

## 隠れ端末問題を考慮した自律分散型リソース割当て法

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: <sup>†</sup>{kaburaki, adachi, fujii}@awcc.uec.ac.jp, <sup>††</sup>takyu@shinshu-u.ac.jp, <sup>†††</sup>maiohta@fukuoka-u.ac.jp

**あらまし** 近年、農業や工業など幅広い産業分野で低コスト、低消費電力、広い通信エリアという特徴を持つ低消費電力広域ネットワーク (LPWAN) の利用が期待されている。一般的な LPWAN では、システム内のトラフィックは周期的な上りリンク (UL) 通信が支配的になる傾向がある。また日本においてアンライセンスバンドを使用する LPWAN は、パケット送信前にキャリアセンス (CS) を行うことが義務付けられている。しかし、通信エリアが広い場合、パケット衝突が発生する隠れ端末問題が顕著になる。特に周期的な UL 通信の場合、一部送信周期の組み合わせでは隠れ端末問題によるパケット衝突が連続的に発生してしまう。そこで本研究では、複数送信周期システムに対応した隠れ端末問題を考慮した自律分散型リソース割当て法を提案する。計算機シミュレーションにより提案手法が CS を利用した既存の手法と比較して、隠れ端末問題によるパケット衝突を低減し、PDR を最大で約 15% 向上可能であることを示す。

**キーワード** WSN, LPWA, LoRaWAN, リソース制御, 隠れ端末問題

## Resource Allocation Strategy to Tackle the Hidden Node Problem 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> Advanced Wireless & Communication Research Center, The University of Electro-Communications

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: <sup>†</sup>{kaburaki, adachi, fujii}@awcc.uec.ac.jp, <sup>††</sup>takyu@shinshu-u.ac.jp, <sup>†††</sup>maiohta@fukuoka-u.ac.jp

**Abstract** In recent years, low-power wide area networks (LPWANs), characterized by low cost, low energy consumption, and extensive communication area, are expected to be used in industrial fields such as agriculture and industry. In a typical LPWAN, the traffic in the system tends to be dominated by periodic uplink (UL) communications. In Japan, LPWANs using unlicensed bands are required to perform carrier sense (CS) before transmitting packets. However, when the communication area is large, the hidden node problem of packet collisions becomes more serious. Especially in the case of periodic UL communications, the combination of some transmission cycles causes continuous packet collisions. Therefore, this paper proposes an autonomous decentralized resource allocation method for the systems with different transmission periodicities that takes into account the hidden node problem. The computer simulation results show that the proposed method can reduce packet collisions and improve PDR by up to about 15% compared to existing CS-based methods.

**Key words** WSN, LPWA, LoRaWAN, Resource control, Hidden node problem

## 1. はじめに

近年、無線機器の小型化および低消費電力化により、無線通信機能を具備したセンサ端末などインターネットに接続可能なIoT (Internet-of-Things) 機器を用いたシステムが急速に普及している [1]。IoT システムの中でも、無線センサーネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) はケーブルの敷設が不要かつ端末配置の自由度の高さから、農業や工業など幅広い産業分野での利用が期待されている [2], [3]。特に低コスト、低消費電力、広い通信エリア、という特徴を持つ低消費電力広域ネットワーク (LPWAN: Low Power Wide Area Network) が WSN 規格として注目を集めている [1]。

一般的に LPWAN では、端末は特定のエリア内に固定配置され、観測データなどを定期的にゲートウェイ (GW: GateWay) に送信する。そのため、システム内のトラフィックは周期的な上りリンク (UL: Up Link) 通信が支配的となる [4]~[6]。また日本においてアンライセンスバンドを使用する LPWAN は、パケット衝突回避および周波数共有の観点からパケット送信前にキャリアセンス (CS: Career Sense) を行うことが義務付けられている。しかし、通信エリアが広い場合、他端末の通信を CS により検知することができず、パケット衝突が発生する隠れ端末問題が顕著になる。特に周期的な UL 通信の場合、一部送信周期の組み合わせでは隠れ端末問題によるパケット衝突が連続的に発生してしまう [7]。

