

LPWA の課題と解決する新 RF IC と IoT に最適なネットワーク構成

Challenges of LPWA, Designed RF ICs, and Optimum IoT Network Structure

小宮邦裕 野田光彦

Abstract

IoT に最適な無線通信技術として LPWA (Low Power Wide Area) 無線が注目されているが、技術的課題も多い。本稿では、全国規模の広域通信網と IoT エリアネットワークに最適な LPWA 通信方式について考察し、それぞれに最適な LPWA 通信方式を両立するための 2 モード LPWA 無線 RF IC の概要と実装における課題と対策案を報告する。更に、IoT エリアネットワークとして有望なアンライセンスト LPWA としての特長を他の方式と比較・検討し、国内電波法への適合性についても考察する。

キーワード：LPWA, アンライセンスト LPWA, IEEE802.15.4k, Sigfox, LoRaWAN

1. IoT の基礎要素とネットワーク構成

IoT (Internet of Things) を支える無線技術として LPWA (Low Power Wide Area) 無線が注目を集めている。LPWA 無線と一くくりに呼ばれるものの多種多様な方式があり、それぞれに特徴を持っている。本章では、LPWA 無線技術が IoT 用無線技術に提案されている理由を説明する。

図 1 に IoT システムの基本構成を示す。点線枠で囲われていない部分は既に市場導入されているネットワーク構成である。一方点線枠では、自治体エリアや企業拠点敷地エリア、共同体管理エリアなど比較的広域な範囲に IoT システムを適用する場合に提唱されているネットワーク構成である⁽¹⁾。ここでは基幹ネットワークを広域通信網でカバーし、末端を広域通信網に接続するためにゲートウェイを介して IoT エリアネットワークを設置するという親子構造となっている。IoT エリアネットワークに対して、安価でかつ緻密に網羅することが IoT

用無線技術の狙いとなる。

LPWA 無線は、先の三つのエリアに代表される比較的広域なサービスエリアに対し、容易なネットワーク構造 (スター構造の 1~数セル) でカバーできる無線通信方式の最有力候補となっている。しかし現時点では親子構造のネットワークに対して様々な通信方式が乱立しており、LPWA 無線を活用したサービスの展開を妨げている。この課題に対して各通信方式の特色を比較し、広域通信網と、多くの端末を接続する IoT エリアネットワークに最適な通信方式を提唱する。また、それぞれに最適な LPWA 無線方式を両立した 2 モード LPWA 無線 RF IC の概要と実装における課題と対策案を報告する。

2. LPWA 無線通信方式の比較

2.1 ライセンスト LPWA とアンライセンスト LPWA

LPWA 無線方式は、使用する無線周波数帯の違いによって、ライセンスト LPWA とアンライセンスト LPWA に分類される。ライセンスト LPWA は、周波数をライセンスされた特定事業者が独占的に使用する。サービスへ適用する場合、特定事業者より付与された周波数帯域を使用するために周波数干渉は生じることがなく、システムのロバスト性も担保されることになる。ライセンスト LPWA の代表格は LTE Cat. NB1^(用語)で、信頼性の高い携帯電話技術を発祥とした無線周波数帯とプロトコルスタックを搭載しているため、全国規模の広

小宮邦裕 ローム株式会社産機戦略部
E-mail kunihiro.komiya@dsn.rohm.co.jp
野田光彦 ラピスセミコンダクタ株式会社 LSC ローパワー LSI ビジネスユニット
E-mail noda698@dsn.lapis-semi.com
Kunihiro KOMIYA, Nonmember (Industrial Marketing Strategy, ROHM Semiconductor Co., Ltd., Kyoto-shi, 615-8585 Japan) and Mitsuhiro NODA, Nonmember (LSC Low power LSI business unit, LAPIS Semiconductor Co., Ltd., Yokohama-shi, 222-8575 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.101 No.10 pp.1024-1031 2018 年 10 月

