

## LPWANにおける周期トラフィックを考慮したリソース割り当て法の検討

蕪木 碧仁<sup>†</sup> 安達 宏一<sup>†</sup> 田久 修<sup>††</sup> 太田 真衣<sup>†††</sup> 藤井 威生<sup>†</sup>

<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> 信州大学 電子情報システム工学科

〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1

<sup>†††</sup> 福岡大学 電子情報工学科

〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1

E-mail: †{kaburaki, adachi, fujii}@awcc.uec.ac.jp, ††takyu@shinshu-u.ac.jp, †††maiohta@fukuoka-u.ac.jp

**あらまし** 近年、様々な機器がインターネットに接続する IoT や M2M 通信技術の発展に伴い、省電力広域ネットワーク (LPWAN) が注目を集めている。LPWAN では、環境モニタリングアプリケーションに代表される温度や湿度などのセンサによって観測された特定のデータを定期的に送信する周期的トラフィックとなる。一方、LPWAN は ALOHA プロトコルなどの簡易な非同期型ランダムアクセス方式を使用しているため、多端末環境では複数の端末が同じ周波数チャンネルで同時にパケットを送信した場合、パケット衝突が発生する。さらにトラフィックは周期性を有するため、周期が一致する端末間では連続的にパケット衝突が発生する。そこで本研究では、LPWAN での周期的トラフィックにおける連続的なパケット衝突を回避するため、集中制御型の通信リソース割り当て法を提案する。GW は各端末の既に受信しているパケットの受信時刻と端末のパケット生成周期から、各端末の将来にわたるパケット衝突を予測することが可能である。そこでパケット衝突が予測される端末に対してそのパケット衝突を回避するための周波数チャンネルおよび送信オフセットの割り当てを行う。計算機シミュレーションにより、本提案手法が ALOHA 手法と比較して、平均パケット配信率 (PDR) を最大で約 25% 向上可能であることを示す。また、本提案手法が ALOHA 手法と比較して、GW に収集される情報の遅延を特徴づける情報鮮度の特性を改善できることを示す。

**キーワード** WSN, LPWA, LoRaWAN, リソース制御, パケット配信率

### Resource Allocation for Periodic Traffic in LPWAN

Aoto KABURAKI<sup>†</sup>, Koichi ADACHI<sup>†</sup>, Osamu TAKYU<sup>††</sup>, Mai OHTA<sup>†††</sup>, and Takeo FUJII<sup>†</sup>

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

<sup>††</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Shinshu University  
4-17-1, Wakasato, Nagano, 380-8553

<sup>†††</sup> Department of Electronics and Computer Science, Fukuoka University  
8-19-1, Nanakuma, Jonan, Fukuoka 814-0180

E-mail: †{kaburaki, adachi, fujii}@awcc.uec.ac.jp, ††takyu@shinshu-u.ac.jp, †††maiohta@fukuoka-u.ac.jp

**Abstract** With the fast- and wide-spread of IoT and M2M communications services, low power wide area networks (LPWANs) have attracted attention. Periodic traffic dominates the network in environmental monitoring applications because sensors transmit specific environmental information such as temperature and humidity. Since LPWAN adopts a simple asynchronous random access protocol such as the ALOHA protocol, multiple nodes may transmit data packets simultaneously on the same frequency channel at the same time, resulting in packet collisions. Furthermore, continuous packet collisions occur between specific nodes having the same packet generation period due to periodic packet transmissions. This paper proposes a centralized resource allocation scheme suitable for periodic traffic to avoid such continuous packet collision. The computer simulation results show that the proposed scheme can improve the average packet delivery ratio (PDR) by 25% compared to the pure ALOHA protocol.

