

## LoRaWANにおけるACK信号を用いた 自律分散的な周波数リソース割当て手法の検討

鈴木 康介<sup>†</sup> 相原 直紀<sup>††</sup> 安達 宏一<sup>††</sup> 山崎 悟史<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 沼津工業高等専門学校 専攻科 〒410-8501 静岡県沼津市大岡 3600

<sup>††</sup> 電気通信大学 先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

<sup>†††</sup> 沼津工業高等専門学校 制御情報工学科 〒410-8501 静岡県沼津市大岡 3600

E-mail: †a19109@numazu.kosen-ac.jp, ††{aihara,adachi}@awcc.uec.jp, †††s-yamazaki@numazu-ct.ac.jp

あらまし 今後IoTの更なる発展により、多数のノードが密集する稠密環境が想定される。そのような環境では、同一時刻・周波数で複数ノードがパケット送信するとパケット衝突が発生し、ゲートウェイがデータを正しく受信できない可能性がある。一方、パケット衝突によるパケット損失回避のためには、ゲートウェイからのACK信号を受信できなかったノードが再送を行うことが考えられる。しかしながら、この方法ではACK信号の送信を前提とするため、ゲートウェイでの処理負荷や送信機会の損失を招く。本稿ではLoRaWANを対象に、パケット衝突数削減とゲートウェイ処理負荷低減の両立を目的とした、自律分散的な周波数リソース割当て手法を提案する。具体的には、ACK送信要求を含むConfirmedパケットとACK送信要求を含まないUnconfirmedパケットを用い、ACKの有無によって周波数を切り替える手法を提案する。さらに、計算機シミュレーションと実機実験により、提案手法の有効性を示す。

キーワード LoRaWAN, 周波数リソース割当て, ACK, Confirmed パケット

## Autonomous Decentralized Frequency Resource Allocation using ACK Signal in LoRaWAN

Kosuke SUZUKI<sup>†</sup>, Naoki AIHARA<sup>††</sup>, Koichi ADACHI<sup>††</sup>, and Satoshi YAMAZAKI<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Department of Multidisciplinary Engineering, NIT, Numazu College  
3600 Ooka, Numazu-shi, Shizuoka 410-8501 Japan

<sup>††</sup> Advanced Wireless and Communication Research Center, The University of Electro-Communications  
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo 182-8585

<sup>†††</sup> Department of Control and Computer Engineering, NIT, Numazu College  
3600 Ooka, Numazu-shi, Shizuoka 410-8501 Japan

E-mail: †a19109@numazu.kosen-ac.jp, ††{aihara,adachi}@awcc.uec.jp, †††s-yamazaki@numazu-ct.ac.jp

**Abstract** A number of nodes will be densely deployed due to the further development of Internet-of-Things (IoT). If multiple nodes simultaneously send packets on the same frequency channel, packet collision happens at the gateway. This leads to packet loss. By sending an ACK signal to the node whose packet was correctly received by the gateway, the other nodes can initiate packet retransmission in order to resolve the packet loss. However, this is based on the assumption of ACK signal transmission from the gateway to all the nodes. Thus, the processing load of the gateway increases and duty cycle (DC) restriction on the gateway may be impacted. In this paper, we propose an autonomous distributed frequency resource allocation method for LoRaWAN, aiming to reduce the number of packet collisions and reduce the gateway processing load. We will show the effectiveness of the proposed approach through computer simulation and experimental evaluations by implementing the proposed approach.