本記事の著作権は著者に帰属します。

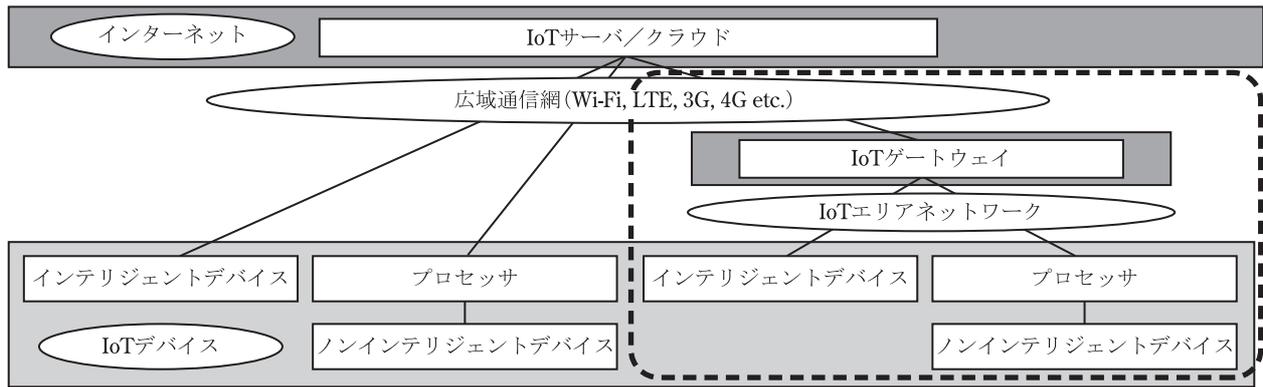


図1 IoTシステムの基本構成 (文献(1)から転載) 左部は、既存 M2M。太点線枠内は親子構造。子となる IoT エリアネットワークのコストや緻密さがIoTサービスの鍵。

表1 二つの LPWA 方式——アンライセンスバンドとライセンスバンド—— (©2018 LAPIS Semiconductor Co., Ltd.)

	LoRaWAN	Sigfox	IEEE802.15.4k	NB-IoT
使用バンド	920 MHz 帯アンライセンスバンド			ライセンスバンド
標準化団体	LoRa アライアンス	Sigfox 社	IEEE	3GPP
誤り訂正	FEC	なし	FEC	TURBO/Viterbi
セキュリティ	AES128			スマホ同等
消費電流	30~35 mA			300 mA
モジュール価格	数百円台			1,500 円
ランニングコスト	ベンダ依存	100 円/Y	0 円/Y	\$ 2/M (海外キャリア)

三つの差異

1. 無線周波数帯
2. プロトコスタック
3. セキュリティ

三つのメリット

1. 省電力
2. 端末価格安価
3. 低いランニングコスト

域通信網として活用が議論されている。

アンライセンスド LPWA は、送信パワー 20 mW を上限とする 920 MHz 帯 (日本国内) 特定小電力無線向けであり、LoRaWAN, Sigfox, IEEE802.15.4k などが広域通信網への適用候補として提案されている。これら方式は同じ周波数帯を使っているが、それぞれ独自のプロトコスタックであるため互換性はない。

表1にライセンスド LPWA とアンライセンスド

■ 用語解説

LTE Cat. NB1 3G/LTE 使用周波数帯で、IoT 向けに使用周波数を狭小化することで、通信距離を伸ばし、レイテンシとモビリティを制限することで、低電力化したセルラの通信規格。

SF 値 (Spreading Factor) スペクトル拡散方式において、受信感度を調整するパラメータで拡散率とも言う。SF 値が高い方が高受信感度となり、より長距離通信が可能となるが、電波法に規定された送信時間制限によって送信可能なデータ量が小さくなる。実使用時には、データレートと受信感度の兼ね合いで設定される。

LPWA をまとめた。これらの中には以下に示すように大きく三つの異なる点がある。1 点目は、無線周波数帯である。ライセンスド LPWA が使用する 905~915 MHz 帯は、2011 年から携帯電話事業者によって LTE に使用されている。一方、アンライセンスド LPWA が使用する 916~928 MHz 帯では、ある一定の無線特性を満たしていれば誰でも使用できるため、多様なシステムが混在することになる。多様なシステムが混在することによる電波衝突を避けるため、送信直前に該当チャネルが使用されていないことの確認 (キャリアセンス: CS) や、送信時間の上限規定を設ける等の電波法を定め、通信障害を回避している。

ライセンスド LPWA とアンライセンスド LPWA 間における 2 点目と 3 点目の差異は、プロトコスタックとセキュリティである。LTE Cat. NB1 は、3GPP により Rel. 13 で標準化され、3G/LTE の全国規模の広域通信網をベースにして、安定で強固なプロトコスタックとセキュリティが流用されている。しかし、IP コアのライセンス費用と回路規模が増大し、アンライセンスド LPWA と比較してコストが高くなり、消費電力が大き

表2 アンライセンスバンド LPWA 無線通信方式の比較 (©2018 LAPIS Semiconductor Co., Ltd.)

名称	IEEE802.15.4k	LoRaWAN	Sigfox
サービスの構成	自営	自営	公衆
通信方向	上り/下り	上り/下り	上り/下り
長距離化手法	DSSS スペクトル拡散の一種	CSS スペクトル拡散の一種	UNB 超狭帯域
物理層標準化	世界標準	オリジナル (一社独占)	オリジナル (仕様公開)
見通し通信距離	30~50 km	30~50 km	30~50 km
受信感度 (代表値)	-140 dBm	-140 dBm	-140 dBm
実効データレート	数百~数千 k (bit/s)	数百~数千 k (bit/s)	100 bit/s
国内電波法難易度	低 物理層標準化の恩恵	中 モジュールベンダ対応	低 先人により克服

