

Zygmunt KUBIAK, Ewa ŁUKASIK,  
Magdalena SROCZAN, Andrzej URBANIAK, Bartosz ZGRZEBA

INSTYTUT INFORMATYKI  
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

# TECHNOLOGIA LoRa™ W KONTEKŚCIE SIECI BEZPRZEWODOWYCH ORAZ INTERNETU PRZEDMIOTÓW W SYSTEMACH POMIAROWYCH PRZEDSIĘBIORSTW WODOCIĄGOWYCH I KANALIZACYJNYCH

LoRa™ TECHNOLOGY IN THE CONTEXT OF WIRELESS  
NETWORKS AND THE INTERNET OF THINGS IN METERING  
SYSTEMS UTILIZED BY WATER AND SEWAGE ENTERPRISES

*The paper reviews wireless networks technologies applied or possible to be applied within the infrastructure of water and sewage enterprises. Several transmission and configuration parameters have been compared. The stress has been put on a new long range wireless technology – LoRa™ that is increasingly used for data transmission in multi-point metering systems as well as in other smart city applications under the IoT paradigm.*

## 1. Wprowadzenie

Prawidłowe zarządzanie procesem technologicznym wymaga systemu pomiarowo-stwierdzającego. Oczywiście dotyczy to też produkcji, dystrybucji i odbioru wody, a także gospodarki ściekowej. Połączenie między elementami systemu, przez które przepływa informacja nazywane jest interfejsem. Pojęcie interfejsu nie ogranicza się wyłącznie do fizycznej realizacji połączenia, ale obejmuje również zasady wymiany informacji, opisane w dokumentacji standardu komunikacyjnego (protokole). Wymiana danych między elementami systemu odbywa się przez kanał transmisyjny, rozumiany jako warstwa sprzętowa interfejsu [4]. Jego specyficzne właściwości zależą od fizycznej formy tego medium (np. przewód, światłowód, fale radiowe). W związku z intensywnym rozwojem technologicznym w mikroelektronice (niska cena, nowe właściwości, duża oferta na rynku) a w szczególności w dziedzinie mikrokontrolerów, sensorów i nadawczo-odbiorczych układów radiowych (ang. *transceivers*) małej mocy, od mniej więcej 2000 roku rośnie gwałtownie zainteresowanie transmisją radiową. Mikrokontrolery aktualnie stanowią wyposażenie nawet bardzo prostych urządzeń jak np. przełączniki stosowane w budynkach inteligentnych.

Sieci bezprzewodowe coraz częściej są stosowane w systemach przemysłowych. Dzieje się tak za sprawą nowych rozwiązań w dziedzinie łączności radiowej. Współczesne technologie pozwalają na zdecydowane obniżenie kosztów węzła nadawczo-odbiorczego. Aktualnie dostępnych jest wiele rozwiązań przeznaczonych do transmisji dźwięku, wideo, realizacji sieci PC, telefonii mobilnej (jak WiFi, Bluetooth, GPRS), jednak do niedawna nie było standardów sieci bezprzewodowych dedykowanych układowi i urządzeniom najniższego poziomu sterowania (na styku systemu sterującego z obiektem sterowanym), tzn. sensorom i układom wykonawczym. W tej dziedzinie dominowały sieci przewodowe, tzw. sieci miejscowe (ang. Fieldbus, np. Modbus, CAN). Sieci bezprzewodowe małej mocy nadawczej, o bardzo niskim poborze energii, których węzły bezpośrednio współpracują z czujnikami różnych mierzalnych parametrów, noszą nazwę Bezprzewodowych Sieci Sensorowych (BSS, ang. Wireless Sensor Networks, WSN). Węzły końcowe takich sieci nazywane są często sensorami. Sieci klasy WSN w wielu przypadkach są rozwiązaniem tańszym, prostszym w instalacji i serwisowaniu od stałego okablowania wejść/wyjść w systemach sterowania. Oczywiście zasięg stosowalności rozwiązań WSN nie ogranicza się tylko do technologii przemysłowych ale dotyczy właściwie wszystkich obszarów działalności człowieka, w tym zastosowań medycznych, wojskowych, rolnictwa, ochrony środowiska, inteligentnych budynków, gospodarstw domowych itp.

Węzły sieci sensorowych najczęściej nie mają dostępu do stałych źródeł zasilania i stąd zagadnienie poboru energii w sieciach WSN ma bardzo istotne znaczenie. Dla przykładu przy automatycznym pozyskiwaniu pomiarów z wodomierzy, ciepłomierzy (lub podzielników ciepła), gazomierzy, wymaga się aby węzły radiowe wbudowane w te urządzenia mogły pracować kilka a nawet kilkanaście lat bez wymiany baterii, co jest związane z okresem legalizacji wspomnianych urządzeń. Wymaganie to częściowo jest realizowane na etapie konstrukcji węzłów poprzez dobór elementów o niskim zapotrzebowaniu na energię oraz właściwy projekt (np. dobór mikrokontrolera o właściwej mocy obliczeniowej, dedykowanego zastosowaniom niskoenergetycznym, sensora z funkcją dezaktywacji, gdy pomiar nie jest wykonywany itp.). Wyżej wymienione zabiegi na poziomie sprzętowym, związane z budową i organizacją węzła są jednak niewystarczające dla osiągnięcia długiego okresu pracy na jednym komplecie baterii. Dalszą energooszczędność można uzyskać przez zastosowanie protokołów wykorzystujących cykliczną aktywność węzłów [4,11]. Przez większość czasu cyklu, węzeł pozostaje w stanie uśpienia (minimalny pobór). Wybudzany jest na czas wykonywania pomiarów, wstępnego przetwarzania wyników i czas transmisji.

W trybie aktywności z reguły za największą część prądu pobieranego przez węzeł odpowiada transmisja radiowa (nadawanie i odbiór) i dlatego powinna być realizowana na tyle rzadko, na ile pozwala dany proces i protokół transmisji. Na zasięg transmisji wpływ ma wiele czynników, z których najważniejsze to moc wyjściowa nadajnika (ang. *output power*), czułość odbiornika (ang. *receiver sensitivity*), modulacja (ang. *modulation*), pasmo ISM (ang. *ISM band*), szybkość transmisji danych (ang. *data rates*) i inne. Duży zasięg i mała moc doprowadzana do anteny są sprzecznymi wymaganiami i dlatego potrzebny jest pewien kompromis. Dla radiowych układów nadawczo-odbiorczych stosowanych w sieciach WSN maksymalna moc wyjściowa nadajników zazwyczaj przyjmuje wartości od +0 dBm (1 mW) do +10 dBm (10 mW), gdzie dBm jest logarytmiczną jednostką miary mocy odniesioną do mocy 1 mW. Z kolei czułość odbiorników zawiera się w przedziale od -95 dBm do -105 dBm.

Czułość jest określona jako minimalna wartość mocy sygnału na wejściu odbiornika przy założonym współczynniku błędu w bitach BER (ang. *Bit Error Rate*). Przy stosowanych bardzo często w modułach radiowych, antenach drukowanych bezpośredni zasięg między węzłami wynosi od kilkunastu metrów (w pomieszczeniach zamkniętych) do kilkuset metrów (w terenie otwartym). W sieciach WSN zasięg jest zwiększany przez zastosowanie węzłów retransmisyjnych (w prostych sieciach) lub węzłów pełniących rolę ruterów (w złożonych sieciach typu siatki (ang. *mesh*)).

