

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

蕪木 碧仁[†] 安達 宏一[†] 田久 修^{††} 太田 真衣^{†††} 藤井 威生[†]

[†] 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

^{††} 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

^{†††} 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、多数のセンサ端末を収容可能かつ数キロメートルの長距離通信が可能な低消費電力広域ネットワーク (LPWAN) が産業界で注目を集めている。環境モニタリングなどの場合、LPWAN 内の通信は周期的な上りリンク (UL) 通信が支配的となる。簡易な非同期型ランダムアクセス方式を採用している LPWAN ではセンサ端末数の増加に伴い、パケット衝突が頻発しシステムの通信品質が低下してしまう。そこで本研究では、センサ端末における CS と UL 通信の周期性を活用した自律分散型リソース割当て法を提案する。CS を活用したリスンビフォアトーク (LBT) では隠れ端末問題によりパケット衝突が発生してしまう。そこで隠れ端末問題に対処するため、センサ端末にて GW からの DL 信号に基づいた隠れ端末検知を行う。また、各端末は周期的に UL 通信を行なっているため、隠れ端末に対する DL 信号送信タイミングの推定が可能である。よって隠れ端末関係にある端末を DL 信号により検出し、使用中と判断した周波数チャネルとは異なる周波数チャネルを自律的に選択することでパケット衝突回避が可能となる。計算機シミュレーションにより提案手法が LBT を使用した従来手法と比較して、隠れ端末問題によるパケット衝突を低減し、パケット配信率 (PDR) を最大で約 9% 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

LBT-based Resource Allocation Schemes Utilizing Periodicity of Traffic in LPWAN

Aoto KABURAKI[†], Koichi ADACHI[†], Osamu TAKYU^{††}, Mai OHTA^{†††}, and Takeo FUJII[†]

[†] Advanced Wireless & Communication Research Center, The University of Electro-Communications
1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan

^{††} Department of Electrical and Computer Engineering, Shinshu University
4-17-1, Wakasato, Nagano, 380-8553

^{†††} 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 Low-power wide-area networks (LPWANs) that can accommodate a large number of sensor nodes and enable long-range communication of several kilometers have been gaining attention in the industrial sector. LPWANs adopt simple asynchronous random access protocols often suffer from frequent packet collisions and a decrease in communication quality as the number of sensor nodes increases. Therefore, this paper proposes an autonomous decentralized resource allocation method that utilizes the carrier sense (CS) and periodicity of UL communication in sensor nodes. The computer simulation results show that the proposed scheme can improve the average packet delivery ratio (PDR) by 9% compared to the listen-before-talk (LBT) protocol.

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

1. はじめに

無線機器の小型化と低消費電力化により、さまざまな機器がインターネットに接続する IoT (Internet of Things) が急速に普及している [1]. 特に、無線通信機能を具備したセンサ端末により情報収集を行う無線センサーネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) は、物理的なケーブルの配線が不要という高い柔軟性を持つことから、産業界への適用が期待されている [1]~[3]. また日本の掲げる未来社会である Society 5.0 の実現には、実世界をデータとしてサイバー空間上に再現するデジタルツインの構築が重要であるため [4], 膨大な数のセンサ端末が得た実世界のデータを効率的に収集する無線センサーネットワーク技術が今後必須となっている. このような背景から、近年多数のセンサ端末を収容可能かつ数キロメートルの長距離通信が可能な低消費電力広域ネットワーク (LPWAN: Low Power Wide Area Network) が産業界で注目を集めている.

