
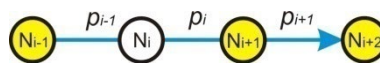


Program Współpraca Polska-RPA	RAPORT CZĄSTKOWY z realizacji projektu w ramach programu międzynarodowego Polska-RPA			 Narodowe Centrum Badań i Rozwoju
	Nr raportu	IR-RATfor5G-07		
Data aktualizacji raportu:	2020.12.17	Wersja	3	
Numer umowy	PL-RPA2/02/RATfor5G+/2019	Akronim	RATfor5G+	
Okres realizacji projektu	od	2019.01.01	do	2022.06.30
Tytuł projektu	Technologie dostępu radiowego dla standardu 5G i przyszłych generacji sieci bezprzewodowych			
Tytuł raportu	Minimalizacja emisyjności sieci			

Zasada wyznaczania prawdopodobieństwa

Niech będzie dana krawędź łącząca węzły N_i oraz N_{i+1} należąca do j -tej ścieżki łączącej dwa dowolne węzły (rys. 1).



Rys. 1. Schemat analizowanej sieci

Aby węzeł źródłowy odebrał informację zwrotną z węzła docelowego, pakiet musi przebyć drogę składającą się z $2l$ krawędzi (l oznacza długość j -tej ścieżki w jednym kierunku transmisji). Prawdopodobieństwo realizacji transmisji bezbłędnej P_{wj0} określa wzór:

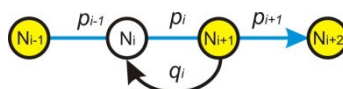
$$P_{wj0} = \prod_{i=1}^{2l} p_i \quad (1)$$

gdzie p_i oznacza wartość prawdopodobieństwa poprawnej realizacji transmisji poprzez i -tą krawędź wchodzącą w skład j -tej ścieżki.

Jeśli założyć, że wystąpi jeden błąd przesłania pakietu poprzez i -tą krawędź, czego przyczyną może być np. niesprawność i -tego łącza lub zewnętrzne zakłócenie transmisji, powodujący konieczność dokonania retransmisji tego pakietu (rys.2), wówczas prawdopodobieństwo realizacji przekazania informacji poprzez daną krawędź wzrośnie o wartość p_{it1} :

$$p_{it1} = p_i q_i \quad (2)$$

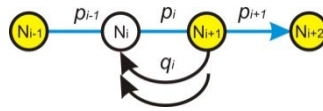
gdzie: q_i oznacza prawdopodobieństwo porażki równe $(1 - p_i)$.



Rys. 2. Wystąpienie jednego błędu podczas transmisji danych przez i -tą krawędź

W tym przypadku węzeł akwizycyjny powinien otrzymać informację zwrotną po $2l + 2$ interwałach czasowych niezbędnych dla przesłania informacji pomiędzy węzłami. Fakt ten wynika stąd, że węzeł N_i odczekuje czas niezbędny na odebranie i wysłanie przez węzeł N_{i+1} komunikatu do sąsiada i dopiero wówczas wysyła replikę informacji.

Jeśli pojawią się dwa błędy podczas przesyłania pakietu poprzez wybraną krawędź, wówczas nastąpi dwukrotne powtórzenie transmisji (rys. 3).

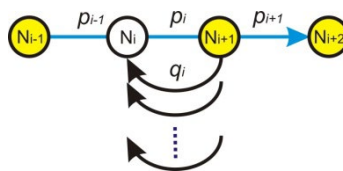


Rys. 3. Wystąpienie dwóch retransmisji

Jeżeli podwójny błąd wystąpi na i -tym łączy wówczas przyrost prawdopodobieństwa p_{it2} będzie wyrażał się wzorem:

$$p_{it2} = p_i q_i^2 \quad (3)$$

Na rys. 4 pokazano przypadek, gdy w trakcie transmisji poprzez wybraną krawędź wystąpi większa liczba błędów.



Rys. 4. Wystąpienie większej liczby błędów podczas transmisji

Uogólniając, przyrosty prawdopodobieństwa w funkcji liczby retransmisji można opisać zależnością:

$$p_{itr} = p_i q_i^r \quad (4)$$

gdzie r oznacza liczbę retransmisji w danym łączy.

Prawdopodobieństwo całkowite P_{ir} dla i -tej krawędzi wchodzącej w skład wybranej ścieżki w zależności od liczby retransmisji określa formuła:

$$P_{ir} = 1 - q_i^{r+1} \quad (5)$$

gdzie $r \in \{0, 1, \dots\}$.

Podstawiając do wzoru (6) wartości obliczone dla każdej z krawędzi wchodzącej w skład j -tej ścieżki wyznaczane jest prawdopodobieństwo wynikowe P_{wj} realizacji transmisji poprzez tę ścieżkę.

$$P_{wj} = \prod_{i=1}^{2l} P_{ir} \quad (6)$$

Dla ilustracji trybu postępowania posłużono się prostym przykładem.

Dana jest ścieżka łącząca dwa węzły tworzona przez krawędzie AB i BA. Założono, że prawdopodobieństwa uzyskania poprawnej transmisji w obu kierunkach nie są jednakowe i wynoszą

odpowiednio 0,70 i 0,75, natomiast prawdopodobieństwo wynikowe uzyskania poprawnej informacji zwrotnej powinno być nie mniejsze niż 0,95.