そこで筆者らは以前「CS とトラフィックの周期性を活用した自律分散型無線リソース割当法」を提案した [8]。この手法では、UL 通信と下りリンク (DL: Down Link) の対応関係および CS により他端末向けの DL 信号を検知し、各端末が自律的に無線リソースを選択することで、隠れ端末関係にある端末同士のパケット衝突を回避する。計算機シミュレーションにより、既存手法と比較してパケット配信率 (PDR: Packet Delivery Rate) を改善できることが示されている。しかし、全端末共通の送信周期のシステム (単一送信周期システム) を前提として検討を行っていたため、評価が限定的であった。そこで、筆者らは文献 [9] にて、文献 [8] の手法を複数送信周期候補からランダムに送信周期を選択した端末で構成されるシステム (複数送信周期システム) に適用した場合の評価を行なった。全端末共通の送信周期ではないシステムにおいても、文献 [8] で提案した手法により、パケット衝突回避があることを確認している。しかし、単一送信周期システムの場合と比較して、PDR の改善率が低くなっている。

そこで本研究では、複数送信周期システムに対応した隠れ端末問題を考慮した自律分散型リソース割当て法を提案する。本提案手法は LPWAN に適用可能な LBT (LBT: Listen Bbefore Talk) 方式である CSMA-x [10] をベースとしている。計算機シミュレーションにより提案手法が CSMA-x と比較して、隠れ端末問題によるパケット衝突を低減し、PDR を最大で約 15% 向上可能であることを示す。

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隠れ端末問題を考慮した自律分散型リソース割当て

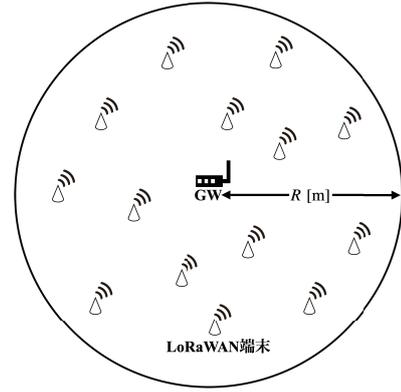


図 1 システムモデルの概要

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、LPWAN の一種である LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) システムを想定する。システムモデルの概要を図 1 に示す。本 LoRaWAN システムは単一の GW を中心とした半径  $R$  [m] の円形の通信エリア内に  $I$  台の端末 ( $\mathcal{I} = \{1, \dots, i, \dots, I\}$ ) をランダムに固定配置する。各端末および GW は  $K$  個の直交する周波数チャネル ( $\mathcal{K} = \{1, \dots, k, \dots, K\}$ ) を使用可能とする。

### 2.1 パケット ToA

LoRaWAN で使用される LoRa 変調には 1 シンボルあたりのビット数を定義する拡散率 (SF: Spreading Factor) と呼ばれるパラメータがある。端末  $i \in \mathcal{I}$  が SF  $S_i$  を使用している場合、1 シンボル長  $T_i^s(S_i)$  [sec] は次式で表される。

$$T_i^s(S_i) = 2^{S_i}/W \quad (1)$$

ここで、 $W$  [Hz] は帯域幅を表す。また 1 パケットの送信に必要なシンボル数  $N_i^s(S_i)$  は次式で表される。

$$N_i^s(S_i) = O_{\text{sym}} + \left\lceil \frac{B_{\text{data}}/R}{S_i} \right\rceil \quad (2)$$

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、 $\lceil x \rceil$  は天井関数を表す。よって、端末  $i$  のパケットあたりの ToA (Time on Air)  $T_i^{\text{ToA}}$  [sec] は次式で表される。

$$T_i^{\text{ToA}} = T_i^s(S_i) \times N_i^s(S_i) \quad (3)$$

### 2.2 LoRa 端末

端末  $i$  は UL パケット生成周期  $G_i^p \sim \mathcal{U}(1, G_{\text{max}}^p)$  [min] に従って UL パケットを生起するものとする。ここで  $\mathcal{U}(a, b)$  は  $[a, b]$  の範囲の整数値をランダムに生起する関数、 $G_{\text{max}}^p$  [min] は最大 UL パケット生成周期を表す。なお、端末が非同期に動作していることをモデル化するため、各端末が最初に送信する UL パケットの生起時刻には、 $G_i^p$  内でランダムに決定される初期送信タイミングオフセットがシステム開始時刻に付加されているものとする。端末  $i$  は生起した UL パケットを SF  $S_i$  および周波数チャネル  $k_i \in \mathcal{K}$  を用いて GW へ送信する。なお、各端末の SF は

GW での信号電力対雑音電力比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio) を基に事前に決定されているものとする [11]. また, 全 UL パケットは GW 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. UL パケットを送信後, 端末は受信窓待機時間  $T^w$  [sec] 待機し, 受信窓を開くことで, GW からの DL パケットを受信可能な状態となる. なお本研究では, 受信窓を  $T_i^{\text{ToA}}$  時間開き, この期間に 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.

