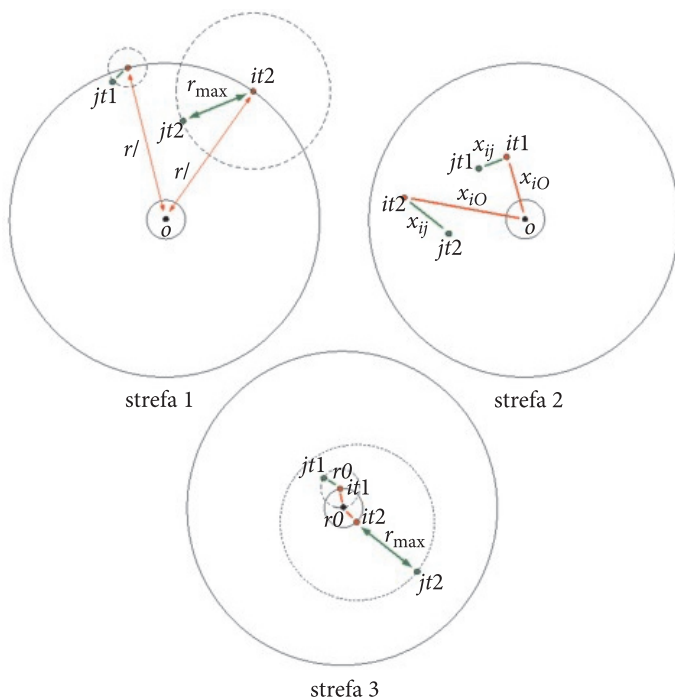


$$f_{P_t^{ij}}(p_t) = \begin{cases} \frac{2 \cdot p_t^{\frac{2}{\eta}-1}}{\eta \cdot p_r^{\frac{2}{\eta}} \cdot (r_{\max}^2 - r_0^2)} & \text{dla } p_m \cdot r_0^\eta < p_t < p_m \cdot r_{\max}^\eta \\ 0 & \text{dla pozostałych } p_t \end{cases} \quad (10)$$

Wyznamy następnie poziom tego sygnału (w tym przypadku jako zakłócającego) nadawany w kierunku węzła odniesienia  $O$  przez węzeł  $i$ . Odległość interferującego węzła  $i$  od węzła  $O$  ( $X_{iO}$ ) jest zmienną losową, której wartości należą do przedziału  $(r_0, r_l]$ , natomiast poziom sygnału interferującego w węzle jest zmienną losową, którą można zapisać jako:

$$P_l = P_t^{ij} \cdot X_{iO}^{-\eta} = \frac{p_m \cdot x_{ij}^\eta}{x_{iO}^\eta} \text{ przy } r_0 < x_{ij} < r_{\max} \text{ oraz } r_0 < x_{iO} < r_l. \quad (11)$$

Na rysunku 6 zobrazowano trzy strefy związane z wzajemnym położeniem węzłów  $i, j$  oraz usytuowaniem węzła  $i$  w stosunku do węzła odniesienia  $O$ .



Rys. 6. Zobrazowanie możliwych przypadków związanych z wzajemnym położeniem węzłów  $i$  i  $j$  oraz usytuowaniem w stosunku do węzła odniesienia

Strefa nr 1 reprezentuje przypadki, w których  $\frac{p_m r_0^\eta}{r_l^\eta} < p_l < \frac{p_m r_{\max}^\eta}{r_l^\eta}$ , strefa nr 2 przypadki w których  $\frac{p_m r_{\max}^\eta}{r_l^\eta} \leq p_l < p_m$ , natomiast strefa nr 3 przypadki, gdzie  $p_m \leq p_l < \frac{p_m r_{\max}^\eta}{r_0^\eta}$ .

Dystrybuanta zmiennej losowej  $P_l$  w zależności od wyżej wymienionych stref może być zapisana jako:

a) Strefa nr 1:  $\frac{p_m r_0^\eta}{r_l^\eta} \leq p_l < \frac{p_m r_{\max}^\eta}{r_l^\eta}$

$$F_{P_l} = \frac{r_l^4 \cdot p_l^{\frac{2}{\eta}} + p_m^{\frac{4}{\eta}} \cdot r_0^4 \cdot p_l^{\frac{2}{\eta}} - 2 \cdot p_m^{\frac{2}{\eta}} \cdot r_0^2 \cdot r_l^2}{2 \cdot p_m^{\frac{2}{\eta}} \cdot (r_l^2 - r_0^2) \cdot (r_{\max}^2 - r_0^2)}; \quad (12)$$

