

# LoRa における動的拡散率制御を用いた時分割多元接続方式

石川 柊斗<sup>1,a)</sup> 向井 宏明<sup>1,b)</sup>

受付日 2022年4月21日, 採録日 2023年2月16日

**概要:** 近年, 省電力遠距離通信が可能な無線通信規格 (LPWA: Low Power Wide Area) を用いた IoT システムの開発が行われている. LPWA の一種である LoRa 通信では MAC 層に ALOHA 方式を用いており, 複数ノードによる通信では通信衝突が発生する可能性がある. そこで, 通信衝突を防ぐために時分割多元接続方式の適用が研究されている. しかし, 低速度な LoRa 通信では 1 ノードに対する通信間隔が大きく開き, システムのリアルタイム性が損なわれてしまう. 本稿では, 既存の時分割多元接続方式をベースに, 通信の信頼性と速度に関わる LoRa 拡散率の動的制御を用いることで, 伝送遅延を考慮した通信方法を考案し検証した.

**キーワード:** Low Power Wide Area, LoRa, time division multiple access

## Time Division Multiple Access with Dynamic Spreading Factor Control in LoRa

SHUTO ISHIKAWA<sup>1,a)</sup> HIROAKI MUKAI<sup>1,b)</sup>

Received: April 21, 2022, Accepted: February 16, 2023

**Abstract:** In recent years, IoT systems with low power wide area (LPWA) wireless communication standards have been deployed. LoRa is a kind of LPWA, and it employs ALOHA as its MAC protocol. ALOHA allows communication collisions, then it is a problem under the large number end-devices circumstance. Therefore, the application of the time-division multiple access method has been studied to avoid communication collisions. However, in LoRa communication, the communication interval for one node gets to be large because of its low data rate. As a result, the real-time performance of the system gets to be degraded. In this paper, we propose the time division multiple access with dynamic spreading factor control in LoRa based on the existing time division multiple access method. It optimizes the data latency and the reachability. This paper also reports the verification results.

**Keywords:** Low Power Wide Area, LoRa, time division multiple access

### 1. 序論

IoT の利用が広まる中, 図 1 に示すバスの現在位置をリアルタイムで表示するバスロケーションシステムのような交通機関における無線通信機器を用いた開発や研究が行われている [1]. 特に地方都市における公共交通機関は住民にとって必要不可欠であり, バスロケーションシステムの導入が進められている. しかし, バスロケーションシステムのデータ伝送に用いる無線通信技術において, モバイル通信規格のような高コストな通信は地方都市における運営



図 1 金沢市「ふらっとバス」バスロケーションシステム  
Fig. 1 Bus location system "FLAT BUS" at Kanazawa, Japan.

<sup>1</sup> 金沢工業大学  
Kanazawa Institute of Technology, Nonoichi, Ishikawa 921-8501, Japan  
<sup>a)</sup> b1816880@planet.kanazawa-it.ac.jp  
<sup>b)</sup> mukai.hiroaki@neptune.kanazawa-it.ac.jp

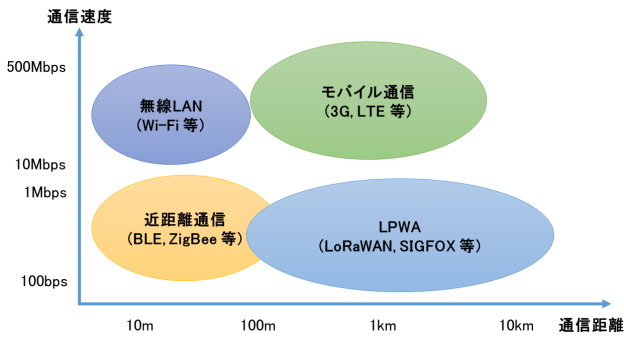


図2 Low Power Wide Area (LPWA) と無線通信システムの関係図

Fig. 2 Diagram of the relationship between Low Power Wide Area (LPWA) and other wireless communication systems.

に不向きである。これに対し、省電力で遠距離通信が可能な Low Power Wide Area (LPWA) を用いた低コスト化ネットワークの構築が行われてきた [2]。

LPWA の中でも、LoRa 通信は実用距離が数 km あり、プライベート LoRa のような通信費がかからない規格も存在する。しかし、LoRa 通信では MAC 層に ALOHA 方式を用いていることから、複数のノードの通信時刻が重なると通信衝突が発生することがある。近年、IoT の進展に伴いデバイスが増加傾向にあるため、通信衝突が増加してしまう危険性が高い。

そこで、通信衝突を防ぐために「時分割多元接続方式による無線通信システム及び無線通信方法」が研究されてきた [3]。無線通信システムに時分割多元接続方式 (TDMA) を取り入れることで、各ノードの通信開始時刻を一定間隔で開けることで通信衝突をふせぐことが可能である。しかし、図 2 のように LPWA は LTE や Wi-Fi のような他の通信規格に比べ通信速度が遅いため、接続ノード数が増加するほど通信間隔が大きく開いてしまう。そのため、バスロケーションシステムのようなリアルタイム性が重視されるシステムには、適していない [4]。

本稿では、「時分割多元接続方式による無線通信システム及び無線通信方法」をベースに、伝送速度と信頼性のバランスを調整する LoRa 拡散率の制御を用いて伝送遅延を考慮した多元接続の手法を提案し、検証を行った。

## 2. 時分割多元接続方式を用いた LoRa 通信の既存研究

### 2.1 LoRa を用いた通信

Low Power Wide Area (LPWA) とは、低消費電力で遠距離通信を実現する通信方式である。LPWA は「ライセンス系」と「アンライセンス系」に分かれており、ライセンス系は通信時に無線局免許が必要なのに対しアンライセンス系は不要である。また LPWA 中でもセルラー系 LPWA のように、携帯キャリアが運営するセルラーネットワークを用いた規格がある。

表 1 拡散率の変更における通信特性の変化

Table 1 Relation between communication characteristics and spreading factor.