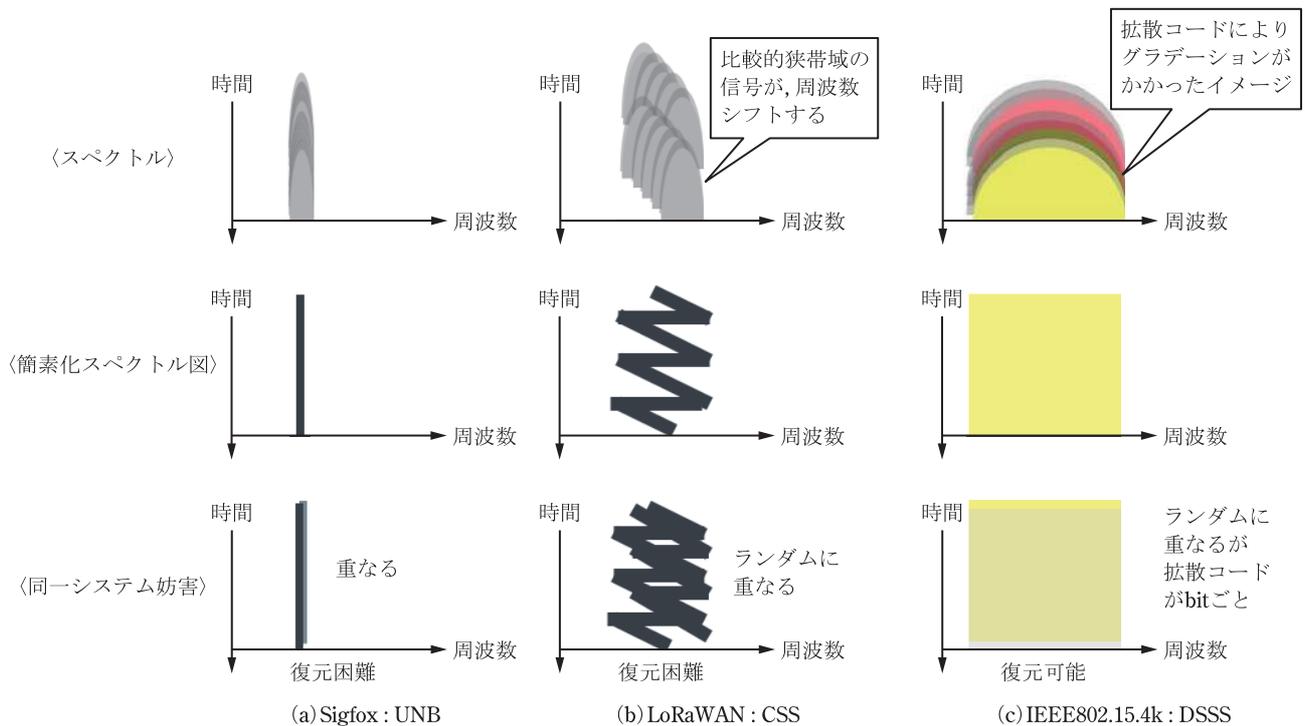


図2 アンライセンスバンド LPWA のスペクトルと妨害イメージ 三者のスペリアスのイメージを図示。DSSS=カラー、CSS=単色ギザギザ、UNB=単色一本線。色の違いは、重なっても分離が可能。(©2018 LAPIS Semiconductor Co., Ltd.)

くなるというデメリットがある。

2.2 アンライセンスド LPWA 無線方式の比較

アンライセンスド LPWA の代表的な通信方式である、LoRaWAN, Sigfox, IEEE802.15.4k の比較を表 2 に示す。

サービスの構成として、Sigfox が通信事業者によりネットワークが構築される公衆ネットワークであるのに対して、他 2 方式は、ネットワーク構築をサービスベンダが準備する、自営ネットワークである。サービス構成は違うものの、同じデータレート設定で比較すれば受信感度は同程度であり、見通し通信距離は変わらない。各方式で大きく異なるのは、長距離化手法である。長距離

化手法としてはスペクトル拡散技術と狭帯域化技術の二つがあり、IEEE802.15.4k と LoRaWAN はスペクトル拡散技術を用い、Sigfox は狭帯域化技術を用いている。

どちらの長距離化手法も、データレートを下げて受信感度を改善することにより通信距離を拡大している点で同じである。スペクトル拡散技術は原信号と伝搬信号のスペクトル比である SF 値 (Spreading Factor)^(用語) に比例する拡散利得を向上させることにより感度改善を実現している。一方で狭帯域化技術では、SN 比改善で感度改善を実現している。