b) Strefa nr 2:  $\frac{p_m r_{\max}^\eta}{r_l^\eta} \leq p_l < p_m$

$$F_{P_l} = \frac{r_l^2}{(r_l^2 - r_0^2)} - \frac{(r_{\max}^2 + r_0^2)}{2 \cdot (r_l^2 - r_0^2)} \cdot p_m^{\frac{2}{\eta}} \cdot p_l^{\frac{2}{\eta}}; \quad (13)$$

c) Strefa nr 3:  $p_m \leq p_l \leq \frac{p_m r_{\max}^\eta}{r_0^\eta}$

$$F_{P_l} = 1 - \frac{r_0^4 \cdot p_l^{\frac{2}{\eta}} + p_m^{\frac{4}{\eta}} \cdot r_{\max}^4 \cdot p_l^{\frac{2}{\eta}} - 2 \cdot p_m^{\frac{2}{\eta}} \cdot r_0^2 \cdot r_{\max}^2}{2 \cdot p_m^{\frac{2}{\eta}} \cdot (r_l^2 - r_0^2) \cdot (r_{\max}^2 - r_0^2)}. \quad (14)$$

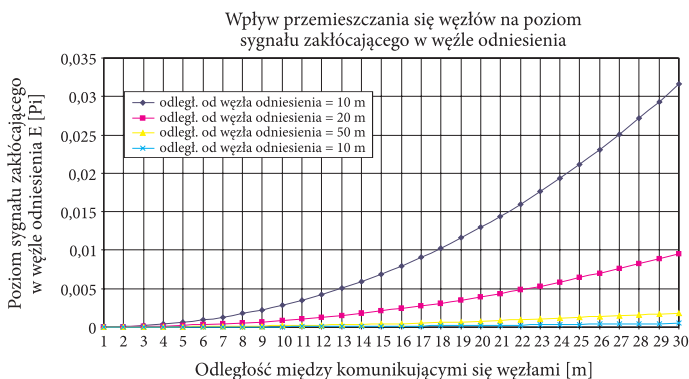
Funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $P_l$  wynosi więc:

$$f_{P_l}(p_l) = \begin{cases} \frac{r_l^4 \cdot p_l^{\frac{2}{\eta}-1} - p_m^{\frac{4}{\eta}} \cdot r_0^4 \cdot p_l^{\frac{2}{\eta}-1}}{\eta \cdot p_m^{\frac{2}{\eta}} \cdot (r_l^2 - r_0^2) \cdot (r_{\max}^2 - r_0^2)} & \text{dla } \frac{p_m \cdot r_0^\eta}{r_l^\eta} \leq p_l < \frac{p_m \cdot r_{\max}^\eta}{r_l^\eta} \\ \frac{p_m^{\frac{2}{\eta}} \cdot (r_{\max}^2 + r_0^2)}{\eta \cdot (r_l^2 - r_0^2)} \cdot p_l^{\frac{2}{\eta}-1} & \text{dla } \frac{p_m \cdot r_{\max}^\eta}{r_l^\eta} \leq p_l < p_m \\ \frac{p_m^{\frac{4}{\eta}} \cdot r_{\max}^4 \cdot p_l^{\frac{2}{\eta}-1} - r_0^4 \cdot p_l^{\frac{2}{\eta}-1}}{\eta \cdot p_m^{\frac{2}{\eta}} \cdot (r_l^2 - r_0^2) \cdot (r_{\max}^2 - r_0^2)} & \text{dla } p_m \leq p_l \leq \frac{p_m \cdot r_{\max}^\eta}{r_0^\eta}. \end{cases} \quad (15)$$

Wartość średnią zmiennej losowej  $P_I$  stanowiącej średni poziom sygnału zakłócającego docierającego do węzła odniesienia  $O$  od węzła  $i$  można wyznaczyć z zależności:

$$E[P_I] = \frac{4 \cdot p_m \cdot (x_{ij}^{\eta+2} - r_0^{\eta+2}) \cdot (x_{iO}^{\eta-2} - r_0^{\eta-2})}{(\eta^2 - 4) \cdot r_0^{\eta-2} \cdot x_{iO}^{\eta-2} \cdot (x_{iO}^2 - r_0^2) \cdot (x_{ij}^2 - r_0^2)} \quad (16)$$

Wykorzystując powyższą zależność, dokonano obliczenia poziomu sygnału zakłócającego docierającego do węzła odniesienia od węzła  $i$  komunikującego się z węzłem  $j$  w funkcji odległości między węzłami. Przyjęto założenie, iż węzeł  $i$  znajduje się w pewnej stałej odległości od węzła odniesienia  $O$  (10 m, 20 m, 50 m, 100 m), natomiast przemieszcza się węzeł  $j$  (zmiana odległości między komunikującymi się węzłami w zakresie 1-30 m). Dodatkowo założono:  $p_m = 0,001$ ;  $\eta = 2,2$  oraz  $\eta = 4,4$ ;  $r_0 = 1$  m. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 7 i 8.