### 2.3 GW

ある時刻, ある周波数チャネルにおいて送信中の UL パケットが単一かつ GW におけるその UL パケットの受信信号 SNR が閾値を上回った場合, GW は受信成功するものとする. また, ある時刻, ある周波数チャネルにおいて送信中の UL パケットが複数であった場合はキャプチャ効果を考慮する. GW において最初に受信処理を開始した UL パケットに関して, SNR および信号電力対干渉電力比 (SIR: Signal-to-Interference Ratio) がそれぞれの閾値を上回った場合, 受信成功するものとする [11], [12]. GW が端末  $i$  のパケット受信に成功し DL パケットを送信する場合, GW は端末  $i$  と同じ SF  $S_i$  を用いて周波数チャネル  $k_i$  で DL パケットを送信する. DL パケットの送信頻度はシステム内の端末数に大きく影響を受けるため, 厳密に DC (Duty Cycle) 制約を考慮する必要がある. そこで GW は DL パケットを周波数チャネル  $k_i$  で送信後, 次式で与えられる  $T_{k_i}^{\text{DC}}$  [sec] 期間, 周波数チャネル  $k_i$  を用いる DL パケットの送信を待機する.

$$T_{k_i}^{\text{DC}} = \left( \frac{1 - D_c}{D_c} \right) T_i^{\text{ToA}} \quad (4)$$

ここで,  $D_c \in (0, 1]$  は Duty 比,  $T_i^{\text{ToA}}$  は端末  $i$  のパケット送信時間長を表す. なお, DL 宛先受信窓の開いている期間に DC 制約を満たさなかった DL パケットは破棄する.

### 2.4 CSMA-x [10]

本研究において, 各端末は CSMA-x に基づくパケット衝突回避を実行するものとする. CSMA-x では, パケット送信前に  $T^{\text{CS}}$  [msec] の間, CS を行う [10]. この時, CS により観測した電力値  $P_i^{\text{CS}}$  [dBm] が CS 閾値  $\Gamma^{\text{CS}}$  [dBm] 以下であった場合, CS 時間経過後すぐにパケットを送信する. 一方  $P_i^{\text{CS}}$  [dBm] が  $\Gamma^{\text{CS}}$  [dBm] を超えていた場合, 周波数チャネル  $k_i$  が使用中であると判定し, バックオフ処理を行う.  $m$  番目パケットのバックオフ処理における送信待機時間  $T_{\text{back}}^{\text{CS}}$  [sec] は次式で与えられる.

$$T_{\text{back}}^{\text{CS}} = U \left( 0, 2^{n_{\text{min}}^{\text{CS}} + n_r^{\text{CS}}} \right) \quad (5)$$

ここで  $n_{\text{min}}^{\text{CS}}$  最小バックオフ指数,  $n_r^{\text{CS}}$  は  $m$  番目パケットにおけるバックオフ回数を表す. 最大バックオフ指数  $n_{\text{max}}^{\text{CS}}$  よりバックオフ処理は  $n_{\text{min}}^{\text{CS}} + n_r^{\text{CS}} \leq n_{\text{max}}^{\text{CS}}$  を満たすまで行われる. CSMA-x では一般的な CSMA/CA とは異なり, バックオフ期間中の CS は行わない. バックオフ処理後, 端末は再び CS を  $T^{\text{CS}}$  [sec] 間行い, パケットを送信可能かどうか判定する.

## 3. 提案手法

本研究では, 隠れ端末問題を考慮した自律分散型リソース割

当法を提案する. LPWAN のように広範な通信エリアを持つシステムに対して CSMA-x などの LBT ベースの手法を適用した場合, CS によって UL 信号を検知できない「隠れ端末問題」がシステムの通信品質に大きく影響してしまう. そこで提案手法では CSMA-x に加えて, 「GW からの DL 信号」と「UL 通信の周期性」を活用し, 隠れ端末問題によるパケット衝突の低減を行う. 具体的に提案手法は隠れ端末に対する GW からの DL 信号を CS によって検知することで, 使用無線リソースを切り替える.

### 3.1 提案手法の概要

周期的な UL 通信環境において, 初期送信タイミングオフセットにより送信タイミングがオーバーラップしている端末間では毎回バックオフ処理が発生してしまう. さらにバックオフ処理によって決定される待機時間は確率的に決定されるため, UL 通信の周期性が成り立たなくなってしまう. そこで端末  $i$  に送信タイミングオフセット  $T_i^{\text{off}}$  を導入する.