以降、アンライセンスド LPWA のスペクトルと妨害イメージについて図 2 を基に説明する。

Sigfox で採用されている狭帯域化技術を説明する⁽²⁾。

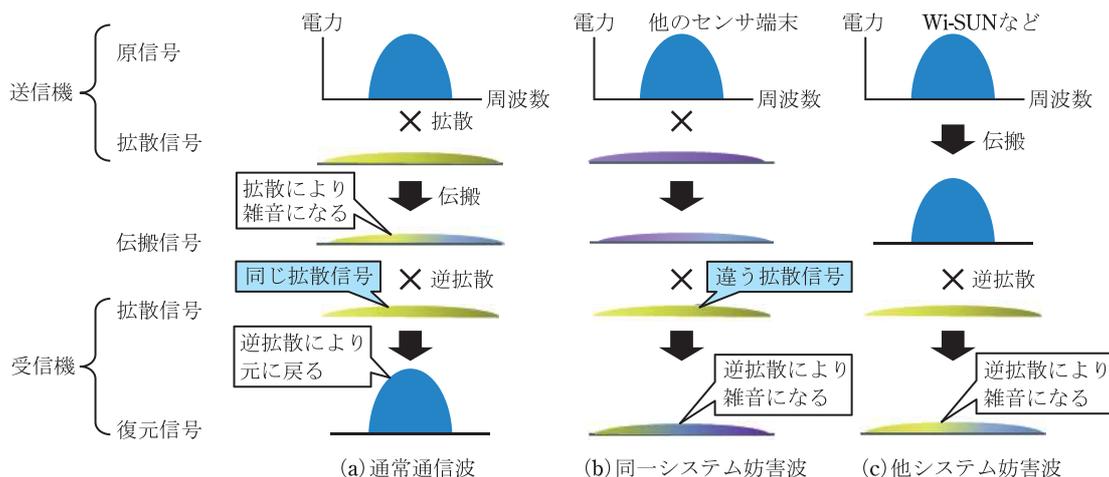


図3 DSSS (IEEE802.15k 拡散方式) の解説 正しい通信では、拡散と復調の拡散コードは同じ。(図中では、色が同じ。) 妨害波に足しては、送受で異なるコード(異なる色)になり、復調されないことが特長。(©2018 LAPIS Semiconductor Co., Ltd.)

Sigfox で規定されている信号帯域は 100 Hz である。特定小電力無線の代表的な Wi-SUN 通信の信号帯域 200 kHz に比較して帯域幅を狭くすることで、感度改善比は $0.1/200 = 10 \times \log(0.1/200) = 33$ dB 改善される。Wi-SUN 受信機の平均的な感度は -105 dBm であるので、Sigfox の場合は、 -138 dBm の感度を得られる計算となる。ただし、データレートと信号帯域は比例関係にあるので、Sigfox のデータレートは、Wi-SUN の 200 kbit/s に対して $1/2,000$ の 100 bit/s となる。狭帯域化技術による受信感度改善手法では、図 2(a) に示すように<同一システム妨害>における複数波形の分離は難しい。

次に、LoRaWAN が採用するチャープ拡散 CSS (Chirp Spread Spectrum) を説明する。CSS はベース変調した狭帯域信号の中心周波数を時間的に変化させることによってスプリアスを拡散させて拡散利得を向上させている。原信号の狭帯域スペクトルが時間とともにシフトしていく様子と、複数信号が重なった場合を図 2(b) に示す。本方式もまた、<同一システム妨害>における複数波形の分離が難しい。

最後に、IEEE802.15.4k が採用する直接拡散方式 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) を説明する。DSSS 方式は、伝送信号のビットごとに拡散コードと呼ばれる特定の雑音パターンを掛け合わせてスペクトル拡散が実施される。ある拡散コードで拡散された信号は、同じ拡散コードを使うことで正しく復調される。複数波形はそれぞれ異なった拡散コードで拡散されているため、拡散後の波形が重なった場合でも、図 2(c) のように波形ごとに異なる拡散コードで復調することにより、必要なデータだけを取得できる。

同一システムからの妨害波を想定し、拡散と復調で異なる拡散コードが適用された例を図 3(b) に示す。ここ

では、送信時の拡散コードと復調時の拡散コードに異なるものを適用したことを想定している。拡散と復調で異なる拡散コードを使用しているため、伝搬信号は復元されず雑音のままである。すなわち、同一システムからの妨害波を受信しても復調されない。

更に、国内の 920 MHz 帯では最も使用されていると思われる、電力スマートメータ向け Wi-SUN 通信等の、他通信システムからの妨害波受信の様子を図 3(c) に示した。ここでは、拡散コードで拡散されていない伝搬信号がスプリアスピークを持って伝搬されている。DSSS 無線システムの受信側で、復調のための拡散が実施されるため、雑音レベルの信号となる。このように、DSSS 方式を用いると同一システムの妨害波だけでなく、他システム妨害波に対しての耐性も高くなる。

今後、LPWA 無線を活用したネットワークが拡大すれば、電波到達圏内に設置される無線ノードの数も増加する。無線ノードが増加すれば通信障害確率も増加するが、上記のような DSSS 方式の強じんな妨害波耐性により、通信障害確率の低減には有望な方式であると考えられる。

3. 日本国電波法への適合性

国内の 920 MHz 帯は、ARIB STD-T108 で標準規格化されている。本稿は 1.0 版⁽³⁾を基に日本国内の電波法適合について考察する。

STD-T108 標準規格で制定されている無線チャネルを図 4 に示した。本稿では最大空中線電力 20 mW 通信が可能なチャネルで議論する。図 4 中の矢印下部に、STD-T108 で規定されているキャリアセンス時間と、最大送信時間を記載している。各通信方式において、電波法認証を取得するためには、この条件を満たす必要が