拡散率(SF 値)	小	大
干渉波の影響	増大	減少
受信感度最大値	低下	上昇
データレート	上昇	低下

LoRa は、アンライセンス系の非セルラー系 LPWA であり、LoRaWAN という標準規格と LoRaWAN を用いないプライベート LoRa と呼ばれる通信方式に分けられる。LoRaWAN は LoRa 用に設計された Media Access Control (MAC) 層におけるプロトコルで、Class A, Class B, Class C の 3 つのクラスに分類され、効率的なアクティブ制御を行い、消費電力を抑える。

また、LoRAWAN は LoRa 専用のネットワークサーバを使用するため既設の媒体を使用できコストを抑えることができる。それに対し、プライベート LoRa は会社ごと独自のプロトコルを使用しており、自由度の高い設計が行える [5]。

### 2.2 LoRa の通信特性

LoRa を用いた通信における伝送時間は LoRa MAC 層のパラメータである LoRa 拡散率と帯域幅の選択に依存している。また、LoRa 通信の信頼性はパケット伝送率である Packet Delivery Ratio (PDR) で測定することができる。PDR は受信側のノイズ比率を表す Signal-to-Noise Ratio (SNR) と受信レベルを表す Received Signal Strength (RSS) に依存している。

表 1 に拡散率 Spreading Factor (SF) の値における通信特性の変化を示す。SF 値はスペクトラム拡散方式の無線通信において送信データ速度である bit rate に対する拡散符号速度である chip rate の比を表す。SF 値を大きくすることで電波の受信可能な感度を大きくすることができる。そのため干渉波の影響が抑えられ低い RSS でパケットを受信できるがデータレートを低下させる。つまり、SF 値を選択することで LoRa 通信におけるデータレートと通信範囲を決定することができる [6]。

### 2.3 時分割多元接続方式を用いた通信

図 3 に ALOHA 方式と時分割多元接続方式における通信のチャートを示す。LoRa 通信で多く採用されている ALOHA 方式では各ノードが任意の時刻にデータを送信するため、通信衝突が発生し送受信に失敗することがある。特にデータの送信頻度やノード数の増加によって発生率もともに増加してしまう。

通信衝突の発生を防ぐために「時分割多元接続方式によ

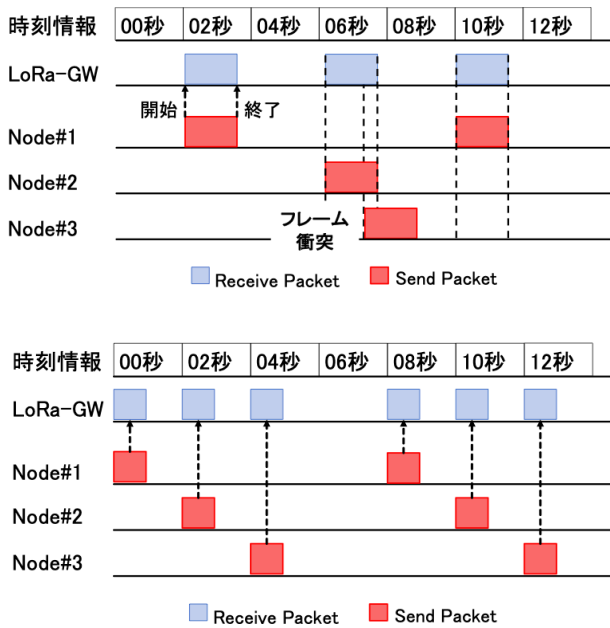


図3 ALOHA方式(上)と多元接続方式における通信チャート(下)

Fig. 3 Communication flowchart of ALOHA and TDMA.

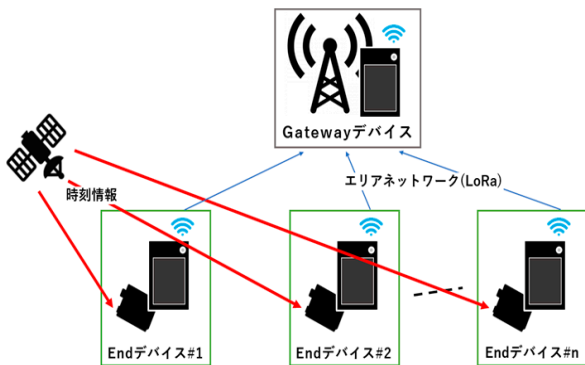


図4 衛星システムを用いた多元接続方式の概要図

Fig. 4 Schematic diagram of the multiple access with the satellite system.