Inne podejście dla uzyskania dużego, bezpośredniego zasięgu radiowego zastosowano w przypadku sieci LoRa™ (ang. *Long Range*), dedykowanej zastosowaniom w systemach Internetu Przedmiotów (ang. *Internet of Things, IoT*). Zagadnienie to zostało bliżej wyjaśnione w rozdziale 3. Ponadto przedstawiono wybrane rozwiązania sieci sensorowych.

## 2. Protokoły wybranych bezprzewodowych sieci sensorowych

Do najważniejszych, dobrze zdefiniowanych protokołów należą IEEE 802.15.4 [7] oraz ZigBee. Znaczenia nabiera opracowanie 6LoWPAN, stanowiące międzynarodowy otwarty standard, łączący protokół IEEE 802.15.4 z rozwiązaniami internetowymi. Specjalnie dla liczników mediów (w szczególności związanych z wodą), dla potrzeb zdalnych odczytów, powstał standard Wireless M-BUS. Interesującym rozwiązaniem jest prosty protokół EnOcean. Jego twórcy główny nacisk położyli na bezbaterijne rozwiązania węzłów sieci. W tym przypadku do wygenerowania energii elektrycznej, niezbędnej do bezprzewodowej transmisji pakietów danych wykorzystywane są różne zjawiska fizyczne. Popularne rozwiązania sieciowe jak WiFi oraz Bluetooth (Classic) nie spełniają założeń sieci WSN, ze względu na sposób pracy i organizację tych sieci, duży pobór prądu, duże wymagania sprzętowe i programowe, bardzo ukierunkowane zastosowania. Wśród niskoenergetycznych rozwiązań sieciowych warto też zauważyć protokół ANT+ oraz zmodyfikowaną wersję Bluetooth – Bluetooth Low Energy (BLE). ANT+ jest rozwiązaniem znacznie prostszym od BLE a z punktu widzenia sieci WSN, bardziej uniwersalnym, umożliwiającym tworzenie dużych sieci (do  $2^{32}$  węzłów) o krótkim bezpośrednim zasięgu (1m–30m). Aktualnie główne obszary zastosowań ANT i BLE obejmują sport, odnowę biologiczną i monitorowanie osób (pacjentów, osób starszych, dzieci).

### 2.1 IEEE 802.15.4 / ZigBee

Szczególne znaczenie dla rozwoju sieci WSN miała standaryzacja w grupie tzw. sieci WPAN (ang. *Wireless Personal Area Networks*) a dokładniej opracowanie protokołu IEEE 802.15.4 dla sieci WPAN *Low Rate* [7]. Standaryzacja nadała właściwy kierunek rozwojowi technologicznemu w dziedzinie radiowych sieci małej mocy. Prace normalizacyjne rozpoczęła grupa ZigBee Alliance w roku 1998. ZigBee Alliance jest stowarzyszeniem firm działających dla opracowania i rozwijania otwartego standardu dotyczącego transmisji bezprzewodowej małej prędkości i niskiej mocy, efektywnej pod względem kosztów. Zatwierdzony w 2003 roku standard IEEE 802.15.4 (obecnie obowiązuje wersja z 2006 r.), opisuje warstwę fizyczną (ang. *Physical Layer, PHY*) oraz warstwę dostępu do medium (ang. *Medium Access Control Layer, MAC*) [21].

Standard ten definiuje prosty lecz silny protokół pakietowy o następujących właściwościach:

- wysoka niezawodność poprzez potwierdzanie odbioru,
- mechanizmy zapewniające integralność oraz poufność transmisji,
- transmisja z rozpraszaniem widma metodą sekwencji bezpośredniej,
- łączność oparta na priorytetach,
- możliwość zmiany częstotliwości dla uniknięcia interferencji.

W protokole IEEE 802.15.4 zdefiniowano dwa typy węzłów: węzeł o zmniejszonej funkcjonalności RFD (ang. *Reduced Functionality Device*) oraz węzeł o pełnej funkcjonalności FFD (ang. *Full Functionality Device*). Węzeł końcowy zawierający układy wejściawyjścia (np. sensory) może być typu FFD ale bardzo często wystarcza ograniczona struktura sprzętowa i programowa RFD – tańsze rozwiązanie z mniejszym zapotrzebowaniem na energię. Węzeł, który zarządza pracą sieci (koordynator) musi być typu FFD. W 802.15.4 dostępne są dwie konfiguracje sieci: *star* i *peer-to-peer*. RFD może realizować połączenia tylko z koordynatorem. Dla FFD nie ma ograniczeń, może występować w topologii, gdzie realizowana jest komunikacja również dowolnymi węzłami.

W 2005 roku dostępna była pierwsza wersja standardu ZigBee (rozszerzenia 2006 i 2007 r.), opartego na IEEE 802.15.4. ZigBee rozszerza możliwości protokołu IEEE 802.15.4 w zakresie realizacji różnych struktur sieciowych, bezpieczeństwa transmisji oraz organizuje interfejs z warstwą aplikacyjną. W ZigBee występują trzy podstawowe konfiguracje:

- topologia gwiazdy (ang. *Star Topology*) jest to najprostsza konfiguracja sieci ZigBee, wszystkie węzły końcowe muszą znajdować się w zasięgu koordynatora; koordynator może pełnić rolę rutera ;
- topologia drzewa (ang. *Tree Topology*) umożliwia korzystanie z rutera, ale nie pozwala na zmianę ścieżki transmisji danych;
- topologia siatki (ang. *Mesh Topology*) zapewnia pełne możliwości komunikacyjne; koordynator i rutery mogą wymieniać dane między sobą; możliwe są alternatywne ścieżki wymiany danych.

W warstwie fizycznej standardu IEEE zdefiniowano trzy pasma częstotliwości: 2,4GHz, 915MHz (USA) i 868MHz. W Europie dostępne są dwa pasma – 868 MHz (tylko jeden kanał) i 2,4GHz (16 kanałów). Dla celów przemysłowych, zdecydowanie lepszym pasmem jest 2,4GHz – duża liczba kanałów, większa szybkość transmisji oraz skuteczniejsza modulacja.

Stosowana jest złożona modulacja fazowa O-QPSK z rozpraszaniem widma metodą sekwencji bezpośredniej DSSS (ang. *Direct Sequence Spread Spectrum*). W przypadku modulacji O-QPSK (ang. *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*) cztery kolejne bity informacyjne, tworzące tzw. symbol zastępowane są odpowiednio dobraną (1 z 16) sekwencją 32 bitów (ang. *chips*). Daje to możliwość pracy przy słabym współczynniku S/N (ang. *signal to noise ratio*, stosunek sygnału do szumu), wynikającym albo z powodu zakłóceń albo niskiej mocy nadajnika.

Ramka transmisyjna na poziomie warstwy fizycznej sieci IEEE 802.15.4/ZigBee zawiera trzy zasadnicze pola: nagłówek synchronizacyjny (odpowiada za właściwą synchronizację bitową i słowową całej ramki), nagłówek ramki warstwy fizycznej (określa długość ramki) oraz ładunek tworzony w wyższych warstwach protokołu.

Protokół ZigBee umożliwia tworzenie rozległych, złożonych struktur sieciowych uwzględniających problematykę wyszukiwania trasy transmisji pakietów (rutingu). Trzeba jednak zaznaczyć, że ZigBee stanowi rozwiązanie wymagające większych zasobów w porównaniu z IEEE 802.15.4, jest więc bardziej kosztowne, a ponadto ma wyższe wymagania energetyczne z powodu konieczności obsługi dodatkowych warstw protokołu.