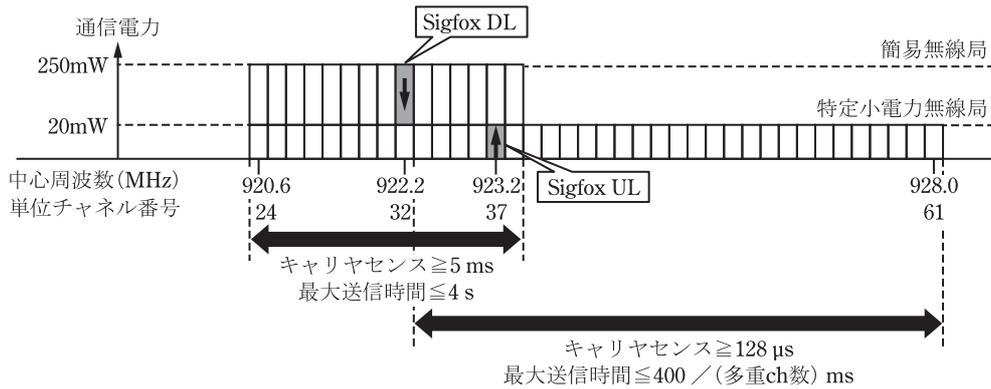


図4 ARIB STD-T108 のチャンネルアサインと各種規制 単位チャンネルは、200kHz 幅。チャンネルにより、キャリアセンス必要時間や送信時間が異なるため、それらに適合した作り込みが必要になる。(©2018 LAPIS Semiconductor Co., Ltd.)

表3 ARIB STD-T108 への適合例 (©2018 LAPIS Semiconductor Co., Ltd.)

名称	IEEE802.15.4k	LoRaWAN	Sigfox
長距離化手法	直接拡散 DSSS	チャープ拡散 CSS	狭帯域化 UNB
受信帯域幅	200 kHz × 2	125 kHz	600 Hz
受信感度例	-123 dBm @SF = 64	-136 dBm @SF = 1,024	-105-10 · log 200 k/200 -135 dBm
実効データレート	3.125 kbit/s @SF = 64	293 bit/s @SF = 1,024	100 kbit/s × (200 k/200) = 100 bit/s
T108 適合送出時間	200 ms	400 ms	4 s
正味ペイロードサイズ	最大 36 Byte @SF = 64	最大 4.8 Byte @SF = 1,024	固定 12 Byte

ある。

Sigfox では、上り UL (アップリンク) 時は、中心周波数 923.2 MHz の 20 mW 以下の特定小電力無線局として扱われている。下り DL (ダウンリンク) 時は中心周波数 922.2 MHz の 250 mW 以下で地上移動局として通信周波数を固定して使用している。IEEE802.15.4k や LoRaWAN は図中の全チャンネルを使用することが可能であるが、どちらの方式でも各チャンネルで規定されたキャリアセンス時間と最大送信時間を満足する必要がある。

最大送信時間は、無線通信時に送信可能なデータサイズを大きく支配する。最大送信時間内に送信できるデータ量が少なくなってしまうからである。各通信方式において送信可能なデータサイズを表3に最大正味ペイロードサイズとして示した。

LoRaWAN では、感度 -136 dBm を実現するために、SF 値を 1,024 に設定した場合、正味ペイロードサイズは 4.8 Byte となる。一度に送信できるデータ量が少ないため、アプリケーションの選択肢が狭くなり、使い勝手の悪いものとなる。スプリアス拡散方式を適用した無線通信方式を STD-T108 に適合させるためには、SF 値

とペイロードサイズにはトレードオフの関係があり、すなわち、受信感度をむやみに大きくできないことが分かる。一方、IEEE802.15.4k では、SF 値を 64 に設定することが一般的であり、そのときの最大正味ペイロードサイズは 36 Byte である。受信感度のある程度保ちながら、IoT エリアネットワークに使用されるセンサ端末に対しては十分な送信データ量を確保できる。

更に、キャリアセンスについて考える。STD-T108 では、単位チャンネル 200 kHz 幅のキャリアセンスが必要であることが規定されている。Sigfox の場合、自身の受信帯域幅は 600 Hz であるため、200 kHz 幅をキャリアセンスする回路を別に準備しなければならない。同様に、LoRaWAN の場合は、自身の受信帯域は 125 kHz であるため、200 kHz 幅をキャリアセンスするための回路を別で準備しなければならない。一方、IEEE802.15.4k では、帯域幅 400 kHz で通信しているため、自身の通信に使用している帯域幅で 200 kHz 幅のキャリアセンスが可能である。端末を開発する際には、IEEE802.15.4k が最も容易に STD-T108 適合可能であり、優れている点の一つであると言える。