**Key words** WSN, LPWA, LoRaWAN, Resource control, PDR

## 1. はじめに

近年、様々な機器にインターネットに接続する機能を具備するモノのインターネット (IoT: Internet of Things) や機械間 (M2M: Machine-to-Machine) 通信技術の発展に伴い、無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) が多種多様なアプリケーションへ導入されてきている [1]. 特にスマートシティやスマート農業などの産業向けのアプリケーションにおいて、低コストで数 km 規模の広い通信エリアを実現できる省電力広域ネットワーク (LPWAN: Low Power Wide Area Network) が注目を集めている [2]~[4]. LPWAN のトラフィックはスマートフォンなどのランダムかつ高データレートなトラフィックとは異なり、温度や湿度といったセンサによって観測される特定のデータを低データレートで定期的送信する周期的トラフィックとなる [5], [6]. また端末の低廉化のため、LPWAN は一般に MAC 層に ALOHA プロトコルなどの非同期型ランダムアクセス方式を採用している. しかし、簡易な非同期型ランダムアクセス方式であるため、多端末環境では複数の端末が同じ周波数チャンネルで同時にパケットを送信し、パケット衝突が発生する. さらに周期的トラフィックなため、パケット生成周期が一致する端末間では連続的にパケット衝突が発生する [7]. また、アンライセンスバンドを用いるため、LPWAN 端末およびゲートウェイ (GW: Gate Way) には、パケット送信可能な時間比率を決定するデューティサイクル (DC: Duty Cycle) によって通信頻度の制約が課されている. そのため、パケット衝突により端末がパケットの再送を行う場合、DC 制限によって大幅な送信遅延も伴う. このようにパケット衝突はシステム全体の通信品質低下を招くため、LPWAN でのパケット衝突回避技術の研究が急務となっている. このパケット送信の周期性に起因するパケット衝突を回避するため、IEEE802.11 における集中制御型のパケット送信タイミングのスケジューリング法が提案されている [7]. しかし、この方法では全端末に集中制御局からの制御信号の送信が必要となるため、LPWAN への適用は困難である.

そこで本研究では、LPWAN での周期的トラフィックにおける連続的なパケット衝突を回避するため、パケット生起の周期性を活用したパケット衝突発生予測に基づく集中制御型の通信リソース割り当て法を提案する. システム内の端末は GW と通信を行うため、GW は各端末との過去の通信履歴からパケット生成周期を把握することが可能である. また GW は各端末の既に受信しているパケットの受信時刻とパケット生成周期から、各端末の将来にわたるパケットの送信期間を計算することが可能である. そのため、GW は各端末の将来のパケット送信期間を比較することでパケット衝突発生の予測が可能である. そこで、パケット衝突が予測される端末に対してそのパケット衝突を回避するための周波数チャンネルおよび送信オフセットの割り当てを行う. 本研究では、LPWAN 規格の一つである LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) に準拠したパラメータを用いて、計算機シミュレーションを使用して提案手法の有効性を示す. 計算機シミュレーション結果より、本提案

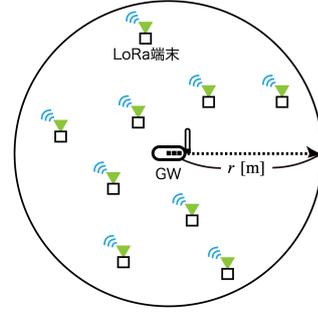


図1 システムモデルの概要

手法が ALOHA 手法と比較して、平均パケット配信率 (PDR: Packet Delivery Rate) を最大で約 25% 向上可能であることを示す. また、本提案手法が ALOHA 手法と比較して、GW に収集される情報の遅延を特徴づける情報鮮度 (AoI: Age of Information) [8] 特性を改善できることを示す. 本稿は以下の構成になっている. 第 2 節で本稿で想定した LoRaWAN のシステムモデルについて説明し、第 3 節で提案手法である周期トラフィックを考慮したリソース割り当て法について説明する. 第 4 節で計算機シミュレーション結果に基づいた評価を行う. 第 5 節はまとめである.

## 2. システムモデル

本研究では、図 1 に示すように GW から半径  $r$  [m] の円形の通信エリア内に  $I$  台の LoRa 端末 ( $I = \{1, \dots, i, \dots, I\}$ ) がランダムに固定配置された LoRaWAN システムを想定する. なお、本システムでは端末間が非同期であるものとする. LoRaWAN は  $K$  個の直交する周波数チャンネル ( $K = \{1, \dots, k, \dots, K\}$ ) を使用して上り通信 (UL: Up Link) および下り通信 (DL: Down Link) を行う. また、端末および GW は 1 シンボルあたりの送信ビット数を決定する拡散率 (SF: Spreading Factor) と呼ばれるパラメータを SF 集合  $S$  から一つ選択し、通信を行う. 拡散率 SF を増加させることにより 1 シンボルあたりで送信可能なビット数は減少するものの、雑音に対する耐性が向上するため長距離通信が可能となる. 端末および GW で生起する全てのパケットは、送信先からの肯定応答 (ACK: Acknowledgement) を要求しない Unconfirmed メッセージとして送信を行うため、再送を行わないものとする.

