

POLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH

**Wydział Elektryczny
Instytut Metrologii Elektroniki i Automatyki**

Beata Krupanek

**MODELOWANIE OPÓŹNIEŃ TRANSMISJI
SPOWODOWANYCH ZABURZENIAMI
W SIECIACH BEZPRZEWODOWYCH W STANDARDZIE
IEEE 802.15.4**

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy Jakubiec

Gliwice 2012

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	3
2. Cel, teza i zakres rozprawy	4
3. Standard IEEE 802.15.4	4
4. Charakterystyka środowiska propagacji sygnału radiowego	5
5. Modelowanie opóźnień za pomocą losowych ciągów funkcyjnych	6
6. Weryfikacja modelu opóźnień	8
6.1. Moduły bezprzewodowe	9
6.2. Układ pomiarowy	10
6.3. Weryfikacja modelu dla zaburzeń pasywnych	11
6.4. Weryfikacja modelu dla zaburzeń aktywnych	16
6.5. Wpływ wolnej przestrzeni na opóźnienia	19
6.6. Pomiar opóźnień w konfiguracji gwiazdowej	21
7. Podsumowanie	23
8. Wybrane pozycje literaturowe	25

1. WSTĘP

Szybki rozwój technologii komunikacyjnych spowodował, że współcześnie jednym z najczęściej wykorzystywanych sposobów przekazywania danych jest ich transmisja przy użyciu sieci komputerowych, w szczególności sieci bezprzewodowych. Opracowano wiele standardów transmisji bezprzewodowej, przeznaczonych przede wszystkim do przesyłania danych na niewielkie odległości między dwoma urządzeniami, takich jak ZigBee, WiFi, Bluetooth. Umożliwia to wykorzystanie tych standardów do budowy systemów złożonych z dużej liczby urządzeń radiowych pozwalających na pomiary różnych wielkości oraz sterowanie obiektem, nazywanych systemami pomiarowo-sterującymi.

W systemach pomiarowo-sterujących przepływ danych od miejsca ich pozyskania (nadajnika) do miejsca, w którym są wykorzystywane (odbiornika), związany jest z występowaniem opóźnień. W pracy przyjęto, że **opóźnieniem** nazywa się czas pomiędzy momentem zainicjowania transmisji w nadajniku a momentem, kiedy informacja zostanie odebrana w odbiorniku. W przypadku, gdy wielkości charakteryzujące obiekt pomiaru zmieniają się w czasie, opóźnienia te mogą powodować powstawanie błędów [13]. Błędy spowodowane opóźnieniami, kumulując się z innymi błędami w systemie, wpływają na niedokładność danych dostarczanych do odbiornika. W związku z tym zachodzi potrzeba wyznaczania i opisu powstających opóźnień.

Opóźnienia można podzielić na **losowe**, do których można zaliczyć opóźnienia powstające na skutek rywalizacji zadań o zasoby w sieci oraz **stałe**, o wartości równej czasowi korzystania z zasobu. Obydwa opóźnienia mają różne właściwości. Opóźnienia losowe opisywane są **probabilistycznie** i mogą być przyczyną powstawania błędów losowych, natomiast opóźnienia stałe mogą być opisywane w sposób deterministyczny, co pozwala wyznaczyć ich maksymalne wartości. Zastosowany w rozprawie sposób modelowania opóźnień wykorzystuje opis probabilistyczny, co wynika z faktu, że zdarzenia, na które reaguje system pomiarowo-sterujący mają w istotnym stopniu charakter losowy. Można zatem przyjąć, że decyzje urządzeń systemu, będących użytkownikami sieci bezprzewodowej, o nawiązywaniu komunikacji są podejmowane w sposób przypadkowy.

W skład całkowitego opóźnienia transmisji komunikatu z nadajnika do odbiornika wchodzi **opóźnienie strukturalne**, spowodowane właściwościami zbudowanej sieci bezprzewodowej (np. konfiguracją urządzeń) oraz **opóźnienie dodatkowe**, których przyczyna tkwi w występowaniu różnego rodzaju czynników, mających wpływ na transmisję radiową. W niniejszej pracy skupiono się na opóźnieniach określonych tu, jako dodatkowe.

Czynniki fizyczne, które mogą powodować opóźnienia są nazywane **zaburzeniami**. Zaburzenie jest rozumiane ogólnie, jako czynnik powodujący nieprawidłowość w funkcjonowaniu sieci bezprzewodowej, której rezultatem może być obniżenie jakości działania urządzenia lub całej sieci. Zaburzenia transmisji bezprzewodowej można podzielić na **pasywne i aktywne**. Pasywnymi nazywane są takie zaburzenia, które oddziałują na sygnał radiowy, jednak bez możliwości generowania lub indukowania sygnałów elektrycznych. Są to między innymi wszelkie elementy architektoniczne budynków, mury, płyty, ogrodzenia wykonane z różnych materiałów, a także np. ulewne deszcze lub ściany gęstego listowia. Zaburzenia aktywne to takie, które mają charakter fal elektromagnetycznych lub wyładowań elektrostatycznych. Mogą one powodować nakładanie się fal radiowych niosących dane i fal zaburzających, w wyniku czego do odbiornika docierają dane zniekształcone lub częściowo pochodzące z innych źródeł.

Współcześnie do transmisji radiowej na niewielkie odległości często wykorzystuje się protokół **IEEE 802.15.4** wraz z uzupełniającą go specyfikacją **ZigBee**. Przy użyciu niewielkich radiowych urządzeń nadawczo-odbiorczych, nazywanych modułami radiowymi, można tworzyć rozbudowane systemy pomiarowo-sterujące wykorzystywane w wielu dziedzinach techniki. Można przyjąć, że właściwości standardu ZigBee są reprezentatywne dla szerokiej grupy współcześnie stosowanych rozwiązań, w związku z czym w pracy skupiono się głównie na tym standardzie transmisji.

Reasumując, ze względu na coraz częstsze wykorzystanie sieci bezprzewodowych do budowy bezprzewodowych systemów pomiarowo-sterujących zachodzi konieczność wyznaczania parametrów transmisji w tego rodzaju systemach, a zwłaszcza opóźnień komunikacyjnych. Na transmisję ma wpływ wiele czynników, które mogą pogorszyć jej jakość i wprowadzać opóźnienia. Eksperymentalne badania fizycznych rozwiązań sieci bezprzewodowych są skomplikowane i kosztowne, dlatego celowe jest opracowywanie modeli matematycznych, pozwalających na symulacyjne badanie opóźnień komunikacyjnych występujących w rzeczywistych konfiguracjach sieciowych.

2. CEL, TEZA I ZAKRES ROZPRAWY

Podstawowym celem pracy jest wykazanie, że do opisu opóźnień transmisji w sieciach bezprzewodowych można zastosować model probabilistyczny obejmujący wpływ losowo określonego czasu dostępu do nośnika i stałego czasu transmisji komunikatu między nadajnikiem a odbiornikiem oraz uwzględniający powtórzenia transmisji. Podstawą budowy zaproponowanego modelu jest czasowy ciąg funkcji delta wykorzystywany do utworzenia ciągu funkcyjnego opisywanego probabilistycznie. Wyrazem takiego ukierunkowania pracy jest teza rozprawy, która brzmi:

Możliwe jest zastosowanie aparatu matematycznego wykorzystującego losowe ciągi funkcyjne do modelowania opóźnień spowodowanych zaburzeniami w sieciach bezprzewodowych.

Wykazanie prawdziwości przyjętej tezy przeprowadzono w sposób doświadczalny. W tym celu zbudowano bezprzewodowe układy pomiarowe, w których zmierzono opóźnienia komunikacyjne, korzystając z typowych modułów bezprzewodowych działających w standardzie ZigBee (IEEE 802.15.4).

Rozprawa obejmuje następujące zagadnienia:

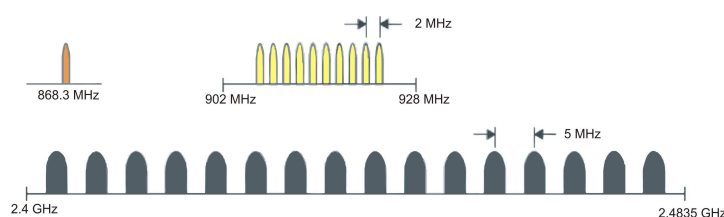
- analizę czynników zaburzających, które powodują powstawanie opóźnień komunikacyjnych w sieci bezprzewodowej,
- opis aparatu matematycznego wykorzystującego losowe ciągi funkcyjne, opracowanego dla celów budowy modeli opóźnień w sieci bezprzewodowej,
- zaprojektowanie, zbudowanie i oprogramowanie stanowiska do eksperymentalnej weryfikacji zaproponowanego modelu opóźnień w sieci ZigBee,
- zbudowanie modeli opóźnień komunikacyjnych oraz ich weryfikację praktyczną w wybranych warunkach pomiarowych,
- weryfikację opracowanych modeli z wykorzystaniem modułów bezprzewodowych różnych producentów.

3. STANDARD IEEE 802.15.4

Standard IEEE 802.15.4 został zaprojektowany z myślą o wykorzystaniu go do tworzenia lokalnych systemów pomiarowo-sterujących. Zgodność standardu IEEE 802.15.4 ze specyfikacją ZigBee umożliwia współpracę urządzeń wyprodukowanych przez różne firmy. Standard i specyfikacja ZigBee opisują model komunikacji zorganizowanej warstwowo oraz zasady tworzenia programów użytkownika, które mają ułatwić budowanie bezprzewodowych sieci małego zasięgu [28], [29].

Zatwierdzony w roku 2003 standard IEEE 802.15.4, definiuje protokół pozwalający na transmisję danych zorganizowanych w pakiety, zapewniający dużą niezawodność poprzez potwierdzanie odbioru, zdolność zmiany częstotliwości dla uniknięcia interferencji oraz integralność i poufność transmisji. Standard określa także wykorzystanie protokołu dostępu do medium: CSMA/CA (ang. *Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance*), co oznacza wielodostęp z detekcją fali nośnej oraz zapobieganiem kolizjom transmisji. IEEE 802.15.4 pozwala stosować 16-bitowy adres skrócony węzła lub 64-bitowy adres rozszerzony [6], [7].

Z wszystkich zdefiniowanych w standardzie IEEE 802.15.4 częstotliwości transmisji danych najczęściej korzysta się z pasma 2,4 GHz. Łącznie we wszystkich dostępnych pasmach częstotliwości wydzielono 27 kanałów (wyodrębnionych części pasma radiowego), ponumerowanych od 0 do 26 [19]. Szesnaście kanałów transmisyjnych dostępnych jest w paśmie 2,4 GHz. Zasięg, a także przepustowość transmisji danych są zróżnicowane dla wyszczególnionych pasm częstotliwości [7]. Dla celów przemysłowych, lepszym pasmem jest 2,4 GHz dzięki dużej liczbie kanałów i dużej prędkości transmisji. Rozmieszczenie kanałów transmisyjnych jest przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Rozmieszczenie kanałów transmisyjnych w pasmach częstotliwości standardu ZigBee

W standardzie ZigBee dane i komunikaty są przesyłane pomiędzy węzłami w formie pakietów. Wewnątrz pola danych (ang. *payload*) warstwy fizycznej znajduje się ramka (pakiet danych) warstwy łącza danych składająca się z trzech głównych sekcji: nagłówka zawierającego adresy węzłów i dane dotyczące bezpieczeństwa transmisji, pola ładunku zawierającego dane lub polecenia oraz stopki zawierającej 16-bitową sumę kontrolną pakietu.

W standardzie ZigBee określone są dwa typy urządzeń [7]. Są to:

- FFD (ang. *Full Function Device*) – urządzenia z pełnymi funkcjami systemowymi,
- RFD (ang. *Reduced Function Device*) – urządzenia o ograniczonych funkcjach.

Urządzenia typu FFD mogą komunikować się z dowolnym urządzeniem pracującym w sieci, natomiast układy RFD mogą komunikować się jedynie z układami o pełnych funkcjach systemowych. Ponadto urządzenia o ograniczonych funkcjach systemowych RFD mają znacznie mniejszą moc obliczeniową i mniejszą pamięć, dlatego też przeznaczone są do wykonywania prostych czynności. Standard ZigBee stanowi, że urządzenia FFD mogą pełnić trzy funkcje: koordynatora, rutera, oraz urządzenia końcowego (ang. *end device*).

Istotną właściwością standardu ZigBee jest to, że urządzenia mogą pracować w sieciach o różnych konfiguracjach. Standard ten definiuje trzy rodzaje konfiguracji sieci [19]: gwiazdy (ang. *Star Topology*), siatki (ang. *Mesh Topology*) oraz drzewiastą (ang. *Cluster Tree Topology*).

Standard IEEE 802.15.4 umożliwia trzy różne typy wymiany danych. Są to:

- transmisja z urządzenia do koordynatora,
- transmisja z koordynatora sieci do urządzenia,
- transmisja z urządzenia do innego urządzenia.

Każde urządzenie może transmitować dane do drugiego urządzenia, które znajduje się w jego zasięgu. W sieci o konfiguracji gwiazdowej występują tylko dwa pierwsze typy transmisji danych, natomiast w sieci o konfiguracji siatkowej mogą być stosowane wszystkie trzy. Wymiana danych pomiędzy dwoma urządzeniami końcowymi możliwa jest jedynie w sieciach o konfiguracji siatkowej.

W celu opisu poszczególnych typów wymiany danych konieczne jest zdefiniowanie pojęcia ramki synchronizującej nazywanej po angielsku „beacon”. W sieci ZigBee transmisja danych może odbywać się na dwa sposoby. Gdy urządzenie ma dane do wysłania, może poczekać aż medium będzie „wolne”, po czym przekazuje dane korzystając z mechanizmu CSMA/CA [7]. Drugi sposób polega na zarządzaniu transmisją przez koordynator, który ustala przedziały czasu dla każdego z urządzeń. Wymaga to jednak okresowego synchronizowania zegarów wszystkich urządzeń podłączonych do sieci. W tym celu koordynator rozsyła ramkę synchronizującą „beacon”, (często nazywaną też sygnałem „beacon”), a każde z urządzeń w sieci musi się okresowo „budzić”, aby ją odczytać i dokonać korekty własnego zegara. W sieci, w której nie są przesyłane ramki synchronizujące, urządzenie chcące wysłać dane do koordynatora po prostu oczekuje na wolny nośnik i transmituje dane. Natomiast, gdy koordynator ma dane dla innego urządzenia, musi zaczekać aż urządzenie wyśle sygnał żądania danych. Koordynator potwierdza otrzymanie żądania i odsyła dane.