4. LPWA 無線の課題を解決できる構成

以上を踏まえて、理想の LPWA 無線ネットワーク階層構造について以下に述べる。

4.1 理想の LPWA 無線ネットワーク構成

ライセンスド LPWA である LTE Cat. NB1 だけで図 1 点線枠に示した IoT エリアネットワークを構成した場合、端末設置費、及び通信ランニング費が上昇する。このコスト問題を解決するため、基幹ネットワークである広域通信網と、ゲートウェイを介した IoT エリアネットワークを最適な LPWA 無線方式で組み合わせるといふ図 5 に示すようなコンセプトを、筆者らは提案する。

広域通信網にライセンスド LPWA を配置し、IoT エリアネットワークにアンライセンスド LPWA を配置する構成である。緻密に張り巡らせる IoT エリアネットワークにアンライセンスド LPWA を活用することで、多数の端末設備費やその通信ランニングコストが削減可能となる。

広域通信網に適用する無線方式を考える。ライセンスド LPWA である LTE Cat. NB1 は、全国展開されている 3G/LTE の既設基地局のファームウェア変更で対応できるため、基地局を新設する投資を抑えることが可能で、広域通信網構築が実現しやすい。しかし、エリアカバー率の拡大は 2020 年以降と予測されており、直近でサービスを行う企業にとっては、エリアカバー率の低いことがビジネス拡大を目指す上での課題である。一方、Sigfox も、1 国 1 キャリヤを制定する公衆ネットワークとしてサービスを構成することができるため、ライセンスド LPWA である LTE Cat. NB1 の代替となり得る。また、2019 年度末で人口カバー率 99%⁽⁴⁾ (日本国内) を達成する計画であり、LTE Cat. NB1 の不安要因であ

る、エリアカバー率拡大の遅さをカバーできる。したがって、広域通信網に Sigfox を適用することが、ビジネス拡大に向けての近道である。

次に、IoT エリアネットワークに適用する無線方式を考える。IoT エリアネットワークには以下のような条件が求められる。

- ① 既に 920 MHz 帯が混雑している都市部での確実な通信
- ② 自治体エリアや企業拠点敷地エリア、共同体管理エリア等の広域ではあるが、限定された地帯での確実な通信
- ③ 人口カバー率マップでは空白となっている山間部や湖沼・沿岸部での確実な長距離通信

上記①、②では、妨害波耐性が重要な特性であり、先に述べた DSSS 方式を採用している IEEE802.15.4k 方式を採用することが最も適していると言える。

広域通信網には人口カバー率の早期拡大が見込める Sigfox を適用し、IoT エリアネットワークには、妨害波耐性に優れる DSSS 方式を採用した IEEE802.15.4k を適用することが、理想の LPWA 無線ネットワーク構成であると考えられる。

4.2 2 モード LPWA 無線通信 RF IC の開発

そのような背景から、全国サービス展開に最も近い Sigfox と妨害波耐性に優れた IEEE802.15.4k に対応可能な「2 モード LPWA 無線通信 RF IC」が必要であると考えられる。

しかし、2 モード LPWA 無線通信 RF IC を実現するにあたっては、DSSS 方式の実装に多大な努力を要する。DSSS 方式では、SF 値の最大設定値が回路規模に

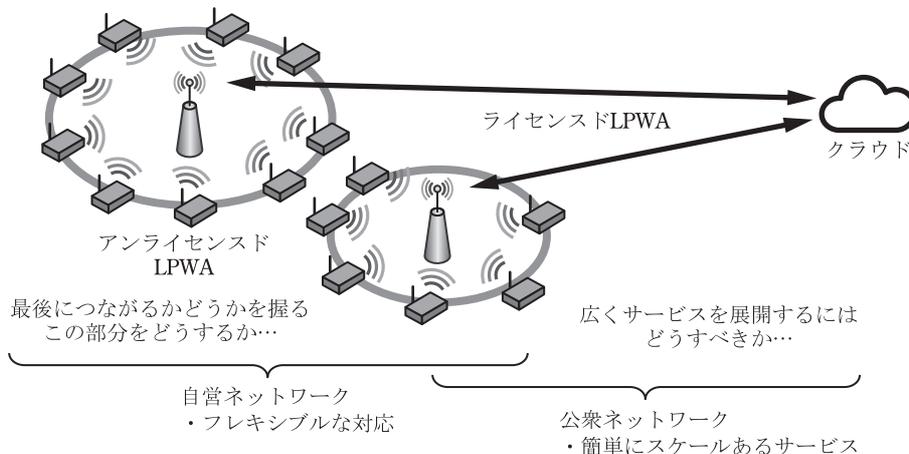


図 5 理想の LPWA ネットワーク階層構造 広域通信網にライセンスド LPWA を、IoT エリアネットワークにアンライセンスド LPWA を適用。サービスの構成として、公衆+自営のネットワークを構築することになる。(©2018 LAPIS Semiconductor Co., Ltd.)