る無線通信システム及び無線通信方法」が研究されてきた[3]。図4に既存システムの概要図を示す。既存の研究では衛星測位システムからの時刻情報をデバイスのデータ送信タイミングに転用している。その時刻情報をもとにデバイスごとスケジューリングされたタイミングでデータの送信を行い、通信衝突の発生を防いでいる。

### 3. 時分割多元接続方式を用いたLoRa通信における課題

図5に2.3で述べた既存システムにおける通信タイミングチャートを示す。既存システムでは通信速度が遅いLoRa通信の場合、通信するノード数が増えるほど1ノードにおける通信間隔が大きく開いてしまう。そのため、リアルタイム性が求められるアプリケーションには適していない。

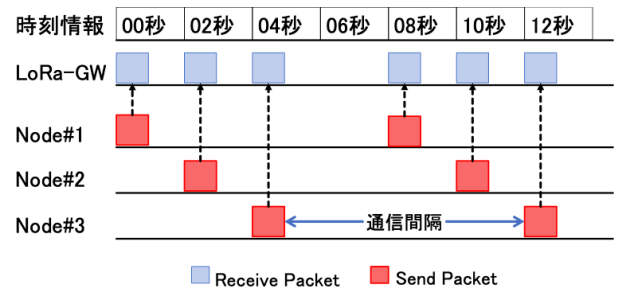


図5 多元接続方式における通信チャート

Fig. 5 Communication flowchart in TDMA.

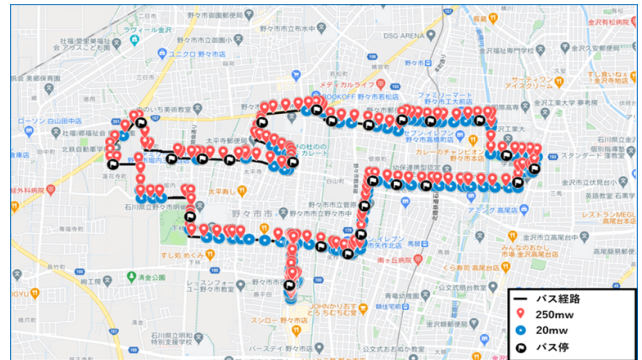


図6 LoRaを用いたバスロケーションシステムの実験とバス停間隔

Fig. 6 Experiment result of bus location system with LoRa and the location of bus stops.

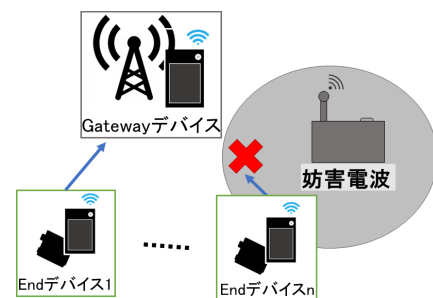


図7 無線通信における第三者による妨害や通信障害

Fig. 7 Interference or communication problems caused by outsiders in wireless communications.

図6にバスロケーションシステムの研究開発[2]におけるLoRaを用いた送受信とバス停の位置関係を示す。バスロケーションシステムのような移動体における通信では、RSSがリアルタイムで変化する。既存のシステムでは、各ノードから事前に設定されたスケジュールとパラメータで一方的に送信される。そのため、常にそのシステムで必要な通信の信頼性を保つための最大SF値を設定する必要がある。つまり、リアルタイム性と通信の信頼性のバランスが欠如する可能性がある。

また、図7のように第三者による妨害や通信障害が発生した場合、一方的に送信し続けるEndデバイスは通信環境を把握する術がないため、不安定な通信を続ける可能性がある。

## 4. LoRa 拡散率における動的制御の提案

### 4.1 LoRa 拡散率の動的制御を用いたシステムの提案

前章で記述した課題を解決するため、Gateway デバイスにおいて通信環境をモニタリングしリアルタイムで End デバイスの通信パラメータである拡散率を制御することでシステムのリアルタイム性と通信の信頼性を両立させるシステムの開発を考案した。本章では提案システムにおける LoRa 拡散率の動的制御の方法を提案する。

### 4.2 LoRa 拡散率制御による遅延短縮

図 8 に本稿で使用する LoRa モジュール「RM-92A」の帯域幅 125 KHz・ペイロード 10 byte 時における各拡散率 (SF 値) での最大受信感度と転送時間の相関図を示す。横軸は通信の受信感度 (RSSI) の最大値、縦軸は転送にかかる時間である。

各 SF 値における最大受信感度と転送時間は負の相関関係にあり、SF 値を増加すると最大受信感度が上昇し転送時間を拡大させ、SF 値を減少すると最大受信感度が低下し転送時間を縮小させる。また、各 SF 値の最大受信感度と転送時間は指数関数的な関係であるため、LoRa 拡散率は、SF 値 8 から 7 への変更時より 12 から 11 への変更時のほうが転送時間をより縮小させる [7]。

以上のデータより、LoRa 拡散率を通信環境に適応するよう制御することで、通信の信頼性の向上と転送時間の縮小のバランスを図ることができる。

### 4.3 LoRa 拡散率の動的制御

#### 4.3.1 LoRa モジュールの動的制御

図 9 に LoRa モジュールの動的制御の方法を図で示す。4.1 で述べたように、通信の信頼性と転送時間のバランスを維持するためには、LoRa モジュールの拡散率を通信環境に適応させる必要がある。しかし、移動体における通信システムでは常に通信環境が変化するため、LoRa モ

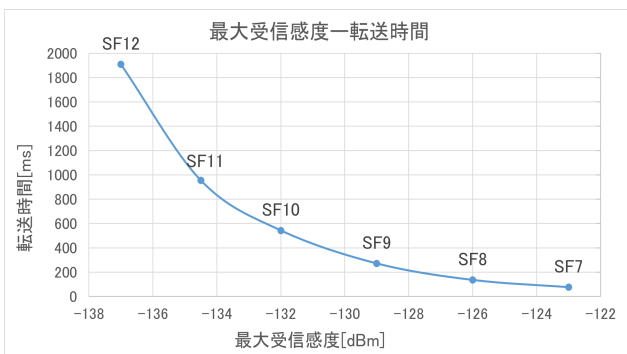


図 8 RM-92A LoRa モジュール使用時の各拡散率における最大受信感度と転送時間

Fig. 8 Maximum receiving sensitivity and transmission time at each spreading factor with RM-92A LoRa module.