### 2.1 伝搬路モデル

パスロスとシャドウィングを考慮した伝搬路モデルを使用する. 端末  $i$  と GW におけるパスロス  $P_{\text{Loss}}(d_i)$  [dB] は次式で計算される [9].

$$P_{\text{Loss}}(d_i) = 10\mu \log_{10} d_i + \nu + 10\xi \log_{10} f_c + \zeta \quad (1)$$

ここで、 $d_i$  [m] は端末  $i$  と GW の距離、 $f_c$  [GHz] は搬送波周波数、 $\zeta$  は  $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$  のガウス分布に従うランダム変数、 $\mu, \nu, \xi$  はそれぞれ伝搬係数、伝搬損失オフセット、周波数係数を表す. よって、GW における端末  $i$  から送信された信号の受信電力  $P_{r,i}$  は次式で与えられる.

$$P_{r,i} = P_t - P_{\text{Loss}}(d_i) - \psi \quad (2)$$

ここで、 $P_t$  [dBm] は全端末と GW で共通の送信電力、 $\psi$  [dB] は対数正規分布に従うシャドウィングを表す. なお本研究では、

端末  $i$  と GW の UL および DL のチャンネル特性は一致すると仮定するため、端末  $i$  での GW からの送信信号の受信電力は  $P_{r,i}$  に等しいものとする。

## 2.2 パケット

端末および GW は LoRa 変調を用いてパケットを送信する。LoRa 変調では使用する SF によって 1 シンボルあたりの送信ビット数が変化する。よって、端末  $i$  と GW 間の通信における 1 シンボルの時間長  $T_{s,i}(S_i)$  [sec] は SF  $S_i$  より次式で与えられる。

$$T_{s,i}(S_i) = 2^{S_i} / W \quad (3)$$

ここで、 $W$  [Hz] は帯域幅を表す。1 つのパケット送信に必要なシンボル数  $N_{s,i}(S_i)$  は次式で与えられる。

$$N_{s,i}(S_i) = O_{\text{sym}} + \left\lceil \frac{B_{\text{data}}/R}{S_i} \right\rceil \quad (4)$$

ここで、 $O_{\text{sym}}$  はオーバーヘッドシンボル数、 $B_{\text{data}}$  [bit] はパケットデータサイズ、 $R$  は符号化率を表す。また  $[x]$  は天井関数を表す。これらより、端末  $i$  のパケット送信時間長  $T_{L,i}$  [sec] は次式で表される。

$$T_{L,i} = T_{s,i}(S_i) \times N_{s,i}(S_i) \quad (5)$$

LoRaWAN はパケット送信に DC による制約を受ける。本稿では、厳密な DC 遵守を想定するため、GW はパケットを周波数チャンネル  $k_i$  で送信後、一定期間新たなパケットの送信を周波数チャンネル  $k_i$  で行うことはできないものとする。GW の端末  $i$  との DL における DC 待機時間  $T_i^{\text{DC}}$  [sec] は次式で与えられる。

$$T_i^{\text{DC}} = \left( \frac{1 - D_c}{D_c} \right) T_{L,i} \quad (6)$$

ここで、 $D_c \in (0, 1]$  は Duty 比を表す。端末は複雑な処理が困難なため、周波数チャンネル全体でシステム稼働時間に対して  $D_c$  を満たすように UL パケットの送信を行うものとする。

## 2.3 LoRa 端末

端末  $i \in \mathcal{I}$  はあらかじめ設定された UL パケット生成周期  $G_{p,i} \sim \mathcal{U}(1, G_{p,\text{max}})$  [min] に従い UL パケットを生起するものとする。ここで、 $\mathcal{U}(1, G_{p,\text{max}})$  は  $[1, G_{p,\text{max}}]$  の整数値を生起する一様乱数を表す。また、最初の UL パケットの生起時刻  $T_i^{\text{FP}}$  はシステム開始時刻から  $G_{p,i}$  内でランダムに決定される。端末  $i$  は生起した UL パケットを、周波数チャンネル  $k_i \in \mathcal{K}$  および  $S_i \in \mathcal{S}$  を用いて GW へ送信する。ここで、 $S_i \in \mathcal{S}$  は GW での各端末からの送信信号の信号電力対雑音比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio) を基に割り当てを行う [10]。UL パケットを送信後、端末は受信窓を必ず開くため、GW からの DL パケットを受信可能な状態となる [11]。本研究では、GW から送信された DL パケットは理想的に受信可能と仮定する。

## 2.4 GW

UL パケットの受信成功判定においてパケット衝突時のキャプチャ効果を考慮するため、GW での SNR および信号電力対干渉比 (SIR: Signal-to-Interference Ratio) が、表 1 に示すそれぞれの閾値  $\Gamma_{\text{SNR},S_i}$ 、 $\Gamma_{\text{SIR},S_i}$  を上回った UL パケットのみ受信成功とする。GW が端末  $i$  のパケット受信に成功し端末  $i$  への DL パケットを生起した場合、GW は端末  $i$  と同じ SF  $S_i$

表 1 SNR 閾値及び SIR 閾値 [10], [12].