大きく影響する。SF 値を大きくすればするほど受信感度がアップし、長距離化できることは前にも述べたが、SF 値の二乗に比例して回路規模は大きくなる。DSSS 受信側の復調回路には、送信側拡散コードと相関を見つけるための相関器回路が配置されるが、この相関器の個

数と精度（シフトレジスタの個数）がそれぞれ SF 値に比例するからである。この様子を図6に示す。図中の相関器の奥行方向が相関器の個数を表し、シフトレジスタの個数が相関器の精度を表している。

また、相関を演算しているときには、相関器中のシフ

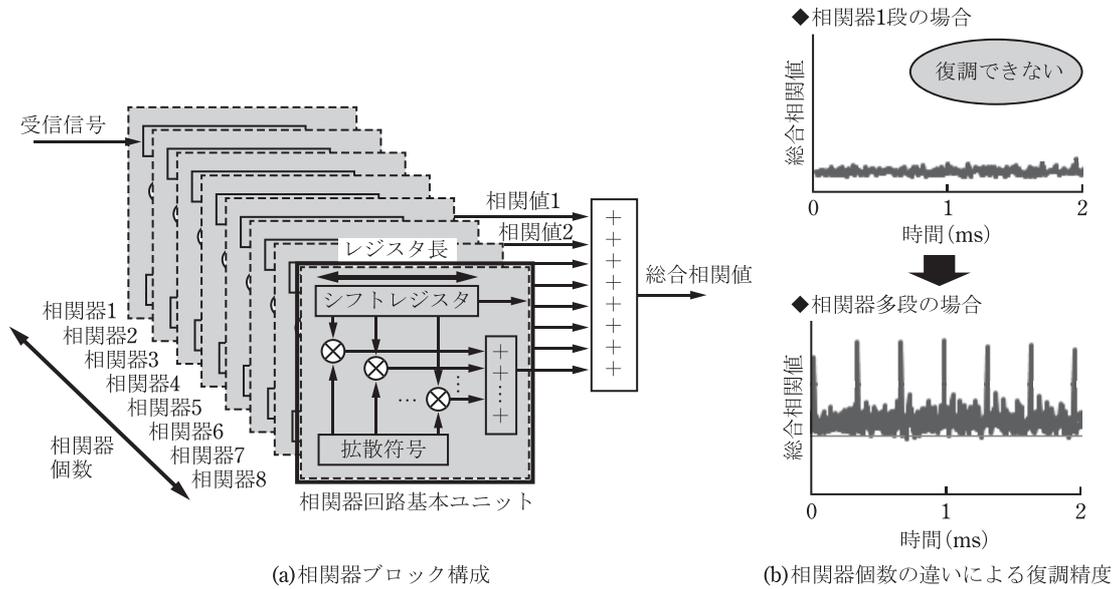


図6 拡散率 SF の最適化 拡散率 SF 値は、感度改善と回路規模・動作電流のトレードオフ。回路規模・動作電流は、SF 値の二乗で効いてくるため、むやみに大きな値にできない。(©2018 LAPIS Semiconductor Co., Ltd.)