Rys. 7. Wpływ przemieszczania się węzłów na poziom sygnału zakłócającego w węźle odniesienia



Rys. 8. Wpływ współczynnika zaników na poziom sygnału zakłócającego w węźle odniesienia

Analizując krzywe, można stwierdzić, że im większa była odległość między komunikującymi się węzłami, tym wyższy poziom sygnału zakłócającego docierał do węzła odniesienia. Obliczenia ponadto wykazały, iż poziom sygnału zakłócającego jest mniejszy w przypadku funkcjonowania sieci w otwartej przestrzeni ( $\eta = 2,2$ ), niż w przypadku pracy w pomieszczeniach zamkniętych ( $\eta = 4,4$ ). Wniosek ten nie jest zgodny z obliczeniami, jakie zrealizowano dla sieci ad-hoc o niezmiennym w czasie architekturze (pkt 2.1). W modelu stochastycznym założono bowiem stały poziom mocy sygnału nadawanego przez każdy węzeł sieci, zależny od odległości od węzła odniesienia. Odległości te były różne, aczkolwiek nie zmieniały się w kolejnych chwilach czasowych (węzły nie przemieszczały się). W zaproponowanym modelu przyjęto natomiast założenie, iż komunikujące się ze sobą węzły przemieszczają się oraz że poziom mocy sygnału nadawanego zmienia się w zależności od odległości między nimi. Współczynnik zaników jest mniejszy w przypadku propagacji w wolnej przestrzeni niż w pomieszczeniach zamkniętych. Dlatego też niższy będzie wymagany poziom mocy sygnału nadawanego w wolnej przestrzeni niż w pomieszczeniu zamkniętym, przy założeniu takiej samej odległości między węzłem nadawczym i odbiorczym.

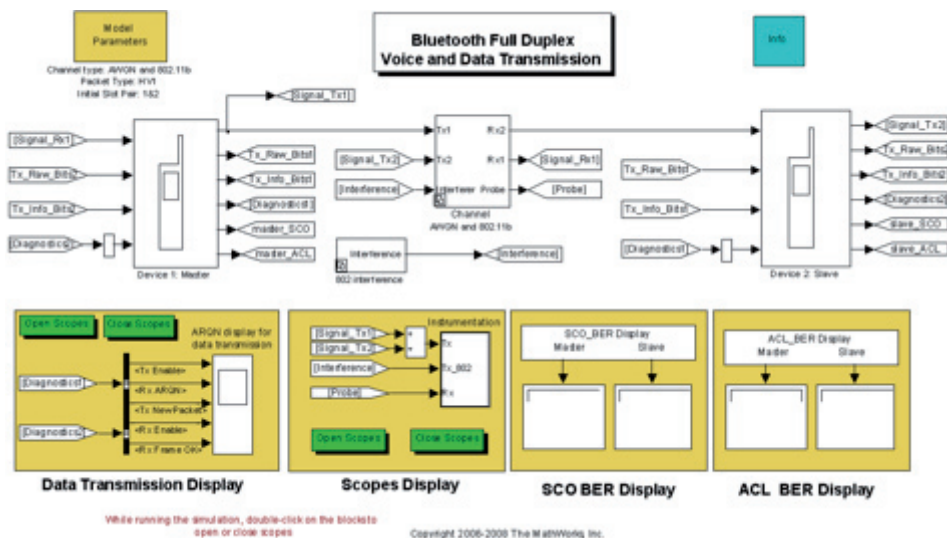
#### 4. Weryfikacja symulacyjna modelu interferencyjnego

Celem symulacji było zbadanie wpływu odległości między komunikującymi się urządzeniami standardu IEEE 802.15 na efektywność transmisji. W oparciu o otrzymane wyniki symulacji dokonano weryfikacji zaproponowanego modelu interferencyjnego pozwalającego na wyznaczenie poziomu sygnału zakłócającego w mobilnej sieci typu ad-hoc.