**Key words** LoRaWAN, Frequency resource allocation, ACK, Confirmed packet

## 1. はじめに

近年, モノのインターネット (Internet of Things, IoT) 向けに低消費電力かつ広域通信可能な LPWA (Low Power Wide Area) が注目を集めている [1], [2], [3]. 今後, IoT の更なる発展により, 多数のノードが密集する稠密環境が想定される. そのような環境では, 1 台のゲートウェイに対して多数のノードが同時にパケットを送信すると, パケット衝突が発生し, ゲートウェイがデータを正しく受信 (復調) できない可能性があり, ノードもそのような状況を把握できない. この問題の対策として, ゲートウェイがパケット受信後に受信成功 (ACK) をノードに返答する手法 (ACK 送信) がある. 送信したパケットに対して ACK を受信できなかったノードは, パケットを再送することによりパケット損失を回避する. しかし, ゲートウェイがパケット受信毎に ACK を送信すると, その送信に伴う時間が大きくなりスループット劣化を招いてしまう [4]. さらに, LPWA ではゲートウェイを含むノード毎にチャンネルを利用できる時間率 (Duty Cycle, DC) が規定されている [1]. そのため, ACK を頻繁に送信した場合には, ゲートウェイに対して設定されている DC を逼迫してしまう. このような問題に対し, LPWA の規格の一つである LoRaWAN [5] を対象として, ダウンリンクにおける各種設定がスループットに与える影響が計算機シミュレーションにより評価されているが [6], [7], 複数のノードが一定時間間隔でパケット送信する環境での評価はなされていない. さらに, 文献 [4] では, 本来 1 つのゲートウェイにて受信すべきパケット群を複数のゲートウェイで分散的に受信することによって本来受信すべきゲートウェイの処理負荷を低減する手法が提案され, ゲートウェイ全体でのパケットロス低下の効果が示されている. しかし, この手法では, ゲートウェイ全体としての処理負荷は変わらない.

本稿では 1 台のゲートウェイに複数のノードがパケットを一定時間間隔で送信する環境を対象に, パケット衝突率低減とゲートウェイにおける処理負荷低減を両立するため, 各ノードが自律分散的に送信周波数を決定する, 周波数リソース割当て手法を提案する. 具体的には, ACK 送信要求を含まない Unconfirmed パケットと ACK 送信要求を含む Confirmed パケットに着目し, ノードが Confirmed パケットをゲートウェイに定期的に送信する手法と確率的に送信する手法を提案する. Confirmed パケットを送ったノードが ACK 信号を受信しなかった場合には, 衝突により送信したパケットが損失したものと推定する. そのため次のパケット送信時にはランダムに周波数を選択してパケット送信を行う. 計算機シミュレーションと実機実験により, 提案手法の有効性を示す.

本稿の構成は以下のようになっている. 第 2 節では LoRaWAN の概要について述べ, 第 3 節では提案手法である ACK 信号を用いた周波数割当てについて述べる. 第 4 節では計算機シミュレーションの結果を述べ, 第 5 節では実機実験の結果を述べる. 第 6 節では本稿のまとめを行う.

## 2. LoRaWAN

### 2.1 概要

LoRaWAN [5] は, 物理層では CSS (Chirp Spread Spectrum) 変調を, MAC (Medium Access Control) 層では純 ALOHA 方式を用いる [8]. 以下, 本稿に関わる 2 つの概念 [5], [8] について述べる.

#### クラス

3 つのクラス (クラス A,B,C) が MAC 層で規定されており, 本稿で用いるクラス A (デフォルト) では, アップリンク送信 (ノード → ゲートウェイ) の直後にノードにて 2 つの受信ウィンドウを設けた後, ダウンリンクを受信 (ゲートウェイ → ノード) する. クラス A におけるアップリンクパケットは, プリアンブル, PHY ヘッダ, ヘッダ CRC (Cyclic Redundancy Check), PHY ペイロード (先頭 3 ビットは MAC ヘッダ), CRC の 5 つで構成されている.

#### メッセージタイプ

メッセージタイプとは, MAC ヘッダに書き込まれる送信パケットの種類を表す識別子であり, 本稿では Unconfirmed Data Up (以降, UP), Confirmed Data Up (以降, CP), Unconfirmed Data Down (以降, ACK), Confirmed Data Down の 4 つが関係する. 例えば, メッセージタイプとして UP が設定された場合, ノードがゲートウェイにパケット送信してもゲートウェイは ACK を送信しない. 同様に ACK が設定された場合, ゲートウェイがノードにパケット送信してもノードは ACK を送信しない. 一方, CP が設定された場合, ノードがゲートウェイにパケット送信すればゲートウェイは ACK を送信する.

以降, メッセージタイプとして CP (UP) が設定されたパケットを単に「CP (UP)」という.