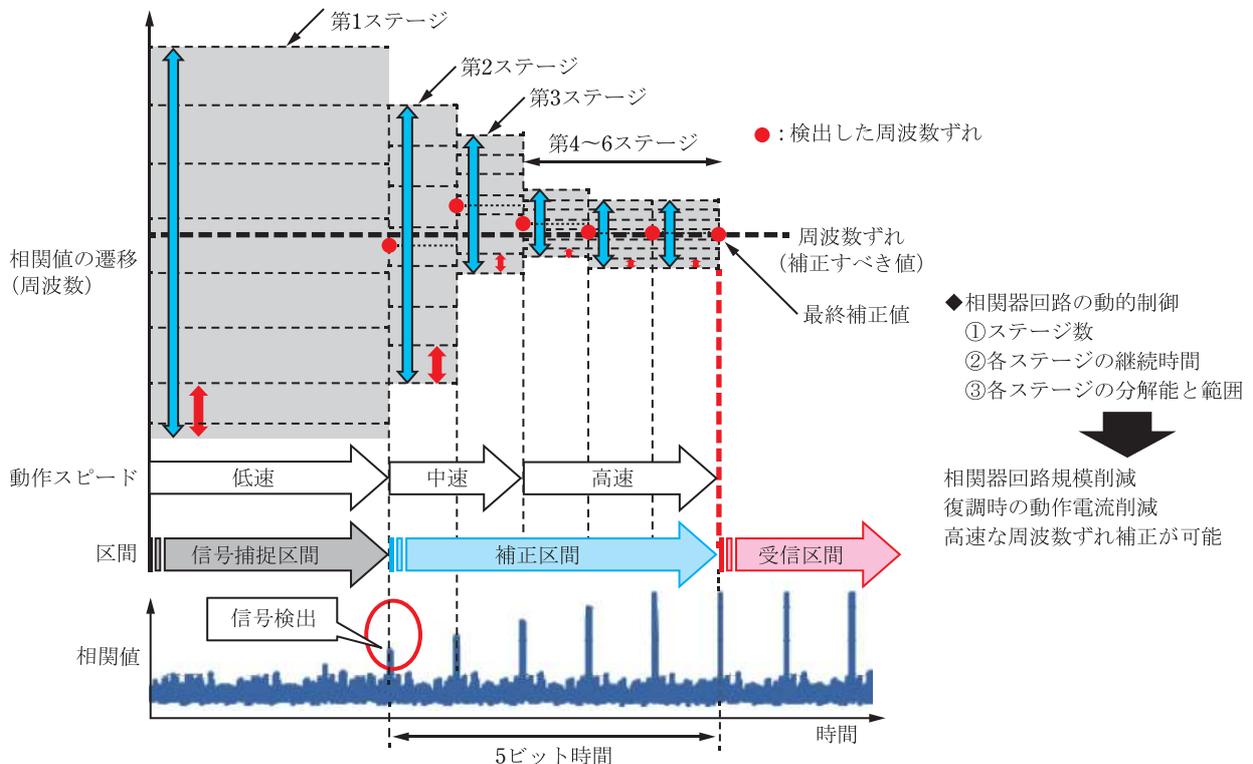


図7 相関器回路実装方法 復調のための相関器回路の実装は、回路規模・動作電流の増加に対する対策が必要。(©2018 LAPIS Semiconductor Co., Ltd.)

表4 2モードLPWA無線通信RF IC (ML7404)の主な仕様
(©2018 LAPIS Semiconductor Co., Ltd.)

項目	ML7404 主な仕様	
	Sigfox	IEEE802.15.4k
対応周波数	上り 923.2 MHz 下り 922.2 MHz	680~960 MHz
ベース変調方式	上り BPSK 下り GFSK	BPSK
長距離化手法	UNB	DSSS
転送速度	上り 100 bit/s 下り 600 bit/s	0.625~25 kbit/s
送信パワー	+10 dBm	+10/0 dBm
受信感度	-124 dBm	-121 dBm @200 kbit/s, 400 kHz
符号化方式	—	NRZ, マンチェスタ, 3 out of 6
その他	ウェークアップ機能, アドレスフィルタ機能 搭載, アンテナダイバーシチ	
電源電圧	1.8~3.6 V (1 mW)	
パッケージ	32ピン WQFN	

トレジスタが高速同期動作するために、受信時動作電流も大きく増えてしまう。この回路規模と動作電流の増大を抑え込むことが、DSSS方式をRF ICに実装する際の必須条件となる。この問題は、相関器動作の速度を動的に制御することで解決を図ることができる。図7のように、全回路を動作させるときには低速（低精度）で動作させ、対象周波数を絞り込んだ後に高速（高精度）で動作するように制御することで、回路規模の増大と動作電流の増加を抑えている。

本技術を適用した、2モードLPWA無線通信に対応したRF ICの例を表4に示す。広域通網向けのSigfoxと、IoTエリアネットワーク向けのIEEE802.15.4kをワンチップに搭載し、筆者らの提案する理想のLPWA無線ネットワーク構成を容易に実現できるものである。

5. む す び

本稿では全国規模の広域通信網とIoTエリアネットワークに最適な無線通信方式について、各方式の拡散方式の比較や、電波法適合の容易さの視点から考察し、それぞれに最適な通信方式を搭載した、2モードLPWA無線RF ICの概要と実装における課題と対策案を述べた。これらの技術は今後更なる発展が期待されるIoT技術に重要な視点である。

IoT市場におけるLPWA無線の普及は、これから本番を迎えるが、実サービスに有効なネットワーク構成を構築する提案を行うことが市場拡大をより加速させると考えられるため、先端的な技術開発を継続的に進めていくことが重要である。

文 献

- (1) モバイルコンピューティング推進コンソーシアム, IoT技術テキスト, (株)リックテレコム, 2016.
- (2) Semtech Corporation, SX1276/77/78/79 Datasheet, Nov. 2014.
- (3) ARIB Standard, "920 MHz 帯テレメータ用, テレコントロール用及びデータ転送用無線設備," 標準規格1.0版, Feb. 2014 策定.
- (4) 日比 学, "LPWAによるIoTビジネス最前線," ワイヤレスジャパン2018セミナー資料, 京セラコミュニケーションシステムズ株式会社, 2018.

(平成30年6月6日受付 平成30年7月4日最終受付)



こみや くにひろ
小宮 邦裕

平5 ローム株式会社入社。半導体アナログ回路設計者としてシステム電源等のシステムLSI開発に従事。平24からIoT関連市場に向けた新規事業開拓に従事し、センサデバイスや無線デバイスを活用したソリューション開発に従事。平29から、現マーケティング部門。



のだ みつひこ
野田 光彦

昭63 姫路工大(現兵庫県立大)・工卒。同年ローム株式会社入社。平23 OKIセミコンダクタ(現ラピスセミコンダクタ)株式会社出向。以来、無線通信LSI, 特にBluetooth Low EnergyやSubGHz無線LSIのマーケティングに従事。現在、ローパワーLSIビジネスユニットでマーケティング担当。