SF	SNR 閾値	SIR 閾値
	$\Gamma_{\text{SNR},S_i}$ dB	$\Gamma_{\text{SIR},S_i}$ dB
7	-7.5	-11
8	-10	-13
9	-12.5	-16
10	-15	-19

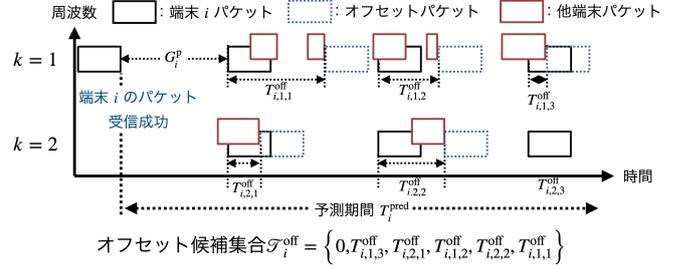


図 2 送信オフセット候補計算の概要

および周波数チャンネル  $k_i$  を用いて DL パケットの送信を行う。その後 GW は、DC により周波数チャンネル  $k_i$  において  $T_i^{\text{DC}}$  期間待機後、新たな DL パケットが送信可能な状態となる。なお、DC による待機期間  $T_i^{\text{DC}}$  中に生起したチャンネル  $k_i$  で送信する DL パケットは破棄する。

## 3. 提案手法

パケット衝突回避を行うために、時分割多元接続 (TDMA: Time Division Multiple Access) を適用し、各端末に異なる時間スロットを割り当てる方法が考えられる。しかしながら、この手法の場合、システム内の端末がお互いに同期している必要がある点、ならびに最適な割り当てを考える場合には組み合わせ最適化を解かなければならない点、そして全ての端末を時間スロットに割り当てることができない場合にどの端末を選択するかを決定しなければならない点など、様々な問題がある。そこで本研究では、UL パケット生起の周期性に起因する連続的なパケット衝突の回避を目的とし、各端末の UL パケット生成周期を活用した集中制御型の周波数チャンネル  $k_i$  及び送信オフセット時間  $T_i^{\text{d}}$  [sec] 割り当て法を提案する。端末は、最初にランダムに UL を行う周波数チャンネルを決定する。GW は端末からの UL パケット受信毎にその端末に対して提案手法による周波数チャンネル  $k_i$  及び送信オフセット時間  $T_i^{\text{d}}$  の割り当てを実行する。そして、送信オフセット時間  $T_i^{\text{d}}$  が割り当てられた端末  $i$  はパケット生起から  $T_i^{\text{d}}$  待機後 UL パケットの送信を行う。

### 3.1 GW での UL パケット生成周期の取得

端末  $i$  の UL パケットにはフレームカウンタ  $n_i$  が含まれているため、GW は受信に成功したパケットが何回目に送信されたパケットかを把握することが可能である [13]。よって GW は 2 回以上パケット受信に成功した端末の UL パケット生成周期  $G_{p,i}$  をフレームカウンタおよび受信時刻より推定可能である。本研究ではパケットの受信に 2 回以上成功した端末の UL パケット生成周期  $G_{p,i}$ 、最初のパケット生起時刻  $T_i^{\text{FP}}$ 、パケット送信時間長  $T_{L,i}$  を GW が理想的に把握可能と仮定する。

### 3.2 送信オフセット候補の算出

GW が端末  $i$  のパケット生成周期  $G_{p,i}$  を把握できている場

表 2 シミュレーション諸元

シミュレーションエリア半径, $r$	895 [m]
シミュレーション時間, $T$	720 [min]
端末数, $I$	1000
送信電力, $P_t$	13 [dBm]
搬送波周波数, $f_c$	0.923 [GHz]
帯域幅, $W$	125 [kHz]
周波数チャネル数, $K$	{1, 2, 4}
SF, $\mathcal{S}$	{7, 8, 9, 10}
符号化率, $R$	4/7
Duty 比, $D_c$	0.01
パスロス指数, $\mu$	4.0
伝搬損失オフセット, $\nu$	9.5
伝搬周波数係数, $\xi$	4.5
オーバーヘッドシンボル数, $O_{\text{sym}}$	20.25
パケットデータサイズ $B_{\text{data}}$	160 [bits]
UL パケット生成最大周期, $G_{\text{p,max}}$	10 [min]

**Algorithm 1** 送信オフセット候補計算アルゴリズム

```

1: Input:
2:    $\mathcal{I}'_e, T_{n_i}^G, T_i^d$ 
3: Initialization:
4:   Ascending sort  $\mathcal{I}'_e = \{T_1^e, \dots, T_{i'}^e, \dots, T_{I'}^e\}$ 
    $T_{i,m,k}^{\text{off}} = T_i^d$ 
   Temporary offset  $T_{\text{temp}}^{\text{off}} = 0$ 
5: for  $i' = 1 \dots I'$  do
6:    $T_{\text{temp}}^{\text{off}} = (T_{i'}^e - T_{n_i}^G + T_i^d) \bmod T_{n_i}^G$ 
7:   if  $f(T_{\text{temp}}^{\text{off}}) = 0$  then
8:      $T_{i,m,k}^{\text{off}} = T_{\text{temp}}^{\text{off}}$ 
9:     Break
10:  end if
11: end for
12: Output:
13:   $T_{i,m,k}^{\text{off}}$ 