4. CHARAKTERYSTYKA ŚRODOWISKA PROPAGACJI SYGNAŁU RADIOWEGO

Komunikację bezprzewodową przeprowadza się przy użyciu zestawu urządzeń określanego mianem łącza radiokomunikacyjnego, które najogólniej składa się z nadajnika i odbiornika, pomiędzy którymi znajduje się medium transmisyjne, będące środowiskiem propagacji się fal radiowych [16].

Współcześnie coraz częściej buduje się sieci bezprzewodowe zlokalizowane wewnątrz budynków mieszkalnych, hal fabrycznych i innych obiektów. Każdy element wyposażenia budynku może wpłynąć na transmisję radiową, a tym samym na opóźnienia. W celu wyznaczenia wpływu otoczenia na opóźnienia transmisji istotne jest zdefiniowanie i opis środowiska wewnątrz budynku z uwzględnieniem zjawisk fizycznych, które mogą zaburzyć transmisję.

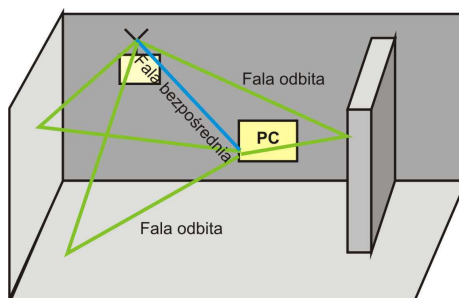
Przestrzeń wewnątrzbudynkową można zdefiniować, jako zamknięte i specyficzne środowisko, w którym może rozchodzić się sygnał radiowy [16]. Przestrzeń ta jest przedzielona ścianami, najczęściej wypełniona sprzętem oraz meblowaniem domowym, biurowym, a także przebywają w niej często ludzie. Bardzo trudno jest analizować i opisywać takie medium transmisyjne zwłaszcza, gdy uwzględni się zmieniające się warunki propagacji (przemieszczanie się ludzi, rzadziej sprzętów). Konieczne jest także zdefiniowanie pojęcia pokrycia radiowego, które rozumiane jest, jako zapewnienie na danym obszarze rozkładu pola użytecznego, spełniającego wymagania odnośnie zasięgu. W celu zapewnienia odpowiedniego pokrycia radiowego należy na wybranym terenie właściwie rozmieścić źródła sygnałów radiowych.

Propagację fal radiowych wewnątrz budynków charakteryzują:

- na ogół małe odległości pomiędzy przeszkodami, różnorodność i zmienność przeszkód (ściany, stropy, meble i inne wyposażenie),
- zmienność sytuacji (drzwi otwarte / zamknięte, przechodzące osoby),
- zmienność otoczenia na małej odległości,
- małe odległości między komunikującymi się urządzeniami.

Dla każdego rodzaju łączności radiowej transmisja sygnału oddziałuje z otoczeniem w sposób bardzo złożony. Wśród zjawisk mających wpływ na transmisję radiową można wymienić odbicia od obiektów, dyfrakcję fal elektromagnetycznych na obiektach, rozproszenie sygnału i tłumienie przez przedmioty znajdujące się na drodze fal elektromagnetycznych w szczególności ściany i stropy [8]. Dodatkowe fale powstające w wyniku np. dyfrakcji przechodząc przez środowisko otaczające nadajnik i odbiornik powodują pojawienie się na wejściu odbiornika licznych opóźnionych fal cząstkowych w porównaniu do transmisji w idealnej, wolnej przestrzeni. Rozchodzenie się fal wewnątrz budynku zilustrowano rysunkiem 4.1. Dane z nadajnika mogą docierać do odbiornika różnymi drogami, zależnymi od usytuowania elementów konstrukcyjnych pomieszczenia.

Należy także zwrócić uwagę, że wpływ na transmisję jest różny dla różnych materiałów, z których zrobione są przeszkody. Chodzi tu o materiały budowlane i wyposażenia wewnątrz (np. ściana z cegły w innym stopniu tłumi sygnał radiowy niż ścianka działowa wykonana z płyty gipsowo-kartonowej). Z tych względów jest to środowisko "niepowtarzalne", trudne do odwzorowania za pomocą uniwersalnych modeli propagacji fal radiowych, które dają się stosować w postaci formuł przydatnych do obliczeń inżynierskich.



Rys. 4.1. Ilustracja odbicia sygnału radiowego od elementów pomieszczenia

Wykonując analizę środowiska wewnątrz budynku należy wziąć pod uwagę nie tylko odbicia sygnału od różnych powierzchni, dyfrakcję na krawędziach oraz tłumienie fali, ale również efekt falowodowy polegający na przewodzeniu fali radiowej w korytarzach [16], a także obecność i ruch ludzi w pomieszczeniu. Wszystkie te czynniki wpływają znacząco na zmianę tłumienia i pojawienie się dodatkowych fal pochodzących z odbić od przedmiotów. Z tego powodu tworzenie narzędzi prognostycznych i modeli matematycznych, które powinny cechować się efektywnością i dokładnością, jest bardzo złożone.

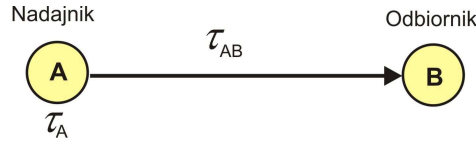
Osobnym zagadnieniem jest rozmieszczenie węzłów sieci i wpływ potencjalnych pól zakłócających na rozpatrywaną sieć. Źródłami zakłóceń mogą być także inne sieci bezprzewodowe pracujące w identycznym paśmie częstotliwości oraz inne urządzenia elektryczne, powodujące generowanie pola elektromagnetycznego o częstotliwości pracującej sieci bezprzewodowej.

5. MODELOWANIE OPÓŹNIEŃ ZA POMOCĄ LOSOWYCH CIĄGÓW FUNKCYJNYCH

Konieczność opisu opóźnień wynika z faktu, że sieci bezprzewodowe są coraz częściej stosowane do budowy różnych systemów, w których czas transmisji informacji jest bardzo istotny. Informacje i opis takich systemów można znaleźć w [2], [20], [22], [26], [27]. Podstawy opisu opóźnień wynikają głównie z teorii kolejek, co zostało przedstawione w [20] i [21]. Opóźnienia są przyczyną powstawania błędów scharakteryzowanych szeroko w publikacjach [1], [12] oraz [13].

Opisany tu model opóźnień komunikacyjnych w sieciach bezprzewodowych bazuje na aparacie matematycznym zaproponowanym w pracy [14] i rozwiniętym w pracy doktorskiej. Model ten pozwala na opis opóźnień w przypadku, gdy na przebieg transmisji danych oddziałują różnego rodzaju czynniki o charakterze losowym. Czynniki te oraz fakt, że moment rozpoczęcia transmisji jest przypadkowy stanowią podstawowe przyczyny zastosowania probabilistycznego modelu matematycznego do opisu opóźnień. Model ten, obejmuje również zjawiska związane z powtarzaniem transmisji na skutek powstających błędów komunikacyjnych.

Punktem wyjścia rozważań jest prosty przypadek, gdy dwa węzły komunikują się bezpośrednio ze sobą przy użyciu sieci bezprzewodowej, jak to pokazano na rysunku 5.1. Jeden z nich pełni rolę nadajnika, a drugi odbiornika przesyłanych danych, przy czym między nimi nie występują inne węzły, pośredniczące w transmisji [14].



Rys. 5.1. Ilustracja opóźnienia komunikacyjnego na drodze pomiędzy węzłami A i B w sieci

Oznaczmy, jako τ_A czas potrzebny w węźle A na uzyskanie dostępu do medium komunikacyjnego, a przez τ_{AB} czas wymagany na przesłanie komunikatu z węzła A do B. Przyjmijmy ponadto, że transmisja jest inicjowana w chwili oznaczonej, jako t_0 , a rozpoczęcie nadawania komunikatu do sieci następuje w chwili t_A . W tak zdefiniowanym przypadku opóźnienie transmisji związane z dostępem do medium można zapisać jako:

$$\tau_A = t_A - t_0. \quad (5.1)$$

Opóźnienie τ_B w przesyłaniu komunikatu z węzła A do węzła B jest różnicą między momentem t_B zakończenia transmisji w węźle B, a momentem jej inicjacji t_0 . Opóźnienie to, gdy uwzględni się zależność (5.1), wynosi:

$$\tau_B = t_B - t_0 = \tau_{AB} + t_A - t_0 = \tau_A + \tau_{AB}, \quad (5.2)$$

czyli jest sumą dwóch opóźnień cząstkowych, z których τ_B jest związane z dostępem do nośnika poprzez urządzenie, a τ_{AB} jest czasem przesyłania komunikatu.

Do probabilistycznego opisu składników wyrażenia (5.2) użyto funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Biorąc pod uwagę, że opóźnienie nie może przyjmować wartości ujemnych, funkcję gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia τ_A dostępu węzła A do medium transmisyjnego można opisać ogólnie zależnością:

$$g_{\tau_A}(\tau_A) = \begin{cases} g_A(\tau_A) & \text{dla } \tau_{A1} \leq \tau_A \leq \tau_{A2}, \text{ gdzie } \tau_{A1} \geq 0 \\ 0 & \text{dla innych} \end{cases}, \quad (5.3)$$

przy czym $g_A(\tau_A)$ jest funkcją ciągłą i ograniczoną, która spełnia warunek normalizujący:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g_A(\tau_A) d\tau_A = \int_{\tau_{A1}}^{\tau_{A2}} g_A(\tau_A) d\tau_A = 1. \quad (5.4)$$

W przypadku, gdy zachodzą powtórzenia transmisji funkcja $g_{AB}(\tau_{AB})$, opisująca rozkład opóźnień spowodowanych transmisją przez medium, może być opisana szeregiem o następującej postaci [14]:

$$g_{AB}(\tau_{AB}) = a_0 \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_0) + a_1 \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_1) + \dots + a_k \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_k), \quad (5.5)$$

gdzie δ jest symbolem delty Dirac'a [11], definiowanej, jako:

$$\delta(\tau_{AB} - \tau_i) = \begin{cases} \infty & \text{dla } \tau_{AB} = \tau_i, \quad i = 0, 1, \dots, k \\ 0 & \text{dla } \tau_{AB} \neq \tau_i \end{cases}, \quad (5.6)$$

przy czym, gdy weźmie się pod uwagę właściwości funkcji delta [11], zachodzi:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau_{AB} - \tau_i) d\tau_{AB} = 1, \quad (5.7)$$

gdzie numerem chwili jest $i = 0, 1, \dots, k$, a liczba wyrazów szeregu (5.5) jest ograniczona i wynosi k . Współczynniki a_0, a_1, \dots, a_k ciągu (5.5) mają stałe i nieujemne wartości.

Zależność (5.5) jest efektem analizy zjawisk zachodzących podczas przesyłania komunikatu przez kanał transmisyjny przy założeniu, że w przypadku niepoprawnej transmisji jest ona powtarzana, czyli zachodzą retransmisje danych. Maksymalna liczba powtórzeń transmisji wynosi k . Poszczególne wyrazy szeregu (5.5) opisują powtórzenia transmisji, przy czym czas τ_i wskazuje chwilę i -tego powtórzenia

transmisji, $i = 0, 1, \dots, k$, a współczynnik a_i określa prawdopodobieństwo wystąpienia powtórzenia transmisji o numerze i .

Funkcja $g_{AB}(\tau_{AB})$ interpretowana jest probabilistycznie, a zatem musi także spełniać warunek normalizujący, co oznacza, że zachodzi:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g_{AB}(\tau_{AB}) d\tau_{AB} = 1. \quad (5.8)$$

Po wprowadzeniu równania (5.5) do zależności (5.8) z uwzględnieniem wyrażenia (5.7), otrzymuje się:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{+\infty} [a_0 \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_0) + a_1 \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_1) + \dots + a_k \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_k)] d\tau_{AB} = \\ & = a_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_0) d\tau_{AB} + a_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_1) d\tau_{AB} + \dots + a_k \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau_{AB} + \tau_A - \tau_k) d\tau_{AB} = a_0 + a_1 + \dots + a_k = 1. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Przy założeniu, że opóźnienia cząstkowe w wyrażeniu (5.2) są niezależne, funkcja gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia całkowitego jest dana splotem funkcji opisujących opóźnienia τ_{AB} i τ_A , co można zapisać jako [23]:

$$g_B(\tau_B) = g_A(\tau_A) \otimes g_{AB}(\tau_{AB}), \quad (5.10)$$

gdzie \otimes jest symbolem splotu. Splot jest przekształceniem liniowym [23], [3], w związku, z czym po wprowadzeniu równania (5.5) do wyrażenia (5.10) można je zapisać, jako:

$$\begin{aligned} g_B(\tau_B) = & a_0 g_A(\tau_A) \otimes g_{AB}(\tau_{AB} + \tau_B - \tau_0) + \\ & + a_1 g_A(\tau_A) \otimes g_{AB}(\tau_{AB} + \tau_B - \tau_1) + \dots + a_k g_A(\tau_A) \otimes g_{AB}(\tau_{AB} + \tau_B - \tau_k). \end{aligned} \quad (5.11)$$

Wyrażenie (5.11) jest sumą składników, z których każdy stanowi iloczyn współczynnika i splotu funkcji delta i funkcji $g_A(\tau_A)$. Uwzględniając zależność (5.2), w pracy doktorskiej wykazano, że dla składnika o numerze i zachodzi:

$$g_{Bi}(\tau_B) = g_A(\tau_A) \otimes \delta(\tau_B - \tau_i) = g_A(\tau_B - \tau_i). \quad (5.12)$$

Zatem, gdy weźmie się pod uwagę wzory (5.11) oraz (5.12) poprawna jest zależność:

$$g_B(\tau_B) = a_0 g_A(\tau_B - \tau_0) + a_1 g_A(\tau_B - \tau_1) + \dots + a_k g_A(\tau_B - \tau_k). \quad (5.13)$$

Z zależności (5.13) wynika, że funkcja gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia całkowitego jest sumą iloczynów, z których każdy składa się z dwóch czynników. Jednym jest funkcja gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia powstającego w węzle A podczas uzyskiwania dostępu do medium, przesunięta o wartość τ_i , $i = 0, 1, \dots, k$, drugim współczynnik wagowy a_i , określający udział danego iloczynu w rozkładzie wypadkowym.

