

LoRaWAN – nowoczesna komunikacja w dobie IoT



MACIEJ WAWRZYSZKO

Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektryczny, na kierunku Metrologia. W Introlu pracuje od 2004 roku, obecnie jest kierownikiem działu analiz przemysłowych.

tel. 32 789 00 62



LoRa – TROCHĘ TEORII

LoRaWAN to sieć bazująca na technologii LoRa (skrót od ang. **Long Range**) pracująca w oparciu o technikę modulacji w widmie rozproszonym. Technologia LoRa powstała we Francji. LoRa to najprościej ujmując technologia komunikacji bezprzewodowej, podobnie jak bardziej popularne technologie typu Wi-Fi, LTE i ZigBee, Bluetooth. Tym, co ją wyróżnia jest technologia modulacji fal elektromagnetycznych. Modulacja LoRa oparta jest na technologii rozpraszania widma CSS (Chirp Spread Spectrum) i polega na ciągłej zmianie częstotliwości w czasie, przy zachowaniu określonej szerokości pasma (Rysunek 1).

Przepustowość kanału transmisyjnego jest kluczowym parametrem w systemach przesyłu informacji. Parametr ten opisywany jest zależnością znaną jako twierdzenie **Shanona-Hartleya**:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

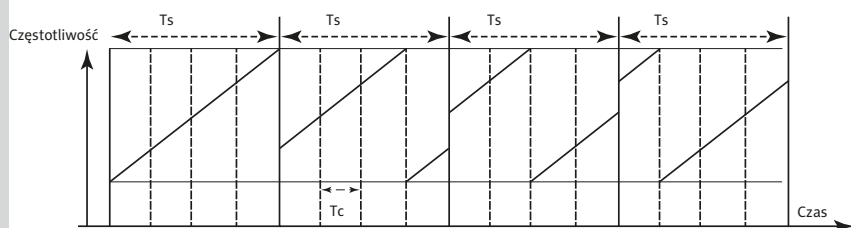
gdzie:

C – przepustowość kanału w bitach na sekundę,
 B – pasmo sygnału w hercach,

$\frac{S}{N}$ – stosunek mocy sygnału do mocy szumów.

Z twierdzenia tego można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Zwiększenie pasma B sygnału, umożliwia zwiększenie transferu przy stałym stosunku mocy sygnału do szumu.



Rysunek 1
Modulacja LoRa

2. Zachowanie przepustowości łącza C , przy spadku stosunku mocy sygnału do szumu S/N , wymaga zwiększenia pasma B . Wartość S/N zależy od ukształtowania terenu i odległości między nadajnikiem i odbiornikiem.

Na powyższym twierdzeniu oparta jest m.in. modulacja CSS (**Chirp Spread Spectrum**), w której strumień danych modulowany jest sygnałem o liniowo wzrastającej częstotliwości i która została zastosowana w modulacji LoRa. Sposób, w jaki przebiega modulacja sygnału, jest zależny od trzech głównych parametrów:

Spreading Factor (SF) – określa jak szybko zmienia się częstotliwość modulująca

Data Rate (DR) – opisuje w jakim zakresie zmienia się częstotliwość modulująca,

Band Width (BW) – określa szerokość przedziału w jakim modulowana jest częstotliwość nośna.



PRZEPUSTOWOŚCI I ZASIĘGI

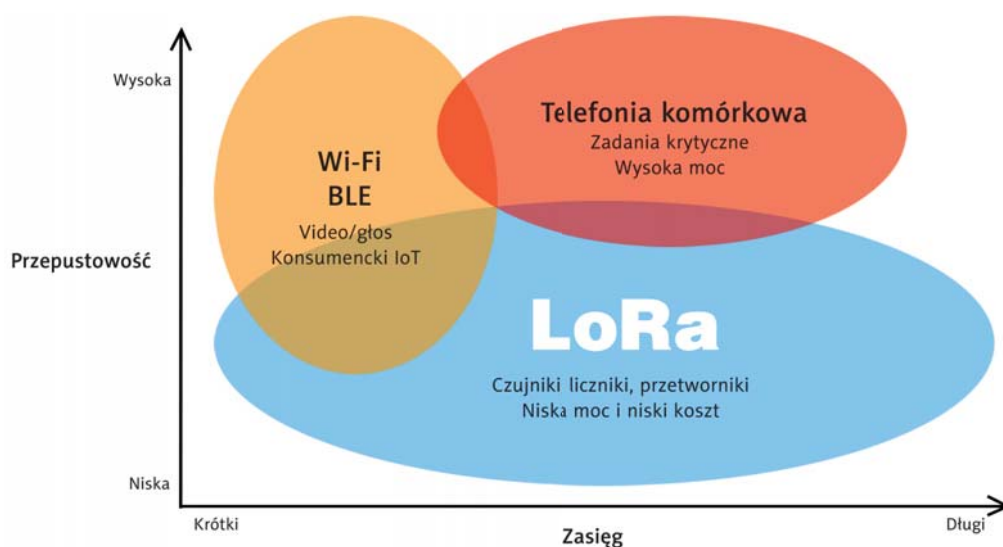
W jaki sposób parametry **Spreading Factor (SF)**, **Data Rate (DR)** oraz **Band Width (BW)** wpływają na pracę łącza **LoRa**? Finalnie, parametry te pozwalają na określenie z jaką prędkością i na jaki dystans urządzenie jest w stanie się komunikować. Ich wartości wybierane są podczas konfigurowania urządzeń tworzących łącze radiowe LoRa.