ジュールを動的に制御し LoRa 拡散率などのパラメータを設定させることが望ましい。

LoRa 拡散率の動的制御に、マイコンを用いた 2 種類の LoRa モジュールの動的制御方法が考えられる。図 9 左側の Module Reset 方式では、マイコンに接続した LoRa モジュールのリセットピンを用いることで LoRa モジュールの再起動と設定の変更を行っている。図 9 右側の Module Command 方式では、モジュール特有のコマンドを用いることで LoRa パラメータの設定を変更している。

Module Reset 方式は多くの通信モジュールで用いることができるが、モジュールの起動と設定に時間を要する。それに対し、Module Command 方式は該当する機能を持ち合わせた通信モジュールが必要になるが、拡散率設定のみを行うため比較的時間がかからない。

本システムではリアルタイム性を重視し拡散率を短時間で変更できる Module Command 方式を採用しており、RF-LINK 社の LoRa モジュールにおける AT-Command Mode を用いた。

#### 4.3.2 受信レベルによる通信の評価

表 2 に本システム内における LoRa 拡散率の動的制御に用いる受信感度の閾値を示す。通信における受信感度を示す RSSI は値が低くなるにつれ、デバイス間の障害物や距離によって通信環境が悪化していると言える。

本システムでは、搭載した LoRa モジュールから通信時

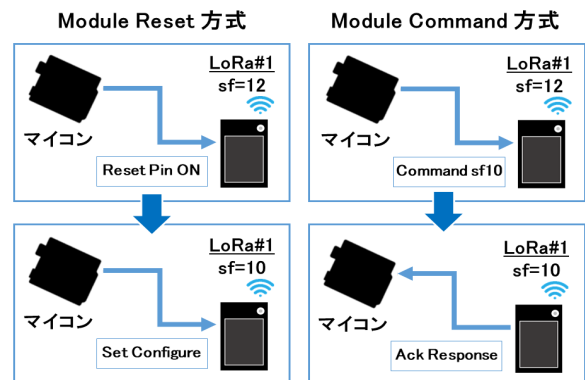


図 9 Module Reset 方式と Module Command 方式

Fig. 9 LoRa Module Reset method and LoRa Module Command method.

表 2 システム内における各 SF 値の RSSI 閾値と付与時間

Table 2 RSSI threshold and time slot allocation for each SF value in the system.

RSSI 範囲 [dBm]	$\geq -120$	$\geq -125$	$\geq -130$	$-131 \leq$
設定 SF 値	SF=7	SF=9	SF=11	SF=12
最大 RSSI [dBm] と 転送時間 [ms]	-123.0, 76	-129.0, 271	-134.0, 954	-137.0, 3500
付与時間 [ms]	1500	2000	2500	3500

の受信側より RSSI を取得し、通信状況をリアルタイムで評価している。評価値より通信に適応した拡散率 (SF 値) を設定し、通信の信頼性と転送時間を最適化している。

表 2 では、SF 値を決定する際に用いる RSSI の閾値を示している。4.1 より、各 SF 値における最大受信感度と転送時間は指数関数的に負の相関関係があることから、移動体における通信環境の変化に適応した閾値を設定した。転送時間が大きく短縮される SF=12 から SF=11 は閾値を細かく設けることで転送時間の縮小の影響をもたらし、転送時間の変化が少ない SF=10 から SF=7 は閾値の間隔を大きく開けることで、最大受信感度にゆとりをもたらしている。

以上の点から、本システムでは通信状況を 4 段階に分け通信の評価を行い、SF 値を設定している。

### 4.3.3 拡散率制御によるタイムフレームの設定

図 10 に LoRa 拡散率の動的制御による可変送信時間を用いた際の通信チャート図を示す。本システムでは Gateway による同期通信から全 End デバイスの通信終了までを 1 周期とし、時分割多元接続方式における各 End デバイスからのデータ転送に必要な時間を、拡散率 (SF 値) に基づいて算出された付与時間として各 End デバイスへ

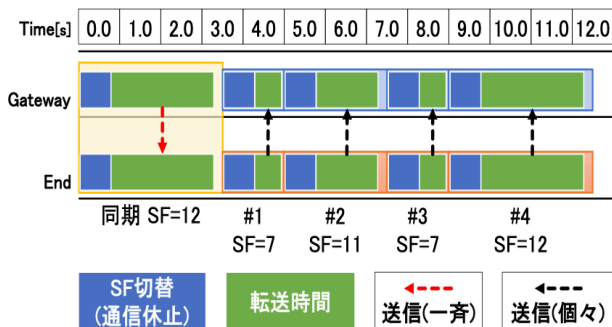


図 10 動的拡散率制御に伴う通信チャート図

Fig. 10 Communication chart diagram for dynamic spreading factor control.