W każdym z wyrazów szeregu (5.24) występuje ta sama funkcja gęstości prawdopodobieństwa $g_A(\cdot)$, przy czym w kolejnych wyrazach ma ona różne współczynniki skali a_i i jest przesunięta o τ_i . Można, zatem powiedzieć, że funkcja $g_A(\cdot)$ stanowi swojego rodzaju szablon odwzorowywany w różnej skali przez kolejne wyrazy ciągu (5.13).

Gdy do opisu kanału komunikacyjnego zastosuje się losowy szereg funkcyjny (5.13), to określenie właściwości konkretnego kanału wymaga podania zbioru odpowiednich parametrów. Taki zbiór może mieć dwojaką postać [14]. Pierwsza z nich:

$$\{g_{rA}(\cdot), \tau_r, \tau_d, a_0, a_1, \dots\}, \quad (5.14)$$

obejmuje parametry charakteryzujące rozkład czasu dostępu do nośnika (szablon) $g_A(\cdot)$, czas dostępu i czas przesyłania komunikatu oraz wartości współczynników kopii szablonu.

Rozkład czasu dostępu można opisać podając typ rozkładu szablonu, a w przypadku gdy jest to rozkład normalny wystarczy określić jego wariancję. Druga postać tego zbioru:

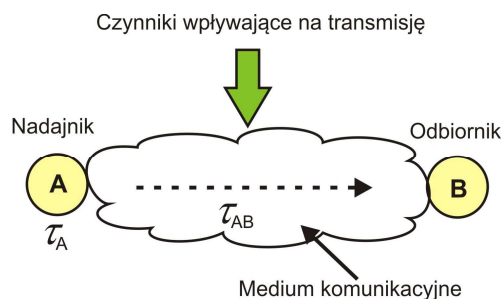
$$\{g_{rA}(\cdot), (\tau_0, a_0), (\tau_1, a_1), \dots\}, \quad (5.15)$$

zawiera opis rozkładu czasu dostępu oraz szereg składający się par liczb, z których pierwsza określa czas wystąpienia kopii szablonu, a druga współczynnik wagowy.

6. WERYFIKACJA MODELU OPÓŹNIEŃ

Doświadczalna weryfikacja zaproponowanego aparatu matematycznego do opisu opóźnień polegała na porównaniu histogramów opóźnień uzyskiwanych przy użyciu zbudowanych układów pomiarowych

z rozkładami otrzymywanymi na podstawie opracowanego modelu. Pomiary w podstawowym zakresie były realizowane dla układu składającego się dwóch modułów ZigBee, jak to pokazano na rysunku 6.1. Nadajnik i odbiornik komunikują się bezpośrednio przy użyciu medium, na które oddziałują zaburzenia. Występują dwa rodzaje opóźnień: wprowadzane przez nadajnik w trakcie przygotowania danych i dostępu do medium oraz opóźnienie związane z czasem transmisji komunikatu z węzła A do B. Zgodnie ze schematem z rys. 6.1 działają układy pomiarowe, zbudowane dla celów realizacji eksperymentów polegających na pomiarze czasu między momentem wysłania danych do nadajnika, a ich uzyskaniem przez odbiornik.



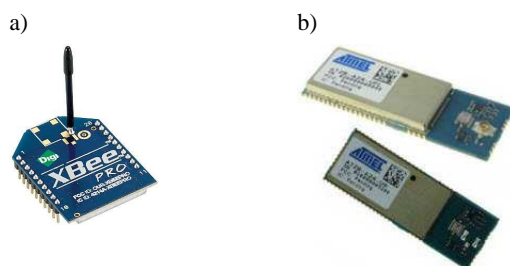
Rys. 6.1. Ilustracja powstawania opóźnień pod wpływem czynników zaburzających

Celem weryfikacji jest potwierdzenie, że opracowany w ramach pracy model można wykorzystać do opisu opóźnień w sieci ZigBee, spowodowanych różnego rodzaju zaburzeniami. W tym celu eksperymenty pomiarowe realizowane były w ten sposób, że pomiar czasu transmisji odbywał się w warunkach, gdy medium komunikacyjne poddawane było wybranym rodzajom zaburzeń. Uzyskiwane wyniki pomiarów zestawiane były w histogram i na tej podstawie tworzony był model opóźnienia z wykorzystaniem zaproponowanego aparatu matematycznego.

6.1 Moduły bezprzewodowe

Spośród dostępnych urządzeń do badań eksperymentalnych wybrano moduły **XBee-PRO** oraz **ATZB-A24-UFL**, które pracują zgodnie ze standardem ZigBee. Układy XBee umożliwiają budowę stosunkowo tanich sieci bezprzewodowych o niewielkim poborze mocy. Każdy moduł zapewnia efektywną wymianę danych w sieci przy zużyciu minimum energii, która wydatkowana jest jedynie w czasie nadawania i odbierania komunikatów.

Wygląd modułów bezprzewodowych pokazano na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Moduł XBee-PRO a) oraz ATZB-A24-UFL b)

Tabela 6.1. Parametry modułów bezprzewodowych wg danych producentów [30], [31]

Parametr	XBee-PRO	ATZB-A24-UFL
Napięcie zasilania	2,8 VDC – 3,4 VDC	3,0 VDC – 3,6VDC
Moc nadajnika radiowego	10 dBm lub 63 mW	10 mW – 100 mW
Zasięg na otwartej przestrzeni	1,6 km	Do 4 km
Zasięg wewnątrz budynków	60-90 m	–
Prąd pobierany w czasie odbierania	50 mA	23 mA
Prąd pobierany w czasie nadawania	215 mA	50 mA
Prąd pobierany w czasie uśpienia	<10 uA	<6 μ A
Przepustowość	250 kbps	250 kbps
Czułość odbiornika	-100 dBm	-104 dBm

Wszystkie parametry modułów XBee-PRO można wprowadzać używając dedykowanego oprogramowania X-CTU. Program ten umożliwia pomiar wskaźnika mocy odbieranego sygnału RSSI, zmianę i aktualizację oprogramowanie każdego XBee-PRO, komunikację przez terminal i ustalanie parametrów transmisji z komputerem [30].

Do przeprowadzenia badań porównawczych wybrano minimoduł o symbolu ATZB-A24-UFL firmy Atmel. Ma on wgrane, opracowane przez producenta, oprogramowanie o nazwie BitCloud, zgodne ze standardami ZigBee i ZigBee Pro [31]. Minimoduł można skonfigurować programowo w taki sposób, że spełnia on jedną z trzech funkcji (koordynatora, rutera lub urządzenia końcowego).

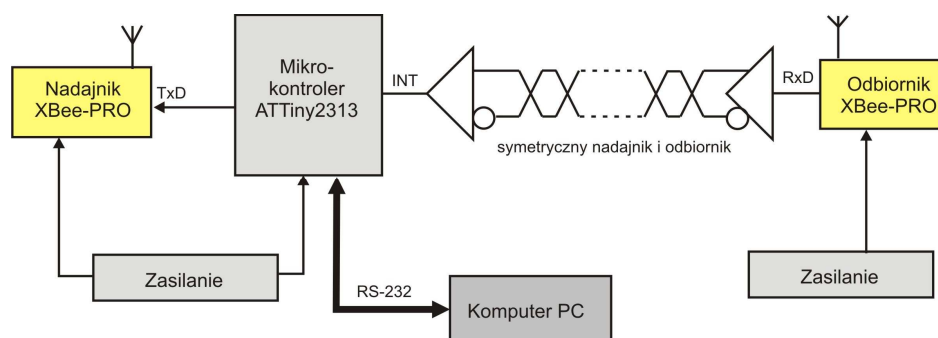
6.2 Układ pomiarowy

W celu przeprowadzenia eksperymentów weryfikacyjnych zbudowano dwa układy pomiarowe. Jeden z wykorzystaniem modułów XBee-PRO, a drugi z użyciem modułów ATZB-A24-UFL. Koncepcja budowy układu pomiarowego zakłada użycie dwóch modułów przesyłających bezprzewodowo dane pomiędzy sobą, co określony odcinek czasu. Pomiar opóźnienia jest dokonywany przy wykorzystaniu sprzężenia przewodowego pomiędzy urządzeniami radiowymi układu pomiarowego. Nadajnik za zadanie przesyłać dane do odbiornika co ustalony odcinek czasu. Odbiornik po otrzymaniu danych wystawia sygnał przzerwania, odbierany przez mikrokontroler układu sterującego. Czas pomiędzy wysłaniem danych do nadajnika a ich uzyskaniem przez odbiornik jest mierzony, a następnie rejestrowany przy użyciu komputera klasy PC [25].

Układ pomiarowy umożliwia zbadanie podstawowych parametrów transmisji bezprzewodowej:

- liczby prawidłowo odebranych bajtów danych do całkowitej liczby wysłanych bajtów,
- opóźnienia komunikacyjnego rozumianego jako czas pomiędzy wysłaniem bajtu przez mikroprocesor, a jego odebraniem przez drugi moduł,
- wskaźnika mocy odbieranego sygnału radiowego,
- liczby retransmitowanych bajtów w odniesieniu do całkowitej liczby bajtów wysłanych.

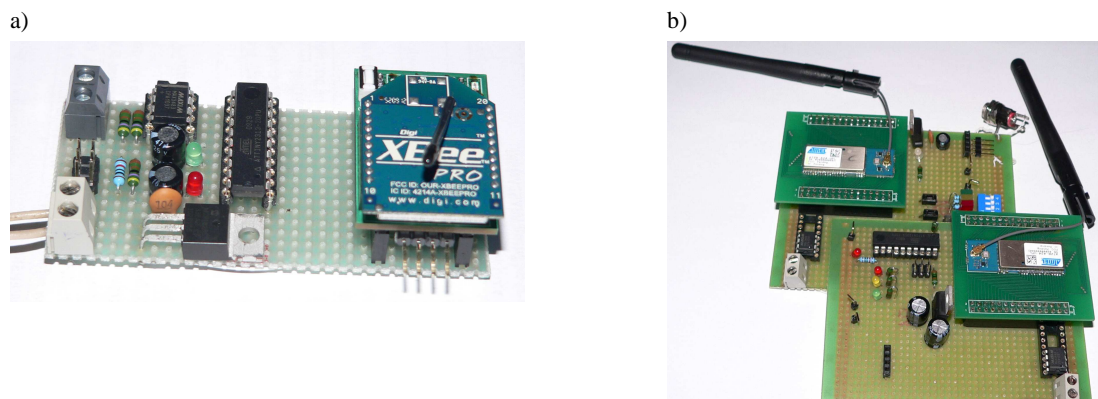
Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 6.3. Obiektem badań są dwa moduły XBee-PRO. Jeden z nich realizuje nadawanie danych, drugi ich odbiór. Elementem sterującym pracą układu pomiarowego jest mikrokontroler AVR ATTiny2313, który wysyła dane na wejście szeregowo modułu nadawczego [25]. Moduły PRO mają większą moc wyjściową sygnału radiowego od zwykłych modułów, a zastosowano je z uwagi na dużą dostępność. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano transmisję pojedynczych bajtów. W momencie wysłania bitu startu do modułu XBee-PRO nadawczego, mikrokontroler rozpoczyna pomiar czasu uruchamiając wewnętrzny zegar. Po otrzymaniu bajtu danych moduł nadawczy wysyła go poprzez łącze radiowe. Drugi z modułów, znajdujący się w tej samej sieci i pracujący na tym samym kanale radiowym, odbiera te dane drogą radiową i wystawia je na wyjściu portu szeregowego RxD. Pojawienie się bitu startu danych na tej linii, która połączona jest do wejścia przzerwania INT mikrokontrolera powoduje zgłoszenie przzerwania i zatrzymanie zegara. Czas pomiędzy wysłaniem danych, a przyjęciem przzerwania rejestrowany jest, jako opóźnienie komunikacyjne łącza bezprzewodowego.



Rys. 6.3. Schemat blokowy działania układu do pomiaru opóźnień transmisji

Dokładność pomiaru czasu w użytym mikrokontrolerze wynosi $2 \mu\text{s}$. Zmierzona wartość czasu przesyłana jest z mikrokontrolera do komputera. Dane przychodzące z układu pomiarowego do komputera PC są rejestrowane i zapisywane w pliku. Kolejny bajt danych wysyłany jest do modułu nadawczego po upływie 100 ms od wysłania pierwszego bajtu danych. Wartość ta jest stała i na tyle duża, aby nie zakłócać transmisji poprzedniego bajtu, a także możliwych powtórzeń (retransmisji) danych.

Do transmisji użyto skrętki z uwagi na to, że jest to najczęściej stosowany sposób przewodowego przesyłania danych w sieciach przemysłowych, a przesyłanie różnicowe zapobiega wpływowi zakłóceń zewnętrznych na transmisję danych na dużych odległościach. Ze względów technologicznych konieczne było użycie względnie długiego przewodu, a ponadto należało wyeliminować wpływ zakłóceń zewnętrznych, które mogły indukować zaburzenia transmisji w przewodzie i wygenerować błędne dane. Zastosowano skrętkę z każdą parą foliowaną, dodatkowo w ekranie z folii i siatki SF/FTP. Ekran przewodu połączono z masą układów, a ponadto do wytłumienia zakłóceń zastosowano filtry ferrytowe. Z uwagi na dużą odległość pomiędzy modułami zastosowano oddzielne zasilanie modułów. Widok zbudowanego układu pomiarowego pokazano na rysunku 6.4.