Zbudowano tabelę 1 umożliwiającą wyznaczenie minimalnej liczby retransmisji przy poziomach nadawania równych 0[dBm] tak, aby spełnić założony warunek.

Tabela 1. Tabela pomocnicza

	P_{AB}	0.700	0.910	0.973	0.992	
P_{BA}	r	0	1	2	3	
0.750	0	0.525	0.683	0.730	0.744	Krawędź BA
0.938	1	0.656	0.853	0.912	0.930	
0.984	2	0.689	0.896	0.958	0.976	
0.996	3	0.697	0.906	0.969	0.988	
		Krawędź AB				

Z tabeli 1 wynika, że założone prawdopodobieństwo wynikowe można uzyskać jeśli sumaryczna liczba retransmisji wyniesie 4, 5 lub 6.

Obliczenie wartości wypromieniowanej energii przy założonym poziomie prawdopodobieństwa P_z uzyskania poprawnej transmisji E_{AB} i E_{BA} dokonano korzystając z następującego wzoru:

$$\begin{aligned} E_{AB}[\text{mWs}] &= (r_{AB} + l) \cdot L_n \cdot I_q \cdot t_b \\ E_{BA}[\text{mWs}] &= (r_{BA} + l) \cdot L_n \cdot I_a \cdot t_b \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie: r_i oznacza – liczbę retransmisji niezbędnych do uzyskania założonego prawdopodobieństwa, l – liczbę krawędzi w ścieżce łączącej węzeł źródłowy z węzłem docelowym, L_n – poziom mocy sygnału nadawczego [mW]; t_b - czas trwania jednego bajtu [1ms]; $I_q = 20$ - liczbę przesyłanych bajtów z węzła akwizycyjnego do węzła docelowego; $I_a = 100$ – liczbę bajtów przesyłanych do węzła akwizycyjnego.

Czas akwizycji danych obliczono korzystając ze wzoru:

$$\begin{aligned} T_{AB}[\text{s}] &= (2r_{AB} + l) \cdot I_q \cdot t_b \\ T_{BA}[\text{s}] &= (2r_{BA} + l) \cdot I_a \cdot t_b \end{aligned} \quad (8)$$

Odnosząc się do rozpatrywanego przykładu, jeśli poziom nadawczy będzie wynosił 0[dBm], obliczone sumaryczne wartości emitowanej energii i czasu akwizycji danych podano w tabeli 2.

Tabela 2. Wyznaczone parametry sieci

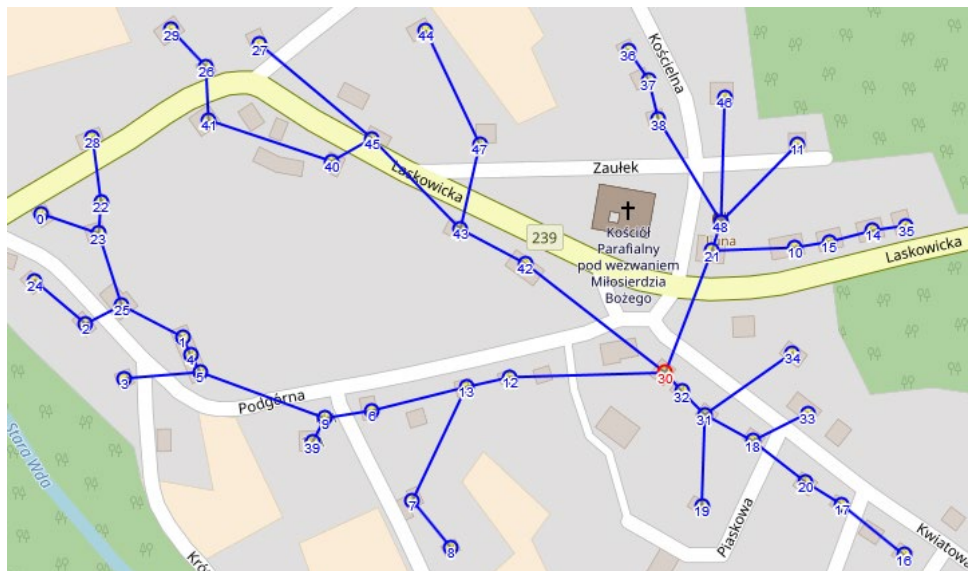
Liczba retransmisji	$r_{AB} = 2, r_{BA} = 2$	$r_{AB} = 2, r_{BA} = 3$	$r_{AB} = 3, r_{BA} = 2$	$r_{AB} = 3, r_{BA} = 3$
$E_{ABA} [\text{mWs}]$	0.36	0.38	0.46	0.48
$T_{ABA} [\text{s}]$	0.60	0.64	0.80	0.84

A zatem można stwierdzić, że rozkład liczby retransmisji rzutuje zarówno na wielkość emitowanej energii, jak i czas zbierania danych.