割り当てる。

表 3 に本システムの SF 値と付与時間の関係を示す。付与時間の算出は 4.2.2 で設定した SF 値における転送時間、SF 設定の切り替えにかかる時間をもとに行っている。SF 値の切り替え時間は 4.3.1 で記述した Module Command 方式におけるコマンドと LoRa Module からのレスポンスにかかる時間であり、本システムでは約 750 ミリ秒で行われる。

表 4 に ARIB の 920 MHz 帯における標準規格で決められているパラメータの組み合わせを示す。表 4 では本稿で使用する 20 mW 出力におけるパラメータの組み合わせを抜粋している。本稿では 1 時間あたりの送信総和時間の制限を除外するためにキャリアセンス時間を 5 ms 以上・休止時間を 50 ms 設けている。また、1 回あたりの送信時間制限を 4 s に設定し通信を行っている。その他のパラメータ制限を表 4 で示す。

本システムでは各 End デバイスは毎周期 Gateway とパラメータの同期を行い、同期時刻と付与時間を基に通信タイミングをスケジューリングする。

同期とスケジューリングを繰り返し行うことで、衛星システムからの時刻情報を用いることなく時分割多元接続方式を用いることができる。

表 3 拡散率と付与時間

Table 3 Relation between the spreading factor and time slot assignment.

LoRa 拡散率	SF=7	SF=9	SF=11	SF=12
転送時間(10byte) <sup>※1</sup>	80	270	955	1900
試作時の転送時間	725	1000	1500	2500
SF 切替 <sup>※2</sup>	750	750	750	750
付与間隔	=1500	=2000	=2500	=3500

※1 ペイロードサイズ、値は MAC ヘッダを含んだ時間 すべて[ms]  
 ※2 通信休止時間(50ms) キャリアセンス(5ms)も兼ねる

表 4 ARIB の 920 MHz 帯における標準規格

Table 4 ARIB standard in the 920 MHz band.

#	送信電力	適用 CH	CH 帯域幅	同時使用 CH	キャリアセンス時間	送信時間制限	休止時間	1 時間送信時間総和	キャリアセンス除外	
									完了時間	開始時間
1	20mW 以下	24-38	200kHz	1-5cH	5ms 以上	4s	50ms	None	—	—
2		33-61	200kHz	1ch	128μs	200 ~ 400ms	送信時間 10 倍 または 2ms	360ms 以下 または 720ms 以下	50ms 以下	2ms 以下
3						6~200ms	2ms			
4						6ms 以下	None			
5				3~200ms		2ms				
6				3ms 以下		None				
7				2~200ms		2ms				
8				2ms 以下		None				

## 5. LoRa 拡散率動的制御を用いた時分割多元接続の実現

### 5.1 システム概要

図 11 にシステム概要図を示す。本システムでは、4章で述べた LoRa パラメータの動的制御を用いた時分割多元接続による通信を行っている。通信は、1 台の Gateway デバイスを親機とし複数台の End デバイスを子機と設定し行っている。

#### 5.1.1 受信感度の測定と拡散率の算出

Gateway デバイスは各 End デバイスからデータを受信する際に受信感度 (RSSI) を測定する。測定した RSSI を基に通信評価を行い、最適な拡散率 (SF 値) を算出する。(図 11 中①)

通信評価を表 5 に示す。通信評価は RSSI を基準に 4 段階で行われる。

#### 5.1.2 パラメータの同期

各デバイスの SF 値の算出を終えた Gateway デバイスはブロードキャスト通信を行い、全 End デバイスとパラメータの同期を行う。(図 11 中②)

#### 5.1.3 パラメータの設定と送信

パラメータデータを受け取った End デバイスは自機の通信設定を行い、全デバイスの付与間隔を参考に送信タイミングの制御を行う。(図 11 中③)

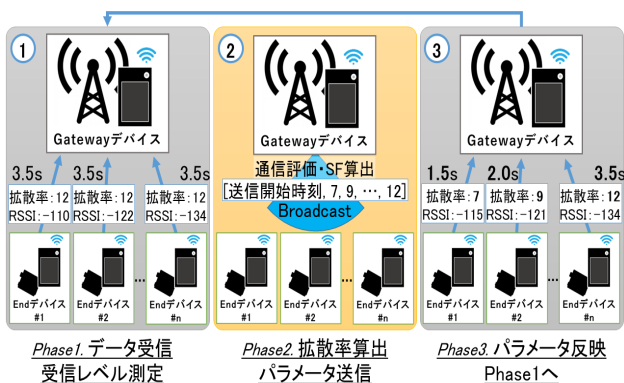


図 11 提案システムの概要

Fig. 11 Overview of the proposed system.

表 5 RSSI を基準とした通信評価

Table 5 Communication evaluation based on RSSI.

RSSI範囲 [dBm]	-120 以上	-121 ~ -125	-126 ~ -130	-131 以下
通信評価	最良	良	悪	最悪
設定SF値	SF7	SF9	SF11	SF12
付与間隔 [ms]	1500	2000	2500	3500

### 5.2 ハードウェア構成

図 12 に Gateway デバイス (左側) と End デバイス (右側) のハードウェア構成図を示す。

図 12 (左) の Gateway デバイスではマイコンコンピュータである Raspberry Pi 3 model b+ を用いて RF-LINK 社の LoRa モジュール「RM-92A」をシリアル通信で制御している。RM-92A は外部にアンテナ線を用いてアンテナを取り付けている。防水ボックス内では仕切板を用いてブレッドボードとマイコンコンピュータの 2 層構造となっている。また、Raspberry Pi は外部から電源と入出力機器を接続しており、システムの操作を行っている。Gateway デバイスは屋内での使用を想定し、Raspberry Pi は Wi-Fi 接続を行い収集データの保存や時刻情報の取得を行っている。