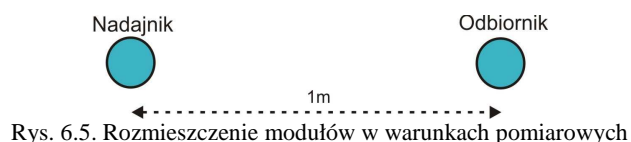


Rys. 6.4. Zbudowany układ pomiarowy z wykorzystaniem modułów XBee-PRO a) i ATZB-A24-UFL b)

W celu wykonania pomiarów porównawczych opóźnienia transmisji danych w systemie pracującym w standardzie IEEE 802.15.4 zaprojektowano i zbudowano mikroprocesorowy układ pomiarowy z wykorzystaniem modułów bezprzewodowych innego producenta. Są to moduły ATZB-A24-UFL firmy Atmel. Układ pomiarowy został zbudowany analogicznie do tego z użyciem modułów XBee-PRO, podmieniając jedynie moduły bezprzewodowe. W urządzeniach wykorzystano oprogramowanie opracowane przez producenta, umożliwiające utworzenie prostej sieci punkt-punkt pomiędzy dwoma urządzeniami. Jedno z urządzeń pełni rolę koordynatora a drugie rutera. Wykorzystanie właściwości tego programu umożliwiło ustalenie początku i końca transmisji informacji między dwoma urządzeniami badanej sieci. Oprogramowanie to umożliwia również podłączenie innych urządzeń (maksymalnie do 8) i ich komunikację w sieci bezprzewodowej. Każde z nich na przydzielony odrębny adres i typ urządzenia. Procedura tworzenia sieci jest rozpoczynana automatycznie po włączeniu zasilania urządzeń. Koordynator tworzy sieć, a każde z urządzeń wyszukuje i przyłącza się do powstałej sieci, co sygnalizowane jest przez diodę sygnalizującą stanu.

6.3 Weryfikacja modelu dla zaburzeń pasywnych

Pomiary wykonano dla kanału komunikacyjnego, składającego się z 2 układów XBee-PRO umieszczonych tak, by zapewnić wzajemną widoczność anten, przesyłających między sobą komunikat o stałej długości danych i oddalonych o 1 m (rys. 6.5). Nie umieszczano żadnych przeszkód między nadajnikiem i odbiornikiem.



Rys. 6.5. Rozmieszczenie modułów w warunkach pomiarowych

Uzyskane wyniki zostały zestawione w histogram (rys. 6.6a), który przedstawia czas transmisji poszczególnych pakietów. Wykonano 20 000 prób, z których każda stanowi pomiar czasu pojedynczej transmisji między dwoma urządzeniami końcowymi, pracującymi w połączeniu typu punkt - punkt. Każda z podjętych prób transmisji została zakończona powodzeniem. Średni czas propagacji wynosi 8,10 ms. Widoczny jest rozrzut wyników pomiarowych, spowodowany właściwościami modułu bezprzewodowego – wartości opóźnień zmieniają się losowo w granicach 7,8÷8,5 ms.

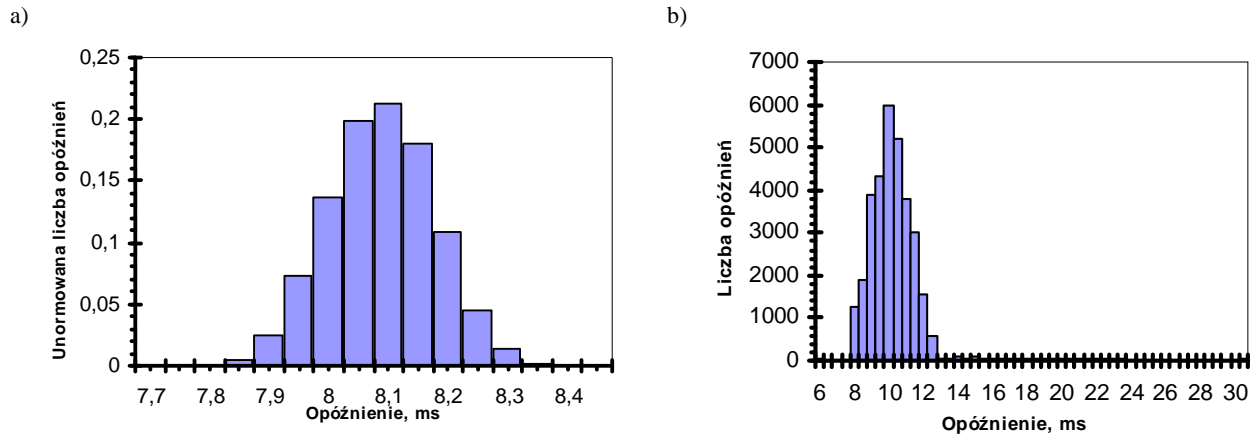
Stosując opracowany model, na podstawie uzyskanych wyników można zapisać, że rozkład opóźnienia całkowitego wyraża się wzorem:

$$g_B(\tau_B) = 1 \cdot g_A(\tau_B - 8,10). \quad (6.1)$$

Dla modułów ATZB-A24-UFL przeprowadzono eksperyment pomiarowy w sposób podobny jak dla modułów XBee. Dwa moduły bezprzewodowe umieszczono w układzie pomiarowym w odległości 1 metra od siebie przy braku przeszkód w transmisji. Przeprowadzono 30 000 prób transmisji jednego bajtu danych, a wyniki pokazano na rysunku 6.6b.

Na podstawie uzyskanych wyników można zapisać, że rozkład opóźnienia całkowitego wyraża się wzorem:

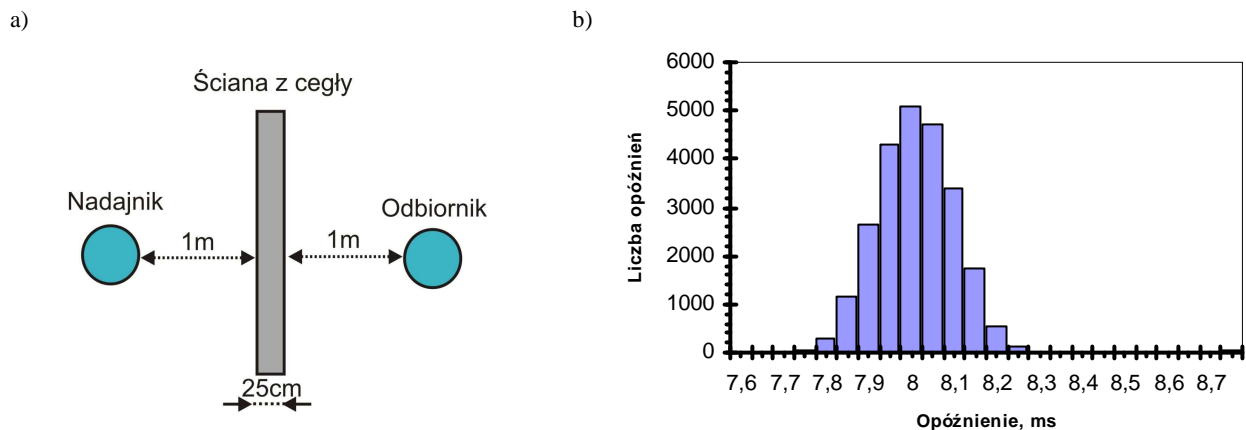
$$g_B(\tau_B) = 1 \cdot g_A(\tau_B - 10,75). \quad (6.2)$$



Rys. 6.6. Histogram wyników opóźnień dla transmisji w otwartej przestrzeni dla modułów XBee-PRO a) oraz dla modułów ATZB-A24-UFL b)

Z uzyskanych histogramów opóźnień (rys. 6.6) wynika, że rozkład opóźnień jest w przybliżeniu normalny. Za kształt tego rozkładu odpowiadają wyłącznie działania nadajnika poprzedzające uzyskanie dostępu do nośnika, gdyż czas przesyłania każdego z pakietów jest taki sam. Oznacza to, że rozkłady z rysunków 6.6a i 6.6b (oczywiście przesunięty o τ_0) mogą być uznane za tzw. **szablon szeregu funkcyjnego**. Zatem, pomiaru tego szablonu należy dokonywać dla kanału komunikacyjnego, gdy nie występują czynniki wpływające na transmisję.

Kolejna grupa eksperymentów polegała na przeprowadzeniu pomiarów w warunkach występowania przeszkód w postaci ścian. Na początku odbiornik danych oddzielono od nadajnika ścianą z cegły o grubości 25 cm. Nadajnik i odbiornik zostały umieszczone po przeciwnych stronach ściany z zachowaniem odstępu 1 m od ściany. Nadajnik i odbiornik umieszczono w jednej linii prostopadłej do płaszczyzny ściany, jak to pokazano na rysunku 6.7a.



Rys. 6.7. Rozmieszczenie modułów w warunków pomiarowych a) oraz histogram wyników opóźnienia dla modułów XBee-PRO w podanych warunkach pomiarowych b)

Pomiar polegał na przesłaniu pojedynczego bajtu danych pomiędzy modułami. Liczba powtórzeń transmisji pojedynczego bajtu wyniosła 25 000. Uzyskane wyniki zostały zestawione w postaci histogramu,

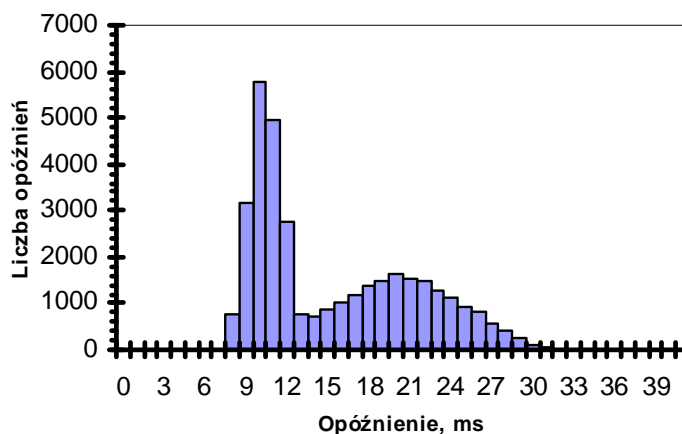
pokazanego na rys. 6.7b. Nie każda z podjętych prób transmisji została zakończona powodzeniem, gdyż kilkadziesiąt pakietów zostało wysłanych powtórnie przez nadajnik. Ta powtórna transmisja nazywana jest pierwszą retransmisją danych i ma przesunięcie czasowe 10,20 ms (niewidoczne na rysunku 6.7b ze względu na małą liczbę wystąpień).

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarowych rozkład opóźnienia całkowitego można opisać wzorem składającym się z dwóch składników:

$$g_B(\tau_B) = 0,998 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,002 \cdot g_A(\tau_B - 10,20), \quad (6.3)$$

pierwszy składnik opisuje opóźnienie przy transmisji bez powtórzeń, drugi – gdy występuje jedna retransmisja.

W celu analizy porównawczej moduły ATZB-A24-UFL poddano podobnemu eksperymentowi pomiarowemu. Dwa moduły bezprzewodowe umieszczono w układzie pomiarowym w odległości 1 metra od przegrody w postaci ściany. Przeprowadzono 30 000 prób transmisji jednego bajtu danych. Uzyskane wyniki przedstawiono na histogramie pokazanym na rysunku 6.8.



Rys. 6.8. Histogram wyników opóźnienia dla modułów ATZB-A24 przy transmisji poprzez jedną ścianę z cegły

W tabeli 6.1 przedstawiono względną liczbę odebranych pakietów przez odbiornik oraz średnią wartość opóźnienia. Dla modułów ATZB-A24-UFL występują trzy retransmisje danych, przy czym pierwsza z nich ma współczynnik skali równy 0,10, druga 0,06 i trzecia 0,02. Tylko niewielka część danych wymaga retransmisji w tym przypadku podobnie jak w modułach XBee.

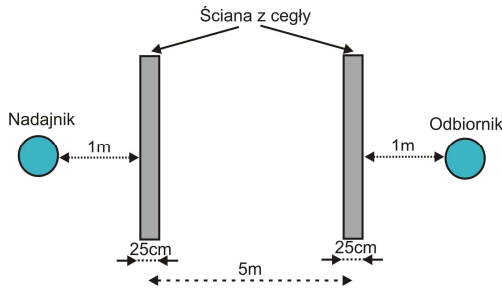
Tabela 6.1. Wyniki pomiarów opóźnienia

	Względna liczba odebranych pakietów, %	Opóźnienie, ms
Transmisja bezpośrednia	82	10,75
Pierwsza retransmisja	10	15,00
Druga retransmisja	6	17,00
Trzecia retransmisja	2	19,00

Na podstawie uzyskanych wyników można zapisać, że rozkład opóźnienia całkowitego wyraża się wzorem:

$$g_B(\tau_B) = 0,82 \cdot g_A(\tau_B - 10,75) + 0,10 \cdot g_A(\tau_B - 15,00) + 0,06 \cdot g_A(\tau_B - 17,00) + 0,02 \cdot g_A(\tau_B - 19,00). \quad (6.4)$$

Kolejny pomiar wykonano **rozdzielając moduły dwoma niezbrojnymi ścianami z cegły**. W tym przypadku moduł odbiorczy został oddalony od reszty elementów sieci na odległość, przy której nadal możliwa była transmisja, jednak występowały próby nieudane. Dodatkową przeszkodą dla propagacji fal radiowych w tym eksperymencie były dwie ściany nośne pomieszczenia, w którym odbywał się pomiar. Warunki realizacji pomiarów ilustruje rysunek 6.9 a otrzymane wyniki zebrano w tabeli 6.2.

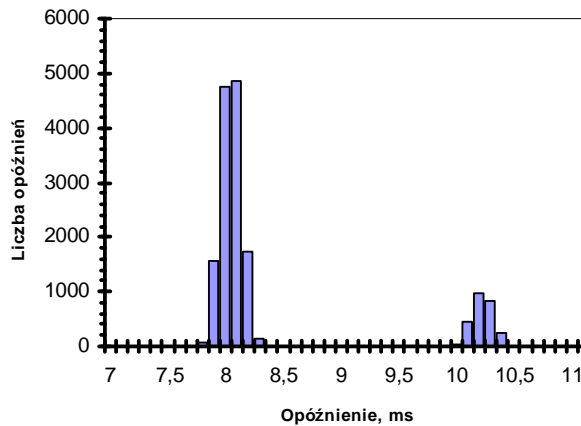


Rys. 6.9. Rozmieszczenie modułów w warunkach pomiarowych

Tabela 6.2. Wyniki pomiarów opóźnienia

	Względna liczba odebranych pakietów, %	Opóźnienie, ms
Transmisja bezpośrednia	84	8,10
Pierwsza retransmisja	16	10,25

Ściany, o grubości 25 cm każda, wykonano z otynkowanej cegły. Odległość pomiędzy nimi wynosiła 5 m, przy czym zarówno nadajnik i odbiornik zostały umieszczone w odległości jednego metra od ścian w linii prostej. Wykonano 20 000 prób transmisji pojedynczego bajtu danych. Uzyskany histogram przedstawiono na rysunku 6.10. Gdy zinterpretuje się ten histogram, jako opis opóźnień w kanale komunikacyjnym, występowanie dwóch kopii oznacza dwukrotną transmisję tego samego komunikatu: pierwsza kopia opisuje pierwszą transmisję, a druga powtórzenie transmisji, gdy pierwsza zakończyła się niepowodzeniem.