### 2.2 タイムシーケンス例

1 台のゲートウェイに対して 2 台のノードがパケットを一定時間間隔で送信するアップリンク環境を想定する. 図 1 にそのタイムシーケンス例を示す. ここで, 通信開始時のアクティベーションは ABP (Activation by Personalization) [5] を想定している. まず, ノード  $j$  のみが時刻  $t_1$ , 周波数  $f_1$  で UP を送信し, ゲートウェイが受信に成功したとする. この時, ゲートウェイは ACK を送信せず, ノード  $j$  はパケット送信の成否を判定しない. 次に, ノード  $j$  のみが時刻  $t_2$ , 周波数  $f_1$  で CP を送信し, ゲートウェイが受信に成功したとする. この時, ゲートウェイは ACK を送信し, ノード  $j$  はパケット送信終了後  $T_{ack}$  秒以内に ACK を受信できれば, パケット送信成功と判定する. さらに, 時刻  $t_3$ , 周波数  $f_1$  でノード  $j$  が CP を, 時刻  $t_4$ , 周波数  $f_1$  でノード  $i$  が UP を送信し, パケットが衝突した場合, ゲートウェイはパケット受信に失敗したものとする. この時, ノード  $i$  はパケット送信の成否を判定しないが, ノード  $j$  はパケット送信終了後  $T_{ack}$  秒以内に ACK を受信できなければパケット送信失敗と判定する.

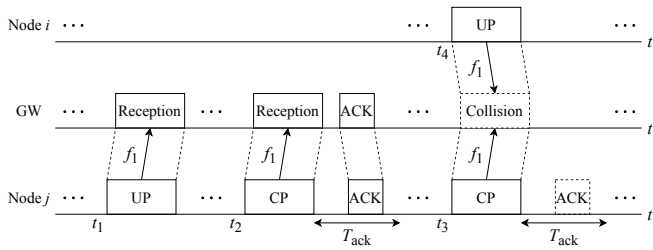


図1 従来のLoRaWANにおけるタイムシーケンス例

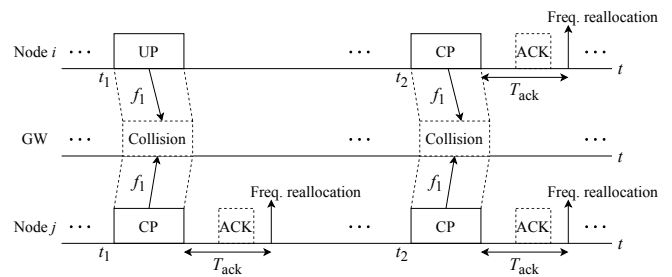


図3 提案手法におけるタイムシーケンス例

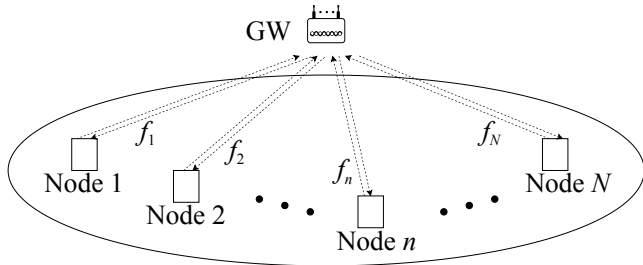


図2 システムモデル

### 3. 提案手法

#### 3.1 システムモデル

図2に示すように、1台のゲートウェイに対して $N$ 台のノードがパケットを一定時間間隔で送信するアップリンク環境を想定する。各ノードは $T_{\text{int}}$  [sec] 毎にパケットを送信する。更に、ノード $n \in \{1, \dots, N\}$ は、送信開始時刻 $T_s(n)$  ( $0 \leq T_s(n) < T_{\text{int}}$ )で最初のパケットを送信するものとする。

#### 3.2 ACK信号を用いた自律分散的な周波数リソース割当て手法

あるノードから送信されたUPとCPの合計に対するCPの送信割合を $R_{\text{cp}}$ 、送信パケット数 $L = 1/R_{\text{cp}}$ を1サイクルと定義する。 $R_{\text{cp}}$ は $L$ が自然数という制約の下、任意に設定可能とする。まず、2つの提案手法に共通の動作について述べ、次に各手法について述べる。

##### 共通動作

各ノードは初期の送信周波数 $f_n \in \mathcal{F}$ をランダムに選択する。その後、一定周期 $T_{\text{int}}$ で、後述する2つの提案手法の各動作に従い、UPとCPのいずれか一方を送信する。各ノードは、CP送信時にACKをゲートウェイから受信しなかった場合、パケットの衝突を検知し、次回以降の送信周波数を $\mathcal{F} = \{1, \dots, F\}$ の中からランダムに選択する。