```

合, GW は  $n_i$  番目のパケット受信時刻  $T_{n_i}$  から  $n_i + 1$  番目以降のパケット送信予定時刻を推定可能である. また GW は各端末のパケット受信予定時刻を比較することで, 事前にパケット衝突の発生を予測することが可能なため, そのパケット衝突を回避可能な周波数チャネルおよび送信オフセット時間を事前に計算することができる. そこで, GW は端末  $i$  の  $n_i$  番目のパケットを受信後, パケット受信時刻  $T_{n_i}$  から予測期間  $T_i^{\text{pred}}$  の期間の全端末のパケット送信予定時刻を推定する. 本稿では, 予測期間  $T_i^{\text{pred}}$  を次式のように設定する.

$$T_i^{\text{pred}} = G_{\text{p},i} - T_{L,i} + G_{\text{p,max}} \quad (7)$$

また, 予測期間  $T_i^{\text{pred}}$  内の端末  $i$  の生成パケット数  $M_i$  は次式で与えられる.

$$M_i = \lfloor T_i^{\text{pred}} / G_{\text{p},i} \rfloor \quad (8)$$

ここで,  $\lfloor x \rfloor$  は床関数を表す. GW は, 予測期間  $T_i^{\text{pred}}$  における端末  $i$  の  $M_i$  個の UL パケットそれぞれに対して, 各周波数チャネルにおいて他の端末と送信期間がオーバーラップするか判定を行う. ここで, 現在割り当てられている送信オフセット時間  $T_i^d$  における  $n_i + m$  番目パケットのオーバーラップ判定関数  $f(T_i^d)$  を次式で定義する.

$$f(T_i^d) = \begin{cases} 0 & \text{if No overlap} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

次に, 周波数チャネル  $k$  における  $n_i + m$  番目パケットの送信オフセット候補  $T_{i,m,k}^{\text{off}}$  を Algorithm1 に示すアルゴリズムによって計算する. ここで,  $\mathcal{I}'_e$  は予測期間内の他端末のパケット送信終了時刻の集合,  $T_{n_i}^G$  は端末  $i$  のパケット生起時刻を表す. 図 2 に示すように Algorithm1 より得られた送信オフセット候補を集合  $\mathcal{T}_i^{\text{off}}$  の要素とする.

**3.3 周波数チャネルおよび送信オフセット時間割り当て**

GW は送信オフセット候補集合  $\mathcal{T}_i^{\text{off}}$  より端末  $i$  にパケット衝突を回避する周波数チャネルおよび送信オフセットの割り当てを行う. GW は送信オフセット候補それぞれに対して, 予測パケット衝突回数  $\hat{N}_{T_{i,k}^d}$  を計算する. ここで, 送信オフセット

$T_{i,k}^d \in \mathcal{T}_i^{\text{off}}$  における予測パケット衝突回数  $\hat{N}_{T_{i,k}^d}$  の導出関数を  $g(T_{i,k}^d)$  とすると,  $\hat{N}_{T_{i,k}^d}$  が最小となる端末  $i$  の送信オフセット  $T_i^d$  は次式で与えられる.

$$T_i^d = \arg \min_{T_{i,k}^d \in \mathcal{T}_i^{\text{off}}} g(T_{i,k}^d) \quad (10)$$

なお, 周波数チャネル  $k_i$  は式 (10) で決定した  $T_i^d$  に対応するものを割り当てる. GW は周波数チャネル  $k_i$  および送信オフセット時間  $T_i^d$  の割り当て制御情報を含む DL パケットを生起し, 端末  $i$  に送信する.

**4. 計算機シミュレーション**

表 2 にシミュレーション諸元を示す. 計算機シミュレーションでは拡散率 SF 10 で通信可能な最大距離  $r = 895$  [m] を半径とする通信エリア内に,  $I = 1000$  台の端末を配置した. UL パケット生成最大周期  $G_{\text{p,max}}$  を 10 分間とした. LoRaWAN 端末の通信パラメータは日本での LoRaWAN の規定 AS923 に準拠したものを用いる [13].