Wyznaczenie wielkości emitowanej energii przy zastosowaniu retransmisji na poszczególnych łączach tworzących ścieżkę

Założonym celem pracy było sprawdzenie, czy i na ile zostanie obniżona emisyjność sieci WSN dzięki wprowadzeniu retransmisji na poszczególnych łączach w stosunku do retransmisji stosowanych na całych ścieżkach. Pod tym kątem dokonano analizy sieci, którą zlokalizowano w miejscowości Gródek (woj. Kujawsko-Pomorskie) (rys. 5). Mapa na której zobrazowano topologię tej sieci, została pobrana z portalu *OpenStreetMap*.

Analizowaną sieć tworzy czterdzieści dziewięć węzłów. Korzystając z opracowanego programu [13] stwierdzono, że najlepszą lokalizacją węzła akwizycyjnego w tych warunkach jest węzeł o numerze 30 (znacznik czerwony). Wyznaczenie umiejscowienia tego węzła przeprowadzono przy poziomie nadawania 0[dBm].



Rys. 5. Schemat sieci w miejscowości Gródek

Posługując się wspomnianą wyżej aplikacją, wyznaczono odległości pomiędzy węzłami pokazanymi na rysunku. Następnie, obliczono teoretyczne wartości tłumienia sygnału w wolnej przestrzeni *FSL* (*Free Space Loss*):

$$FSL = 32,44\text{dBm} + 20 \log(f) + 20 \log(d) + 40\text{dBm} \quad (9)$$

gdzie: f oznacza częstotliwość transmisji (do obliczeń przyjęto, że wykorzystywana częstotliwość radiowa będzie wynosić 433MHz); d – odległość pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem (km); wartość 40dBm wynika z przyjętego założenia użycia anteny dookólnej.

l_i	10	8	6	4	11	7	2	1	4	1	5	5
P_{wi}	0.171	0.209	0.170	0.183	0.148	0.156	0.927	0.969	0.768	0.671	0.459	0.392
Węzeł	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
l_i	4	3	5	4	5	1	2	3	3	3	2	2
P_{wi}	0.415	0.442	0.368	0.275	0.185	0.510	0.441	0.241	0.297	0.434	0.359	0.646

Przy założonej wartości prawdopodobieństwa uzyskania poprawnej transmisji dla każdej ze ścieżek łączących węzeł zbiorczy z węzłami docelowymi, określona została teoretyczna liczba niezbędnych retransmisji. Warunek, który musi spełniać wartość prawdopodobieństwa uzyskania poprawnej transmisji przez każdą z krawędzi tworzących daną ścieżkę, jest określony wyrażeniem:

$$p_i \geq \sqrt[l]{P_z} = p_{ref} \quad (10)$$

gdzie P_z oznacza założone prawdopodobieństwo wynikowe. Warunek ten wynika stąd, że wartości prawdopodobieństwa są zawarte w przedziale (0, 1), zatem jeśli wartość przypisana dowolnej z krawędzi nie będzie spełniała tej zależności, wówczas iloczyn $p_i = p_{ref}$ będzie zawsze mniejszy od P_z .

Przekształcając wyrażenie (10) otrzymano formułę umożliwiającą określenie liczby retransmisji r_i dla danej krawędzi tworzącej wybraną ścieżkę określa formuła:

$$r_i = \left\lceil \frac{\log(1-p_{ref})}{\log(1-p_i)} - 1 \right\rceil. \quad (11)$$

Wartość r_i można wyznaczać dwójako: przyjmując wartość p_{ref} obliczoną dla węzła docelowego najbardziej oddalonego od węzła źródłowego lub kolejno dla poszczególnych węzłów oddalonych o 1, 2, ... $l-1$, l krawędzi od tego węzła.

Celem wyjaśnienia trybu postępowania, obliczono wartości r_i dla krawędzi należących do ścieżki łączącej węzeł nr 8 z węzłem 30 przy założeniu, że $P_z = 0.95$.

Ścieżkę tę tworzą krawędzie: 8-7, 7-13, 13-12 i 12-30, $l = 4$, $p_{ref} = \sqrt[4]{0.95} = 0.9936$.

Obliczone wartości r_i pierwszą metodą podano w tabeli 4.

Tabela 4. Wyznaczanie liczby retransmisji pierwszą metodą

r_i	Krawędź			
	8-7	7-13	13-12	12-30
0	0.95100	0.82000	0.96200	0.75900
1	0.99760	0.96760	0.99856	0.94192
2	1.00000	0.99997	1.00000	0.99980
3	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
p_{ref}	0.99361			

Zatem minimalne ilości retransmisji wynoszą $r_{8-7} = 1, r_{7-13} = 2, r_{13-12} = 1, r_{12-30} = 2$, a $P_w = 0.99593$.

Obliczone wartości r_i drugą metodą podano w tabeli 5.

Tabela 5. Wyznaczanie liczby retransmisji drugą metodą

Krawędź				
r_i	8-7	7-13	13-12	12-30
0	0.9510	0.8200	0.9620	0.7590
1	0.9976	0.9676	0.9986	0.9419
2	1.0000	1.0000	1.0000	0.9998
3	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
p_{ref}	0.99361	0.99893	0.99840	0.99680

Również i w tym przypadku minimalne liczby retransmisji wynoszą $r_{8-7} = 1, r_{7-13} = 2, r_{13-12} = 1, r_{12-30} = 2$, natomiast P_w osiąga wartość 0.98779, więc jest nieco większa.