一般にスマートシティやスマート農業などの産業用途では、特定のエリアに配置されたセンサ端末が周辺環境をセンシングし、観測データをゲートウェイ (GW: GateWay) などの情報集約ステーションに定期的に送信する. そのため、ネットワーク内の通信は周期的な上りリンク (UL: Up Link) 通信が支配的となる [5]~[7]. またセンサ端末の低廉価などの観点から LPWAN の UL 通信には、一般に 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が適用されている. しかし、ALOHA プロトコルではネットワーク内のセンサ端末数の増加に伴い、パケット衝突が頻発しシステムの通信品質が低下する. 特に周期的な UL 通信が支配的な環境では、端末の送信オフセットおよび送信周期の組み合わせ次第で連続的なパケット衝突が発生してしまう. そのため、LPWAN において様々なパケット衝突回避法が提案されている [8], [9]. 著者らは文献 [8] にて、周期的な UL 通信環境における集中制御型のパケット衝突回避法を提案した. この提案手法では GW にて各端末の送信周期を推定し、その送信周期情報と送信タイミングからパケット衝突回避可能な無線リソースを下りリンク (DL: Down Link) を用いて割り当てる. UL 通信の周期性を活用することで ALOHA プロトコルと比較して大幅に通信品質を改善可能であることが示されている. また文献 [9], [10] では、LPWAN にキャリアセンス (CS: Carrier Sense) を活用した LBT (Listen before talk) 方式を適用することが検討されている. LBT は CS に基づいて送信タイミングを決定するため、自律分散的にパケット衝突回避を行うことができる. しかし、通信エリアの広い LPWAN では、隠れ端末問題によるパケット衝突が頻繁に発生する. また、集中制御方式に比べ、リソース選択に使用可能な情報が少ないため、一般的に通信品質が劣る. このように、集中制御型のリソース割当てによるパケット衝突回避法は高い通信品質を達成することができる. しかし、センサ端末へのリソース割当て制御情報送信などの無線リソースを使用するオーバーヘッドが存在するため、端末数が増加した場合適用が困難になる可能性がある.

そこで本研究では、センサ端末における CS と UL 通信の周

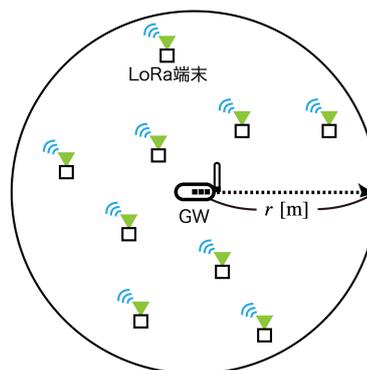


図 1 システムモデルの概要

期性を活用した自律分散型リソース割当て法を提案する. 一般に LPWAN での CS は、センサ端末がパケットの送信前に使用予定の周波数チャネルの電力状態を観測し、観測した電力が CS 閾値以下であった場合、周波数チャネルが空きであると判断する [9], [10]. CS に基づき各センサ端末が UL パケット送信を行うことで、自律分散型のパケット衝突回避が可能となる. しかし、LPWAN は一般的に通信エリアが広いいため、隠れ端末問題が発生する. そこで、本研究では隠れ端末問題に対処するため、センサ端末にて GW からの DL 信号に基づいた隠れ端末検知を行う. 一般に GW からの DL 信号は全センサ端末に届くため、ある端末において隠れ端末であるセンサ端末に対する DL 信号に関しては、CS により UL 信号と比較して検出可能な可能性が高い. また、各端末は周期的に UL 通信を行なっているため、隠れ端末に対する DL 信号送信タイミングの推定が可能である. よって隠れ端末関係にある端末を DL 信号により検出し、使用中と判断した周波数チャネルとは異なる周波数チャネルを自律的に選択することでパケット衝突回避が可能となる. 計算機シミュレーションにより提案手法が LBT を使用した従来手法と比較して、隠れ端末問題によるパケット衝突を低減し、パケット配信率 (PDR: Packet Delivery Rate) を最大で約 9% 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センサ端末における CS と UL 通信の周期性を活用した自律分散型リソース割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、LPWAN の規格の一つである LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) ベースのシステムを想定する. 図 1 に示すように半径 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し、中心に 1 台の GW を設置する. 各端末は 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 伝搬路モデル

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だけ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^r [dBm] は次式で与えられる。

$$P_i^r = P^t - P_{\text{Loss}}(d_i) \quad (1)$$

ここで、 P^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 [11]。

$$P_{\text{Loss}}(d_i) = 10\alpha \log_{10} d_i + \beta + 10\gamma \log_{10} f_c \quad (2)$$

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、 α 、 β 、 γ 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^r に等しいと仮定する。

2.2 LoRaWAN におけるパケット送信

LoRa 変調において 1 シンボルの時間長 $T_i^s(S_i)$ [sec] は SF S_i によって変化する。拡散率 S_i が与えられた時のシンボル長は次式で与えられる。

$$T_i^s(S_i) = 2^{S_i}/W \quad (3)$$

ここで、 W [Hz] は帯域幅を表す。また 1 パケットあたりのシンボル数 $N_i^s(S_i)$ は次式で与えられる。

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

ここで、 O_{sym} はオーバーヘッドシンボル数、 B_{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^{ToA} [sec] は次式で表される。

$$T_i^{\text{ToA}} = T_i^s(S_i) \times N_i^s(S_i) \quad (5)$$

2.3 LoRa 端末

端末 i はあらかじめ設定された周期 G_p [min] 毎の周辺環境を観測し、その観測結果を GW へと送信するものとする。本研究では、各端末が観測時刻からの遅延なく観測データをペイロードに格納し、UL パケットを生起できるものと仮定する。端末 i における m 回目の観測データ $s_{i,m}$ を格納した UL パケットを $SF S_i \in \mathcal{S}$ および周波数チャンネル $k_i \in \mathcal{K}$ を用いて GW へ送信する。ここで、SF は信号電力対雑音電力比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio) 規範を用いて決定される [12]。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。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。本論文では、受信窓を開いている時間に 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。