**4.1 評価指標****4.1.1 PDR**

システムの通信品質を評価するため, PDR を使用する. 全端末は周期的にパケットを生起する. そこで, システム開始から UL パケット生成最大周期毎の PDR を評価する.

$$\text{PDR} \triangleq N_{\text{succ}} / N_{\text{tran}} \quad (11)$$

ここで,  $N_{\text{succ}}$  は UL パケット生成最大周期毎に GW で受信に成功した UL パケット数, UL パケット生成最大周期毎に  $N_{\text{tran}}$  は全端末が送信した UL パケット数を表す.

**4.1.2 AoI**

端末のパケット生起から, GW が受信するまでの遅延を評価するため, AoI を使用する. 端末  $i$  のシミュレーション終了時刻  $T$  までにおける平均 AoI  $\bar{a}_i$  [sec] を以下のように定義する [14].

$$\bar{a}_i \triangleq \frac{1}{T} \sum_{j=0}^{J_i} \left( \frac{G_{\text{p},i}^2}{2} + G_{\text{p},i} D_{i,j} \right) \quad (12)$$

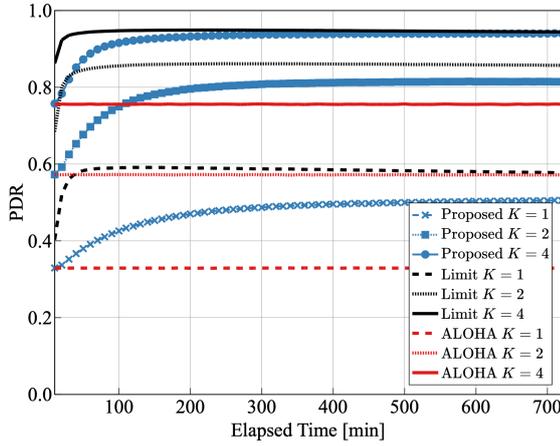


図3 経過時間毎の平均 PDR 特性

ここで、 $J_i$  は GW で受信に成功した端末  $i$  のパケット数、 $D_{i,j}$  [sec] は  $j$  個目のパケットが生起してから GW で受信されるまでの遅延時間を表す。  $\bar{a}_i$  より全端末の平均 AoI の累積分布関数 (CDF: Cumulative Distribution Function) 特性を評価する。 また、最大の遅延量を評価するためピーク AoI (PAoI: Peak Age-of-Information) を使用する。 端末  $i$  の  $j$  個目の受信成功パケットの  $PAoI_{i,j}^{\text{peak}}$  [sec] は次式で定義される。

$$a_{i,j}^{\text{peak}} \triangleq T_{i,j}^r - T_{i,j-1}^g \quad (13)$$

ここで、 $T_{i,j}^r$  [sec] は  $j$  個目パケットの受信完了時刻、 $T_{i,j-1}^g$  [sec] は  $j-1$  個目パケットの生起時刻を表す。 各端末の PAoI の最大値の CDF 特性を評価する。 本研究では 1 個以上パケット受信に成功した端末のみ、AoI と PAoI の計算を行う。

## 4.2 比較手法

本提案の有効性を示すため、2つの手法と特性比較を行う。

### 4.2.1 ALOHA

現在、LoRaWAN で用いられている ALOHA プロトコルを使用した場合の特性を評価する。 ALOHA において、各端末は UL パケット送信毎にランダムに周波数チャンネルを切り替える。 また、UL パケット生起後、待機せずすぐに UL パケットを送信する。

### 4.2.2 Limit

本提案アルゴリズムは GW から端末に制御信号を送信する必要がある。 しかし、DC によって制御信号の送信機会に制約を受ける。 また、GW は 2 回以上 UL パケットの受信に成功した端末のみ送信タイミングが予測できるため、提案アルゴリズムにより送信タイミングを把握していない端末とのパケット衝突が発生する可能性がある。 そこで、提案アルゴリズムの性能限界を評価するため、DC による制約がなく、かつ全端末の送信タイミングを GW が把握している場合の特性を評価する。

## 4.3 シミュレーション結果

### 4.3.1 PDR 特性

図 3 にシステムの開始時刻から UL パケット生成最大周期  $G_{p,\max}$  毎の平均 PDR 特性、図 4 に各端末毎の PDR の CDF 特性、図 5 に、ある時刻の周波数チャンネル数  $K=1$  における UL パケット生成周期毎の平均 PDR 特性を示す。 図 3 より、提案手法は ALOHA と比較して全ての周波数チャンネル数にお