図 12 (右) の End デバイスでは Gateway デバイスと同様のマイコンコンピュータを使用し、シリアル変換器を用いて同時に LoRa モジュールと GPS モジュールをシリアル通信で制御している。また、End デバイスは防水ボックス内で 2 層構造のデバイスとモバイルバッテリーが接続されているため、ボックス単体で動作することができる。

### 5.3 ソフトウェア構成

図 13 に本システム全体の構成図を示す。本システムでは LoRa パラメータの動的制御を行うため RM-92A LoRa モジュールの AT-Command mode を使用している。

また、図 14 に Gateway デバイスのソフトウェア構成図を示す。Gateway デバイスでは以下の機能を備えており、Python プログラムを用いて図 14 のシステムを構成している。

- Packet Collector  
LoRa モジュールからシリアル通信を用いて受信パケットを読み込む。
- SF Selection Algorithm  
受信パケットから RSSI を取得し、デバイス間の

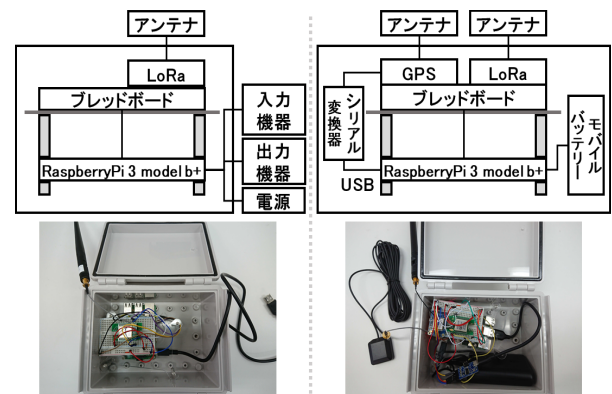


図 12 Gateway デバイス (左) と End デバイス (右) のハードウェア構成

Fig. 12 Hardware configuration of gateway device (left) and end device (right).

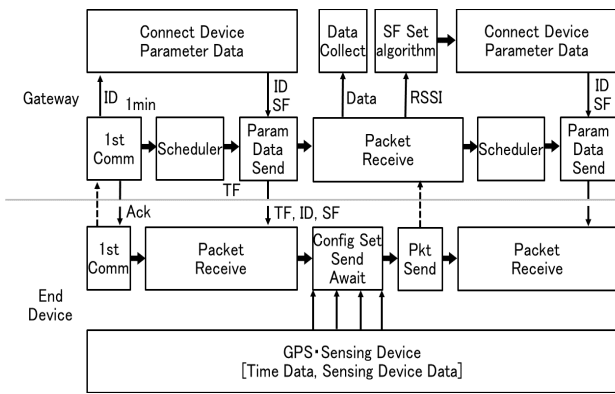


図 13 システムのソフトウェア構成図  
Fig. 13 Software configuration diagram.

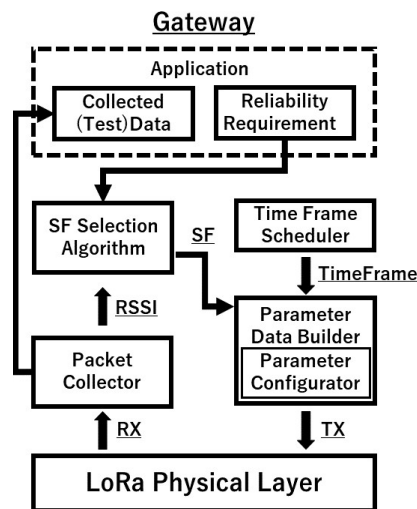


図 14 Gateway デバイスのソフトウェア構成図  
Fig. 14 Gateway software configuration diagram.

LoRa 拡散率 (SF 値) を設定する。

- Collected Data・Reliability Requirement  
受信パケットから収集したセンサデータを取得・保存する。パラメータやタイムフレームの設定に必要な閾値や設定値を保存しておく。
- Time Frame Scheduler  
送信開始時刻の設定と各デバイス間の SF 値より受信間隔のスケジュールを行う。
- Parameter Data Builder  
「送信開始時刻・使用 CH・各デバイスの SF 値」含むパラメータデータを生成し、End デバイスへの送信パケットを生成する。

図 15 に End デバイスのソフトウェア構成図を示す。End デバイスでは以下の機能を備えており、Python プログラムを用いて図 15 のシステムを構成している。

- Packet Collector  
Gateway デバイスからブロードキャスト送信で送られてきたパケットを受信する。受信パケットからパラメータデータを取得し、タイムフレームの計算と自機

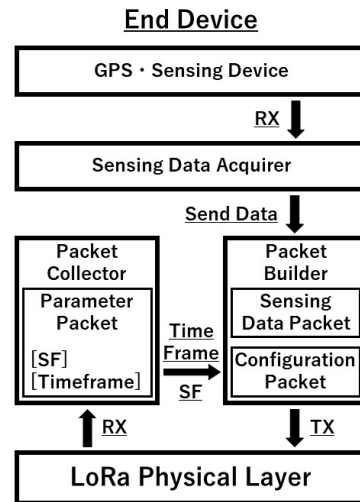


図 15 End デバイスのソフトウェア構成図  
Fig. 15 End device software configuration diagram.



図 16 移動体通信における提案システムの評価方法

Fig. 16 Evaluation methods for the proposed systems in mobile communications.