一般に GW からの DL 信号は全端末に届くと考えられる. よって, 端末  $i$  において隠れ端末である端末  $i'$  に対する DL 信号は端末  $i$  の CS により検出可能な場合がある. そこで, 端末  $i$  は  $m$  番目の UL パケット送信タイミングを一時的に変更かつタイミング変更前の  $m$  番目の UL パケットに対応した受信窓タイミングで CS を実行する. 端末  $i$  が受信窓タイミング CS により DL 信号を検出した場合,  $T^w$  が共通なことから端末  $i$  の  $m$  番目 UL パケット送信タイミングで他端末が UL パケットを送信していたと端末  $i$  は推定可能である. そのため, 受信窓タイミング CS により DL 信号を検出した場合, 端末  $i$  は使用周波数チャネル  $k_i$  を変更することでパケット衝突回避が可能となる. しかし, GW が端末  $i'$  に DL 信号を送信するためには, 端末  $i'$  の UL パケットを正常に受信する必要がある. そのため, 隠れ端末問題と UL 通信の周期性により発生しているパケット衝突を一時的に回避する必要がある. そこで本稿では, 各端末に送信タイミング変更確率  $p^t$  を導入し, 確率的に送信タイミングを変更することで一時的なパケット衝突回避を行う.

### 3.2 GW の DL 送信規範

LPWAN における一般的な GW は半二重通信動作かつ DC 制約があるため, GW が全端末の全 UL パケットに DL パケットを送信するのは困難かつ周波数利用効率の観点から非効率である. そこで, パケット衝突回避に寄与するとヒューリスティック的に考えられる端末に対してのみ DL パケットを送信する. 具体的には後述する二つの条件を満たした端末にのみ DL パケットを送信する.

端末  $i$  の UL パケットの受信に成功した場合, パケットヘッダーに含まれている情報に基づき, GW はパケットカウンタ  $m$  を把握可能である. よって GW は端末  $i$  からの  $j-1$  回目受信成功と  $j$  回目受信成功の間におけるパケットロス数  $\hat{N}_i^{\text{loss}}(j)$  を推定可能である. 周期的な UL 通信環境では, 連続的なパケット衝突が発生している端末によりシステム全体の PDR が低下するため, 連続的にパケット衝突が発生している端末に使用リソース変更を促すことが有効である [7]. そこで, 一つ目の条件を次式のように考える.

$$\hat{N}_i^{\text{loss}}(j) \geq 2 \quad (6)$$

式 (6) により GW は前回の受信成功時から 2 パケット以上の連続的なパケット衝突が発生していると推定した端末を DL パケット送信対象にすることができる。式 (6) を満たした端末を  $i^*$  と定義する

本提案において、DL パケットは DL パケット送信対象以外に、受信窓タイミング CS を行っている端末の無線リソース選択に影響を及ぼす。そこで「GW において端末  $i^*$  の  $j$  回目パケット受信処理時に、周波数チャネル  $k_{i^*}$  以外の全周波数チャネルで受信処理を行っていない」を二つ目の条件とする。この二つ目の条件により、受信窓タイミング CS により周波数チャネルを切り替える端末において、切り替え先の周波数チャネルでのパケット衝突確率を低減することが可能となる。

### 3.3 送信タイミング変更確率

端末  $i$  に送信タイミング変更確率  $p_i^{\dagger}$  を導入する。端末  $i$  は確率  $p_i^{\dagger}$  で UL パケットの送信タイミングを一時的に変更する。ここで  $p_i^{\dagger}$  で送信タイミングを変更した  $m$  番目の UL パケットのインデックスを  $m'$  とする。UL パケットの送信タイミングは CS 結果に依存するため、CS 開始時刻を変更することで一時的に変更した送信タイミングを定義する。 $m'$  番目パケットの CS 開始時刻  $T_{i,m'}^{\text{CS}}$  は次式で表される。

$$T_{i,m'}^{\text{CS}} = T_{i,m}^{\text{CS}} + T^{\text{CS}} + T_i^{\text{ToA}} + 2T^{\text{w}} \quad (7)$$

$m'$  番目パケットは  $T_{i,m'}^{\text{CS}}$  に CS を開始し、CSMA-x に基づき UL パケットを送信する。

なお端末  $i$  は GW からの DL パケット受信回数  $m_i^{\text{DL}}$  によって  $p_i^{\dagger}$  を変更する。

$$p_i^{\dagger} = \begin{cases} P^{\dagger} & \text{if } m_i^{\text{DL}} \bmod 2 = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