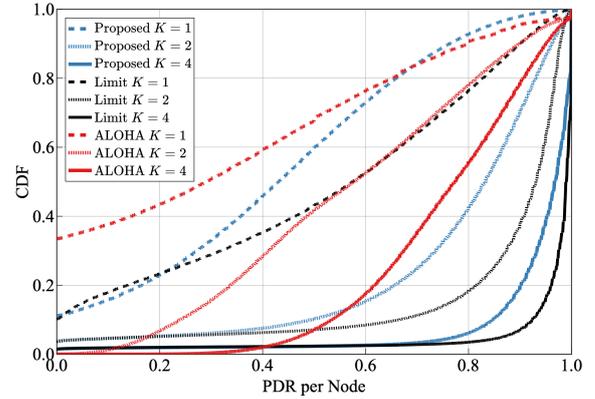


図4 端末毎の PDR 特性の CDF

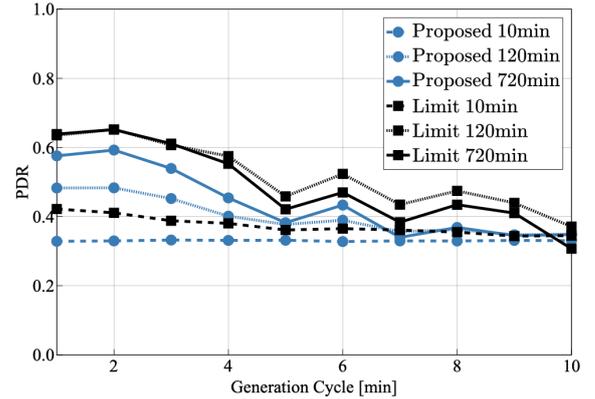


図5  $K=1$  における UL パケット生成周期毎の平均 PDR 特性

いて、時間経過とともに平均 PDR 特性が改善していくことがわかる。 これは、時間経過とともに提案アルゴリズムによって制御信号が送信される端末数が増加し、パケット衝突が発生する通信リソースを使用する端末の割合が減少していくためである。 特に、周波数チャンネル数  $K=2$  の時、提案手法の PDR 特性は約 400 分で収束し、ALOHA と比較して平均 PDR 特性を約 25% 改善できていることがわかる。 また図 4 より、提案手法は周波数チャンネル数  $K=1$  において ALOHA と比較して高 PDR 端末数が減少していることがわかる。 これは、提案手法によってパケット衝突を回避するため各端末の送信タイミングを変更することで、ALOHA ではパケット衝突しない端末の組み合わせが発生するためである。

Limit は DL 送信に DC による制約がなく多数の端末に制御信号を送信可能なため、システム開始直後から PDR を大幅に改善できていることがわかる。 しかし、周波数チャンネル数  $K=1$  の場合、120 分ごろから平均 PDR 特性が劣化していくことがわかる。 図 5 より、提案アルゴリズムを用いる手法では、時間経過とともに UL パケット生成周期が異なる端末間で平均 PDR 特性に差が出るようになる。 これは、提案アルゴリズムが UL パケットの受信毎に実行されるため、UL パケット生成周期が短い端末ほど GW が制御する機会が増えるためである。 また、UL パケット生成周期  $G_{p,i} = 5, 7$  においては、短い UL パケット生成周期を約数に持たないため提案アルゴリズムによる PDR 改善効果が小さくなっていると考えられる。

### 4.3.2 AoI 特性

図 6 に端末毎の平均 AoI の CDF 特性、図 7 に端末毎の最大

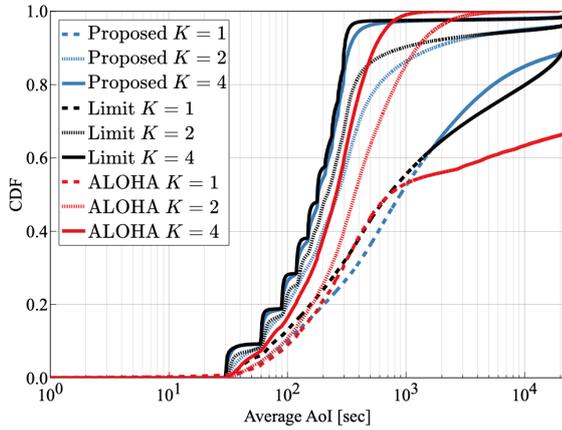


図6 AoIのCDF特性

PAoIのCDF特性を示す。図6より、提案手法は複数周波数チャンネルがある場合、ALOHAと比較してAoIが小さい領域でCDF特性が改善していることがわかる。これは、提案手法による送信オフセットによる遅延の影響よりもPDR改善による効果が大いためである。一方、周波数チャンネル数 $K=1$ の場合は、AoIが小さい領域でALOHAと比較して劣化したCDF特性となっている。これは、周波数チャンネル数 $K=1$ では送信オフセット割り当てのみでパケット衝突の回避を行うため、各端末に割り当てられる送信オフセット量が大きくなるためである。図7より、提案手法は複数周波数チャンネルにおいてALOHAと比較してPAoIの小さい領域でCDF特性を改善している。これは、提案手法によりULパケット生起の周期性に起因する連続的なパケット衝突の発生確率が減少するためである。周波数チャンネル数 $K=1$ において、提案手法は送信オフセットのみによるパケット衝突回避を行っているため、PAoIが小さい領域でALOHAと比較して劣化していることがわかる。