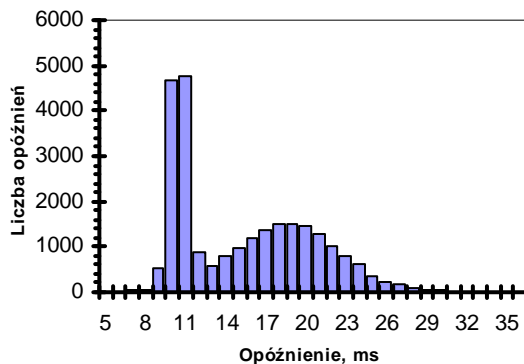
Rys. 6.10. Histogram wyników opóźnienia przy transmisji przez dwie niezbrojone ściany dla modułów XBee-PRO

Na podstawie przeprowadzonych badań można napisać, że rozkład opóźnienia całkowitego dla modułów XBee wyraża się wzorem:

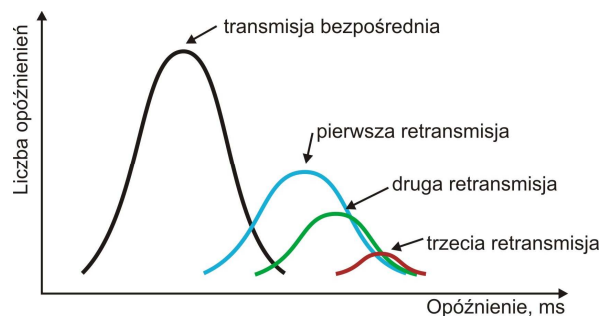
$$g_B(\tau_B) = 0,84 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,16 \cdot g_A(\tau_B - 10,25). \quad (6.5)$$

Dla modułów ATZB A24-UFL w zbliżonych warunkach pomiarowych wykonano 35 000 prób transmisji bajtu danych. Uzyskane wyniki przedstawiono za pomocą histogramu, pokazanego na rysunku 6.11a. Histogram składa się z 4 części, które są widoczne dopiero po symulacji zachowania się modułów i analizie ich dokumentacji, co przedstawiono schematycznie na rysunku 6.11b. Przy niewielkich różnicach czasów przesunięcia kolejne kopie szablonu zachodzą na siebie, w wyniku czego powstaje wspólna obwiednia całego rozkładu [14].

a)



b)



Rys. 6.11 Histogram wyników opóźnienia przy transmisji przez dwie niezbrojone ściany dla modułów ATZB A24-UFL a) i sposób powstawania wspólnej obwiedni histogramu b)

Proces powtarzania transmisji danych odbywa się do momentu wysłania wszystkich danych ze skutkiem pozytywnym lub wyczerpania się, zadeklarowanej sprzętowo w module, liczby powtórzeń transmisji. Dla modułów XBee i ATZB A24-UFL liczba ta wynosi 3. Dane, które po trzecim powtórzeniu nie dotrą do odbiorcy są usuwane z bufora nadajnika i uznawane za utracone. Wyniki pomiarów zabrano w tabeli 6.3.

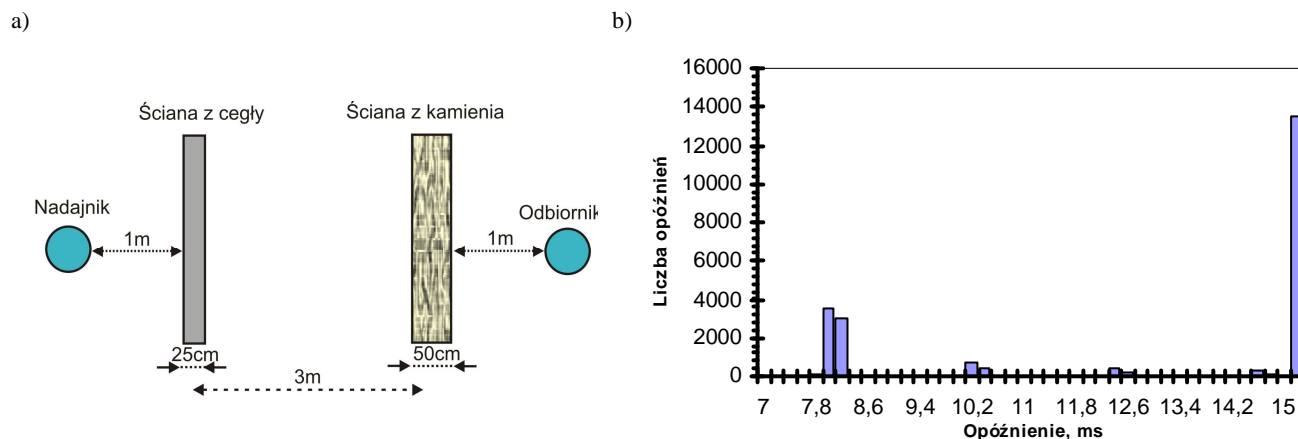
Tabela 6.3. Wyniki pomiarów opóźnień

	Względna liczba odebranych pakietów, %	Opóźnienie, ms
Transmisja bezpośrednia	60,0	10,25
Pierwsza retransmisja	34,0	15,00
Druga retransmisja	4,8	17,00
Trzecia retransmisja	1,2	19,00

Na podstawie uzyskanych danych można zapisać, że rozkład opóźnienia całkowitego dla modułów ATZB A24-UFL w podanych warunkach środowiskowych wyraża się wzorem:

$$g_B(\tau_B) = 0,60 \cdot g_A(\tau_B - 10,25) + 0,34 \cdot g_A(\tau_B - 15,00) + 0,048 \cdot g_A(\tau_B - 17,00) + 0,012 \cdot g_A(\tau_B - 19,00). \quad (6.6)$$

Dla porównania **różnych materiałów konstrukcyjnych** zestawiono układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 6.12a. Moduł nadawczy został umieszczony obok ściany z cegły w budynku, a moduł odbiorczy ustawiono za kolejną ścianą – kamienną o grubości ok. 50 cm. Moduły bezprzewodowe zostały umieszczone w jednej linii prostopadłej do ścian.



Rys. 6.12. Schemat układu pomiarowego a) oraz histogram wyników opóźnienia dla modułów XBee-PRO przedzielonych ścianami z różnych materiałów konstrukcyjnych b)

Z publikacji [15] wynika, że współczynnik tłumienia sygnału radiowego przez kamienne elementy jest dużo większy niż dla przegród ceglanych, gipsowo-kartonowych czy betonowych. Współczynnik tłumienia zależy także od grubości materiału budowlanego i wzrasta ze wzrostem grubości. Wpływ zwiększonego tłumienia sygnału radiowego można zaobserwować na histogramie pokazanym na rysunku 6.12b. Histogram składa się z pięciu części, z których cztery to kopie szablonu rozkładu podstawowego. W trakcie bezpośredniej transmisji jedynie 29% wysłanych przez nadajnik pakietów dociera do odbiornika. Większość pakietów (ponad 60%) nie dotarła do odbiornika pomimo trzykrotnej retransmisji danych, co przedstawiono na histogramie w postaci ostatniego słupka. Zmierzone parametry transmisji zostały pokazane w tabeli 6.4.

Tabela 6.10. Wyniki pomiarów opóźnień

	Względna liczba odebranych pakietów, %	Opóźnienie, ms
Transmisja bezpośrednia	29	8,10
Pierwsza retransmisja	5	10,20
Druga retransmisja	3	12,40
Trzecia retransmisja	2	14,60
Pakiety utracone	61	∞

Na podstawie uzyskanych wyników można zapisać, że rozkład opóźnienia całkowitego dla modułów XBee w rozpatrywanym przypadku wyraża się zależnością:

$$g_B(\tau_B) = 0,29 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,05 \cdot g_A(\tau_B - 10,20) + 0,03 \cdot g_A(\tau_B - 12,40) + 0,02 \cdot g_A(\tau_B - 14,60) + 0,61 \cdot g_A(\tau_B - \tau_1), \quad (6.7)$$

przy czym:

$$\tau_1 \rightarrow \infty. \quad (6.8)$$

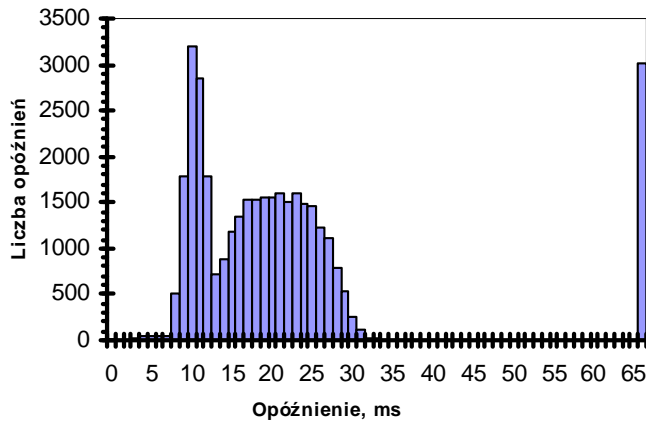
Ostatni człon wyrażenia 6.15 oznacza, że 61% pakietów ma opóźnienie nieskończenie duże, czyli nie dociera do odbiorcy.

W konfiguracji pokazanej na rysunku 6.33 poddano pomiarom moduły ZigBee ATZB A24-UFL wykonując 42 000 prób transmisji bajtu danych. Uzyskane wyniki przedstawiono na histogramie na rysunku 6.13. Duża część danych jest także retransmitowana w każdej z trzech dozwolonych retransmisji. Pakiety (7%), które nie zostały odebrane przez odbiornik w trakcie trzech retransmisji są uznawane za utracone i nie są powtarzane.

W tabeli 6.5 zebrano wyniki pomiarów względnej liczby odebranych i utraconych pakietów w trakcie transmisji. W porównaniu do modułów XBee-PRO w identycznych warunkach środowiskowych odnotowano relatywnie niewielką liczbę utraconych pakietów. Na podstawie uzyskanych wyników można zapisać, że rozkład opóźnienia całkowitego dla modułów XBee-PRO w rozpatrywanym przypadku wyraża się zależnością:

$$g_B(\tau_B) = 0,41 \cdot g_A(\tau_B - 10,25) + 0,19 \cdot g_A(\tau_B - 15,00) + 0,18 \cdot g_A(\tau_B - 17,00) + 0,15 \cdot g_A(\tau_B - 19,00) + 0,07 \cdot g_A(\tau_B - \tau_1), \quad (6.9)$$

przy czym obowiązuje zależność 6.8.



Rys. 6.13. Histogram wyników opóźnienia dla transmisji poprzez dwie niezbrojone i jedną zbrojoną ścianę dla modułów ATZB

Tabela 6.5. Wyniki pomiarów opóźnienia

	Względna liczba odebranych pakietów, %	Opóźnienie, ms
Transmisja bezpośrednia	41	10,25
Pierwsza retransmisja	19	15,00
Druga retransmisja	18	17,00
Trzecia retransmisja	15	19,00
Pakiety utracone	7	∞

6.4 Weryfikacja modelu dla zaburzeń aktywnych

W celu przebadania wpływu zakłóceń elektromagnetycznych wykonano szereg testów z wykorzystaniem modułów XBee-PRO. Obejmowały one badania odporności układów na **wyładowania elektrostatyczne**, a także **wpływ innych układów działających w standardzie ZigBee** na opóźnienia transmisji danych. Poddano także badaniom **wpływ impulsowego pola magnetycznego** na opóźnienia danych w transmisji radiowej.

W celu przebadania wpływu **zakłóceń elektrostatycznych** na opóźnienia wykorzystano generator przeznaczony do wykonywania badań odporności urządzeń na wyładowania elektrostatyczne. Jest to symulator wyładowań elektryczności statycznej (ESD) typu NSG 435 produkcji firmy Schaffner [33]. Wyładowanie elektrostatyczne jest określone jako gwałtowny przepływ ładunku elektrycznego między ciałami o różnych potencjałach elektrostatycznych przy ich zbliżeniu lub bezpośrednim zetknięciu [34]. Amplituda impulsu wyładowczego może wynosić do 16 kV.

Stanowisko pomiarowe składa się z generatora pomiarowego, sprzętu badanego i wyposażenia pomocniczego niezbędnego do wykonania wyładowań do sprzętu narażanego bezpośrednio i pośrednio. Badania realizowane są w następujący sposób (rys. 6.14):

- Wyładowanie kontaktowe do powierzchni przewodzących i do płaszczyzn sprzęgających. Płaszczyzna sprzęgająca to arkusz lub płyta metalowa, do której wytwarzane są wyładowania w celu symulacji wyładowań elektrostatycznych zachodzących do obiektów sąsiadujących ze sprzętem badanym.
- Wyładowanie w powietrzu w odniesieniu do płaszczyzn izolacyjnych.



Rys. 6.14. Wygląd stanowiska pomiarowego do badania wpływu wyładowań elektrostatycznych na opóźnienia w sieci ZigBee

Metoda wyładowania kontaktowego jest metodą badania, w której elektroda generatora pomiarowego jest utrzymywana w kontakcie ze sprzętem badanym, a obwód rozładowczy RC wprowadza ładunek do obiektu badanego w sposób galwaniczny. Wyładowanie jest powodowane łącznikiem rozładowczym wewnątrz generatora [34]. Metoda wyładowania w powietrzu to metoda badania, w której to ten sam obwód rozładowczy RC wprowadza ładunek elektrostatyczny do obiektu przez łuk elektryczny. Łuk powstaje w wyniku zbliżenia elektrody do obiektu (dedykowanej do powietrznych wyładowań, innej niż do kontaktowych) [4]. W zbudowanym układzie pomiarowym dokonano pomiarów z trzema różnymi wartościami napięcia wyładowania (6 kV, 10 kV, 16 kV). Częstotliwość generowania impulsów została ustawiona na maksymalną wartość równą 25 Hz. Dla każdej serii pomiarowej zarejestrowano po 30 tysięcy wyników. Uzyskane dane przestawiono w tabeli 6.6.