##### 提案手法1

通信開始前 ( $t = 0$ ) にノードでランダムな変数 $x$  ( $1 \leq x \leq L$ を満たす自然数で一様分布に従う) を発生させる。そして、1サイクルにおいてCPを $x$ 回目(固定的)に送信する。すなわち、1サイクルにおいてまずUPを $x - 1$ 回送信した後、CPを1回送信し、UPを $L - x$ 回送信する。

##### 提案手法2

確率 $R_{\text{cp}}$ でCPを送信し、確率 $1 - R_{\text{cp}}$ でUPを送信する。具体的には、各パケットを送信する前にノード内でランダムな変数 $y$  ( $1 \leq y \leq L$ を満たす自然数で一様分布に従う) を発

生させ、 $y = 1$ ならばCPを送信し、 $y \neq 1$ ならばUPを送信する。この処理を、1サイクルにおける全送信パケットに対して行う。

以上から分かるように、提案手法1と2はともに1サイクル中にCPを1回送信する。2.2で述べたように、従来のLoRaWANの動作では衝突が発生しても送信周波数は変更されないが、提案手法ではゲートウェイからのACK信号を用いた自律分散的な周波数リソース割当てを実現する。

#### 3.3 タイムシーケンス例

図3に2台のノード $i, j$ が1台のゲートウェイにパケットを送信するときの、提案手法の動作に関するタイムシーケンスの例を示す。図3において $t_{k+1} = t_k + T_{\text{int}}$  ( $k: 1$ 以上の整数、 $T_{\text{ack}} < T_{\text{int}}$ )となる。

まず、時刻 $t_1$ 、周波数 $f_1$ でノード $i$ がUPを、ノード $j$ がCPを同時に送信した場合、パケットが衝突し、ゲートウェイはパケット受信に失敗したもとする。この時、ノード $i$ はパケット送信の成否を判定しないが、ノード $j$ は $T_{\text{ack}}$ 秒以内にACKを受信できなければパケット送信失敗と判定し、次回以降の送信周波数を $\mathcal{F} = \{1, \dots, F\}$ の中からランダムに選択する。ここでは、送信周波数 $f_1$ が選択されたと仮定する。

次に、時刻 $t_2$ 、周波数 $f_1$ でノード $i, j$ がCPを同時に送信した場合、パケットが衝突し、ゲートウェイはパケット受信に失敗したもとする。この時、ノード $i, j$ は $T_{\text{ack}}$ 秒以内にACKを受信できなければパケット送信失敗と判定し、次回以降の送信周波数を $\mathcal{F} = \{1, \dots, F\}$ の中からランダムに選択する。

### 4. 計算機シミュレーション

図2のシステムモデルを想定し、計算機シミュレーションにより提案手法を評価する。なお、本稿では簡単化のため、ビット誤りや電波伝搬遅延、他システムからの干渉はないものとする。4.1では多ノード環境における基礎評価を行い、その知見を踏まえ、4.2では提案手法を評価する。

#### 4.1 多ノード環境における最大同時送信ノード数の評価

表1のシミュレーション諸元を用い、最大同時送信ノード数 $N_{\text{col}}$ を評価する。ここで、 $N_{\text{col}}$ は、同時に送信を行う(送信パケットが時間的に重なる)ノード数の最大値である。なお、周波数リソース数 $F$ は1であり、2.2で述べたようにパケット衝突が発生しても周波数の変更はない。すなわち、従来のLoRaWANの動作に基づき評価する。