で使用する CH と SF 値の参照を行う。

- Sensing Data Acquire  
GPS などのセンシングデバイスからセンサデータを取得する。可能な場合は時刻情報を取得し、送信タイミングに転用する。
- Packet Builder  
取得したセンサデータを送信パケットに格納する。参照した CH と SF 値をもとに LoRa パラメータの設定を行う。タイムフレームに従い、スケジュールされたタイミングで送信を行う。

## 6. 提案方式の評価

### 6.1 評価方法

#### 6.1.1 移動体通信における動的 LoRa 拡散率制御の評価方法

図 16 に本システムを用いた移動体通信における評価方法の考案図を示す。評価方法を考案するために、同 LoRa モジュールを用いて測定・予想を行った。金沢工業大学や

つかほりサーチキャンパス内での簡易測定の結果は図 16 の左図のようになっている。これらの通信環境を参考に移動体のルート（右図）を決定し、通信を行う。

通信実験では、転送時間が最短の拡散率（SF）SF=7、中間のSF=9、受信可能感度が最大のSF=12、本システムを用いて10分間計測する。本システムにおけるSF値は通信状態に合わせて動的に変更される。

評価方法はSF=7, 9, 12を用いた通信と本システムを用いた通信時におけるパケット受診率と単位時間あたりの送信回数を比較し、本システムにおける通信の信頼性とリアルタイム性を検証する。

**6.1.2 時分割多元接続を用いた通信における動的拡散率制御の評価方法**

図 17 に本システムにおける時分割多元接続通信の評価方法の考案図を示す。6.1.1と同様に簡易測定を行い、システム内で使用する通信環境の基準にあった通信場所を選定した。Gateway デバイス 1 台に対し、番号 1~4 の場所に設置した End デバイス 4 台の時分割多元接続を用いた同時通信を行う。

通信は、SF=12, 9, 7 を用いた場合と本システムを用いた場合で行う。本システムにおける各 End デバイスの SF 値はデバイスごとの通信環境にあわせて動的に変更される。

評価方法はSF=7, 9, 12を用いた通信と本システムでの通信時における各デバイスのパケット受診率と単位時間あたりの送信回数を比較し、本システムにおける通信の信頼性とリアルタイム性を検証する。

**6.2 評価結果**

**6.2.1 移動体通信における評価結果**

表 6 に 6.1.1 で述べた移動体通信における本システムの評価結果を示す。表 6 における拡散率の行は実験に用いた拡散率を示し、既存策として拡散率（SF 値）7, 9, 12 を用いて通信実験を行い、Auto では本システムの動的拡散率制御を用いて通信実験を行った。



図 17 時分割多元接続通信における提案システムの評価方法  
Fig. 17 Evaluation method for proposed systems in time division multiple access communication.

パケット受信率の行は Gateway デバイスにおいて 10 分間で End デバイスから LoRa 通信を用いて送られたデータの受信率 [%] を示す。パケット送信回数の行は、End デバイスにおいて 10 分間でデータを送信した回数 [回] を示す。

3.1 で述べたように、拡散率の値が低いSF=7から高いSF=12に変更するとともにパケット受信率が上がるのに対し、パケットの総送信回数が減っていることが分かる。Auto 列は、パケット受信率 97.5%・パケット送信回数 120 回であり、SF=12 は、パケット受信率 98.8% パケット送信回数 172 回であった。よって提案方式は、SF=12 と比較し十分なパケット受信率を保っている。しかし、Auto 列における送信回数は既存の通信方法に対し減少していることが分かる。

**6.2.2 時分割多元接続を用いた通信における評価結果**

表 7 に 6.1.2 で述べた時分割多元接続方式による複数デバイスを用いた通信における本システムの評価結果を示す。既存の LoRa 拡散率を固定した通信方法も同様に実験を行い比較した。

表 7 における拡散率の行は実験に用いた全デバイスの拡散率を示し、既存策として拡散率 7, 9, 12 を用いて通信実験を行い、Auto では本システムの動的拡散率制御を用いて通信実験を行った。

パケット平均受信率の行は Gateway デバイスにおいて 10 分間で全 End デバイスから LoRa 通信を用いて送られたデータの受信率の平均 [%] を示す。パケット総送信回数の行は、各 End デバイスにおいて 10 分間でデータを送信した回数の総和 [回] を示す。

6.2.1 と同様に拡散率の値が低いSF=7から高いSF=12に変更するとともにパケット受信率が上がるのに対し、パ

表 6 移動体通信実験における評価結果

Table 6 Evaluation results in mobile communication.

	既存			提案
	SF=7	SF=9	SF=12	Auto
拡散率				
パケット受信率[%]	59.8	82.3	98.8	97.5
パケット送信回数[回]	400	300	172	120

表 7 時分割多元接続方式を用いた通信実験における評価結果

Table 7 Evaluation results of communication experiments with time division multiple access.