Aby upewnić się, czy długość ścieżek ma istotny wpływ na liczbę koniecznych retransmisji w tabeli 6 podano ich liczbę dla wszystkich ścieżek łączących węzeł nadawczy z pozostałymi węzłami przyjmując wartość $P_z \geq 0,95$. Wartość r_{il} oznacza liczbę retransmisji ścieżki obliczoną dla wartości p_{ref} wyznaczonej dla najbardziej oddalonego węzła, r_{ic} – liczbę retransmisji dla p_{ref} obliczaną dla oddalonego o l_i krawędzi.

Tabela 6. Liczby retransmisji koniecznych do osiągnięcia założonego prawdopodobieństwa

Węzeł	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
r_{il}	23	17	20	17	16	15	9	9	10	11	5	6
r_{ic}	21	14	17	13	12	11	6	7	8	8	4	6
Węzeł	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
r_{il}	4	6	7	6	8	6	3	4	5	3	22	21
r_{ic}	3	4	7	6	8	6	3	4	5	2	22	19
Węzeł	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36
r_{il}	22	19	15	13	24	16	2	1	4	3	8	8
r_{ic}	19	16	14	12	24	16	2	1	4	3	8	8
Węzeł	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
r_{il}	7	6	12	11	14	5	7	12	10	6	9	3
r_{ic}	7	6	9	10	13	3	5	10	9	6	7	3

Z wyników zamieszczonych w tabeli 6 wynika, że im dłuższa ścieżka, tym, w większości

przypadków, liczba retransmisji koniecznych do uzyskania założonego prawdopodobieństwa uzyskania poprawnej transmisji obliczona pierwszą metodą jest większa.

Omawiany sposób wyznaczania liczby retransmisji dla wybranej ścieżki nie daje możliwości oceny, jaki powinien być rozkład liczby retransmisji w poszczególnych krawędziach tworzących tę ścieżkę, aby uzyskać założone prawdopodobieństwo.

Przykładowo: ścieżkę łączącą węzeł nr 30 z węzłem 19 tworzą krawędzie 30-32, 32-31 i 31-19, dla których prawdopodobieństwa wynoszą odpowiednio 0.984, 0.978 oraz 0.892. Sumaryczna liczba retransmisji wynikająca z obliczeń wynosi 4. Aby spełnić zakładany warunek $P_z \geq 0.95$ z przeprowadzonej analizy wynika, że musi nastąpić po jednej retransmisji na łączach 30-32, 32-31 oraz po dwóch na łączu 31-19. Jeżeli wszystkie cztery retransmisje wystąpią np. na łączu 31-19, wówczas wynikowe prawdopodobieństwo dla analizowanej ścieżki wyniesie 0.926, a więc nie zostanie spełniony $p_i < P_z$.

Aby w pewnym stopniu wyeliminować ten mankament dokonano badań symulacyjnych. Zasada działania opracowanego programu polega na pseudolosowym wyborze uszkodzonych krawędzi grafu opisującego topologię sieci i wyznaczaniu liczby retransmisji niezbędnych dla spełnienia założonego warunku $p_i < P_z$. Poniżej został opisany zastosowany algorytm postępowania.

1. Operacje wstępne

- Wczytywana jest macierz opisująca odległości pomiędzy węzłami;
- Korzystając ze wzoru wyznaczone są teoretyczne wartości tłumienia sygnału w wolnej przestrzeni *FSL* (*Free Space Loss*), bądź też wczytywana jest macierz tłumienia sygnału wynikająca z przeprowadzonych pomiarów;
- Dzięki wykorzystaniu programu opisanego w wybierane jest optymalne położenie węzła akwizycyjnego, który będzie korzeniem minimalnego drzewa rozpinającego obrazującego topologię połączeń;
- Zakładając jednakowy poziom emisji sygnałów radiowych oraz jednakową czułość odbiorników, dla obliczonego poziomu sygnału docierającego do odbiornika RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), określane są wartości parametru PER (*Packet Error Rate*) na podstawie zależności zaczerpniętej z publikacji;
- Tworzona jest macierz wartości PER obliczonych dla każdej z krawędzi, co stanowi bazę dla dalszego działania symulatora;
- Tworzone jest minimalne drzewo rozpinające;
- Wyznaczane są najkrótsze ścieżki pomiędzy węzłami;
- Obliczane są wartości parametru l określającego liczbę krawędzi tworzących każdą ze ścieżek pomiędzy węzłem akwizycyjnym a węzłami docelowymi.