Tabela 6.6. Wyniki uzyskane przy zakłóceniu modułów XBee-PRO symulatorem wyładowań elektrostatycznych

	Względna liczba odebranych pakietów dla 6 kV, %	Względna liczba odebranych pakietów dla 10 kV, %	Względna liczba odebranych pakietów dla 16 kV, %
Transmisja bezpośrednia	95,67%	95,83%	97,07%
Pierwsza retransmisja	3,43%	3,13%	0,97%
Druga retransmisja	0,12%	0,16%	0,11%
Trzecia retransmisja	0,08%	0,08%	0,10%
Pakiety utracone	0,70%	0,81%	1,74%

Na podstawie uzyskanych wyników można zgodnie z zależnością (5.24) zapisać rozkład opóźnienia całkowitego dla modułów XBee.

- Dla napięcia wyładowania elektrostatycznego 6 kV:

$$g_B(\tau_B) = 0,9567 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,0343 \cdot g_A(\tau_B - 10,20) + 0,0012 \cdot g_A(\tau_B - 12,40) + 0,0008 \cdot g_A(\tau_B - 14,60) + 0,0070 \cdot g_A(\tau_B - \tau_1). \quad (6.10)$$

- Dla napięcia wyładowania elektrostatycznego 10 kV:

$$g_B(\tau_B) = 0,9583 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,0313 \cdot g_A(\tau_B - 10,20) + 0,0016 \cdot g_A(\tau_B - 12,40) + 0,0008 \cdot g_A(\tau_B - 14,60) + 0,0081 \cdot g_A(\tau_B - \tau_1). \quad (6.11)$$

- Dla napięcia wyładowania elektrostatycznego 16 kV:

$$g_B(\tau_B) = 0,9707 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,0097 \cdot g_A(\tau_B - 10,20) + 0,0011 \cdot g_A(\tau_B - 12,40) + 0,0010 \cdot g_A(\tau_B - 14,60) + 0,0174 \cdot g_A(\tau_B - \tau_1). \quad (6.12)$$

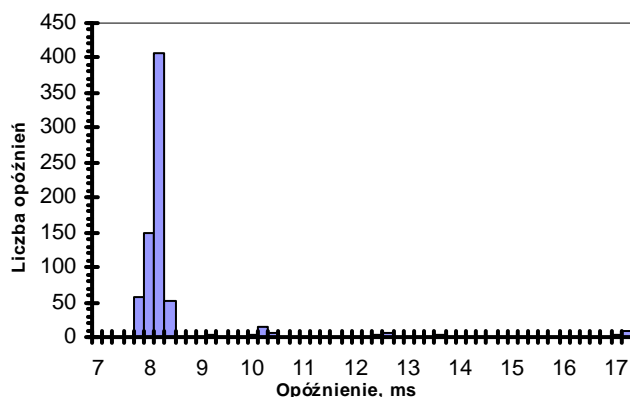
Uzyskane wyniki nie zostały zobrazowane na histogramach ze względu na zbyt małą liczbę przesyłanych danych podczas trzech retransmisji w stosunku do transmisji bezpośredniej, co powoduje nieczytelność takiego wykresu. Z otrzymanych danych wynika, że wyładowania elektrostatyczne wpływają na transmisję, powodując sporadyczną utratę danych. Ilość danych, które wymagają retransmisji jest jednakże na poziomie 3%, co oznacza, że wpływ ten nie jest duży. Wynika to z faktu, że częstotliwość transmisji danych jest stosunkowo niewielka w porównaniu z częstotliwością wyładowań elektrostatycznych, a ponadto czas transmisji pojedynczego pakietu danych jest bardzo krótki w stosunku do czasu pomiędzy transmisjami, a samo wyładowanie jest krótsze niż czas transmisji danych. Dlatego wpływ wyładowań na transmisję był niewielki.

Na podstawie otrzymanych danych można zauważyć, że liczby odebranych pakietów przy każdej retransmisji niewiele się różnią dla kolejnych wartości napięcia wyładowania. Pozwala to przypuszczać, że niezależnie od napięcia wyładowania opóźnienie transmisji będzie podobne.

Właściwością transmisji radiowej, na którą należy również zwrócić uwagę jest jej odporność na bezpośrednie oddziaływanie **impulsowego pola magnetycznego**, które może wpłynąć na opóźnienia. Norma PN-EN 61000-4-9 zaleca przeprowadzanie badań odporności na pola magnetyczne zależnie od środowiska. Im większa możliwość narażeń obiektu na pola magnetyczne tym bardziej zalecane jest rozszerzenie badań o pola magnetyczne impulsowe.

Zaproponowany w normie kształt impulsu i jego wartości szczytowe odwzorowują zagrożenia, jakie wywołuje prąd wyładowania lub procesy łączeniowe w stacjach elektroenergetycznych. W badaniach prowadzonych zgodnie z zaleceniami tej normy urządzenie narażone jest na działanie impulsowego natężenia pola magnetycznego wytworzonego przez prąd udarowy o kształcie 6,4/16 μ s płynący w prostopadłych układach przewodów. Wartości szczytowe natężenia pola uzależnione są od przyjętej klasy środowiska.

Układ do pomiaru wpływu impulsowego pola magnetycznego na opóźnienia zbudowany jest z nadajnika i odbiornika danych oraz generatora impulsów zakłóceń Moduła 6150 firmy Schaffner, do którego podłączono antenę ramową, która jest źródłem równomiernego pola magnetycznego. Antena ramowa została ustawiona pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem, tak by nie zaburzać pracy urządzeń elektronicznych (np. mikroprocesora), a badać jedynie wpływ zakłóceń na transmisję radiową. Natężenie impulsowego pola magnetycznego w trakcie badań wynosiło 1000 A/m. W tabeli 6.7 przedstawiono wyniki otrzymanych pomiarów opóźnienia. Z danych wynika, że wpływ impulsowego pola magnetycznego jest niewielki, ponieważ ponad 97% pakietów jest dostarczanych do odbiornika w czasie pierwszej transmisji.



Rys. 6.15. Histogram wyników opóźnienia uzyskany przy zaburzaniu transmisji radiowej impulsowym polem magnetycznym

Tabela 6.7. Wyniki pomiarów opóźnienia

	Względna liczba odebranych pakietów, %	Opóźnienie, ms
Transmisja bezpośrednia	97,3	8,10
Pierwsza retransmisja	1,6	10,20
Druga retransmisja	0,4	12,40
Trzecia retransmisja	0,2	14,60
Pakiety utracone	0,5	∞

Uzyskane wyniki przedstawiono w formie histogramu na rysunku 6.15. Na ich podstawie można zapisać rozkład opóźnienia całkowitego dla modułów XBee, dany wzorem:

$$g_B(\tau_B) = 0,973 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,016 \cdot g_A(\tau_B - 10,20) + 0,004 \cdot g_A(\tau_B - 12,40) + 0,002 \cdot g_A(\tau_B - 14,60) + 0,005 \cdot g_A(\tau_B - \tau_1) \quad (6.13)$$

przy czym spełniona jest zależność 6.8.

Opisane badania wykonuje się w celu symulacji pewnych rzeczywistych zagrożeń, jakie mogą wystąpić w pobliżu działania urządzeń. Należą do nich między innymi: kolejowe i tramwajowe sieci zasilające, sieci elektroenergetyczne, urządzenia termiczne i spawalnicze oraz piece indukcyjne. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że wpływ wymienionych czynników na opóźnienia i liczbę traconych danych w sieci ZigBee jest niewielki.

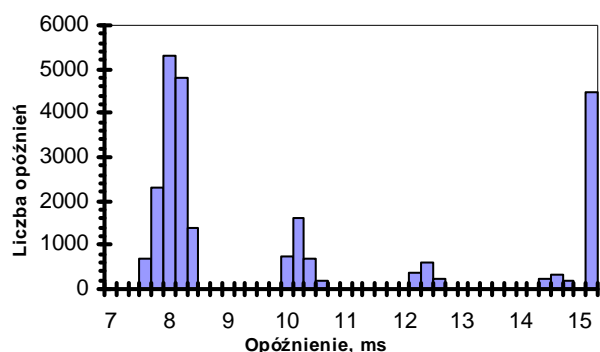
W celu porównania **wplywu pracy innych urządzeń działających w standardzie ZigBee** na opóźnienia transmisji w układzie pomiarowym zostały dodane dwa moduły bezprzewodowe ZigBee. Moduły dodatkowe komunikują się między sobą przesyłając paczkę danych co 100 ms.

Nadajnik i odbiornik XBee połączone są zgodnie z podstawowym układem pomiarowym. Oba moduły zostały rozsunięte na odległość 1 m. Dodatkowe moduły ZigBee zostały tak skonfigurowane tak, aby przysyłać dane jedynie pomiędzy sobą.

Można wyróżnić dwa przypadki, które należy poddać analizie:

1. Moduły dodatkowe mogą transmitować na tym samym kanale radiowym jak moduły pomiarowe.
2. Moduły dodatkowe transmitują na innym kanale, niż moduły pomiarowe.

Obydwa przypadki zostały omówione poniżej.



Rys. 6.16. Histogram wyników opóźnień transmisji w przypadku gdy układy są zakłócone inną transmisją ZigBee na tym samym kanale transmisyjnym

Tabela 6.8. Wyniki pomiarów opóźnienia

	Względna liczba odebranych pakietów, %	Opóźnienie, ms
Transmisja bezpośrednia	61,85	8,10
Pierwsza retransmisja	14,48	10,20
Druga retransmisja	5,47	12,40
Trzecia retransmisja	3,08	14,60
Pakiety utracone	20,17	∞

W przypadku, gdy moduły nie transmitują na tym samym kanale transmisyjnym nie są obserwowane żadne zakłócenia dodatkowe w serii wyników pomiarowych. Histogram wyników jest kopią szablonu z rysunku 6.6a, co oznacza, że inne układy ZigBee działające na innym kanale transmisyjnym nie mają wpływu na opóźnienie. W przypadku, gdy dwa inne moduły działające w standardzie ZigBee, transmitują dane pomiędzy sobą na tym samym kanale transmisyjnym, co moduły pomiarowe, to wprowadzają one zakłócenia do toru radiowego. Zakłócenia te powodują, że konieczne są retransmisje danych, ponieważ część wysyłanych pakietów nie dociera do odbiornika. Wpływ ten jest duży, ponieważ ilość zagubionych pakietów jest na poziomie 20%. Konieczne jest także porównywanie wysłanych danych z danymi otrzymanymi na wyjściu odbiornika, ponieważ mogą powstać błędy pomiaru spowodowane odebraniem danych z modułów dodatkowych. Histogram uzyskanych wyników dla tego przypadku przedstawiono na rysunku 6.16, natomiast wyniki zebrano w tabeli 6.8.

Rozkład opóźnienia całkowitego można opisać zależnością (6.14):

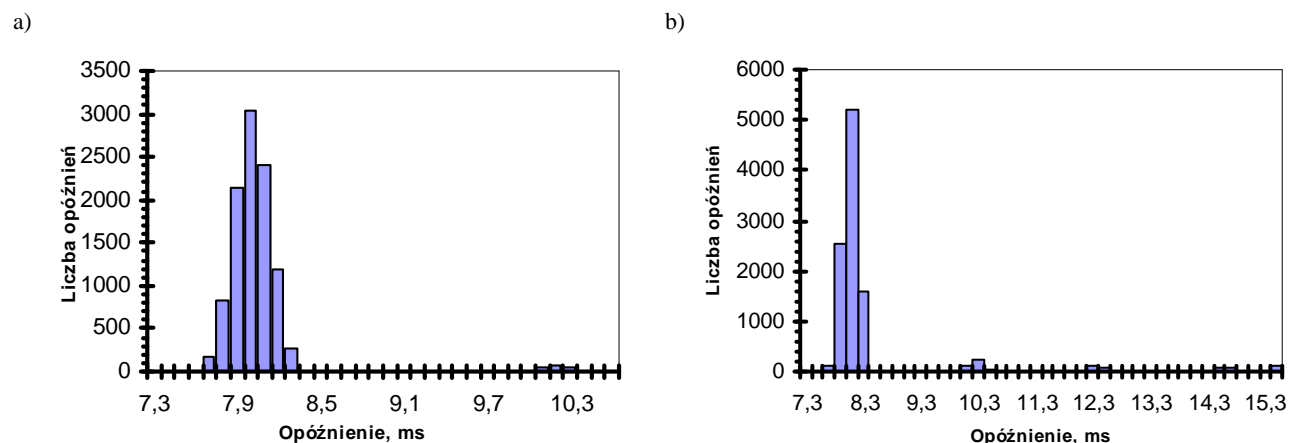
$$g_B(\tau_B) = 0,6185 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,1448 \cdot g_A(\tau_B - 10,20) + 0,0547 \cdot g_A(\tau_B - 12,40) + 0,0308 \cdot g_A(\tau_B - 14,60) + 0,2017 \cdot g_A(\tau_B - \tau_1). \quad (6.14)$$

Przeprowadzone pomiary potwierdziły, że wpływ transmisji dodatkowej pary układów ZigBee jest istotny gdy obie pary modułów bezprzewodowych transmitują dane korzystając z tego samego kanału radiowego, czego efektem są powstające opóźnienia komunikacyjne.