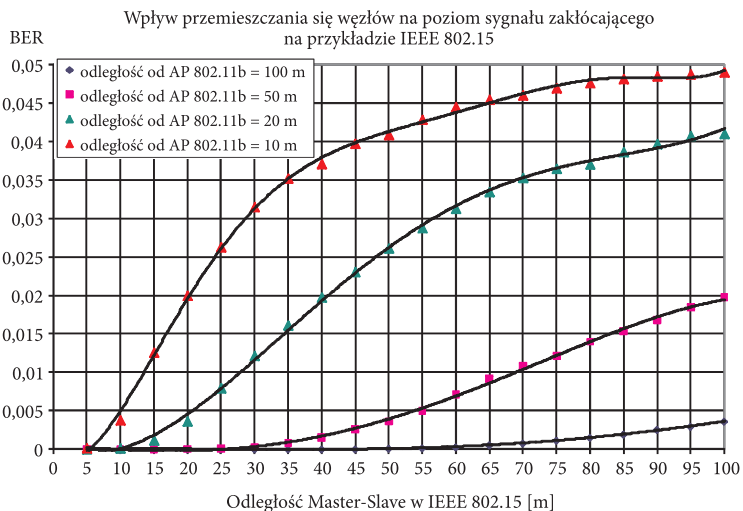
Standard IEEE 802.15 pracuje w zakresie 2,4-2,4835 GHz. Jako metodę rozpraszania widma wykorzystuje skakanie po częstotliwościach w sposób pseudolosowy (FHSS), wybierając co najmniej 75 częstotliwości z 79 dostępnych. Szybkość przeskoków wynosi 1600 razy na sekundę, a czas pozostawania na jednej częstotliwości nie trwa dłużej niż 625  $\mu$ s. W zapytaniach i przywołaniach szybkość przeskoków podwaja się, a czas pozostawania na częstotliwości wynosi 312,5  $\mu$ s.

Model symulacyjny zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink przedstawiono na rysunku 9.

W symulacji przyjęto założenie, iż urządzenie Bluetooth typu „Master” znajduje się w pewnej stałej odległości od punktu dostępowego (ang. *Access Point*, AP), natomiast przemieszcza się urządzenie typu „Slave” (zmiana odległości między komunikującymi się urządzeniami Master-Slave). Symulacje wykonano dla czterech odległości Bluetooth Master-AP (100 m, 50 m, 20 m, 10 m) oraz zmiany położenia urządzenia Bluetooth Slave w stosunku do położenia Bluetooth Master w zakresie 5-100 m (co 5 m). Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 9. Model symulacyjny do badania wpływu odległości między urządzeniami IEEE 802.15 na poziom interferencji zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink



Rys. 10. Wpływ przemieszczania się węzłów na poziom sygnału zakłócającego na przykładzie IEEE 802.15

Dokonując porównania krzywych na rysunku 7 oraz krzywych na rysunku 10, można wnioskować o poprawności zaproponowanego modelu pozwalającego wyznaczyć poziom sygnału zakłócającego w bezprzewodowej, mobilnej sieci typu ad-hoc.

## 5. Podsumowanie i wnioski

W artykule zaproponowano model interferencyjny pozwalający wyznaczyć poziom sygnału zakłócającego w mobilnej, bezprzewodowej sieci ad-hoc. Przeanalizowano wpływ komunikacji między przemieszczającymi się węzłami na stacjonarny węzeł odniesienia, rozpatrując możliwe warianty wzajemnego położenia węzłów. Otrzymane wyniki obliczeń zweryfikowano poprzez badania symulacyjne, które potwierdziły poprawność zaproponowanego modelu. Wykazano, iż mobilność węzłów w istotny sposób ogranicza pojemność sieci. Pokazano również różnicę wpływu środowiska propagacyjnego na pojemność sieci ad-hoc o ściśle ustalonej (niezmiennej w czasie) architekturze oraz sieci, w której węzły przemieszczają się i dynamicznie dostosowują poziom mocy sygnału nadawanego w zależności od odległości od odbiornika.

Artykuł wpłynął do redakcji 23.04.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2010 r.

### LITERATURA

- [1] S. JACKOWSKI, B. KOCOT, *Interferencje w bezprzewodowych, mobilnych sieciach typu ad-hoc z wielodostępem kodowym*, Konferencja TRANSCOMP, 2009.
- [2] S. JACKOWSKI, B. KOCOT, *Modele interferencyjne w bezprzewodowych sieciach typu ad-hoc*. Konferencja TRANSCOMP, 2007.
- [3] S. JACKOWSKI, *Telekomunikacja, część 2*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, 2005.
- [4] S. JACKOWSKI, *Telekomunikacja, część 1*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, 2003.
- [5] B. KOCOT, *Ograniczanie interferencji w mobilnych sieciach typu ad-hoc z wielodostępem kodowym*, WAT, 2009.
- [6] R. HEKMAT, *Ad-hoc Networks: Fundamental Properties and Network Topologies*, Springer, 2006.
- [7] P. GAJEWSKI, S. WSZELAK, *Technologie bezprzewodowe sieci teleinformatycznych*, Wydawnictwo WKŁ, 2008.
- [8] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/>

S. JACKOWSKI, B. KOCOT

### **Influence of mobility of ad-hoc network nodes on interference**

**Abstract.** This paper presents a statistical model which enables us to calculate a level of interference in wireless ad-hoc networks and a new model taking mobility of the nodes into consideration. The new model was verified through simulation using Matlab/Simulink tool.

**Keywords:** radio communication, interferences, ad-hoc networks