W tym miejscu należałoby zagłębić się w strukturę pakietu impulsów wysyłanych w eter podczas transmisji w łączu LoRa. Z uwagi na ograniczenia objętości tej publikacji, odsyłamy do szczegółowej dokumentacji układów scalonych.



ZALETY I OGRANICZENIA SIECI LORAWAN

LoRaWAN to sieć oparta na technologii LoRa. W Europie pracuje w otwartych pasmach ISM (**Industrial, Scientific, Medical**) 433 MHz i 868 MHz, a w Ameryce Północnej w pasmie 915 MHz. Moc wyjściowa nadajników to +20 dBm/100mW



Rysunek 2
Porównanie zasięgów różnych typów sieci

(w Europie ograniczenie do +14 dBm). Odbiorniki w sieci LoRa cechuje zdumiewająco wysoka czułość, do -148 dBm (0.01 $\mu\text{V}/50\ \Omega$). Ten poziom czułości jest nieosiągalny dla większości klasycznych analogowych układów odbiorczych.

Korzystanie z protokołu LoRaWAN w otwartym paśmie ISM (w Polsce 868 MHz do 870 MHz), stawia wymóg przestrzegania norm i regulacji dotyczących tego pasma częstotliwości. Istotne jest tutaj ograniczenie godzinowego czasu nadawania przez każde z urządzeń. Każde pojedyncze urządzenie może nadawać przez nie więcej niż 1% czasu godzinowego, czyli **przez 36 sekund w ciągu każdej godziny**. Jednocześnie ograniczony jest poziom mocy doprowadzanej do anteny, do wartości nie większej niż 25 mW (14 dBm). Ograniczenia te oczywiście wpływają na możliwości realizacji transmisji danych.

36 sekund wydaje się być niewielką ilością czasu, jednakże jeśli przyjrzymy się czasom transmisji pojedynczej informacji z urządzenia – szybko przekonamy się, że jest to ilość czasu wystarczająca dla większości aplikacji. Warto zauważyć, że wymiana danych w IoT polega na przesyłaniu krótkich wiadomości, zawierających kilkanaście do kilkudziesięciu bajtów. W sieci LoRaWAN, oprócz danych użytkowych, transmitowane są informacje o identyfikatorach urządzeń, numerach urządzeń końcowych i sumach kontrolnych, a transmisja jest szyfrowana.

Przeprowadźmy teraz analizę w oparciu o Tabelę 1 dla pakietu zawierającego 11 bajtów, użytecznych danych. Dla współczynnika SF7 maksymalna prędkość przesyłania danych wynosi 5470 bps (bit per second), czyli około 680 B/s. Przybliżony dystans, na jaki urządzenie będzie w stanie wysłać wiadomość o wielkości 11 bajtów, to około 2 km, a wysłanie tej wiadomości zajmie w przybliżeniu 60 ms. Rozpatrzmy też drugi skrajny przypadek – dla współczynnika SF10 maksymalna prędkość przesyłania danych wynosi 980 bps, czyli około 120 B/s. Przybliżony dystans, na jaki urządzenie będzie w stanie wysłać wiadomość o wielkości 11 bajtów, to około 8 km, a wysłanie tej wiadomości zajmie

w przybliżeniu 370 ms. Jak to się odnosi do ograniczenia zajętości pasma do 36 sekund? Jeśli będziemy wysyłać wiadomości przedstawione w przypadku opisanym dla SF7, będziemy mogli ich nadać **aż 600 w ciągu godziny!** Oznacza to, że w każdej minucie moglibyśmy wysłać 10 pomiarów, żeby zmieścić się obowiązujących nas normach. W przypadku korzystania z SF10 będziemy mogli nadać około 10 wiadomości w ciągu godziny.