2. Dane wyjściowe

- Wprowadzana jest minimalna wartość prawdopodobieństwa uzyskania poprawnej transmisji P_z pomiędzy węzłem źródłowym a węzłem docelowym;
- Wprowadzane są wartości prawdopodobieństwa p_i dla każdej z krawędzi tworzących ścieżkę;
- Tworzona jest tablica $[2l;2]$, w której jest zapisywany numer krawędzi oraz odpowiadające jej prawdopodobieństwo p_i ;
- Obliczane jest prawdopodobieństwo wynikowe uzyskania bezbłędnej transmisji

$$P_{wo} = \prod_{i=1}^{2l} p_i \quad (12)$$

- Sprawdzany jest warunek $P_{wo} > P_z$
 - Jeśli TAK – $r; P_{av}; \text{END.}$
 - Jeśli NIE – GOTO Symulacja

3. Symulacja

- i. Zakładana liczba przeprowadzanych symulacji S ;
- ii. Ustalana jest początkowa wartość liczby retransmisji $r_i = 0$;
- iii. Wstępne ustalenie parametrów symulacji:
 - $s = 0$ bieżący numer symulacji;
 - $P_{avs} = 0$ prawdopodobieństwo obliczone dla symulacji numer s ;
 - $P_{av} = 0$; średnie prawdopodobieństwo wynikowe;
- iv. $r_i = r_i + 1$;
- v. Wprowadzana jest sumaryczna liczba krawędzi losowanych $s_k = r_i$, w których wystąpią błędy;
- vi. Losowane są numery krawędzi ze zbioru $\{0, 1, \dots, 2l-1\}$ – są to kombinacje z powtórzeniami;
- vii. Obliczane są wartości prawdopodobieństwa dla każdej wylosowanej k -tej krawędzi wg wzoru:

$$p_{kr} = 1 - (1 - p_k)^{r+1} \quad (13)$$

- viii. Wyznaczane jest prawdopodobieństwo wynikowe dla danej ścieżki (7);
- ix. $s = s + 1$;
- x. Dokonywane jest sprawdzenie warunku $s < S$
 - TAK
 - $P_{avs} = P_{wr} + P_{avs}$;
 - GOTO iv.
 - NIE
 - $P_{av} = \frac{P_{avs}}{s}$;
 - $P_{wo} > P_z$;
 - NIE
 - GOTO iii.;
 - TAK
 - $r; P_{av}; \text{END.}$

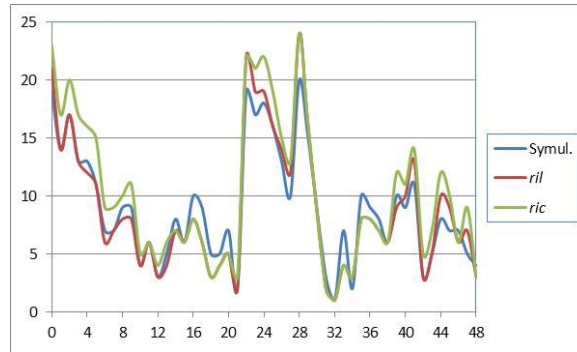
Wykorzystując podany wyżej algorytm zastosowany w programie symulacyjnym, wyznaczono liczbę retransmisji r_i , niezbędnych, aby uzyskać założony poziom prawdopodobieństwa wynikowego. Otrzymane wyniki zaprezentowano w tabeli 7.

Tabela 7. Liczby retransmisji wynikające z symulacji

Węzeł	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
r_i	19	14	17	13	13	11	7	7	9	9	4	6
Węzeł	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
r_i	3	5	8	6	10	9	5	5	7	2	19	17
Węzeł	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36

r_i	18	16	13	10	20	15	3	1	7	2	10	9
Węzeł	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
r_i	8	6	10	9	11	3	5	8	7	7	5	4

Wyniki te porównano z rezultatami obliczeń uzyskanych opisanymi uprzednio metodami, co uwidoczniło na wykresie (rys. 8).



Rys. 8. Porównanie liczby retransmisji otrzymanych zastosowanymi metodami

Dzięki zastosowaniu podanych niżej wzorów obliczono wartości wypromieniowanej energii E_{2l} oraz czasu akwizycji T_{2l} , zarówno dla każdej ze ścieżek, jak i dla całej sieci.

$$\begin{aligned}
 E_{2l}[\text{mWs}] &= (r_{ij} + l) \cdot L_n \cdot I_q \cdot t_b + (r_{ji} + l) \cdot L_n \cdot I_a \cdot t_b = \\
 &= 20 \cdot L_n \cdot t_b \cdot (r_{ij} + 5r_{ji} + 6l)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

gdzie E_{2l} oznacza wynikową emisyjność ścieżki, a r_{ij} liczbę retransmisji w kierunku od węzła źródłowego do węzła docelowego, natomiast r_{ji} – w kierunku przeciwnym.

Przyjmując założenie, iż liczba retransmisji w obu kierunkach jest jednakowo prawdopodobna wzór (14) przyjmuje następującą postać:

$$E_{2l}[\text{mWs}] = 120 \cdot L_n \cdot t_b \cdot (r_{2l} + l)
 \tag{15}$$

r_{2l} – sumaryczna liczba retransmisji w całej ścieżce.

W tabeli 8 zaprezentowano wyniki obliczeń wartości emisyjności sieci dla każdej ze ścieżek łączących węzeł akwizycyjny z pozostałymi węzłami.