2.4 GW

本研究ではキャプチャ効果を考慮し、GW において SNR およ

表 1 SNR 閾値及び SIR 閾値 [12], [13].

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

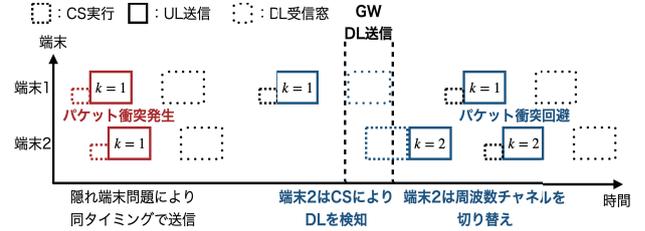


図 2 システムモデルの概要

び信号電力対干渉電力比 (SIR: Signal-to-Interference Ratio) が表 1 に示す閾値を上回った信号のみ、受信成功とする [12], [13]。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 および周波数チャンネル k_i を用いて DL パケットを送信する。GW が DL パケットを送信する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ンネル k_i で送信後、次式で与えられる $T_{k_i}^{\text{DC}}$ [sec] 期間、周波数チャンネル k_i で送信する必要のある DL パケットの送信を中止し、その期間に送る必要のあるパケットは破棄する。

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

ここで、 $D_c \in (0, 1]$ は Duty 比、 T_i^{ToA} は端末 i のパケット送信時間長を表す。

2.5 CSMA-x [9]

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機能を具備しているものとする。CSMA-x はパケット送信前に T^{CS} [msec] の間、CS を行う [9]。この時、CS により観測した電力値 P_i^{CS} [dBm] が CS 閾値 Γ^{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^{CS} [dBm] が Γ^{CS} [dBm] を超えていた場合、周波数チャンネル 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。

$$T_{\text{back}}^{\text{CS}} = \mathcal{U} \left(0, 2^{n_{\text{min}}^{\text{CS}} + n_r^{\text{CS}}} \right) \quad (7)$$

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、 $n_{\text{min}}^{\text{CS}}$ 最小バックオフ指数、 n_r^{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^{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、CS 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を提案する。通信エリアが広い場合、CSMA-x において CS により UL 信号を検知できない隠れ端末問題が発生してしまう。そこで、提案手法では CSMA-x に加えて GW からの DL 信号を活用した隠れ端末検知を行う。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、隠れ端末問題によるパケット衝突を回避するよう各端末が周波数チャンネル k_i 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 CSMA-x によって周波数チャンネルを空きと判断した場合、CS により検知可能な範囲の端末とは送信タイミングがオーバーラップしない可能性が高い。そこで端末 i において、周辺端末とのパケット衝突回避を効率的に行うため、端末 i に送信オフセット T_i^{off} を導入する。

一般に GW からの DL 信号は全端末に届くため、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 により検出可能な可能性が高い。そこで、端末 i において CS を受信窓タイミングで実行する。受信窓タイミングで CS を実行し DL 信号を検出した場合、 T^w が共通なことから端末 i の 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ことを推定可能である。そのため図 2 に示すように、受信窓タイミングでの CS により DL 信号を検出した場合、端末 i は使用周波数チャンネル 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、端末 i' に対して DL 信号を送るためには、端末 i' の UL パケットの受信に成功する必要がある。そのため、隠れ端末問題と UL 通信の周期性により連続衝突が発生している場合、端末 i と i' のどちらか一方の送信タイミングを一時的に変更し、GW で UL パケットの受信に成功する必要がある。そこで、本研究では観測データ $s_{i,m}$ に基づき送信タイミングの変更を行う。環境モニタリングなどのシステムの場合、端末の観測情報は時間的な相関を持つため、 $s_{i,m-1}$ と $s_{i,m}$ が大きく変化しないことが考えられる。特に $s_{i,m-1} = s_{i,m}$ の場合、一般に冗長な観測情報であるため GW 側での観測遅延を許容できると考えられる。よって、 $s_{i,m-1} = s_{i,m}$ が成り立つ時、端末 i は $s_{i,m}$ を含んだ UL パケットの送信タイミングを変更する。送信タイミングを変更することで一時的にパケット衝突を回避し、先述の DL 信号検出が可能とする。