6.5 Wpływ wolnej przestrzeni na opóźnienia

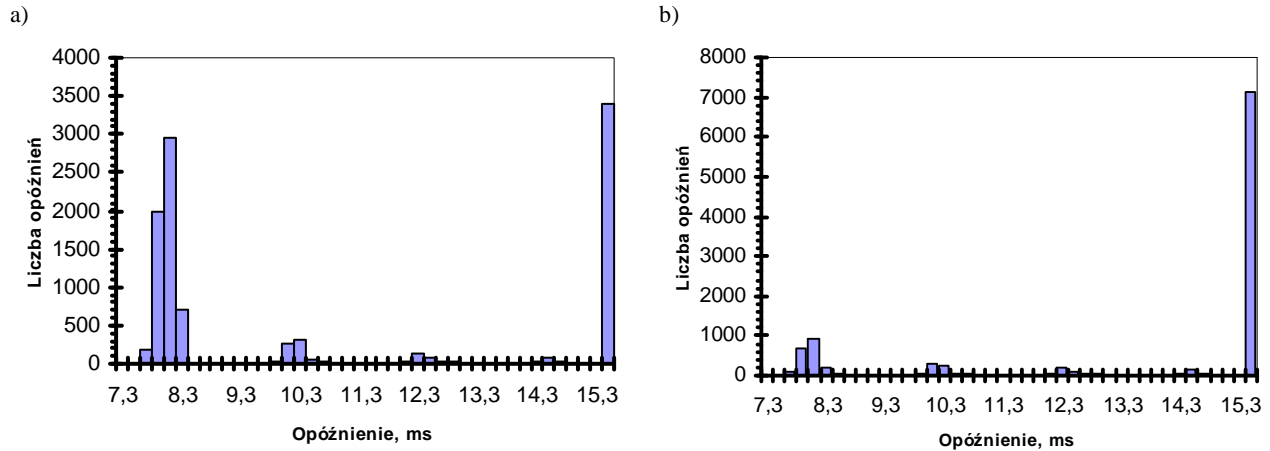
W trakcie realizacji badań postanowiono przeanalizować wpływ odległości między modułami na opóźnienia w transmisji danych. Badania przeprowadzono w wolnej przestrzeni na terenach rolniczych o powierzchni około 400 h pozbawionej zabudowań i lokalnych sieci bezprzewodowych.

W trakcie pomiarów zwiększano odległość (oznaczoną jako d) między modułami XBee. Dla każdej z odległości pomiędzy modułami zarejestrowano około 10 000 wyników pomiarowych. Przy odległości równej 20 m pojawia się pierwsza retransmisja danych. Jest to kilkanaście bajtów, stanowiących niewielki odsetek wszystkich przesłanych pakietów. Uzyskany histogram pokazano na rysunku 6.17a.



Rys. 6.17. Histogram opóźnienia transmisyjnego dla modułów XBee przy odległości $d = 20$ m a) i 40 m b).

Po zakończeniu pomiaru zwiększono odległość między modułami dwukrotnie do 40 metrów. Otrzymane wyniki przedstawiono na histogramie na rysunku 6.17b. W tym przypadku zachodzą już wszystkie trzy retransmisje, co oznacza, że sygnał radiowy jest stosunkowo silnie tłumiony. Na 10 000 wykonanych prób transmisji około 10% zakończyło się niepowodzeniem.



Rys. 6.18. Histogram opóźnienia transmisyjnego dla modułów XBee przy odległości $d = 80$ m a) i 100 m b).

W miarę zwiększania odległości tracona jest coraz większa liczba pakietów, które pomimo trzykrotnej retransmisji nie docierają do odbiornika w poprawnej postaci. W przypadku, gdy odległość między modułami zostaje zwiększona do 100 metrów prawie 70% pakietów nie trafia do odbiorcy, co pokazano przy użyciu histogramie z rysunku 6.18. W tabeli 6.15 zebrano względne wartości odebranych i utraconych pakietów w transmisji bezpośredniej i retransmisjach dla każdej z odległości.

Tabela 6.15. Wyniki uzyskane dla różnych odległości między modułami w wolnej przestrzeni

	Względna liczba odebranych pakietów, %				
	dla 20 m	dla 40 m	dla 60 m	dla 80 m	dla 100 m
Transmisja bezpośrednia	99,82	93,60	74,73	56,40	18,40
Pierwsza retransmisja	0,18	4,31	5,21	6,69	6,57
Druga retransmisja	0	0,62	1,68	2,47	4,12
Trzecia retransmisja	0	0,26	0,87	1,52	2,86
Pakiety utracone	0	1,19	17,51	32,83	68,05

Z uzyskanych danych wynika, że transmisja pomiędzy dwoma modułami, bez urządzeń powiększających zasięg (np. ruter) jest niemożliwa powyżej 130 m dla modułów XBee. Liczba pakietów wymagających retransmisji wzrasta wraz ze wzrostem odległości, co jednak nie gwarantuje powodzenia transmisji. Na podstawie uzyskanych wyników pomiaru opóźnienia w funkcji odległości między modułami można opisać rozkład opóźnienia całkowitego.

- Dla odległości 20 m:

$$g_B(\tau_B) = 0,9982 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,00018 \cdot g_A(\tau_B - 10,20). \quad (6.15)$$

- Dla odległości 40 m:

$$g_B(\tau_B) = 0,9360 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,0431 \cdot g_A(\tau_B - 10,20) + 0,0062 \cdot g_A(\tau_B - 12,40) + 0,0026 \cdot g_A(\tau_B - 14,60) + 0,0119 \cdot g_A(\tau_B - \tau_1). \quad (6.16)$$

- Dla odległości 60 m:

$$g_B(\tau_B) = 0,7473 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,0521 \cdot g_A(\tau_B - 10,20) + 0,0168 \cdot g_A(\tau_B - 12,40) + 0,0087 \cdot g_A(\tau_B - 14,60) + 0,1751 \cdot g_A(\tau_B - \tau_1). \quad (6.17)$$

- Dla odległości 80 m:

$$g_B(\tau_B) = 0,5640 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,0669 \cdot g_A(\tau_B - 10,20) + 0,0247 \cdot g_A(\tau_B - 12,40) + 0,0152 \cdot g_A(\tau_B - 14,60) + 0,3283 \cdot g_A(\tau_B - \tau_1). \quad (6.18)$$

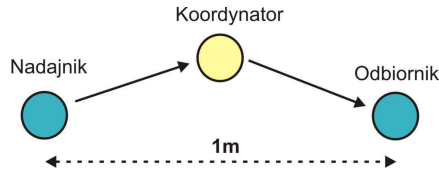
- Dla odległości 100 m:

$$g_B(\tau_B) = 0,1840 \cdot g_A(\tau_B - 8,10) + 0,0657 \cdot g_A(\tau_B - 10,20) + 0,0412 \cdot g_A(\tau_B - 12,40) + 0,0286 \cdot g_A(\tau_B - 14,60) + 0,6805 \cdot g_A(\tau_B - \tau_1). \quad (6.19)$$

6.6 Pomiar opóźnień w konfiguracji gwiazdowej

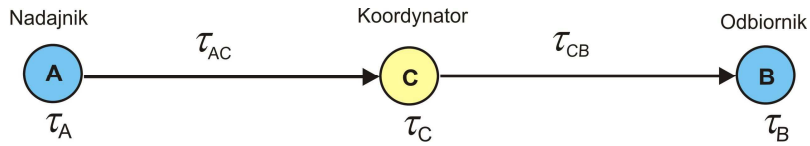
Dotychczas analizowano opóźnienia powstające w sieci bezprzewodowej w konfiguracji punkt-punkt. Jednak na ogół wykorzystuje się bardziej rozbudowane konfiguracje sieciowe (np. gwiazdista). W celu sprawdzenia, czy opracowany model jest przydatny dla takich systemów zbudowano układ pomiarowy, składający się z trzech elementów, połączonych w konfiguracji gwiazdy.

Jak już wspomniano wcześniej w sieci ZigBee występują trzy rodzaje węzłów: koordynator, router i węzeł prosty, co stwarza możliwości budowy bardziej elastycznych systemów pomiarowo-sterujących, dobrze dopasowanych do potrzeb funkcjonalnych węzłów sieci instalowanych w określonym miejscu. Układy wieloelementowe są opisane m.in. w [9] i [10]. Obecność trzeciego elementu w sieci może znacząco wpłynąć na opóźnienia dlatego skonstruowano układ pomiarowy składający się z trzech modułów XBee (rys. 6.19). Odbiornik i nadajnik umieszczono w odległości 1 metra od siebie w wolnej przestrzeni.



Rys. 6.19. Układ pomiarowy w konfiguracji gwiazdowej dla modułów XBee

Jeden z modułów został skonfigurowany do pracy, jako koordynator poprzez aktywację odpowiedniego oprogramowania dostarczonego przez producenta modułów. Nadajnik i odbiornik pełnią funkcję ruterów w sieci (jest to domyślne ustawienie funkcji modułu). Nadajnik dzięki odpowiedniej adresacji wysyła każdy pakiet przychodzący na wejście TxD modułu do koordynatora. Koordynator otrzymane dane przesyła bezpośrednio do odbiornika. Odbiornik wystawia otrzymane dane na wyjściu RxD. Układ pomiarowy mierzy czas pomiędzy rozpoczęciem transmisji danych (podanie danych na wejście TxD), a ich odbiorem (pojawienie się danych na wyjściu RxD). Mierzone jest sumaryczne opóźnienie wprowadzane przez nadajnik, koordynator i odbiornik, co pokazano na rysunku 6.20.



Rys. 6.20. Ilustracja powstawania opóźnienia w sieci przez trzy elementy toru pomiarowego

Biorąc pod uwagę opisane uwarunkowania, należy uwzględnić następujące opóźnienia w transmisji danych:

- τ_A – opóźnienie związane z czasem przetwarzania i uzyskania dostępu do nośnika przez węzeł A,
- τ_{AC} – czas przesłania komunikatu z węzła A do węzła C (koordynatora),
- τ_C – opóźnienie związane z przetwarzaniem danych w węźle C i z czasem uzyskania dostępu do nośnika przez ten węzeł w celu transmisji danych do węzła B,
- τ_{CB} – czas przesłania komunikatu z węzła C do węzła B.

W związku z powyższym można napisać, że wypadkowe opóźnienie jest równe τ_B jest sumie wszystkich opóźnień cząstkowych i wyraża się zależnością:

$$\tau_B = \tau_A + \tau_{AC} + \tau_C + \tau_{CB} \quad (6.20)$$

Funkcję gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia τ_A można opisać zależnością:

$$g_{\tau_A}(\tau_A) = \begin{cases} g_A(\tau_A) & \text{dla } \tau_{A1} \leq \tau_A \leq \tau_{A2}, \text{ gdzie } \tau_{A1} \geq 0 \\ 0 & \text{dla innych} \end{cases}, \quad (6.21)$$

przy czym $g_A(\tau_A)$ jest funkcją ciągłą i ograniczoną, która spełnia warunek normalizujący:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g_A(\tau_A) d\tau_A = \int_{\tau_{A1}}^{\tau_{A2}} g_A(\tau_A) d\tau_A = 1. \quad (6.22)$$

Natomiast funkcję gęstości prawdopodobieństwa opóźnienia wprowadzanego przez koordynator τ_C można zapisać jako:

$$g_{\tau_C}(\tau_C) = \begin{cases} g_C(\tau_C) & \text{dla } \tau_{C1} \leq \tau_C \leq \tau_{C2}, \text{ gdzie } \tau_{C1} \geq 0 \\ 0 & \text{dla innych} \end{cases}, \quad (6.23)$$

przy czym $g_c(\tau_c)$ jest funkcją ciągłą i ograniczoną, która spełnia warunek normalizujący:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g_c(\tau_c) d\tau_c = \int_{\tau_{c1}}^{\tau_{c2}} g_c(\tau_c) d\tau_c = 1. \quad (6.24)$$

Założmy, że funkcja gęstości prawdopodobieństwa $g_{AC}(\tau_{AC})$, opisująca rozkład opóźnień spowodowanych transmisją przez medium, jest dana szeregiem o następującej postaci:

$$g_{AC}(\tau_{AC}) = a_0 \delta(\tau_{AC} + \tau_A - \tau_{0k}) + a_1 \delta(\tau_{AC} + \tau_A - \tau_{1k}) + \dots + a_k \delta(\tau_{AC} + \tau_A - \tau_{kk}), \quad (6.25)$$

gdzie δ jest symbolem delty Dirac'a zdefiniowanej w rozdziale 5 i spełniającej zależność (5.6). W wzorze (6.24) $i = 0, 1, \dots, k$, jest numerem chwili, a liczba wyrazów szeregu (6.24) jest ograniczona i wynosi k . Współczynniki a_0, a_1, \dots, a_k ciągu mają stałe i nieujemne wartości.

W podobny sposób można przyjąć, że rozkład prawdopodobieństwa czasu transmisji τ_{CB} , jest dany funkcją $g_{CB}(\tau_{CB})$, opisującą opóźnienie spowodowane transmisją przez medium pomiędzy koordynatorem a węzłem B. Funkcję $g_{CB}(\tau_{CB})$ można zapisać w postaci szeregu:

$$g_{CB}(\tau_{CB}) = b_0 \delta(\tau_{CB} + \tau_C - \tau_{0n}) + b_1 \delta(\tau_{CB} + \tau_C - \tau_{1n}) + \dots + b_n \delta(\tau_{CB} + \tau_C - \tau_{nn}). \quad (6.26)$$

W wzorze (6.25) $i = 0, 1, \dots, n$, jest numerem chwili, a liczba wyrazów szeregu (6.26) jest ograniczona i wynosi n . Współczynniki b_0, b_1, \dots, b_n tego ciągu mają stałe i nieujemne wartości.

Należy zauważyć, że przesunięcie czasowe τ_{ik} oraz τ_{in} przy transmisji z węzła A do koordynatora i z koordynatora do węzła B jest takie same w obu przypadkach i zależy jedynie od producenta układów radiowych. Jest to czas związany z retransmisją i jak pokazano wcześniej jest stały dla danego powtórzenia. Przy czym nie zawsze liczby powtórzeń k i n będą sobie równe. Jest to spowodowane tym, że warunki środowiskowe dla każdej pojedynczej transmisji mogą być inne. Przykładowo transmisja danych z węzła A może zaburzać jakiś czynnik zewnętrzny i liczba powtórzeń wyniesie k (czyli maksymalną dostępną dla modułów liczbę retransmisji), natomiast transmisja z węzła C do B może nie być zaburzona w związku z czym nie będzie żadnych retransmisji.