Organizacja ZigBee Alliance dąży do uproszczenia projektowania sieci [28]. Od początku prowadziła swoje prace nad protokołami w kierunku konkretnych dziedzin zastosowań (profilu). W rezultacie powstały trzy grupy specyfikacji: ZigBee RF4CE, ZigBee PRO, ZigBee IP. Sieć ZigBee RF4CE przeznaczona jest dla elektroniki użytkowej (ZigBee Remote Control i ZigBee Input Device). Wykorzystuje ona pasma częstotliwości ISM (ang. *Industrial, Scientific, Medical*) 2,4 GHz, jednak aby zminimalizować zakłócenia z sieci WiFi stosowane są tylko kanały 15, 20 i 25 spośród zdefiniowanych w protokole IEEE 802.15.4. Główne zastosowania ZigBee RF4CE to sterowanie audiowizualnym oraz zdalne sterowanie urządzeniami domowymi jak oświetlenie, żaluzje itp.

Dla sieci bardziej wymagających opracowano specyfikację ZigBee Pro obejmującą profile: ZigBee Building Alliance, ZigBee Health Care, ZigBee Home Automation, ZigBee Telecom Services oraz ZigBee Smart Energy 1.x. Dokumentacje profili stopniowo są uzupełniane.

Najnowsze specyfikacje protokołu ZigBee – ZigBee 2012 oraz ostatnia specyfikacja z roku 2015 – ZigBee 3.0, stanowiąc mają wsparcie dla projektantów sieci dla różnych dziedzin zastosowań, jak budynki inteligentne (ZigBee Building Automation), zarządzanie energią, bezpieczeństwem i automatyzacja domów (ZigBee Home Automation), ochrona zdrowia, odnowa biologiczna (ZigBee Health Care), sterowanie oświetleniem (ZigBee Light Link), inteligentne pomiary [8,9,13] (ZigBee Smart Energy), usługi mobilne (ZigBee Telecom Service). W ramach opcji Green Power zapewniono możliwość włączenia do sieci węzłów zasilanych energią pozyskiwaną z otoczenia (ang. *energy harvesting*) lub z własnym zasilaniem (ang. *self powered*). ZigBee 3.0 uwzględnia zastosowania Internetu Przedmiotów (ang. *Internet of Things*) jak również integruje normy specyfikacji ZigBee 2012. Dodatkowo zdefiniowano ponad 130 urządzeń, w tym dla automatyki domowej, oświetlenia, zarządzania energią, bezpieczeństwa, ochrony zdrowia itp.

## 2.2 Wireless M-BUS

Prace nad przeniesieniem koncepcji M-BUS do rozwiązań bezprzewodowych rozpoczęto w roku 1998 [1,24]. Dla potrzeb transmisji danych pomiarowych proponowane jest pasmo ISM 868,0-868,6 MHz (<25 mW) ponieważ jest stosunkowo mało obciążone a układy transmisyjne są tanie. Dla celów ręcznej i automatycznej sygnalizacji wykorzystującej krótkie telegramy rzadko przesyłane, preferuje się pasmo 868,7-869,2 MHz (<25 mW). Dla zadań komunikacji bezprzewodowej w obrębie lub między budynkami wymagających sporadycznej transmisji większej ilości danych zaleca się pasmo 869,4-869,65 MHz (<500 mW). Kolejne założenia są następujące: licznik nie powinien zajmować dłużej niż łącznie 0,5 s w ciągu każdego dnia ze względu na dopuszczalne obciążenie pasma. Proponowana jest prędkość transmisji sygnału wynosi 19200 Bd. Integralność telegramów zapewnia słowo kontrolne CRC16. Telegramy powinny być oparte na zaleceniach IEC870-5-1 oraz EN1334-3. Transmisja radiowa danych pomiarowych wymaga poufności stąd potrzeba ich szyfrowania.

Pierwsza wersja specyfikacji Wireless M-BUS została opublikowana w 2003 roku [18]. Kolejne pojawiły się w następnych latach. Standard określa komunikację między licznikami wody, gazu, ciepła oraz energii elektrycznej a koncentratorami. Wireless M-BUS może być stosowany w kilku trybach (S, T i R) związanych z transmisją jednokierunkową (S1, S1-m, T1) lub dwukierunkową (S2, T2, R2) w systemach stacjonarnych i mobilnych (S1-m).

Na poziomie warstwy fizycznej telegramy modulowane są kodem Manchester lub kodem „3 z 6”. Podstawową topologią sieci Wireless M-BUS jest gwiazda. Taka konfiguracja złożona jest z węzłów-liczników oraz koncentratora, tzn. węzła który zbiera pomiary. Podstawową zasadą obowiązującą w sieci jest autonomiczna praca liczników. W trybach jednokierunkowych liczniki są wyłącznie nadajnikami a koncentrator jest tylko odbiornikiem. W trybach dwukierunkowych nadajniki okresowo generują żądanie dostępu a koncentrator może rozpocząć transmisję z danym licznikiem wysyłając do niego potwierdzenie (ACK). Wspólne podstawy sieci M-BUS i Wireless M-BUS oznaczają łatwość konwersji protokołów obu sieci [1,24].

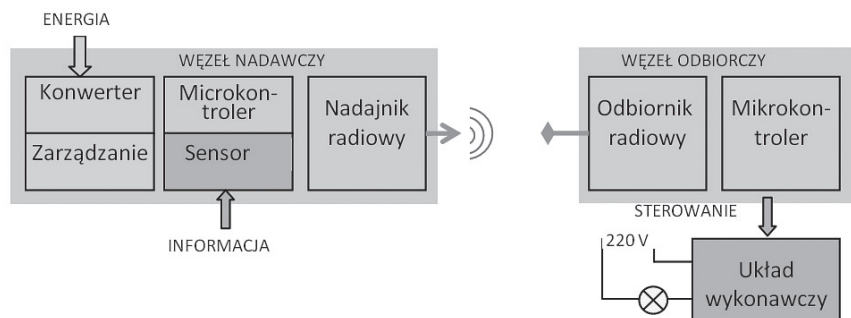
Transmisja w sieci Wireless M-BUS jest realizowana przy pomocy telegramów, które mogą być złożone z kilku bloków. W najprostszym przypadku jest to pojedyncza ramka (pierwszy blok). Jeżeli zachodzi potrzeba przesłania danych (liczba danych  $\leq 255$ ) wtedy pełen telegram składa się z ciągu wielu ramek – dane dzielone są na bloki o długości 15 bajtów. Ostatni blok może zawierać maksymalnie 16 bajtów danych. Każda z ramek w zależności od trybu transmisji jest poprzedzona (w warstwie fizycznej) odpowiedniej długości preambułą i słowem synchronizacyjnym. W Wireless M-BUS ramka jest tworzona z ciągu bitów i dlatego stosuje się silniejsze zabezpieczenie integralności (tylko całej ramki) w postaci słowa kontrolnego CRC16. W specyfikacji EN 13757-3 [17], dotyczącej warstwy aplikacyjnej przedstawiono również propozycję zapewnienia poufności transmisji. W standardzie przyjęto metodę szyfrowania DES (ang. *Data Encryption Standard*) w trybie kodowania CBC (ang. *Cipher Block Chaining*). Obecnie algorytm szyfrowania DES uznawany jest za niebezpieczny.