Tabela 8. Wyniki obliczeń emisyjności

Węzeł	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
$E_{2l}[\text{mWs}]$	5.16	3.72	4.56	3.48	3.36	3.00	1.80	1.80	2.16	2.28	1.08	1.44	r_{il}
	4.92	3.36	4.20	3.00	2.88	2.52	1.44	1.56	1.92	1.92	0.96	1.44	r_{ic}
	4.56	3.12	3.84	2.76	2.64	2.4	1.2	1.32	1.8	1.56	0.84	1.2	Sym.
Węzeł	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
$E_{2l}[\text{mWs}]$	0.72	1.20	1.80	1.44	2.40	1.92	1.08	1.20	1.56	0.60	5.04	4.68	r_{il}
	0.60	0.96	1.80	1.44	2.40	1.92	1.08	1.20	1.56	0.48	5.04	4.44	r_{ic}

	0.36	0.84	1.44	1.08	1.8	1.56	0.72	0.84	1.08	0.36	4.44	4.2	<i>Sym.</i>
Węzeł	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36	
E_{2l} [mWs]	5.04	4.20	3.24	2.52	5.52	3.60	0.72	0.36	1.44	0.60	2.16	2.16	r_{il}
	4.68	3.84	3.12	2.40	5.52	3.60	0.72	0.36	1.44	0.60	2.16	2.16	r_{ic}
	4.08	3.48	3.24	2.16	5.04	3.48	0.48	0.24	1.08	0.36	1.8	2.04	<i>Sym.</i>
Węzeł	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
E_{2l} [mWs]	1.80	1.44	2.64	2.28	2.88	0.84	1.32	2.16	1.92	1.44	1.56	0.84	r_{il}
	1.80	1.44	2.28	2.16	2.76	0.60	1.08	1.92	1.80	1.44	1.32	0.84	r_{ic}
	1.68	1.2	2.04	1.68	2.52	0.48	1.08	1.8	1.44	1.32	1.2	0.72	<i>Sym.</i>

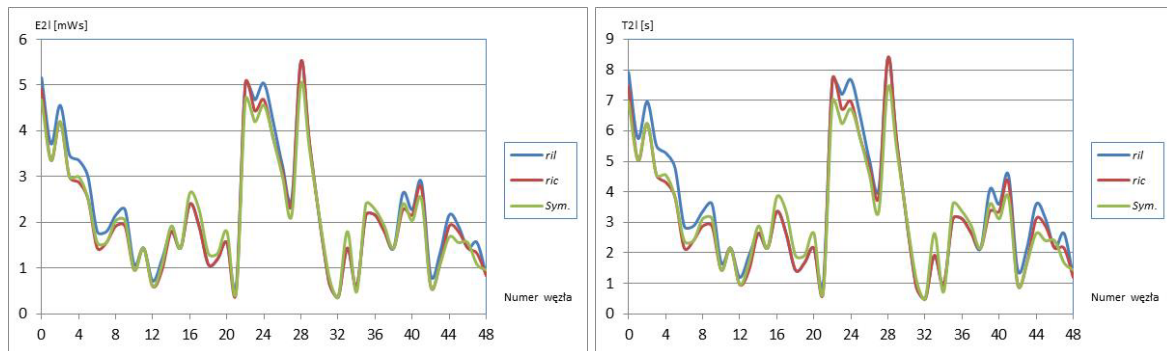
W tabeli 9 podano czas akwizycji danych obliczany ze wzoru:

$$T_{2l}[s] = 2(r_l + l) \cdot (I_q + I_a) \cdot t_b = 240 \cdot t_b \cdot (r_l + l) \quad (16)$$

Tabela 9. Wyniki obliczeń czasu akwizycji

Węzeł	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
T_{2l} [s]	7.92	5.76	6.96	5.52	5.28	4.80	2.88	2.88	3.36	3.60	1.68	2.16	r_{il}
	7.44	5.04	6.24	4.56	4.32	3.84	2.16	2.40	2.88	2.88	1.44	2.16	r_{ic}
	6.96	5.04	6.24	4.56	4.56	3.84	2.40	2.40	3.12	3.12	1.44	2.16	<i>Sym.</i>
Węzeł	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
T_{2l} [s]	1.20	1.92	2.64	2.16	3.36	2.64	1.44	1.68	2.16	0.96	7.68	7.20	r_{il}
	0.96	1.44	2.64	2.16	3.36	2.64	1.44	1.68	2.16	0.72	7.68	6.72	r_{ic}
	0.96	1.68	2.88	2.16	3.84	3.36	1.92	1.92	2.64	0.72	6.96	6.24	<i>Sym.</i>
Węzeł	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36	
T_{2l} [s]	7.68	6.48	5.04	4.08	8.40	5.52	0.96	0.48	1.92	0.96	3.12	3.12	r_{il}
	6.96	5.76	4.80	3.84	8.40	5.52	0.96	0.48	1.92	0.96	3.12	3.12	r_{ic}
	6.72	5.76	4.56	3.36	7.44	5.28	1.20	0.48	2.64	0.72	3.60	3.36	<i>Sym.</i>
Węzeł	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
T_{2l} [s]	2.64	2.16	4.08	3.60	4.56	1.44	2.16	3.60	3.12	2.16	2.64	1.20	r_{il}
	2.64	2.16	3.36	3.36	4.32	0.96	1.68	3.12	2.88	2.16	2.16	1.20	r_{ic}
	2.88	2.16	3.60	3.12	3.84	0.96	1.68	2.64	2.40	2.40	1.68	1.44	<i>Sym.</i>

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że otrzymane wartości analizowanych parametrów w niewielkim stopniu różnią się pomiędzy sobą (rys. 9).