Nawet najprostsze metody transmisji danych bazujące na połączeniach stałych oferują zdecydowanie większe i szybsze transfery, tak samo jak WiFi czy Bluetooth. Przepustowość transmisji LoRa nie pozwala na jej wykorzystanie w aplikacjach audio-wideo. Dodatkowo, wymóg ograniczenia zajętości pasma otwartego wyklucza możliwość funkcjonalnego zastosowania w aplikacjach do sterowania w czasie rzeczywistym (Real Time).

Z przytoczonych przykładów nasuwa się jeden wniosek – jeżeli chcemy korzystać z LoRaWAN i sensownie zarządzać energią zasilającą baterijne urządzenia końcowe, nie należy transmitować wiadomości zbyt często. W przemyśle zwykle dane zbierane z czujników to dane pomiarowe dotyczące procesów wolno-zmiennych lub zdarzeń występujących sporadycznie lub wręcz losowo, więc ograniczenia LoRaWAN nie stanowią problemu. Gdyby jednak zaistniała konieczność zwiększenia częstotliwości połączeń, istnieje możliwość poprawy przepustowości poprzez zmniejszenie wartości współczynnika SF. Współczynnik SF można zmniejszyć poprzez zwiększenie ilości oraz zmianę lokalizacji bramek lub punktów retransmisyjnych.

Spreading Factor dla BW=125kHz	Prędkość przesyłu	Zasięg	Czas przesyłania pakietu o długości 11 bajtów.
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	104 ms
SF7	5470 bps	2 km	61ms

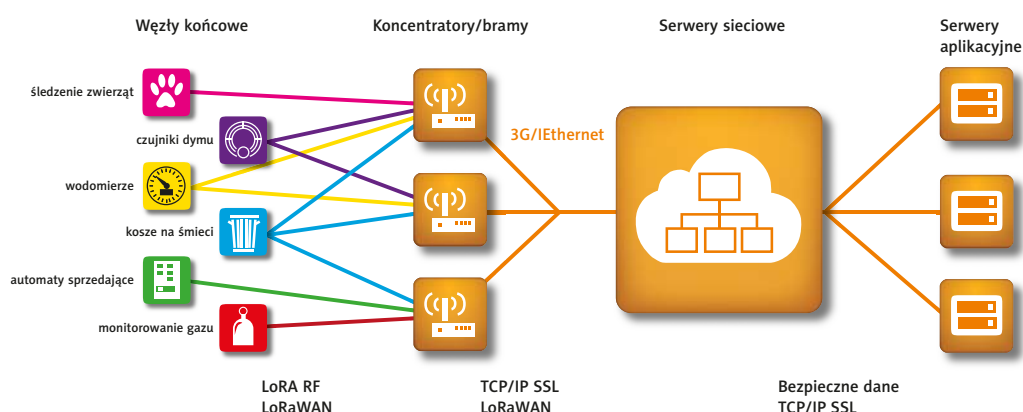
Tabela 1
Zależność prędkości przesyłu i zasięgu od SF

„Niewątpliwą zaletą sieci LoRaWAN jest propagacja sygnału i związany z nią zasięg sięgający nawet kilkunastu kilometrów.

Kończąc analizę kluczowych zalet i wad LoRaWAN można pokusić się o stwierdzenie, że choć LoRaWAN oferuje ograniczone szybkości transferu i ograniczenia w częstotliwości wysyłania, to jednak jej niewątpliwą zaletą jest propagacja sygnału i związany z nią zasięg sięgający nawet kilkuset kilometrów. Jeśli dodamy do tego niski pobór mocy urządzeń oraz możliwość obsługi bardzo dużej ilości sygnałów (nawet tysięcy urządzeń wysyłających małe pakiety danych), to zauważamy, że zalety tego rozwiązania zdecydowanie przewyższają ograniczenia (które w wielu zastosowaniach w ogóle nie mają znaczenia). Nie dziwi więc fakt obserwowanej na całym świecie ekspansji sieci pracujących w otwartym standardzie LoRaWAN. **Smart City, Smart Factory czy Smart Metering**

który przekazuje informacje z urządzeń końcowych na serwer komunikacyjny i z serwera komunikacyjnego do urządzeń końcowych. Należy przy tym podkreślić, iż komunikacja w sieci LoRaWAN jest **komunikacją dwustronną**, a przynajmniej może być skonfigurowana jako taka. Wyróżnia się trzy klasy pracy urządzeń końcowych.