Ograniczona normą moc nadawania sygnałów radiowych limituje maksymalną odległość między węzłem licznika a węzłem zbierającym dane, przy której można zrealizować poprawną transmisję. Zasięg zależy od bardzo wielu czynników. Jednym z nich jest miejsce rozmieszczenia węzłów. Największy zasięg można uzyskać w terenie otwartym. W budynkach występuje znaczące tłumienie sygnałów radiowych zależne od technologii wykonania zabudowy. Z wyżej zasygnalizowanych powodów często zachodzi potrzeba retransmisji telegramów. Dla sieci Wireless M-BUS taką możliwość uwzględniono w specyfikacji EN 13757-5 [19]. Proponowane są dwie metody. Pierwsza polega na rozgłaszaniu pakietów za pośrednictwem węzłów retransmisyjnych. Węzeł retransmisyjny, który odbierze pakiet z licznika przesyła go dalej. Kolejne węzły, które znajdują się w zasięgu poprzednika kontynuują retransmisję. Na jakimś etapie rozsyłania pakiet trafia do węzła przeznaczenia. W drugiej metodzie przyjęto rozszerzenie formatu każdej ramki o pole trasy pakietu. Ustalenie trasy wymaga realizacji specjalnej procedury.

## 2.3 Wireless M-BUS

EnOcean GmbH jest niewielką niemiecką firmą powstałą w 2001 roku. Jest ona producentem i dostawcą modułów do transmisji bezprzewodowej dla takich firm jak Siemens, Osram, Wieland Electric, Wago itd., przeznaczonych do automatyzacji budynków (np. klimatyzacja, oświetlenie) a także w przemyśle motoryzacyjnym. Główne założenie tych produktów (podstawowa cecha sieci EnOcean) to bezbateryjne zasilanie węzłów nadawczych (tzw. samozasilające bezprzewodowe sensory). Oznacza to pozyskiwanie energii z otoczenia (ang. *energy harvesting*). Do zasilania wykorzystuje się różne rozwiązania jak mikrogeneratory elektromagnetyczne, piezoelektryczne, baterie słoneczne czy termoogniwa.

Sieć EnOcean [25] może zawierać trzy podstawowe typy węzłów, tzn. bezbateryjne radiosensory (nadajniki), układy wykonawcze (odbiorniki) oraz węzły nadawczo-odbiorcze, które mogą pełnić rolę m.in. urządzeń końcowych, retransmisyjnych jak i bram do innych sieci (np. LON, EIB, Modbus, ZigBee). Podstawowym pasmem częstotliwości jest 868 MHz. Prędkość transmisji wynosi 125 kbit/s. Przyjęta ramka transmisyjna ma stałą długość 14 bajtów, co oznacza, że czas jej transmisji wynosi około 0,9 ms. Ramka ma bardzo prostą budowę. Rozpoczyna się od części startowej, zawierającej 2 bajty synchronizacyjne, bajt nagłówek rozróżniający typ ramki (np. ramkę danych od ramki uczącej) oraz bajt określający organizację ramki w zależności od typu węzła nadawczego. Kolejne cztery bajty przeznaczone są na pole danych, a następne cztery tworzą unikatowy 32 bitowy numer nadajnika (sensora), ustalany przez producenta. Kolejny bajt określa stan sensora oraz zawiera licznik powtórzeń wiadomości. Ramkę zamyka suma kontrolna uzyskana jako młodszy bajt z sumy wszystkich bajtów ramki z pominięciem pola synchronizacji.



Rys. 1. Technologia EnOcean

Fig. 1. EnOcean technology

Na rys.1. zilustrowano koncepcję sterowania bezprzewodowego w systemie EnOcean. Jednym z podstawowych założeń tej sieci są bezbateryjne sensory.

Wszystkie węzły sensorowe (nadajniki) mogą rozpocząć transmisję w dowolnym momencie, a ponieważ nie są one wyposażone w część odbiorczą, nie mogą więc monitorować stanu medium transmisyjnego. Taka sytuacja oznacza znaczące prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji, szczególnie w przypadku dużej sieci. W związku z tym przyjęto zasadę trzykrotnego powtarzania tej samej ramki w różnych odstępach czasowych. Dodatkowo dla różnych typów węzłów stosuje się różne scenariusze powtarzania ramek, np. dla sensorów zasilanych z baterii słonecznej odstęp między ramkami uzależniono między innymi od temperatury węzła. Takie rozwiązania spowodowały radykalne zmniejszenie możliwości wystąpienia błędów transmisji.

### 3. Technologia LoRa™

LoRa™ (ang. *Long Range*) jest protokołem sieci bezprzewodowej obejmującym głównie warstwę fizyczną z uwzględnieniem specyficznej metody modulacji zapewniającej transmisję radiową na duże odległości – od kilku kilometrów w terenie zabudowanym, do kilkunastu w terenie niezabudowanym przy małym poborze prądu [23,27]. LoRaWAN™ (ang. *Long Range Wide Area Network*) jest koncepcją rozległej komunikacji z wykorzystaniem Internetu oraz technologii LoRa™ dla potrzeb Internetu Przedmiotów [2].

#### 3.1 Architektura sieci LoRaWAN™

W sieciach omówionych w rozdziale 2. zwiększenie zasięgu jest uzyskiwane poprzez retransmisję ramek informacyjnych (sieci "wieloskokowe" – ang. *multihop*). W LoRa™ węzły końcowe mają bezpośredni dostęp do węzła bramki (ang. *Gateway*), sieć tworzy konfigurację gwiazdy (sieć "jednoskokowa" – ang. *onehop*). Duży zasięg uzyskano zwiększając moc wyjściową nadajników do +20 dBm (100 mW) oraz stosując specjalną, opatentowaną metodę modulacji [5], opartą na technologii rozpraszania widma CSS (ang. *Chirp Spread Spectrum*, omówioną szerzej w rozdziale 3.2) co umożliwiło dla aktualnie produkowanych układów, uzyskanie bardzo dużej czułości do - 148 dBm ( $0,01\mu\text{V}/50\Omega$ ). CSS opracowano w latach 40-tych dla potrzeb radarów a obecnie zaadaptowano przez IEEE dla osobistych sieci małej prędkości (ang. *LR-WPANs – Low-Rate Wireless Personal Area Networks*).

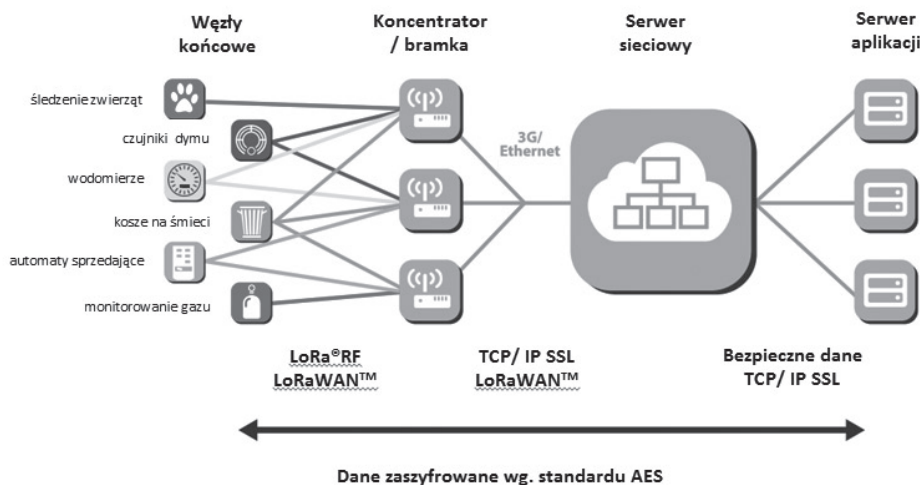
W Europie wykorzystywane jest pasmo ISM 868 MHz. LoRa™ definiuje dziesięć kanałów, z których osiem pracuje z prędkością od 250 b/s do 5,5 kb/s, jeden dla dużej prędkości 11 kb/s oraz jeden kanał z modulacją FSK i prędkością 50 kb/s. Maksymalna moc wyjściowa dozwolona w Europie przez ETSI wynosi +14 dBm, z wyjątkiem pasma G3, gdzie może wynosić do +27 dBm. Obowiązują również ograniczenia cyklu pracy.