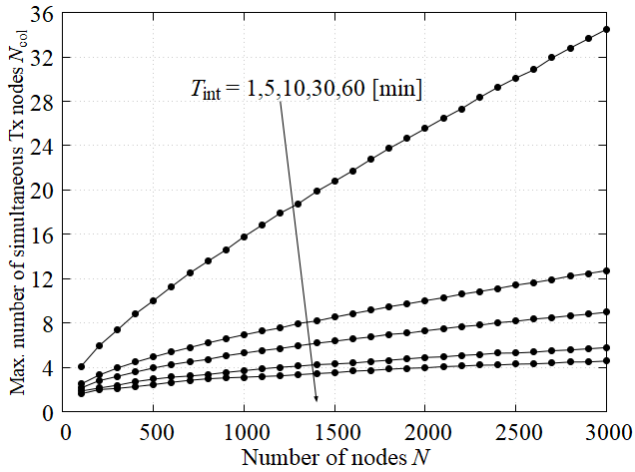


図4 全ノード数  $N$  に対する最大同時送信ノード数  $N_{col}$

図4に全ノード数  $N$  に対する最大同時送信ノード数  $N_{col}$  を示す。図4より、 $T_{int}$  が5分以上かつ  $N$  が1000台以下の時、 $N_{col}$  は高々8台であることが分かる。すなわち、多数のノードが一定時間間隔で同時にパケットを送信する環境においては、限られた数のノード間でのパケット衝突を回避することが効果的であると考えられる。以上から、次節における提案手法の評価では、全ノード数  $N = 8$  とする。

#### 4.2 提案手法の評価

表2のシミュレーション諸元を用い、次式で定義されるパケット衝突率  $R_{col}$  を評価する。

$$R_{col} = \frac{\sum_{n=1}^N \{N_{tx}(n) - N_{suc}(n)\}}{\sum_{n=1}^N N_{tx}(n)} \quad (1)$$

ここで、 $N_{tx}(n)$  はノード  $n$  の合計送信パケット数、 $N_{suc}(n)$  はノード  $n$  の合計送信成功パケット数であり、本稿では  $N_{tx}(n) = 100$  とした。本稿では、複数ノードがパケットを一定時間間隔で同時に送信する環境を対象としているため、 $T_s(n)$  は全ノードで同一とする。また、パケット衝突が発生すれば、3.2に従い周波数割当てがなされる。なお、 $t = 0$  における送信周波数  $f_n$  の初期値として、ランダムな場合 (以降、RANDOM) と全て1の場合 (以降、FIXED) について評価する。

ここで、従来のLoRaWANでRANDOMを設定する場合、 $R_{col}$  の理論値は次式で表される (導出略)。

$$R_{col} = 1 - \{(F - 1)/F\}^{N-1} \quad (2)$$

表1 シミュレーション諸元1

Number of nodes $N$	100, 200, ..., 3000
Number of frequency resources $F$	1
Transmission interval $T_{int}$	1, 5, 10, 30, 60 min
Protocol	Pure ALOHA
Spreading factor $SF$	10
Payload size $l_p$	11 byte
Number of trials $I$	100000

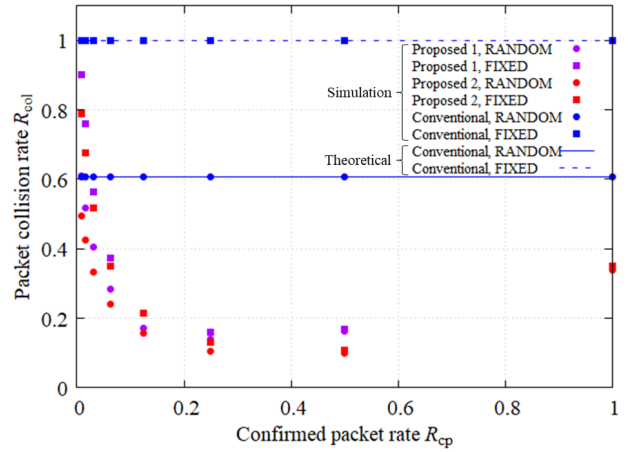


図5 CP送信割合  $R_{cp}$  に対するパケット衝突率  $R_{col}$  ( $N = 8, F = 8$ )

#### 4.2.1 CP送信割合 $R_{cp}$ の影響

図5に  $N = 8, F = 8$  のときの  $R_{cp}$  に対する  $R_{col}$  を示す。ここで、従来のLoRaWANの結果 (Conventional) も示している。2.2で述べたように、従来のLoRaWANではパケット衝突が発生すると再度周波数割当てを行わないため、3.1で述べた今回想定するシステムモデルでは、次回以降のパケット送信時においてもパケット衝突が繰り返されることになり、 $R_{cp}$  に依らず  $R_{col}$  は一定となる。FIXEDの場合、全ノードが毎回同一周波数で送信するため、必ずパケット衝突が発生し  $R_{col} = 1$  となる。RANDOMの場合、ノードによって異なる周波数が割当てられる可能性があり、パケット衝突は低減され、シミュレーション結果から  $R_{col}$  が0.6程度になることが示された。また、 $N = 8, F = 8$  のとき、式(2)から、 $R_{col} \simeq 0.607$  となり、シミュレーション結果の妥当性を示した。一方、2つの提案手法では  $R_{cp}$  に応じてCPの送信を決定し、その後ゲートウェイからのACKの有無に応じてノード側にて自律分散的に周波数リソースの再割当てがなされるため、 $R_{cp}$  に応じて  $R_{col}$  が低減されている。