Urządzenie pracujące w klasie A znajduje się w ciągłym uśpieniu. Wybudzanie następuje w ściśle określonych momentach lub na skutek zajścia konkretnego zdarzenia. Po wybudzeniu urządzenie nadaje wiadomość do serwera i sprawdza, czy nie pojawiła się jakaś wiadomość z serwera. Finalnie, urządzenie w większości czasu pozostaje w stanie uśpienia, tym samym oszczędzając energię w baterii.



Rysunek 3
Schemat budowy sieci LoRaWAN

– w tych zastosowaniach technologia LoRa i sieć LoRaWAN wybijają się ponad inne technologie transmisyjne.



BUDOWA SIECI LoRaWAN

Typowa sieć zbudowana w oparciu LoRaWAN ma strukturę określaną jako Gwiazda Gwiazd (**Star of Stars**) i składa się z czterech grup elementów (Rysunek 3):

- urządzeń końcowych (**end devices, end points**);
- bramek (**gateways**);
- serwerów sieciowych (**LNS – LoRaWAN Network Server**);
- serwerów aplikacyjnych (**application servers**).



W JAKI SPOSÓB DZIAŁA TAKA SIEĆ?

Załóżmy, że posiadamy urządzenia końcowe z możliwością pracy w sieci LoRaWAN, z których chcemy zbierać dane, a następnie odbierać i odczytywać je w wygodny sposób w Internecie, na stacji roboczej pracującej w zakładowej sieci ethernet lub w dowolnej standardowej sieci komunikacyjnej. Urządzenia końcowe **end devices** mają dostęp do LoRaWAN. Dla urządzeń warstwy przetwarzania danych, sieć LoRaWAN dostępna jest poprzez bramę **gateway**. Brama jest „mostem”,

Urządzenie pracujące w klasie B zachowuje się podobnie jak w klasie A, ale dodatkowo ma możliwość otwierania tzw. okien czasowych, w których samo może nadawać i odbierać wiadomości z serwera. Taki sposób pracy zapewnia serwerowi większą kontrolę nad urządzeniami końcowymi. Zużycie energii wzrasta, ale jest to akceptowalne.

Urządzenie pracujące w klasie C pozostaje cały czas na nasłuchu. Jest to tryb zalecany dla urządzeń zasilanych z zewnętrznych źródeł zasilania.

Wiadomości w sieci LoRaWAN mogą być przesyłane z potwierdzeniem i bez potwierdzenia odbioru przez serwer. W pierwszym przypadku urządzenie wysyła wiadomość i arbitralnie zakłada, że dotrze ona do odbiorcy. Praca z potwierdzeniem skutkuje oczekiwaniem przez urządzenie końcowe na informację zwrotną. W efekcie, dłużej pozostaje w trybie aktywnym. Oczywiście dobór urządzeń końcowych oraz wybór sposobu pracy sieci lub jej części zależny jest od wymagań stawianych przez aplikację.



IDENTYFIKACJA I BEZPIECZEŃSTWO

Bezpieczeństwo w sieci LoRaWAN zapewnione jest w dwóch warstwach – sieci oraz aplikacji. Bezpieczeństwo w warstwie sieci pozwala nam potwierdzić, że urządzenie, z którym się komuni-

„Sieć LoRaWAN daje możliwość jednoczesnego nadawania tej samej informacji do grupy urządzeń.

kujemy jest rzeczywiście tym, za które się podaje, natomiast bezpieczeństwo w warstwie aplikacji sprawia, że operator sieci nie ma dostępu do naszych danych. Obie warstwy są szyfrowane 128-bitowym kluczem AES128.

Urządzenia pracujące w sieci LoRaWAN posiadają unikalne numery identyfikacyjne analogicznie do kodów MAC, występujących w urządzeniach powszechnego użytku. Podczas tworzenia sieci, urządzenia otrzymują indywidualne adresy sieciowe oraz nadawane są im identyfikatory, pozwalające na podział zasobów sieci na grupy. Istotną cechą sieci LoRaWAN jest możliwość jednoczesnego nadawania tej samej informacji do grupy urządzeń.



LoRaWAN A INNE SIECI

Sieć na bazie LoRaWAN z założenia cechuje się dużą elastycznością. W chwili obecnej dostępne są na rynku urządzenia umożliwiające dołączenie sieci LoRaWAN do praktycznie wszystkich dostępnych sieci wymiany i gromadzenia danych, z uwzględnieniem funkcji charakterystycznych takich jak master lub slave, o ile występują.