Na rys.2. przedstawiono architekturę sieci LoRaWAN™. Węzły nie są związane z określoną bramą [2]. Zwykle dane z danego węzła końcowego odbierane są przez kilka bram. Każda brama przekazuje odebrany pakiet do serwera zarządzającego sieci, który filtruje pakiety usuwając nadmiarowe, przeprowadza kontrole bezpieczeństwa, realizuje potwierdzenia przez optymalne bramy, ustala prędkość transmisji itp. Węzły sieci są asynchroniczne i mogą transmitować dane gdy one będą gotowe do wysłania, gdy wystąpiło kontrolowane przez węzeł zdarzenie lub według przyjętego harmonogramu. Taka zasada pracy węzłów końcowych w sieci 2 jest oszczędna dla baterii. Węzły nie muszą się synchronizować co pochłania w innych sieciach sporo energii. Brama musi mieć zdolność odbierania dużej liczby pakietów od węzłów końcowych. Cel ten osiąga się przez dobór prędkości transmisji oraz przez wykorzystanie dostępnych kanałów.



Dodatkowo, w celu zwiększenia żywotności baterii wprowadzono trzy klasy węzłów.

- Klasa A dotyczy bateryjnie zasilanych węzłów z sensorami. Umożliwia największe oszczędności energii, ale należy liczyć się z możliwością wystąpienia większych opóźnień komunikacyjnych.
- Klasa B zalecana jest dla bateryjnie zasilanych węzłów z układami wykonawczymi. Realizowana jest synchronizowana komunikacja w przydzielonych szczelinach czasowych co oznacza większe zużycie energii niż w klasie A, ale zapewnia kontrolowane opóźnienia transmisji.
- Klasa C obejmuje węzły z układami wykonawczymi, ze stałym zasilaniem, a dzięki możliwości ciągłego nasłuchu (poza krótkimi okresami nadawania) zapewnia naj-  
mniejsze opóźnienia transmisji.



Rys. 2. Architektura sieci LoRaWAN™ [2]

Fig. 2. Architecture of LoRaWan™ network [2]

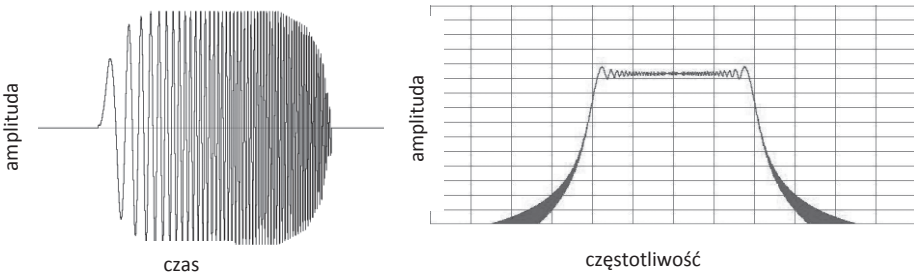
Dla rozwiązań IoT istotne jest bezpieczeństwo komunikacji. LoRaWAN™ wykorzystuje dwie warstwy zabezpieczeń: jedną dla sieci i jedną dla aplikacji.

Bezpieczeństwo sieci zapewnia sprawdzenie autentyczności węzła w sieci, podczas gdy bezpieczeństwo warstwy aplikacji oznacza, że operator sieci nie ma dostępu do danych aplikacji końcowego użytkownika. Stosowane jest szyfrowanie AES z wykorzystaniem identyfikatora IEEE EUI 64 do wymiany kluczy.

### 3.2 Modulacja w technologii LoRa™

Technologia LoRa™ opiera się na modulacji ze „świergotowym” rozpraszaniem widma (ang. *chirp spread spectrum, CSS*). Rozproszenie widma uzyskuje się poprzez zastąpienie sygnału reprezentującego bit danych przez sygnał sinusoidalny o narastającej częstotliwości – świergocie (ang. *chirp*). Ten typ modulacji gwarantuje rozszerzenie widma w granicach od najniższej do najwyższej częstotliwości świergotu (lub odwrotnie, od najwyższej do najniższej), czyli rozszerzone pasmo jest równoważne szerokości widma sygnału BW, które w Europie wynosi 125, 250 i 500kHz [15]. Przykładowy sygnał świergotowy i jego widmo pokazano na rys.3.

Modulacja ta gwarantuje utrzymanie stałego poziomu sygnału oraz niską jego moc, podobnie jak modulacja FSK, jednak zapewnia znacznie większy zasięg i odporność na interferencje. Rozszerzenie widma kompensuje degradację stosunku sygnału do szumu, stąd sygnał może być nadawany poniżej poziomu szumu. Dzięki niskim kosztom i dużemu zasięgowi przy niewielkiej infrastrukturze jest możliwe pokrycie znacznych obszarów, np. całych miast, umożliwiając realizację idei Smart City. Technologia LoRa™, dzięki wielu zastosowaniom, którym może służyć, wydaje się szczególnie przydatna w Internecie Przedmiotów. Zaletą tej metody modulacji jest to, że pod względem czasu i częstotliwości, przesunięcia między nadajnikiem a odbiornikiem są równoważne, co znacznie zmniejsza złożoność konstrukcji odbiornika.



Rys. 3. Przykładowy sygnał świergotowy i jego widmo  
Fig. 3. Exemplary chirp signal and its spectrum

W systemach z widmem rozproszonym, zwłaszcza w systemach z bezpośrednim rozpraszaniem widma (ang. *direct spread spectrum system, DSSS*), stosuje się termin “czip” (ang. *chip*) na oznaczenie impulsu o czasie trwania krótszym, aniżeli czas trwania symbolu. W DSSS pseudoprzypadkowa sekwencja czipów, po wymnożeniu z sygnałem reprezentującym symbol, powoduje jego rozproszenie. W przypadku modulacji świergotowej czipem nazywa się fragment sygnału świergotowego o czasie trwania  $T_c$  zależnym od współczynnika rozproszenia  $SF \in \{7, \dots, 12\}$  według zależności:

$$T_s = 2^{SF} \cdot T_c \quad (3.1)$$

gdzie  $T_s$  jest czasem trwania symbolu. Czip w modulacji LoRa™ może się zaczynać od dowolnej częstotliwości z obowiązującego zakresu, a gdy osiągnie maksimum, generowany jest sygnał od częstotliwości najniższej. W uproszczeniu pokazano to na rys.4. dla  $SF=2$ . Gwarantuje to pełen zakres częstotliwości dla każdego symbolu. Każdy symbol obejmuje więc pełen zakres częstotliwości pasma BW, stąd czas trwania symbolu  $T_s$  definiuje się następująco:

$$T_s = 2^{SF} / BW \quad (3.2)$$

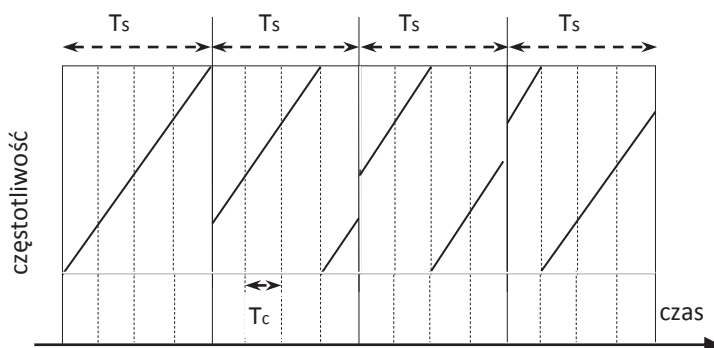
Biorąc pod uwagę wzór 3.1 uzyskujemy zależności dla  $T_c$  i  $R_c$ :

$$T_c = 1 / BW \quad (3.3)$$

$$R_c = BW \quad (3.4)$$

Zależność 3.4 oznacza, że na jeden Hz pasma zajętego przez sygnał świergotowy przypada jeden czip/s. Z kolei bitową szybkość transmisji definiuje się następująco:

$$R_b = SF \cdot R_s = SF / T_s = SF / (2^{SF} / BW) \quad (3.5)$$



Rys. 4. Uproszczony przykład zmiany częstotliwości świergotu z podziałem na czipy (dla współczynnika rozproszenia  $SF=2$ )

Fig. 4. Simplified example of frequency change of a chirp signal divided into chips (for spreading factor  $SF=2$ ).

Dodatkowym parametrem, który wpływa na efektywną szybkość bitową jest współczynnik  $\eta$ , który określa sprawność nadmiarowego kodu FEC (ang. *Forward Error Correction*) korygującego błędy. W systemie LoRa™ nadmiarowość CR określa się dla 4 bitów i jest jedną z pięciu wartości  $CR \in \{0, \dots, 4\}$ , stąd sprawność kodu wynosi:

$$\eta = 4 / (4 + CR) \quad (3.6)$$

a efektywna bitowa szybkość transmisji wynosi:

$$R_b = SF \cdot \eta / (2^{SF} / BW) \text{ [b/s]} \quad (3.6)$$

### 3.3 Projektowanie transmisji w modemie LoRa™

Modemy LoRa™ dają możliwość ustawiania parametrów transmisyjnych w zależności od warunków transmisji. Czulość  $S$  odbiornika radiowego w temperaturze pokojowej zależy od szerokości wykorzystanego pasma  $BW$ , współczynnika charakteryzującego szum własny odbiornika (wartość stała dla danego odbiornika) oraz od stosunku poziomu sygnału do poziomu szumu  $SNR$  i jest opisana zależnością [14]:

$$S = -174 + 10 \log_{10} BW + NF + SNR \text{ [dB]} \quad (3.6)$$

Pierwszy składnik stanowi wartość szumu termicznego odbiornika na 1Hz. Projektant ma wpływ na kształtowanie  $BW$  i  $SNR$ .  $SNR$  najistotniejszym parametrem decydującym o efektywności demodulacji. Dzięki zastosowanej metodzie rozpraszania widma, modulacji i korekcji błędów, poziom ten dla technologii LoRa™ jest stosunkowo niski, przy czym im większy jest współczynnik rozproszenia  $SF$ , tym mniejszy  $SNR$  może mieć sygnał danych, np. dla  $SF=12$   $SNR$  wynosi  $-20\text{dB}$ , a dla  $SF=10$  zwiększa się do  $-15\text{dB}$  i sygnał staje się bardziej czuły na zakłócenia. Ujemne wartości  $SNR$  wskazują, że poziom sygnału jest niższy od poziomu szumu. Dla porównania, dla konwencjonalnej modulacji GMSK  $SNR$  wynosi  $9\text{dB}$ . Z kolei zwiększenie wartości współczynnika  $SF$  powoduje wydłużenie sekwencji bitowej i wydłużenie czasu nadawania danych, co nie jest zjawiskiem korzystnym, stąd potrzebny jest kompromis. Tabela 1. i Tabela 2. pokazują przykładowe zależności tych parametrów.

Tabela 1. Wpływ  $SF$  na czas transmisji i czulość ( $CR=2$ ,  $BW=250$ )

Table 1. Influence of  $SF$  on Time on Air and Sensitivity ( $CR=2$ ,  $BW=250$ )

| $SF$ | Czas transmisji [ms] | Czulość [dBm] |
|------|----------------------|---------------|
| 12   | 528,4                | -134          |
| 10   | 132,1                | -129          |
| 8    | 39,2                 | -124          |

Tabela 2. Wpływ szerokości pasma  $BW$  na czas transmisji i czulość ( $CR=2$ ,  $SF=10$ )

Table 2. Influence of  $BW$  on Time on Air and Sensitivity ( $CR=2$ ,  $SF=10$ )

| $BW$ [kHz] | Czas transmisji [ms] | Czulość [dBm] |
|------------|----------------------|---------------|
| 125        | 264,2                | -132          |
| 250        | 132,1                | -129          |
| 500        | 66                   | -126          |

Powyższe i inne, bardziej zaawansowane zależności stanowią podstawę do zaprojektowania trybu transmisji. Firma Semtech dostarcza kalkulator parametrów transmisji w technologii LoRa™. Przykładowe wartości kalkulatora parametrów konfiguracyjnych modemu LoRa™ przedstawiono w Tabeli 3.

Tabela 3. Przykładowe wartości kalkulatora parametrów konfiguracyjnych modemu LoRa™ [14]  
Table 3. Exemplary LoRa™ modem calculator of configuration parameters values [14]

| Parametry wejściowe kalkulatora  |         | Parametry wyjściowe kalkulatora  |             |
|----------------------------------|---------|----------------------------------|-------------|
| szerokość pasma BW               | 500 kHz | ekwiwalentna szybkość transmisji | 1171,88 b/s |
| współczynnik rozproszenia SF     | 12      | czas sekwencji synchronizacyjnej | 83,97ms     |
| nadmiarowość kodu CR             | 1       | czas transmisji                  | 190,46ms    |
| liczba bajtów danych w ramce     | 8       | czas trwania symbolu             | 8,19 ms     |
| liczba symboli sekwencji synchr. | 6       | czułość odbiornika               | -131 dBm    |
| częstotliwość środkowa pasma     | 865 MHz | pobór prądu w czasie transmisji  | 90mA        |
| moc sygnału nadawanego           | 17 dBm  | pobór prądu w czasie uśpienia    | 100nA       |
|                                  |         | detekcja aktywności kanału       | 13mA        |

Z powyższych zestawień wynika, że projektant systemu komunikacji z wykorzystaniem modemu LoRa™ musi dokładnie rozważyć wszystkie dostępne konfiguracje, by zrealizować transmisję danych w istniejących warunkach. Jest to niezwykle ważne w terenach zabudowanych, gdzie występują liczne ograniczenia zasięgu. Potwierdzają to badania firmy Apollogic [22].

#### 4. Porównanie sieci bezprzewodowych

W Tabeli 4. zestawiono niektóre parametry robocze wybranych sieci bezprzewodowych, które mają zastosowanie w zdalnych systemach pomiarowych, a także są przygotowywane do zastosowań związanych z szeroko pojętym Internetem Przedmiotów. Porównano ZigBee 3.0, Wireless M-BUS, EnOcean, LoRa™, Bluetooth BLE oraz będący w fazie standaryzacji system Wi-Fi HaLow (standaryzacja przewidziana na 2018 rok) [3, 6, 16, 20, 23, 24, 27].