	既存			提案
	SF=7	SF=9	SF=12	Auto
拡散率				
パケット平均受信率[%]	47.0	74.0	97.7	96.7
パケット総送信回数[回]	400	300	171	182



ケットの総送信回数が減っていることが分かる。Auto列は、パケット受信率 96.7%・パケット送信回数 182 回であり、SF=12 は、パケット受信率 97.7%パケット送信回数 171 回であった。提案方式は、各デバイスが通信状況に適した動的拡散率制御を行っているため、SF=12 に近い十分なパケット受信率を保ちつつ SF=12 よりパケットの総送信回数を増加させている。

## 7. 考察

### 7.1 提案方式におけるリアルタイム性に関する考察

6.2.2 の通信結果から、一定数の End デバイスにおける通信環境が良好な場合、LoRa における動的拡散率制御を既存の時分割多元接続方式に用いることで、十分な通信の信頼性を保ちつつリアルタイム性を保持したデータ収集することができることが分かる。

一方、6.2.1 の通信結果から、本システムにおいてデバイス数が少ない場合、パラメータの同期に用いる通信の分、1 サイクルにおけるデータ送受信にかかる時間が増大するためリアルタイム性がかけてしまうことが分かる。

また、6 章で述べた実験において、通信を制御する既存システムでは各拡散率の転送時間や通信間隔の時間を固定された値で設けている。したがって、全デバイスのデータ送受信に要する時間に変動が少ない。提案したシステムでは使用する拡散率が動的に変動するため、全デバイスのデータ送受信に要する時間も変動する。したがって、多くのデバイスにて低受信強度が続くような環境では拡散率が常に大きな値となり、全デバイスのデータ送受信に要する時間が増大してしまうため提案システムは適さないといえる。

### 7.2 提案方式における時刻同期方法に関する考察

本システムでは全 End デバイスに同タイミングでパラメータデータが送信されている。そのため、パラメータデータの受信タイミングを時分割多元接続方式に必要な親局と子局の時刻同期に転用できる。したがって、既存の「時分割多元接続方式による無線通信システム及び無線通信方法」のように衛星測位システムからの時刻情報を用いることなく通信のスケジューリングを行うことができるため、GPS 信号ができない環境や GPS モジュールの不要によるコスト削減・消費電力の抑制が期待できる。

## 8. 今後の課題

LoRa 拡散率の動的制御を用いることで、単体の移動体における場合と複数の固定デバイスによる検証を行い通信の信頼性の確保とリアルタイム性の両立が可能なが確認できた。また、前章で記述した点から、本システムは複数の移動通信体があり、かつ通信環境が変動するようなアプリケーションにおいて有効と考えられる。本システムの

有効性をバスロケーションシステム等の実環境での検証が今後の課題といえる。

## 9. 結論

本稿では、LoRa 拡散率の動的制御を用いることで、時分割多元接続方式による無線通信において低速度な LoRa 通信を用いた場合に、通信の信頼性とリアルタイム性を向上させることを提案した。

既存の時分割多元接続方式による無線通信では、通信ノード数の増加とともに 1 ノードにおける通信間隔の拡大によるシステムのリアルタイム性の欠如が課題であった。提案したシステムでは、既存の時分割多元接続方式を用いた無線通信システムをベースに、各デバイスとの通信状況を評価し適切な LoRa 拡散率に動的変更を行っている。

また、提案したシステムを移動体通信と複数デバイスにおける時分割多元接続方式を用いた通信に搭載し検証を行った。結果、限定されたデバイス数や環境においては既存の通信システムと比較し高いパケット受信率を維持しながら通信回数を増加させることに成功し、通信の信頼性を維持したままりリアルタイム性の向上を達成した。

LoRa の拡散率を動的制御することで、通信環境が変動する移動体通信において有効と考えられ、特にエンドデバイスが多数の移動体通信での効果が期待できる。

## 参考文献

- [1] 金沢市：金沢ふらっとバス：〈<https://www4.city.kanazawa.lg.jp/11310/taisaku/flatbus/>〉（参照 2020-08-01）。
- [2] Sakauchi R., Ishikawa S., Yabe H., and Sode Tanaka M.: "Multi-channel Communication of LoRa using Time Division Multiple Access", IWIN2021 (2021).
- [3] 学校法人金沢工業大学. 向井宏明, 平櫻瞭太郎: 時分割多元接続方式による無線通信システム及び無線通信方法, 特開 2020-178156. 2020/10/29.
- [4] NTT 西日本: IoT 事業拡大のための LoRaWAN の事業化, 〈<https://journal.ntt.co.jp/article/5426>〉（参照 2020-08-01）。
- [5] EASEL Inc: LoRaWAN とプライベート LoRa の違い, 〈<https://easel5.com/technical-guide/difference-lorawan-and-private-lora/>〉（参照 2020-08-01）。
- [6] Mu D., Chen Y., Shi J., and Sha M.: "Runtime Control of LoRa Spreading Factor for Campus Shuttle Monitoring", 2020 IEEE 28th International Conference on Network Protocols (ICNP) (2020).
- [7] (株) RFLINK: RM-92A/RM-92C 製品仕様書: 〈[http://www.rflink.co.jp/pdf/RM-92A-92C/Ver209-RM-92A\\_RM-92C\\_data-sheets.pdf](http://www.rflink.co.jp/pdf/RM-92A-92C/Ver209-RM-92A_RM-92C_data-sheets.pdf)〉（参照 2021-05-01）。
- [8] 920MHz-BAND TELEMETER TELECONTROL AND DATA TRANSMISSION RADIO EQUIPMENT, ARIB STD-T108 Version 1.4.



石川 柊斗 (非会員)

2018年4月より金沢工業大学工学部情報工学科. LPWA 関連の研究に従事.



向井 宏明 (正会員)

千葉大学工学部電子工学科卒業. 同大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了. 同大学大学院工学研究科人工システム科学専攻博士後期課程修了. 三菱電機(株)入社, 通信システム開発センター, 情報技術総合研究所, 通信システムエンジニアリングセンターを経て, 2017年金沢工業大学工学部情報工学科教授就任.