また、 $R_{cp}$  を小さくすればゲートウェイの負荷低減に繋がるが、小さすぎると  $R_{col}$  が増大する。よって、パケット衝突率  $R_{col}$  の観点から最適な送信割合  $R_{opt}$  が存在し、特に提案手法2、RANDOMの場合は  $R_{opt}$  は0.5であることがわかった。以上から、2つの提案手法はシステム要件に応じてパケット衝突数削減とゲートウェイ処理負荷低減の2つを柔軟に選

表2 シミュレーション諸元2

Number of nodes $N$	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14
Number of frequency resources $F$	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14
Transmission interval $T_{int}$	5 min
Protocol	Pure ALOHA
Spreading factor $SF$	10
Payload size $l_p$	11 byte
Number of transmission packets $N_{tx}(n)$	100
Number of trials $I$	100000

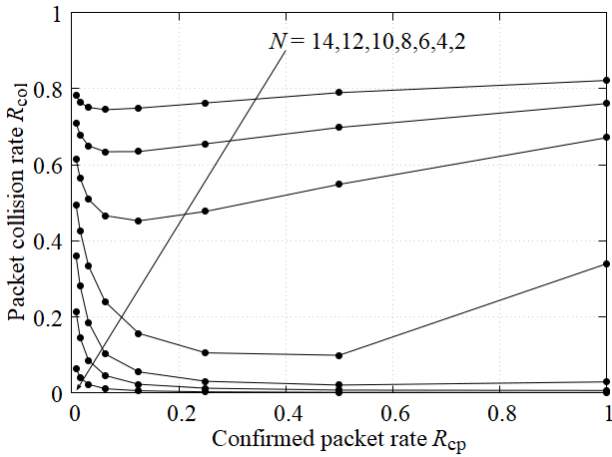


図6 CP 送信割合  $R_{cp}$  に対するパケット衝突率  $R_{col}$  (提案手法 2, RANDOM, ノード数  $N$  の影響)

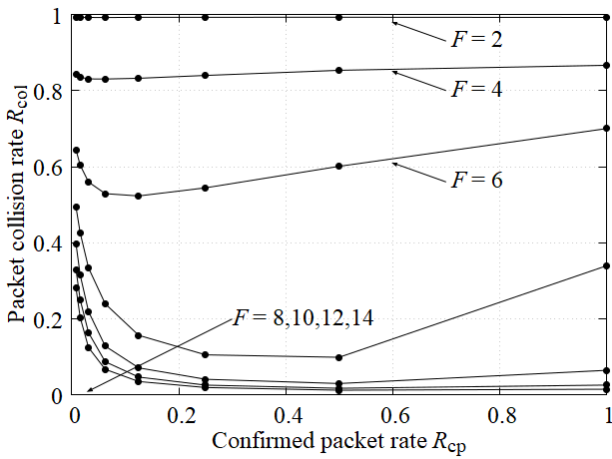


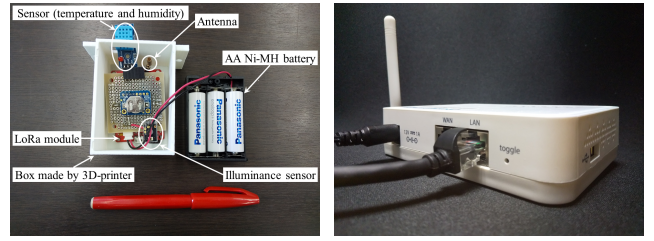
図7 CP 送信割合  $R_{cp}$  に対するパケット衝突率  $R_{col}$  (提案手法 2, RANDOM, 周波数リソース数  $F$  の影響)