Każda z zaprezentowanych technologii ma swój specyficzny wyróżnik i można się spodziewać, że znajdzie swoją niszę implementacyjną. ZigBee 3.0 oraz EnOcean nastawione są na samozasilanie, LoRa™, dzięki swojej unikatowej metodzie modulacji gwarantuje unikatowo daleki zasięg, z kolei WiFi HaLow obiecuje dużą szybkość transmisji danych. Należy zaznaczyć, że parametry transmisyjne, zwłaszcza zasięg, czułość nadajnika, pobór mocy mają charakter orientacyjny, zależą bowiem od zastosowanych urządzeń i mogą się różnić od tych, zamieszczonych w Tabeli 4.

Tabela 4. Porównanie parametrów transmisyjnych sieci bezprzewodowych  
 Table 4. Comparison of wireless networks transmission parameters

|                         | ZigBee                        | Wireless M-Bus                              | EnOcean                                      | LoRa™  | Bluetooth BLE             | Wi-Fi HaLow                         |
|-------------------------|-------------------------------|---|--|--|---------------------------|-------------------------------------|
| Standard                | IEEE802.15.4 =><br>ZigBee 3.0 | EN 13757                                    | ISO/IEC<br>14543-3-1X                        | IEEE 802.15.4g                               | Bluetooth 4.2             | 802.11ah                            |
| Częstotliwość w Europie | a) 2,4 GHz<br>b) 868MHz       | 868 MHz                                     | 868.3 MHz                                    | 868 MHz                                      | 2,4 GHz                   | 863MHz                              |
| Pasmo                   | a)16x5MHz                     | b) 600kHz<br>c) 500kHz                      | 280 kHz                                      | 125kHz,<br>250kHz,500kHz                     | 40x2MHz                   | 1MHz, 2 MHz<br>(4,8,16MHz)          |
| Maksymalny zasięg       | 10-100m                       | Otwarta przestrzeń<br>500 – 1000m           | <30m (budynek)<br><300m (otwarta przestrzeń) | 2-5 km (miasto)<br>15km (tereny podmiejskie) | 50-150 m                  | 30-100m                             |
| Szybkość transmisji     | 250kb/s                       | a) 4,8 kb/s<br>b) 32.768 kb/s<br>c) 100kb/s | 125 kB/s                                     | 0,3-50kb/s                                   | 1Mb/s                     | 150kb/s -<br>3,9Mb/s                |
| Moc                     | 1mW<br>Green Power            | <25mW                                       | Samo-<br>zasilanie                           | <10mW  | 10-500mW                  | 6.0mW                               |
| Czułość odbiornika      | - 100 dBm                     | dla 100kb/s<br>-106 dBm                     | -96 dBm                                      | < -120dBm                                    | <90dBm                    | -104dBm                             |
| Modulacja               | a) O-QPSK<br>b) BPSK<br>+DSSS | Manchester,<br>3 z 6<br>b) 2FSK             | ASK  | CSS  | GFSK/przełączanie kanałów | OFDM+BPSK/<br>QPSK/<br>16 - 256 QAM |

## 5. Potencjalne korzyści z zastosowania technologii LoRa™ w przedsiębiorstwach wodociągowych i kanalizacyjnych

Przedsiębiorstwa wodociągowe i kanalizacyjne od lat związane były ze standardem transmisji przewodowej M-Bus, w ostatnich latach ze standardem bezprzewodowym Wireless M-Bus, który między innymi ma zastosowanie w wodomierzach [10, 12].

W przypadku masowych zastosowań największe znaczenie mają standaryzowane protokoły uniwersalne jak ZigBee, IEEE 802.15.4 i inne rozwiązania pochodne. Wynika to z niskich kosztów węzłów w produkcji wielkoseryjnej, taniego i jednolitego oprogramowania a w następstwie również niskich kosztów instalacji, eksploatacji, serwisowania. Dla projektów z ZigBee istotne jest również wsparcie ze strony ZigBee Alliance. Sieć ZigBee stała się standardem dla monitoringu i sterowania bezprzewodowego. Protokół tej sieci jest specjalnie zaprojektowany do tanich, energooszczędnych i jednocześnie wysoce niezawodnych zastosowań. Organizacja ZigBee Alliance od początku prowadziła swoje prace nad protokołami w kierunku zastosowań w konkretnych dziedzinach (profilu) aby w ten sposób uprościć projektowanie sieci.

W 2008 roku, ZigBee Alliance zaprezentował nowy profil ZigBee (ang. *ZigBee Smart Energy Profile Specification*), który wspiera dwa podstawowe wymagania rynku inteligentnych mediów (np. Smart Energy, Smart Water) pomiary i zarządzanie [28]. Specyfikacja ZigBee IP rozszerza standard IEEE 802.15.4 o rozwiązania znane z protokołów internetowych, dodając warstwy sieciową i bezpieczeństwa oraz strukturę aplikacji (ang. *application framework*). ZigBee IP wykorzystuje protokół internetowy w wersji 6 (IPv6) co dzięki rozszerzonym możliwościom adresowania, stwarza podwaliny dla Internetu Przedmiotów bez konieczności stosowania bram pośrednich.

Umożliwia tworzenie ekonomicznie uzasadnionych, energooszczędnych sieci o topografii siatki (ang. *mesh*) na podstawie standardowych protokołów internetowych takich jak 6LoWPAN, IPv6, PANA, RPL, TCP, TLS i UDP. ZigBee IP zawiera aktualnie jeden profil - ZigBee Smart Energy 2.0.

W rozwoju sieci radiowych małej mocy można zauważyć rosnące zainteresowanie rozwiązaniami bezbaterijnymi (pozyskiwanie energii z otoczenia), np. ZigBee Green Power czy EnOcean.

Sieci jak ZigBee, Wireless M-Bus, EnOcean dobrze sprawdzają się dla procesów, które ograniczają się do stosunkowo niewielkiego obszaru, jak budynek czy teren przedsiębiorstwa. Dla większych obszarów koszty retransmisji pakietów informacyjnych (poprzez wiele węzłów) stają się zbyt duże. W przedsiębiorstwach wodociągowych i kanalizacyjnych oferowany zasięg przez typowe sieci WSN w wielu przypadkach może być niewystarczający. Sieci wodociągowe i kanalizacyjne w miastach zajmują bardzo duży obszar. W małych miejscowościach i wioskach rozmieszczenie punktów pomiarowych również oznacza konieczność przekazywania pomiarów na duże odległości [11].