ここで  $P^{\dagger}$  は初期送信タイミング変更確率、関数  $a \bmod b$  は  $a$  の  $b$  による余剰を表す。

### 3.4 受信窓タイミング CS

送信タイミング変更確率  $p_i^{\dagger}$  により送信タイミングを変更した場合、端末  $i$  は CSMA-x に基づく CS に加えて受信窓タイミング CS を実行する。受信窓タイミング CS の開始時刻  $T_{i,m'}^{\text{RWCS}}$  は次式で表される。

$$T_{i,m'}^{\text{RWCS}} = T_{i,m}^{\text{CS}} + T^{\text{CS}} + T_i^{\text{ToA}} + T^{\text{w}} \quad (9)$$

GW の DC 制約により、DL パケットの送信タイミングは DL 送信対象の受信窓期間内で変化する。そこで、受信窓タイミング CS の実行長を  $T_i^{\text{ToA}}$  とし通常の CS より長く実行するものとする。式 (9) により、端末  $i$  は本来の UL パケット送信タイミングにオーバーラップして UL パケットを送信している他端末に対する DL パケット送信タイミングで CS を行うことができる。

CS では周波数チャネル  $k_i$  における電力値から信号の有無を検知する。よって受信窓タイミング CS のみでは検出した信号が GW からの DL 信号であるか判定は困難である。そこで、自

端末に対する DL パケット受信電力  $P_i^{\text{RDL}}$  [dBm] と受信窓タイミング CS によって観測した電力値  $P_i^{\text{CS}}$  を比較することで、DL 信号判定を行う。次式で表される DL 判定規範関数  $f$  を考え、1 が出力された場合、端末  $i$  は DL 検出 CS により検出した信号を DL 信号と判定する [8]。

$$f(P_i^{\text{CS}}, P_i^{\text{RDL}}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{round}(P_i^{\text{CS}}) = \text{round}(P_i^{\text{RDL}}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 $\text{round}(x)$  は最近傍の整数値に丸め込みを行う関数を表す。

## 3.5 端末における無線リソース制御

### 3.5.1 送信タイミングオフセットの決定

端末  $i$  において  $m$  番目 UL パケットに対しての DL パケットを受信し、 $m_i^{\text{DL}} \bmod 2 = 0$  を満たす場合、次式で送信タイミングオフセット  $T_i^{\text{off}}$  を決定する。

$$T_i^{\text{off}} = (T_{i,m}^{\text{start}} - T_{i,m}^{\text{g}} - T^{\text{CS}}) \bmod G_i^{\text{p}} \quad (11)$$

ここで  $T_{i,m}^{\text{start}}$  [sec] は  $m$  番目パケットの送信開始時刻、 $T_{i,m}^{\text{g}}$  [sec] は  $m$  番目 UL パケット生起時刻を表す。よって、 $m+1$  番目パケットにおける CS 実行開始時刻  $T_{i,m+1}^{\text{CS}}$  [sec] は次式で表される。

$$T_{i,m+1}^{\text{CS}} = T_{i,m+1}^{\text{g}} + T_i^{\text{off}} \quad (12)$$

### 3.5.2 周波数チャネルの切り替え

端末  $i$  が選択済みの周波数チャネルの集合を  $\mathcal{K}'_i \subseteq \mathcal{K}$ 、新たに選択する周波数チャネルを  $k_{i^*}$  と定義する。式 (10) により DL 検出と判定した端末  $i$  は周波数チャネル  $k_i$  を変更する。端末  $i$  は次式を満たすようにランダムに  $k_{i^*}$  を決定する。

$$k_{i^*} \in \mathcal{K} \setminus \mathcal{K}'_i \quad (13)$$

GW での DL 送信規範により、端末  $i$  の UL 送信タイミングにオーバーラップして UL を送信する端末が  $k_{i^*}$  にいる確率を低減できているため、端末  $i$  はランダムに周波数チャネルを切り替えることが可能である。なお  $\mathcal{K} \setminus \mathcal{K}'_i = \emptyset$  となった場合は、 $\mathcal{K}'_i = \emptyset$  に初期化する。周波数チャネル  $k_{i^*}$  に切り替えた場合、式 (8) とは独立して  $p_i^{\dagger} = 0$  に更新する。