Jeżeli pojęcie gateway oznacza bramę sieciową między systemem nadrzędnym czy serwerem, a siecią bezprzewodową LoRaWAN, to pojęcie bridge odnosi się do urządzenia końcowego, pracującego w sieci LoRaWAN, a dołączanego do zdalnej sieci komunikacyjnej. Sposób pracy urządzeń końcowych typu bridge uzależniony jest od wymagań sieci, w której moduł taki istnieje.

Przykładowo, oddalony przepływomierz elektromagnetyczny z interfejsem RS485 Modbus RTU doposażony o moduł końcowy **LoRaWAN/Modbus RTU master** może być dostępny poprzez sieć LoRaWAN w sieci lokalnej poprzez moduł bramy **LoRaWAN**. Konfiguracja taka rozwiązuje problem odczytu stanu licznika totalizera oraz bieżącą kontrolę natężenia przepływu medium w nadzorowanym punkcie sieci.



LoRa, ETHERNET, DTU...

Pojawienie się układów komunikacyjnych LoRa zaowocowało dostępnością modemów DTU

(**Data Transmission Unit**) wyposażonych w praktycznie wszystkie powszechnie stosowane interfejsy. W efekcie, realizacja łącza radiowego w paśmie ISM stała się względnie prosta. Niebagatelne znaczenie ma fakt, iż własności standardu LoRa umożliwiają tworzenie niewielkich sieci telemtrycznych bez konieczności uruchamiania zaawansowanych lokalnych aplikacji serwerowych czy korzystania z chmury danych. Rozwiązania takie mają ograniczenia, ale w bardzo wielu przypadkach mogą być sposobem na budowę systemów zbierania danych, których realizacja wcześniej nie była możliwa ze względu na koszty lub oddalenie źródeł informacji.

Ciekawym rozwiązaniem, również oferowanym przez różnych producentów, są moduły **gateway** z interfejsami ETHERNET, RS485 i LoRa. Oferują one możliwość komunikowania się z wieloma urządzeniami wyposażonymi w modemy DTU z poziomu protokołu MODBUS TCP lub z sieci RS485 z protokołem MODBUS RTU.

Omówione do tego momentu własności funkcjonalne warstwy sieciowej IO nie wyczerpują zagadnienia. W rzeczywistości warstwa sieciowa ma również strukturę warstwową. Widać to doskonale na przykładzie komunikacyjnej warstwy sieciowej bazującej na technologii bezprzewodowej LoRa i nadrzędnej do niej warstwy reprezentowanej przez protokół komunikacyjny LoRaWAN. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest dążenie do maksymalnego odseparowania aplikacji od mechanizmów komunikacyjnych na poziomie sprzętu i medium transmisyjnego. Nie powinno zatem budzić zdziwienia, iż w warstwie sieciowej IoT pojawiła się kolejna, wyższa warstwa transportowa, reprezentowana przez protokół MQTT. Protokół ten przybliżymy przy innej okazji.



PRZEMYSŁ, MIASTO, DOM...

Standard LoRaWAN umożliwia tworzenie rozległych sieci zbierania danych za pomocą zarówno urządzeń zasilanych z baterii, jak i urządzeń zasilanych ze źródeł stacjonarnych. Możliwość względnie prostego i taniego zaprojektowania i utrzymania własnej infrastruktury, brak ograniczeń w rozbudowie, duży zasięg oraz brak opłat za korzystanie z pasma powodują, iż LoRaWAN znajduje zastosowanie w wielu aplikacjach z różnych dziedzin naszego życia. Sieć podbija zatem świat w takich obszarach jak **Smart Metering** (zużycie mediów, temperatura, wilgotność itp.), **Smart City** (pomiar jakości powietrza i temperatury, sterowanie oświetleniem, kontrola zajętości parkingów itp.), **Smart Factory** (wykrywanie wycieków cieczy, kontrola otwarcia okien, drzwi, zbieranie danych z różnych urządzeń, komunikacja między maszynami **M2M** itp.) czy **Smart Home** (kontrola dostępu, sterowanie klimatyzacją, kontrola otwarcia drzwi i okien). O konkretnych aplikacjach z naszego obszaru zainteresowań, czyli układów pomiarowych i kontroli procesu, opowiemy w kolejnym numerze.

”LoRa umożliwia tworzenie niewielkich sieci bez konieczności uruchamiania zaawansowanych lokalnych aplikacji serwerowych czy korzystania z chmury danych.