Rozwój przedsiębiorstw zajmujących się gospodarką wodnościekową w kierunku wprowadzenia zaawansowanej struktury pomiarowej (jest nieunikniony) [8,9,13], w skrócie AMI (ang. *Advanced Metering Infrastructure*), bardzo często oznacza transmisję danych na duże odległości. W AMI na najniższym poziomie występują tzw. liczniki inteligentne, tzn. liczniki elektroniczne (bądź z elektroniczną częścią pozyskiwania, przetwarzania oraz transmisji danych pomiarowych) wyposażone w możliwość dwukierunkowej komunikacji między odbiorcą medium (np. wody) a jego dostawcą. Podstawę systemu AMI stanowi przede wszystkim dokładne opomiarowanie odbiorców, z uwzględnieniem krótkiego cyklu pomiarowego. Oczekiwane korzyści z wprowadzenia AMI pojawią się jednak dopiero wówczas, gdy również część produkcyjna i dystrybucyjna wodociągów zostanie odpowiednio przystosowana i zmodernizowana. Jednym z głównych problemów sieci wodociągowych i kanalizacyjnych są różne nieszczelności, które nie zawsze muszą się ujawniać w sposób gwałtowny. Lokalizacja takich wycieków nie jest łatwa. Nie zawsze ich usuwanie jest ekonomicznie uzasadnione jednak prawidłowe zbilansowanie wody w sieci to podstawowy element oceny efektywności pracy wodociągu czy sieci kanalizacyjnej. Prawidłowe zarządzanie wspomnianymi sieciami wymaga dostępu do wiarygodnych informacji o całym nadzorowanym procesie. Zdalny, cykliczny (np. co godzinę lub częściej) odczyt ciśnienia i przepływu wody (w tym również u odbiorców końcowych) w różnych punktach sieci wodociągowej zdecydowanie usprawniłby lokalizację uszkodzeń, kradzieży i umożliwił szybką reakcję na sytuacje awaryjne. Dokładne dane na temat poboru wody pozyskiwane w czasie rzeczywistym umożliwiłyby właściwe sterowanie wydajnością pomp, przyczyniłyby się do zmniejszenia awaryjności urządzeń w procesie produkcji i dystrybucji wody, jak również sprzyjałyby bardziej racjonalnej eksploatacji źródeł wody. Poprzez wprowadzenie systemu, który zapewniałby prosty, intuicyjny dostęp do danych pomiarowych i bieżących kosztów oraz czytelnej strategii korzystania z taryf opłat, klient stałby się aktywnym uczestnikiem rynku wody, a w rezultacie pojawiłyby się oszczędności zarówno dla konsumenta jak i producenta.

Tanim rozwiązaniem bezpośredniej (w jednym kroku) transmisji danych na duże odległości, sięgające nawet ponad 20 km, może być przedstawiona w rozdziale 3. bezprzewodowa sieć LoRa™. Przykładowa analiza wykonana przez firmę Talkpool, która ma duże doświadczenie we wdrażaniu sieci zarówno Wireless M-Bus i LoRa™, wykazała prawie dziesięciokrotnie niższy koszt instalacji systemu w przypadku LoRa™ niż WM-Bus [2,26]. Struktura sieciowa LoRaWAN™ (z nielimitowaną liczbą węzłów końcowych) zapewnia nie tylko bezpieczeństwo przesyłania danych ale tworzy również warunki do zarządzania dużą liczbą gromadzonych danych, co potwierdzają wyniki badań przeprowadzonych przez firmę Apollologic [22].

## 6. Potencjalne

Dokonano przeglądu najpopularniejszych technologii bezprzewodowych pracujących w nielicencjonowanym paśmie ISM, które są wykorzystywane przez systemy Internetu Przedmiotów. W Europie najczęściej jest to pasmo 868 MHz (obok stosowanego na całym świecie pasma 2,4 GHz). Oprócz charakterystyki struktur sieciowych ZigBee i Wireless M-Bus, przedstawiono rozwiązania bezbateryjne, w których energia jest pozyskiwana z otoczenia np. ZigBee Green Power czy EnOcean, a także rozwijany standard 802.11. ah (Wi-fi HaLow). Szczególną uwagę poświęcono technologii LoRa™, która ze względu na swój unikatowy sposób modulacji gwarantuje największy zasięg przy bardzo małym poborze mocy, dużej czułości i strukturze sieciowej WAN. Dzięki temu może znaleźć zastosowanie w budowie bezprzewodowych systemów pomiarowych w przedsiębiorstwach wodnych i kanalizacyjnych.



## Bibliografia

- 1) AN010, Wireless M-Bus to Wired M-Bus with RC1180-MBUS, 1.0, Radiocrafts AS, 2008
- 2) A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. LoRa® Alliance technical Marketing Workgroup, November 2015
- 3) Dugand, F. Bluetooth Smart and ZigBee: If you can't beat them, join them, Embedded Computing Design, September 2015, <http://embedded-computing.com/articles/bluetooth-smart-and-zigbee-if-you-cant-beat-them-join-them/#>
- 4) Holger, K., Willing, A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons, Ltd, 2007
- 5) Hornbuckle, C.A. Patent US7791415. Fractional-N synthesized chirp generator. Semtech Corporation, 2010
- 6) IEEE 802.11AH Wi-Fi HaLow RADIO IN TSMC 40NM CMOS Prestandard design, [http://www2.imec.be/content/user/File/Brochures/ip2016/7\\_ULP%20WIFI%20RADIO\\_mail.pdf](http://www2.imec.be/content/user/File/Brochures/ip2016/7_ULP%20WIFI%20RADIO_mail.pdf), 2016
- 7) IEEE 802.15.4TM, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS). New York, IEEE, 2003
- 8) Kubiak, Z. Inteligentne pomiary, Ochrona Środowiska Gospodarka Komunalna, BMP, (5) 2011
- 9) Kubiak, Z., Urbaniak, A. Inteligentny system pomiarowy – rozwój standardu, przykładowe rozwiązania. Rynek Energii, 2013, 104 (1) 43-49
- 10) Kubiak, Z., Urbaniak, A. Interfejsy urządzeń wodociągowych. Gaz, woda i technika sanitarna, Warszawa, PZiITS, ISSN 0016-5352, nr 6/2015
- 11) Kubiak, Z., Urbaniak, A. Sieci bezprzewodowe dla systemów zdalnych pomiarów, Rynek Energii, nr 4 (87)/2010
- 12) Kubiak, Z., Urbaniak, A. Smart Metering a woda, Mat. VIII Ogólnopolskiej KNT. Politechnika Śląska, Instytut Technologii Wody i Ścieków, Szczyrk 2015
- 13) Kubiak, Z., Urbaniak, A. Systemy monitorowania zużycia mediów w budynkach. Rynek Energii, 2009, 85 (5) 22-31
- 14) LoRa Designer's Guide, AN 1200.13, Rev. 1, Semtech Corporation, [http://www.semtech.com/images/datasheet/LoraDesignGuide\\_STD.pdf](http://www.semtech.com/images/datasheet/LoraDesignGuide_STD.pdf), July 2013
- 15) LoRa Modulation Basics, AN 1200.22, Rev. 2, May 2015, Semtech Corporation, <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>
- 16) Nottveit, Ø. Implementing with RC1180-MBUS Wireless M-Bus module. Application Note AN009, Rev. 1.0, Radiocrafts Embedded Wireless Solutions, 2008
- 17) prEN 13757-3. Communication systems for meters and remote reading of meters. Part 3: Dedicated application layer; English version EN 13757-3, 2004
- 18) prEN 13757-4. Communication systems for meters and remote reading of meters – Part 4: Wireless meter readout (Radio Meter reading for operation in the 868-870 MHz SRD band), CEN, Brussels, 2003
- 19) prEN 13757-5. Communication systems for meters and remote reading of meters.” Part 5: Wireless Relaying; English version prEN 13757-5, 2009

- 20) Spinsante, S., Squartini, S., Gabrielli, L., Pizzichini, M., Gambi, E., Piazza, F. Wireless M-Bus Sensor Networks for Smart Water Grids: Analysis and Results, International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2014, Article ID 579271, 16 stron, 2014
- 21) ZigBee Specification. ZigBee Document 053474r13. ZigBee Standards Organization, 2006
- 22) <http://apollogic.com/>
- 23) <https://www.lora-alliance.org/>
- 24) <http://www.m-bus.com/>
- 25) <https://www.enocean.com/en/>
- 26) <http://www.talkpool.com/>
- 27) <http://www.semtech.com/wireless-rf/iot.html>
- 28) <http://www.zigbee.org>