択可能な手法といえる。

さらに、 $R_{cp}$  や送信周波数  $f_n$  の初期値によらず提案手法 1 に比べ提案手法 2 のほうが  $R_{col}$  を低減可能であり、特に提案手法 2, RANDOM の場合に  $R_{col}$  が最小となった。これは、提案手法 1 では CP 送信タイミングが 1 サイクル中で固定的であるため、あるタイミングで CP が衝突すると次回以降のサイクルにおいても CP の衝突が繰り返されるが、提案手法 2 では 1 サイクルにおける各パケットで CP の送信が確率的に決まるため、パケット衝突率が低減されたと考えられる。

#### 4.2.2 ノード数 $N$ の影響

図 6 に、提案手法 2, RANDOM を用いたときの  $R_{cp}$  に対する  $R_{col}$  を示す。ここで、 $N = \{2, 4, 6, 8, 10, 12, 14\}$ ,  $F = 8$  とした。 $N$  を減らせば、 $R_{col}$  は減少し、特に、 $N$  が 8 から 10 の付近において、 $R_{col}$  の急激な変化が見られる。具体的には、 $R_{opt}$  において 0.35 程度の差が生じている。これは、 $N$  が  $F$  以下の場合には周波数リソース割当てによって全てのパケットが送信に成功する可能性があるが、 $N$  が  $F$  より大きい場合、周波数リソース割当てを行っても、パケット送信毎に少なく



(a) 開発した LoRaWAN ノード (b) LoRaWAN ゲートウェイ [10]

図 8 実験システム

とも 1 つ以上の周波数でパケット衝突が発生するためである。

#### 4.2.3 周波数リソース数 $F$ の影響

図 7 に、提案手法 2, RANDOM を用いたときの  $R_{cp}$  に対する  $R_{col}$  を示す。ここで、 $N = 8$ ,  $F = \{2, 4, 6, 8, 10, 12, 14\}$  とした。 $F$  を多くとれば、 $R_{col}$  は減少し、特に、 $F$  が 6 から 8 の付近において  $R_{col}$  の急激な変化が見られる。具体的には、 $R_{opt}$  において 0.42 程度の差が生じている。これは図 6 同様、 $N$  と  $F$  の大小関係によって決まる。

## 5. 実機評価

### 5.1 実験システム

図 2 のシステムモデルを想定し、表 3 のパラメータを用いて提案手法の実機評価を行う。本稿では最大 4 台のノードを用いて、各ノードとゲートウェイの距離を 0.5 m とし、屋内で実験した。

#### ノード

LoRaWAN 対応 IoT センサモジュール LoRa mini-JP [9] をベースに、市販で購入可能なセンサ類のみを用いてセンサノードを設計・開発した。本稿では温度、湿度、照度を計測対象とし、単三電池 3 本で動作可能とした。3D プリントで造形したボックスの中にモジュール一式を格納することで、屋外での利用が可能となる。図 8a にその概観を示す。

#### ゲートウェイ

市販の LoRaWAN ゲートウェイ Dragino LG01 [10] を用いる。図 8b にその概観を示す。なお、本機は最大同時受信チャンネル数が 1 であるため、同機を複数台用意し、疑似的に複数チャンネル同時受信可能なゲートウェイとして動作させた。

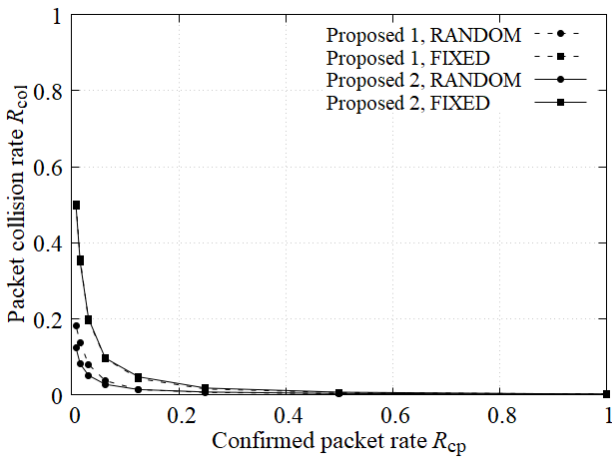
### 5.2 結果

図 9a に、 $N = 2$ ,  $F = 4$  のときの、 $R_{cp}$  に対する  $R_{col}$  を、図 9b に  $N = 4$ ,  $F = 4$  のときのそれ示す。これらの結果は