## 5. まとめと今後の課題

本稿では、LoRaWANでの周期的トラフィックにおける連続的なパケット衝突の回避を目的とし、トラフィックの周期性を考慮した集中制御型の無線リソース割り当て法を提案した。本提案法では、各端末の送信周期を基にパケット衝突発生の事前予測を行い、そのパケット衝突を回避するための周波数チャンネルおよび送信オフセット時間の割り当てを行った。計算機シミュレーションより、提案手法はALOHAと比較して周期的トラフィックにおける平均PDR特性を最大で約25%改善可能であることを示した。また、提案手法はALOHAと比較してAoIおよびPAoI特性を改善できることを明らかにした。しかし、本提案法は時間経過とともに送信周期が異なる端末間でPDR特性に差が発生してしまう。そこで今後は、送信周期が異なる端末間でPDR特性に差が発生しない制御方法の考案、ならびにGWからの制御信号と端末からの制御信号がオーバーラップした場合などを考慮した評価を行う。また、一度もパケット受信成功していない端末数の改善に取り組む。

**謝辞** 本研究開発は総務省SCOPE(受付番号JP205004001)の委託によるものである。

## 文献

[1] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and

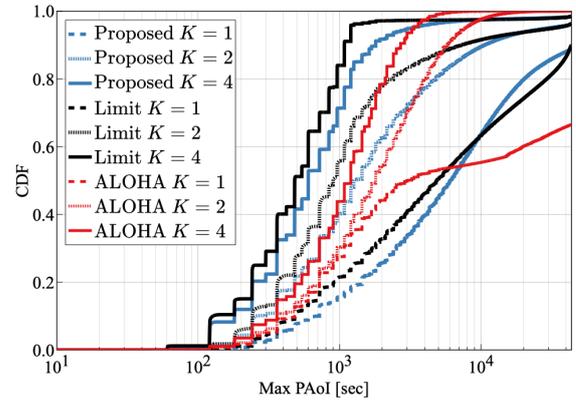


図7 PAoIのCDF特性

M. Zorzi, "Internet of things for smart cities," *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014.

- [2] O. Georgiou and U. Raza, "Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?" *IEEE Commun. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 162–165, 2017.
- [3] W. Guibene, J. Nowack, N. Chalikias, K. Fitzgibbon, M. Kelly, and D. Prendergast, "Evaluation of lpwan technologies for smart cities: River monitoring use-case," *2017 IEEE Wireless Commu. Netw. Conf. Workshops (WCNCW)*, pp. 1–5, 2017.
- [4] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Commun. Surveys & Tut.*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.
- [5] R. K. Verma, S. Bharti, and K. K. Pattanaik, "Gda: Gravitational data aggregation mechanism for periodic wireless sensor networks," *2018 IEEE SENSORS*, pp. 1–4, 2018.
- [6] V. Gupta, S. K. Devar, N. H. Kumar, and K. P. Bagadi, "Modelling of IoT Traffic and Its Impact on LoRaWAN," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1–6, Dec. 2017.
- [7] A. H. Nguyen, Y. Tanigawa, and H. Tode, "Scheduling method for solving successive contentions of heterogeneous periodic flows based on mathematical formulation in multi-hop wsn," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 21, pp. 9021–9033, 2018.
- [8] S. Kaul, M. Gruteser, V. Rai, and J. Kenney, "Minimizing Age of Information in Vehicular Networks," in *Proc. 2011 8th Annu. IEEE Commun. Soc. Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Commun. and Netw.*, pp. 350–358, 2011.
- [9] P. Series, "Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz," [online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1411-9-201706-S/en>, 2017.
- [10] Semtech, "Semtech SX1272 Datasheets," [online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/loro-core/sx1272>.
- [11] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, and O. Hersent, "Lorawan specification," *LoRa alliance*, 2015.
- [12] D. Croce, M. Gucciardo, S. Mangione, G. Santaromita, and I. Tinnirello, "Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 4, pp. 796–799, Apr. 2018.
- [13] LoRa Alliance, "LoRaWAN Regional Parameters v1.1rB," [online]. Available: [https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm\\_regional\\_parameters\\_v1.1rB\\_-\\_final.pdf](https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rB_-_final.pdf), Dec. 2018.
- [14] S. Kaul, R. Yates, and M. Gruteser, "Real-Time Status: How Often Should One Update?" in *Proc. 2012 IEEE IN-FOCOM*, pp. 2731–2735, 2012.