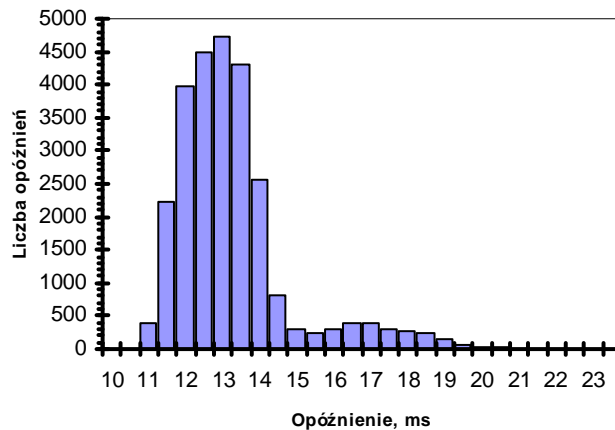
Na podstawie rozważań zamieszczonych w rozdziale piątym można napisać, że dla zależności (6.20) funkcja gęstości prawdopodobieństwa $g_B(\tau_B)$ opóźnienia transmisji z węzła A do węzła B wyraża się splotem funkcji gęstości prawdopodobieństwa, opisujących niezależne od siebie opóźnienia cząstkowe:

$$g_B(\tau_B) = g_A(\tau_A) \otimes g_{AC}(\tau_{AC}) \otimes g_C(\tau_C) \otimes g_{CB}(\tau_{CB}). \quad (6.27)$$

Właściwością splotu jest łączność dlatego każde z działań opisanych wzorem (6.26) można wykonać w dowolnej kolejności. Podstawiając (6.32), (6.34), (6.36), (6.37) do (6.38) i wykonując kolejno działania, w pracy doktorskiej wykazano, że opóźnienie całkowite jest dane wzorem:

$$g_B(\tau_B) = a_0 b_0 (g_A \oplus g_C)(\tau_B + \tau_C - \tau_{0k} - \tau_{0n}) + a_1 b_1 (g_A \oplus g_C)(\tau_B + \tau_C - \tau_{1k} - \tau_{1n}) + \dots + a_k b_n (g_A \oplus g_C)(\tau_B + \tau_C - \tau_{kk} - \tau_{nn}). \quad (6.28)$$

Po połączeniu układu pomiarowego w konfigurację gwiazdową zarejestrowano wyniki pomiaru opóźnienia. Na podstawie uzyskanych wyników utworzono histogram opóźnień przedstawiony na rysunku 6.21. W porównaniu do prostej transmisji między dwoma modułami nastąpiło zwiększenie opóźnienia do około 14 ms dla bezpośredniej transmisji.



Rys. 6.21. Histogram opóźnień dla układów XBee w konfiguracji gwiazdowej

Uzyskany histogram składa się z czterech kopii szablonu podstawowego – dla transmisji bezpośredniej i dla każdej z retransmisji. W otrzymanym układzie pomiarowym nie było strat pakietów. Szczegółowe wyniki zamieszczono w tabeli 6.16.

Tabela 6.16. Wyniki pomiaru opóźnień dla układu ruter– koordynator– ruter

	Opóźnienie, ms	Ilość pakietów odebranych w %
Transmisja bezpośrednia	13,75	82%
Pierwsza retransmisja	16,15	11%
Druga retransmisja	17,25	5%
Trzecia retransmisja	18,35	2%

Ponieważ splot dwóch funkcji o rozkładach normalnych jest również rozkładem normalnym [6], to na postawie uzyskanych wyników można napisać, że rozkład opóźnienia całkowitego dla opisywanego przypadku wyraża się wzorem:

$$g_B(\tau_B) = 0,82 \cdot (g_A \oplus g_C)(\tau_B + \tau_C - 13,75) + 0,11 \cdot (g_A \oplus g_C)(\tau_B + \tau_C - 16,15) + 0,05 \cdot (g_A \oplus g_C)(\tau_B + \tau_C - 17,25) + 0,02 \cdot (g_A \oplus g_C)(\tau_B + \tau_C - 18,35). \quad (6.28)$$

Przeprowadzone pomiary pokazują przydatność przedstawionego modelu do opisu opóźnień w sieciach bezprzewodowych w różnych konfiguracjach sieciowych. Pokazany model dla rozbudowanych sieci może okazać się trudny do obliczeń analitycznych, dlatego tak istotne jest wprowadzenie go do programów symulacyjnych.

Wszystkie przedstawione wyniki badań zostały potwierdzone w programie symulacyjnym OPNET Modeler [32], co zostało przedstawione w rozprawie i w publikacjach np. [17], [18].

7. PODSUMOWANIE

Niniejsza praca dotyczy sieci bezprzewodowych, które coraz powszechniej stosowane są we współczesnych systemach, w tym systemach pomiarowo-sterujących. Omówiono standardy ZigBee, WiFi oraz Bluetooth, które mają wiele cech wspólnych, takich jak pakietowa transmisja danych oraz powtórzenia danych utraconych w czasie komunikacji. Główne różnice pomiędzy nimi wynikają z używania innych przedziałów używanych częstotliwości, szybkości transmisji oraz budowy ramki danych. Na każdą transmisję bezprzewodową, niezależnie od używanego standardu, ma wpływ wiele czynników zewnętrznych takich jak elementy architektoniczne budynków i elementy wyposażenia wewnątrz na propagację fal radiowych co skutkuje pogorszeniem jakości transmisji bezprzewodowej i zagubieniem przesyłanych danych.

W rozprawie przedstawiono sposoby modelowania opóźnień komunikacyjnych biorąc pod uwagę modele matematyczne oraz symulacyjne. Opisano również prowadzone aktualnie badania parametrów sieci bezprzewodowych, a w szczególności badania opóźnień i czasu transmisji pakietu w sieci. Z danych literaturowych wynika, że często dokonuje się pomiaru liczby utraconych pakietów w sieci, jednak dość rzadko mierzone są opóźnienia w sieciach bezprzewodowych. Nie opracowano również wystarczająco dobrego modelu matematycznego, który pozwoliłby na opis tych opóźnień, a zarazem byłby na tyle prosty, aby można go wykorzystać w programach symulacyjnych. Z tych powodów w pracy zaproponowano nowy sposób opisu opóźnień, przedstawiony w rozdziale piątym. Polega on na probabilistycznym opisie czasu dostępu do nośnika oraz zastosowaniu czasowego ciągu funkcji delta do opisu czasu transmisji komunikatu między nadajnikiem i odbiornikiem.

Aby potwierdzić tezę, że taki model można wykorzystać do opisu opóźnień komunikacyjnych przeprowadzono szereg eksperymentów pomiarowych z użyciem modułów łączności bezprzewodowej bazujących na standardzie IEEE 802.15.4. Eksperymenty polegały na pomiarze opóźnień pomiędzy nadajnikiem, a odbiornikiem w różnych warunkach środowiskowych, a także przy uwzględnieniu wybranych zakłóceń elektromagnetycznych, które mogą się pojawić w otoczeniu badanych układów. Pomiary prowadzono dla modułów bezprzewodowych różnych producentów. Wyniki eksperymentów pomiarowych potwierdzają tezę, że jest możliwe zastosowanie scharakteryzowanego aparatu matematycznego do opisu zjawisk czasowych w bezprzewodowych sieciach w standardzie ZigBee.

Zbudowane modele opóźnień zostały zweryfikowane w sposób pomiarowy oraz porówna z wynikami badań symulacyjnych, przeprowadzonych przy użyciu programu OPNET Modeler. Rozprawa zawiera także opis procesu tworzenia modelu symulacyjnego.

Do najważniejszych osiągnięć pracy można zaliczyć:

- Analizę prowadzonych wspólnie badań związanych z sieciami bezprzewodowymi pod kątem pomiaru opóźnień oraz stosowanych modeli analitycznych i symulacyjnych.
- Opis aparatu matematycznego do probabilistycznego modelowania opóźnień dla wybranych konfiguracji sieci oraz opracowanie modelu opóźnień komunikacyjnych w sieciach bezprzewodowych.
- Zaprojektowanie i zbudowanie układów pomiarowych służących do wyznaczania opóźnień transmisji między urządzeniami ZigBee, pozwalających na pomiar w warunkach występowania zaburzeń.
- Weryfikację pomiarową zaproponowanego modelu w warunkach występowania zaburzeń pasywnych w postaci ścian pomiędzy modułami transmisyjnymi i aktywnych w postaci zakłóceń elektrostatycznych wysokonapięciowych oraz impulsowego pola magnetycznego.

Zaletą zaproponowanego modelu jest jego uniwersalność, ponieważ ze względu na podobieństwo zjawisk występujących w różnego rodzaju sieciach bezprzewodowych, przedstawionych w rozdziale drugim, uprawnione jest stwierdzenie, że będzie go można wykorzystać do opisu opóźnień w tych sieciach. W rozdziale czwartym scharakteryzowano także problem powstawania i opisu opóźnień w sieciach przewodowych. Podobieństwa realizacji transmisji w sieci przewodowych i bezprzewodowych pozwalają na wniosek, że opracowany aparat matematyczny będzie można także zastosować do modelowania opóźnień komunikacyjnych w sieciach przewodowych.

Uzyskane w pracy wyniki wskazują, że mogą być one użyteczne w szerszym zakresie, przykładowo przy projektowaniu sieci bezprzewodowych, planowaniu zasięgu urządzeń, wyznaczaniu czasu transmisji danych w złożonych konfiguracjach sieci, a także wyznaczaniu współczynników służących do oceny jakości sieci.

8. WYBRANE POZYCJE LITERATUROWE

- [1] – Al Raimi H.: *Badanie błędów związanych z opóźnieniami w transmisji danych w systemach pomiarowych*. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice, 2003.
- [2] – Bilski P., Łukaszewski R.: *Analiza opóźnień czasowych w komputerowych systemach pomiarowo – kontrolnych*. Monografia Metrologia dziś i jutro, 2009, s.439-448.
- [3] – Bromiley P.: *Products and Convolutions of Gaussian Distributions*. Tina Memo No. 2003-003.
- [4] – Charoy A.: *Zakłócenia w urządzeniach elektronicznych*. WNT, Warszawa, 1999.
- [5] – Czachórski T.: *Modele kolejkowe w ocenie efektywności sieci i systemów komputerowych*. Gliwice, 1999.
- [6] – Eady F.: *Hands-On ZigBee: Implementing 802.15.4 with Microcontrollers*. Elsevier Inc, 2007.
- [7] – Farahani S.: *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Elsevier Ltd, USA, 2008.
- [8] – Ferrari G., Medagliani P., Di Piazza S., Martalo M.: *Wireless Sensor Networks: Performance Analysis in Indoor Scenarios*. Hindawi Publishing Corporation, vol. 2007, art. ID 81864.
- [9] – Grygiel M., Żurkowski R.: *System eksperymentalny do pomiaru opóźnień transmisji w standardzie ZigBee 802.15.4*. Monografia Metrologia dziś i jutro 2009, 423-430.
- [10] – Grygiel M., Żurkowski R.: *Pomiar opóźnień transmisji danych w sieciach standardu ZigBee*. Materiały konferencyjne VIII Konferencji Naukowej SP'2010 w Łagowie, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, 2010.
- [11] – Gupta S.C., *Delta Function*. IEEE Transactions on Education, vol. 7, iss. 1. 1964.
- [12] – Jakubiec J.: *Błędy powodowane opóźnieniami w systemie pomiarowo-sterującym*. Pomiary Automatyka Robotyka 7-8/2004.
- [13] – Jakubiec J.: *Błędy i niepewności danych w systemie pomiarowo – sterującym*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [14] – Jakubiec J., Krupanek B., Grygiel M.: *Probabilistyczne modelowanie opóźnień komunikacyjnych w sieciach komputerowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Elektryka, z.216, Gliwice 2012.
- [15] – Jasiński Ł.: *Pomiar tłumienia ścian i innych elementów charakterystycznych dla środowiska wewnątrzbudynkowego w paśmie 2,4 GHz*. Wrocław 2011.
- [16] – Katulski R.: *Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej*. WKŁ, Warszawa 2009.
- [17] – Krupanek B., Topór-Kamiński T.: *Niezawodność przesyłu danych w rozproszonych systemach pomiarowych*. Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 55, nr 9, 2009, s.783-786.
- [18] – Topór-Kamiński T., Krupanek B.: *Projektowanie sieci komputerowych z uwzględnieniem zapotrzebowania na usługi internetowe z wykorzystaniem oprogramowania OPNET MODELER*. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Elektryka, Z. 214, s. 143-156.
- [19] – Kurytnik I., Karpiński M.: *Bezprzewodowa transmisja informacji*. Wydawnictwo PAK, Warszawa 2008.
- [20] – Markowski A.: *Model symulacyjny rozproszonego systemu pomiarowo – sterującego*. Praca doktorska, Zielona Góra, 2006.
- [21] – Michta E.: *Modele komunikacyjne sieciowego systemu pomiarowo sterującego*. Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra 2000.
- [22] – Olszyna J., *Technologie bezprzewodowe w przemyśle na przykładzie standardu ZigBee*. Pomiary Automatyka Robotyka 12/2008.
- [23] – Papoulis A.: *Prawdopodobieństwo, zmienne losowe i procesy stochastyczne*. WNT, Warszawa 1972.
- [24] – Tanenbaum A.S.: *Sieci komputerowe*. Helion, 2004.
- [25] – Tokarski J., Bogacz R., Krupanek B.: *Mikroprocesorowy system do pomiaru parametrów transmisji sieci bezprzewodowych zbudowanych w oparciu o moduły XBee*. Metrologia dziś i jutro, 2011, s. 321-336.
- [26] – Topór-Kamiński T., Żurkowski R., Grygiel M.: *Selected Methods of Measuring the Delay in Data Transmission Systems with Wireless Network Interfaces*. Acta Physica Polonica A, Optical and Acoustical Methods in Science and Technology, No. 4, Vol. 120, 2011.
- [27] – Winiecki W., Olszyna J.: *Bezprzewodowy rozproszony system pomiarowy z wykorzystaniem technologii ZigBee*. Pomiary Automatyka Kontrola 06/2008.

Strony internetowe i inne źródła:

- [28] – <http://standards.ieee.org/>;
- [29] – <http://www.zigbee.org/>;
- [30] – Dokumentacja modułów XBee-PRO, <http://www.digi.com/>;
- [31] – Dokumentacja modułów ATZB-A24-UFL firmy Atmel, <http://www.atmel.com/>;
- [32] – Dokumentacja programu OPNET Modeler w formie elektronicznej dołączana do programu.
- [33] – Dokumentacja symulatora wyładowań elektrostatycznych NSG 435, <http://www.astat.com.pl>
- [34] – Materiał dydaktyczny opracowany na podstawie normy PN-EN 61000-4-2, Kompatybilność Elektromagnetyczna (EMC), cz. 4: Metody badań i pomiarów. Arkusz 2: Badanie odporności na wyładowania elektrostatyczne.