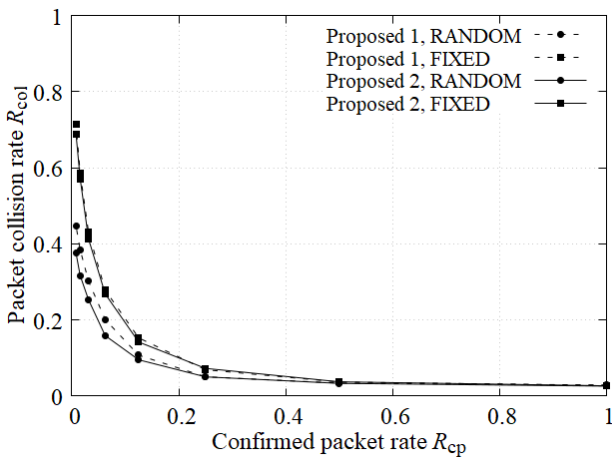
表 3 実験諸元

Number of nodes $N$	2, 4
Number of frequency resources $F$	4
Transmission interval $T_{int}$	5 min
Protocol	Pure ALOHA
Spreading factor $SF$	10
Payload size $l_p$	11 byte
Number of transmission packets $N_{tx}(n)$	100
Number of trials $I$	10





(a)  $N = 2, F = 4$



(b)  $N = 4, F = 4$

図9 CP送信割合  $R_{cp}$  に対するパケット衝突率  $R_{col}$  (実機)

図5に示す計算機シミュレーションによる特性と概ね一致し、実機評価においても提案手法の優位性、すなわち、パケット衝突数削減とゲートウェイ処理負荷低減が示された。 $R_{col}$ が $R_{cp}$ 関わらずシミュレーション結果に比べて低下している原因は、評価諸元の差異や実環境におけるパケット衝突時のキャプチャ効果などが考えられる。

## 6. まとめ

LoRaWANを対象に、ACK送信要求を含むConfirmedパケットを定期的および確率的に送信することによってノードが送信周波数を決定する、自律分散的な周波数リソース割当て手法を提案した。計算機シミュレーションと実機実験により、提案手法はパケット衝突率低減とゲートウェイにおける処理負荷低減が両立可能であり、従来手法に対する優位性を示した。特に、Confirmedパケットを確率的に送信し割当て可能な送信周波数をランダムとした場合が、最も衝突率を削減できることを示し、今回の評価諸元ではパケット衝突率の観点から最適な送信割合が0.5であることを明らかにした。

今後の課題として、電波伝搬環境を考慮した評価やキャリ

アセスメントを用いた周波数割当て手法の構築等が挙げられる。

謝辞 本研究開発は総務省SCOPE(受付番号175104004)の委託を受けて行われたものである。

## 文献

- [1] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.19, no.2, pp.855–873, 2017.
- [2] H. Wang and A.O. Fapojuwo, "A Survey of Enabling Technologies of Low Power and Long Range Machine-to-Machine Communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.19, no.4, pp.2621–2639, 2017.
- [3] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT Express*, vol.5, no.1, pp.1–7, mar 2019.
- [4] V. Di Vincenzo, M. Heusse, and B. Tourancheau, "Improving Downlink Scalability in LoRaWAN," *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp.1–7, IEEE, may 2019.
- [5] LoRa Alliance Technical Committee, "LoRaWAN 1.1 Specification". [https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawan\\_specification\\_v1.1.pdf](https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawan_specification_v1.1.pdf)
- [6] M. Centenaro, L. Vangelista, and R. Kohno, "On the impact of downlink feedback on LoRa performance," *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp.1–6, IEEE, oct 2017.
- [7] K. Mikhaylov, J. Petajajarvi, and A. Pouttu, "Effect of Downlink Traffic on Performance of LoRaWAN LPWA Networks: Empirical Study," *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp.1–6, IEEE, sep 2018.
- [8] A. Lavric and V. Popa, "Internet of Things and LoRa™ Low-Power Wide-Area Networks: A survey," *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, pp.1–5, IEEE, jul 2017.
- [9] Dragino Technology Co., Limited, "LoRa Mini Dev featuring LoRa® technology". <http://www.dragino.com/products/lora/item/126-lora-mini-dev.html>
- [10] Dragino Technology Co., Limited., "LG01-P IoT Gateway featuring LoRa® technology". <http://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/117-lg01-p.html>