Rys. 9. Wykresy emitowanej energii i czasu akwizycji danych

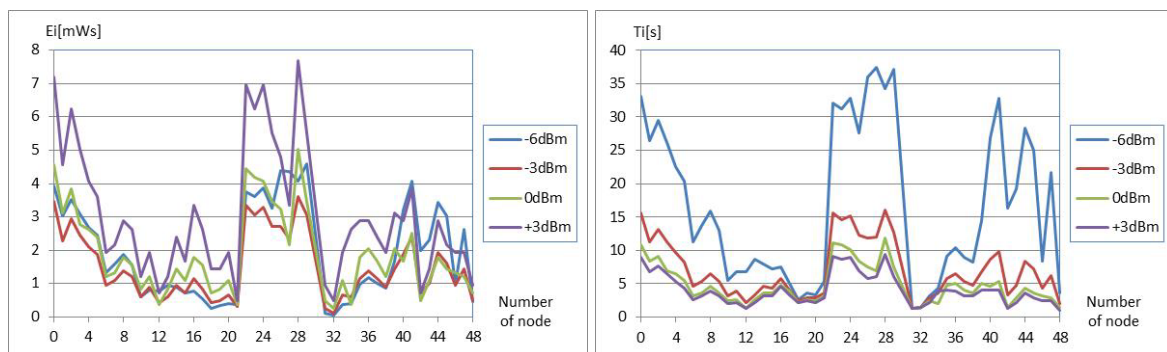
Obliczone zostały sumaryczne wielkości wypromieniowanej energii oraz czasu zbierania danych – tabela 10.

Tabela 10. Porównanie wyznaczonych parametrów sieci

Parametr	r_{il}	r_{ic}	Symulacja
E_w [mWs]	107.76	100.68	90.60
T_w [s]	168.96	154.80	155.04

Ponieważ celem, który przyświecał autorom była minimalizacja emisyjności sieci, dokonano badania wpływu wyboru poziomów nadawczych na ten parametr. Aby zrealizować te zamierzenie wykorzystano wyniki otrzymane drogą symulacji.

Na wykresach (rys. 10) pokazano efekty badania analizowanej sieci w funkcji zmian poziomów nadawania informacji.



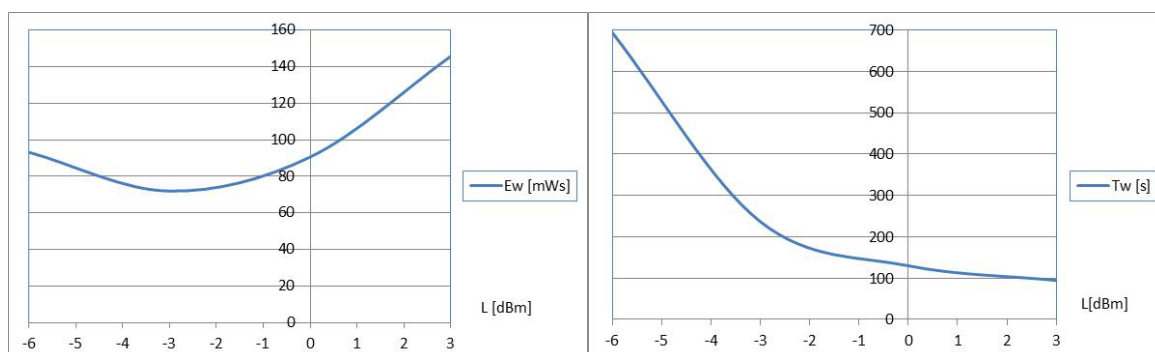
Rys. 10. Wyniki porównania parametrów sieci w funkcji zmian poziomu nadawania

Wyznaczono wartości sumaryczne analizowanych parametrów w funkcji zmian poziomów nadawania, które zaprezentowano w tabeli 11 i na rys. .

Tabela 11. Wartości badanych parametrów w funkcji zmian poziomów nadawczych

L [dBm]	-6	-3	0	+3
E_w [mWs]	93.12	71.94	90.60	145.68

T_w [s]	693.60	236.40	129.84	94.32
-----------	--------	--------	--------	-------



Rys. 11. Wartości badanych parametrów w funkcji zmian poziomów nadawczych

Z otrzymanych danych wynika, że optymalnym poziomem nadawczym jest poziom -3 [dBm]. Wniosek – dla minimalizacji wypromieniowanej energii należy dokonać wyboru poziomów sygnałów radiowych, za pośrednictwem których będą przekazywane informacje (przy sieciach o większych rozmiarach może to mieć istotne znaczenie).