## 4. 計算機シミュレーション

計算機シミュレーションでは、全端末が DL 信号を CS で検知可能な距離  $R = 300$  [m] を半径とする通信エリア内に、端末を一様ランダムに配置し、LoRaWAN 端末の通信パラメータは日本での LoRaWAN の規定 AS923 に準拠する。本研究では、リソース割当てによる通信品質への影響を評価するためパスロスみの伝搬路モデルを採用する。端末  $i \in \mathcal{I}$  から送信された信号の GW における受信電力  $P_i^{\text{r}}$  [dBm] は次式で与えられる。

$$P_i^{\text{r}} = P^{\text{t}} - P_{\text{Loss}}(d_i) \quad (14)$$

ここで、 $P^{\text{t}}$  [dBm] は全端末で共通の送信電力、 $P_{\text{Loss}}(d_i)$  [dB] はパスロスを表す。パスロスには都市部における見通し外 (NLoS: Non-Line-of-Sight) 環境を考慮した以下のモデルを採用する [13]。

表 1 シミュレーション諸元

シミュレーションエリア半径 $R$	300 [m]
シミュレーション時間 $T$	4320 [min]
端末数 $I$	{500, 1000, 1500}
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]
周波数チャンネル数 $K$	{2, 4, 8}
SF $S$	7
符号化率 $R$	4/7
Duty 比 $D_c$	0.01
雑音電力スペクトラム密度, $N_0$	-174 [dBm/Hz]
パスロス指数 $\alpha$	4.0
伝搬損失オフセット $\beta$	9.5
伝搬周波数係数 $\gamma$	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]
最大 UL パケット生成周期 $G_{\text{max}}^{\text{P}}$	5 [min]
SNR 閾値	-7.5 [dB]
SIR 閾値	6 [dB]
CS 閾値 $\Gamma^{\text{CS}}$	-110 [dBm]
CS 実行時間 $T^{\text{CS}}$	5 [msec]
最小バックオフ指数 $n_{\text{min}}^{\text{CS}}$	1
最大バックオフ指数 $n_{\text{min}}^{\text{CS}}$	3
受信窓待機時間, $T^{\text{w}}$	1 [sec]
初期送信タイミング変更確率, $P^{\text{t}}$	0.05

$$P_{\text{Loss}}(d_i) = 10\alpha \log_{10} d_i + \beta + 10\gamma \log_{10} f_c \quad (15)$$

ここで,  $d_i$  [km] は端末  $i$  と GW の距離,  $f_c$  [MHz] は搬送波周波数,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  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. なお, 端末  $i$  における UL チャンネルおよび DL チャンネルにおいて双対性が成り立つとし, GW からの DL パケットの受信信号電力は  $P_i^{\text{r}}$  に等しいと仮定する. また提案手法の有効性を示すため, CSMA-x のみによるパケット衝突回避法との比較を行う. 表 1 にシミュレーション諸元を示す.

#### 4.1 評価指標

本研究は隠れ端末問題によるパケット衝突を回避することを目的としている. そこで, 10 分間毎の隠れ端末問題によるパケット衝突率  $H_c$  を評価する.

$$H_c \triangleq \frac{\sum_{i=1}^I N_{i,c}^{\text{hid}}}{\sum_{i=1}^I N_{i,c}^{\text{gen}}} \quad (16)$$

ここで,  $c \in \{1, \dots, c, \dots, C\}$  は 10 分間を表すインデックス,  $N_{i,c}^{\text{hid}}$  は CS により検知不可な端末との衝突パケット数,  $N_{i,c}^{\text{gen}}$  は生起パケット数を表す. また, 端末毎の PDR の累積分布関数 (CDF: Cumulative Distribution Function) 特性を評価する. なお端末  $i$  の PDR は端末  $i$  の総送信成功パケット数を端末  $i$  の総送信パケット数で割ったものと定義する. パケット衝突と送信タイミングオフセットによる遅延の影響を評価するため, GW における端末  $i$  からの UL パケット受信間隔 (PRI:

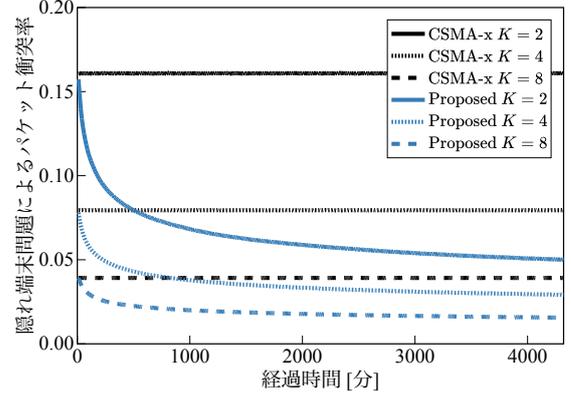


図 2 隠れ端末問題によるパケット衝突率の時間変化 ( $I = 1000$ )