3.2 GW の DL 送信規範

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。そこで、次式が成立した受信成功 UL パケットに対して DL パケットを送信する。

$$\hat{N}_i^{\text{loss}}(j) > \underset{0 \leq l < j}{\operatorname{argmin}} \hat{N}_i^{\text{loss}}(l), \quad (8)$$

式 (8) により GW は前回の受信成功時からの連続的なパケット衝突に着目する。一般に GW は半二重通信を採用しているた

め、DL 送信中は UL パケットを受信することができない。そのため、DL 送信規範を設けない場合、DL 送信によるパケットロス数が増加してしまう。また周期的な 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 [8]。そこで、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ため、式 (8) を満たす端末に DL 送信を行う。

3.3 送信オフセットの探索

CS 可能範囲内端末との送信タイミングオーバーラップを回避するため、端末 i において送信オフセット T_i^{off} の探索を行う。CS により周波数チャンネルが空きと判断した場合、次式により T_i^{off} を決定する。

$$T_i^{\text{off}} = T_{i,m}^{\text{back}} - T_{i,m}^g - T^{\text{cs}} \quad (9)$$

ここで $T_{i,m}^{\text{back}}$ [sec] は m 番目パケットにおけるバックオフ処理時間を含めた CS 処理終了時刻、 $T_{i,m}^g$ [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。

$$T_{i,m+1}^{\text{cs}} = T_{i,m+1}^g + T_i^{\text{off}} \quad (10)$$

なお、後述の周波数チャンネル切り替えを行なった場合は $T_i^{\text{off}} = 0$ に初期化し、再探索を行う。

3.4 観測情報に基づく送信タイミング変更

端末 i における観測情報に関して $s_{i,m-1} = s_{i,m}$ が成立した時、送信予定である m 番目 UL パケットの送信タイミングを変更する。本研究では、送信タイミング変更前の UL パケット送信時に開く DL 受信窓タイミングでの CS を行うことで、隠れ端末に対する DL 信号を検知する。そのため、 $s_{i,m-1} = s_{i,m}$ 成立時は、(11) で開始する CS を m 番目 UL パケットにおける最初の CS 処理として CSMA-x の動作を行う。

観測情報について $s_{i,m-1} = s_{i,m}$ となった時、 m 番目 UL パケットの CS 実行開始時刻 $T_{i,m}^{\text{cs}'}$ [sec] は次式で表される

$$T_{i,m}^{\text{cs}'} = T_{i,m}^{\text{cs}} + T^{\text{cs}} + T_i^{\text{ToA}} + T^w \quad (11)$$

式 (11) により $s_{i,m-1} \neq s_{i,m}$ の場合における m 番目 UL パケットでの受信窓タイミングに対応した時刻での CS を行う。以降、 $T_{i,m}^{\text{cs}'}$ を開始時刻とする CS を DL 検出 CS と定義する。なお DL 検出 CS のみ、CS 時間 $T^{\text{cs}} = T_i^{\text{ToA}}$ とする。

3.5 CS による DL 信号検出規範

CS では周波数チャンネル k_i における電力値から信号の有無を検知する。よって 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 $P_i^{\text{RD}}L$ [dBm] と DL 検出 CS によって観測した電力値 P_i^{CS} を比較することで、DL 信号判定を行う。本検討では、初期検討として、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。

$$f(P_i^{\text{CS}}, P_i^{\text{RD}}L) = \begin{cases} 1 & \text{if } \operatorname{round}(P_i^{\text{CS}}) = \operatorname{round}(P_i^{\text{RD}}L) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

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	300 [m]
シミュレーション時間 T	720 [min]
端末数 I	{100, 200, 300, 400, 500}
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 α	4.0
伝搬損失オフセット β	9.5
伝搬周波数係数 γ	4.5
オーバーヘッドシンボル数 O_{sym}	20.25
パケットデータサイズ B_{data}	160 [bits]
観測周期 G^p	1 [min]
CS 閾値 Γ^{CS}	-110 [dBm]
CS 実行時間 T^{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^{w}	1 [sec]

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.