Założonym pierwotnie celem przeprowadzonej analizy było porównanie omówionej wyżej metody retransmisji w odniesieniu do sposobu polegającego na wielokrotnym przesyłaniu danych poprzez całą ścieżkę. W tym celu, wykorzystując wzór:

$$r_i = \left\lceil \frac{\log(1 - P_z)}{\log(1 - p_i)} \right\rceil \quad (17)$$

gdzie r_i oznacza całkowitą liczbę powtórzeń transmisji, p_i – prawdopodobieństwa uzyskania poprawnej transmisji dla całej ścieżki łączącej dany węzeł akwizycyjny z węzłem docelowym, obliczono minimalną liczbę retransmisji koniecznej dla spełnienia warunku $p_w \geq P_z$. Otrzymane wyniki zamieszczono w tabeli 12.

Tabela 12. Liczba retransmisji obliczona dla przypadku powtórnego wysyłania pakietu przez całą ścieżkę

Węzeł	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
r_i	17	10	13	12	10	10	5	6	7	6	3	4
Węzeł	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
r_i	3	3	4	4	3	2	1	2	2	2	16	15
Węzeł	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36
r_i	15	12	16	14	18	17	1	0	2	2	4	6
Węzeł	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
r_i	5	5	6	9	14	4	5	10	8	5	6	2

Na podstawie otrzymanych danych obliczono emisyjność sieci i czas akwizycji danych,

$$E_w[\text{mWs}] = 120 \cdot L_n \cdot t_b \cdot r_i \cdot 2l, \quad (18)$$

$$T_w[\text{s}] = 120 \cdot t_b \cdot r_i \cdot 2l, \quad (19)$$

a rezultaty uzyskane przy poziomie nadawczym równym 0[dBm] podano w tabelach 13 i 14.

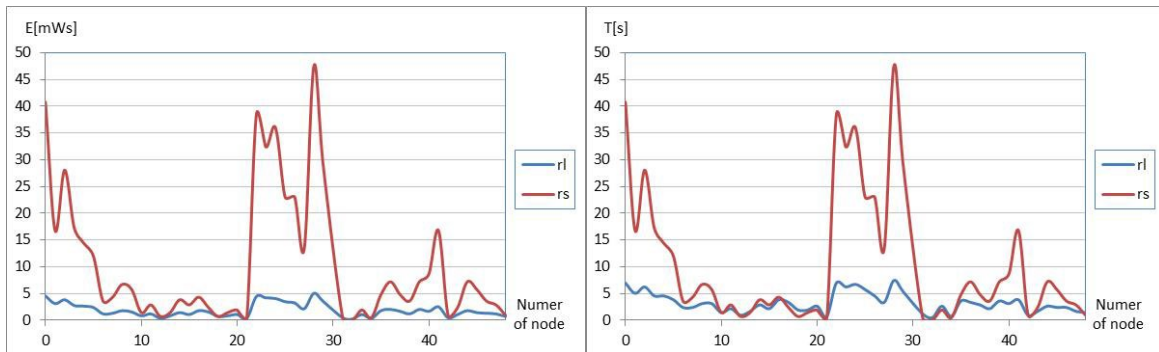
Tabela 13. Wyniki obliczeń emisyjności sieci

Węzeł	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$E_w[\text{mWs}]$	40.80	16.80	28.08	17.28	14.40	12.00	3.60	4.32	6.72	5.76	1.44	2.88
Węzeł	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$E_w[\text{mWs}]$	0.72	1.44	3.84	2.88	4.32	2.40	0.72	1.44	1.92	0.48	38.40	32.40
Węzeł	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36
$E_w[\text{mWs}]$	36.00	23.04	23.04	13.44	47.52	28.56	0.48	0.00	1.92	0.48	4.80	7.20
Węzeł	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
$E_w[\text{mWs}]$	4.80	3.60	7.20	8.64	16.80	0.96	2.40	7.20	5.76	3.60	2.88	0.96

Tabela 14. Wyniki obliczeń czasu akwizycji danych

Węzeł	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$T_w[\text{s}]$	40.80	16.80	28.08	17.28	14.40	12.00	3.60	4.32	6.72	5.76	1.44	2.88
Węzeł	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$T_w[\text{s}]$	0.72	1.44	3.84	2.88	4.32	2.40	0.72	1.44	1.92	0.48	38.40	32.40
Węzeł	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36
$T_w[\text{s}]$	36.00	23.04	23.04	13.44	47.52	28.56	0.48	0.00	1.92	0.48	4.80	7.20
Węzeł	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
$T_w[\text{s}]$	4.80	3.60	7.20	8.64	16.80	0.96	2.40	7.20	5.76	3.60	2.88	0.96

W tym przypadku obliczone sumaryczne wartości emitowanej energii wynosiły 496.32[mWs], a czasu akwizycji – 496.32[s].



Rys. 12. Porównanie wyników uzyskanych dzięki retransmisji na całych ścieżkach *rs* i na poszczególnych ich krawędziach *rl*

Na wykresach (rys. 11) pokazano różnice wielkości analizowanych parametrów dla obu porównywanych metod. Sumaryczne ich wartości uzyskane dzięki użyciu metody retransmisji na poszczególnych krawędziach, dotyczące emisyjności, są ponad pięciokrotnie, a jeżeli o czas – prawie czterokrotnie mniejsze od wielkości otrzymanych metodą retransmisji na całych ścieżkach.