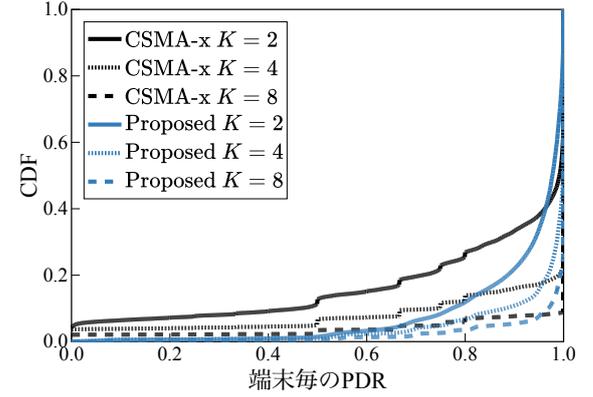


図 3 端末毎の PDR の CDF ( $I = 1000$ )

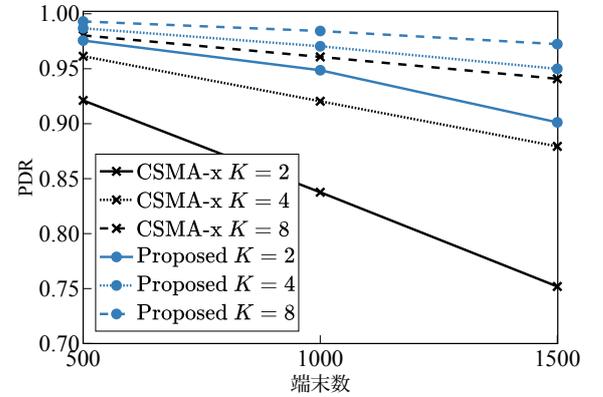


図 4  $c = 432$  における端末数毎の平均 PDR

Packet Reception Interval) を評価する. 端末  $i$  における  $G_i^{\text{P}}$  で正規化した PRI は次式のように定義する.

$$\text{PRI}_i \triangleq \frac{1}{J_i - 1} \sum_{j=1}^{J_i} \left( \frac{T_{i,j}^{\text{R}} - T_{i,j-1}^{\text{R}}}{G_i^{\text{P}}} \right) \quad (17)$$

ここで  $J_i$  は GW で受信に成功した端末  $i$  の UL パケット数,  $T_{i,j}^{\text{R}}$  [sec] は GW で受信に成功した端末  $i$  の  $j$  番目パケットの受信成功時刻を表す.

#### 4.2 シミュレーション結果

図 2 に端末数  $I = 1000$  における 10 分間毎の隠れ端末によるパケット衝突率  $H_c$  の特性を示す. 図 2 より, 提案手法は全周波数チャンネル数において時間経過とともに隠れ端末問題によるパケット衝突率を低減していることがわかる. これは送信タ

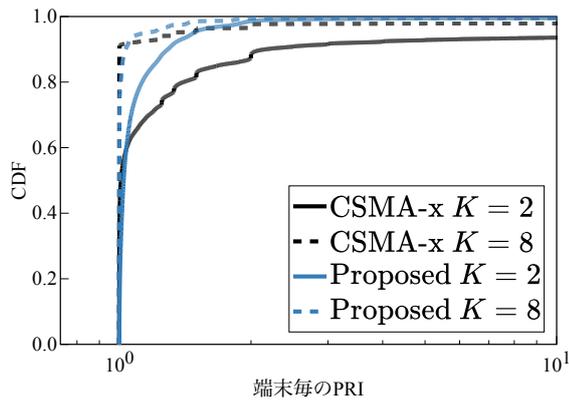


図5 PRI ( $I = 1000$ )

タイミングオフセットおよび、受信窓タイミングCSに基づく周波数チャンネル切り替えにより隠れ端末関係にある端末間で異なる無線リソースを使用するようになるためである。特に周波数チャンネル数  $K = 2$  において提案手法はCSMA-xと比較して最大約11%隠れ端末問題によるパケット衝突率を低減可能であることがわかる。図2より提案手法の特性変化率は経過時間とともに減少していることがわかる。これは提案手法はGWからのDLパケットをトリガーとして動作するため、時間経過とともにDL送信規範を満たす端末数が減少し無線リソース制御を行う端末数が減少してしまうためである。

図3に端末毎のPDRのCDF特性を示す。図3より、CSMA-xでは極端にPDRが低い端末が存在していることがわかる。これは隠れ端末関係および一部送信周期の組み合わせの端末間で連続的にパケット衝突が発生しているためである。一方提案手法は全周波数チャンネル数においてCSMA-xと比較してPDRが低い端末の発生を抑制できていることがわかる。これは、提案手法では一時的な送信タイミングの変更および送信タイミングオフセットにより時間方向に各端末の送信タイミングが分散するようになり、連続的なパケット衝突が回避できるようになるためである。図4に  $C = 432$  における各端末数毎の10分間の平均PDRを示す。図4より、提案手法は端末数が変化した場合でもCSMA-xと比較して優れたPDRを達成可能であることがわかる。特に、端末数が多いまたは周波数チャンネル数が少ない場合に提案手法のCSMA-xに対する改善率は大きくなっており、 $I = 1500, K = 2$  の時最大約15%PDRを改善できていることがわかる。これは、提案手法は先述の通りDLパケットをトリガーとしているため、隠れ端末問題が深刻とならない無線リソースが潤沢な環境ではDL送信機会が減少してしまうためである。

図5に端末数  $I = 1000$  における端末毎のPRLのCDF特性を示す。PRIは1に漸近するほど所望の周期でパケット受信できていることを表す。図5より提案手法は周波数チャンネル数に依存せず、大きいPRIの端末数の割合を減少できていることがわかる。これは、提案手法は送信タイミングオフセットや一時的な送信タイミング変更による遅延の影響よりも、GWで連続的にパケット受信に成功するようになる影響の方が大きいためである。

## 5. まとめ

本研究では、隠れ端末問題を考慮した自律分散型リソース割

当法を提案した。本提案手法では、DLパケットの受信および受信窓タイミングCSによるDL検知をトリガーとして各端末自律的に無線リソースの選択を行う。特に受信窓タイミングでのCSにより隠れ端末向けDL信号を検知し、パケット衝突回避が見込める周波数チャンネルに切り替えることで、パケット衝突の回避を行った。計算機シミュレーションより、提案手法はCSMA-xと比較してPDR特性を最大約15%改善可能であることを示した。今後の課題として、提案手法の収束速度の改善方法について検討する。

**謝辞** 本研究開発は、JSPS 科研費 23KJ0965 の助成を受けたものである。また本研究の一部は総務省SCOPE(受付番号JP235004002)の委託によるものである。

## 文献

- [1] M. Jouhari, E. M. Amhoud, N. Saeed, and M.-S. Alouini, "A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges," *arXiv preprint arXiv:2202.11082*, 2022.
- [2] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of Things for Smart Cities," *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014.
- [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] R. K. Verma, S. Bharti, and K. K. Pattanaik, "GDA: Gravitational Data Aggregation Mechanism for Periodic Wireless Sensor Networks," in *Proc. 2018 IEEE SENSORS*, pp. 1–4, 2018.
- [5] 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.
- [6] Z. Xu, J. Luo, Z. Yin, T. He, and F. Dong, "S-MAC: Achieving High Scalability via Adaptive Scheduling in LPWAN," in *Proc. IEEE INFOCOM 2020*, pp. 506–515, 2020.
- [7] A. Kaburaki, K. Adachi, O. Takyu, M. Ohta, and T. Fujii, "Adaptive Resource Allocation Utilizing Periodic Traffic and Clock Drift in LPWAN," *IEEE Trans. Wireless Commun. (Early Access)*, 2023.
- [8] 蕪木碧仁, 安達宏一, 田久修, 太田真衣, 藤井成生, "キャリアセンスとトラフィックの周期性を活用した自律分散型リソース割当法の検討", *信学技報*, vol. 123, no. 76, pp. 105–110, 2023年6月.
- [9] —, "キャリアセンスとトラフィックの周期性を活用した自律分散型リソース割当法の検討", *信学ソ大*, B-5-76, 2023年9月.
- [10] T.-H. To, and A. Duda, "Simulation of LoRa in NS-3: Improving LoRa Performance with CSMA," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, 2018, pp. 1–7.
- [11] Semtech, "Semtech SX1272 Datasheets," [online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1272>.
- [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] 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.