3.6 周波数チャンネルの切り替え

式 (12) により他端末向け DL 信号を検出した場合, 端末 i は周波数チャンネル k_i を変更する. この時, 既に割当てた周波数チャンネルを除いた選択可能な周波数チャンネルの中からランダムに選択する. なお, 選択可能な周波数チャンネルが無くなった場合は, 再び全ての周波数チャンネルを使用可能として周波数チャンネル切り替えを行う.

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, 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, 端末を一樣ランダムに配置し, LoRaWAN 端末の通信パラメータは日本での LoRaWAN の規定 AS923 に準拠した. 端末 i の観測対象は空間相関を考慮した対数正規分布に従うモデルに基づき生成し, 正規化した数値 $S(t, x_i, y_i)$ を 100 階調に丸め込み処理を行なった値とする [14]. なお観測環境の時間変化を考慮するため, 本研究では時刻 t と $t + G^p$ において $S(t, x_i, y_i) = S(t + G^p, x_i - 1, y_i)$ が成り立つようシャドウイングマップを時間変化させた. 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.

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

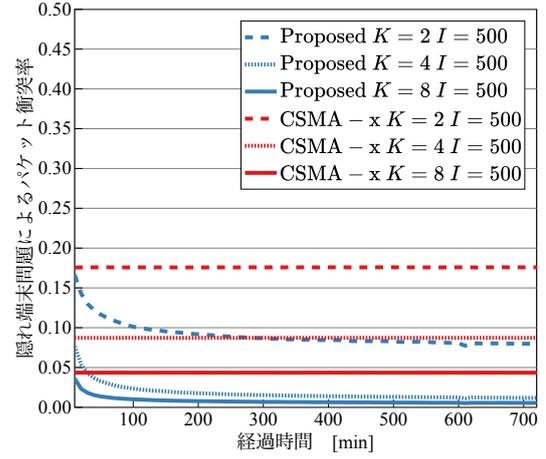


図 3 隠れ端末問題によるパケット衝突率の時間変化

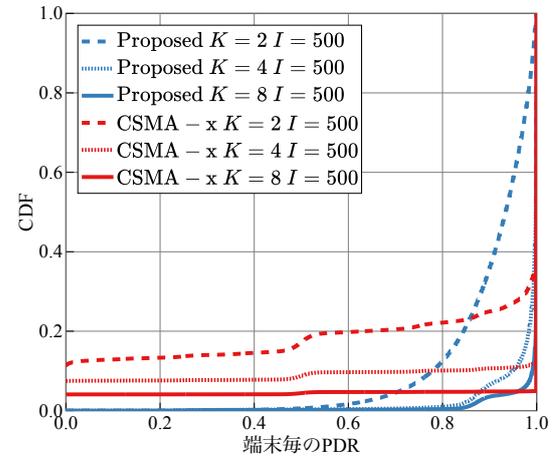


図 4 端末毎の PDR の CDF ($I = 400$)

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.

$$H_c \triangleq \frac{\sum_{i=1}^I N_{i,c}^{\text{hid}}}{\sum_{i=1}^I N_{i,c}^{\text{gen}}}, \quad (13)$$

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.

4.2 シミュレーション結果

図 3 に端末数 $I = 500$ 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 3 より, 提案手法は全ての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によるパケット衝突率を低減していることが確認できる. これは提案手法により, 端末 i において隠れ端末関係にある端末に対する DL パケットを検知し, 別の周波数チャンネルに切り替えることでパケット衝突を回避できるようになったためである. 特に提案手法は UL パケット送信の周期性を活用することで, 端末 i に対する隠れ端末の中でも衝突する可能性の高い端末の DL パ

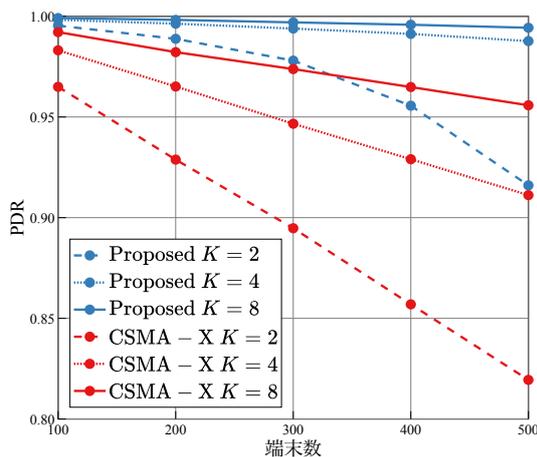


図5 端末数毎の平均 PDR ($I = 400$)

ケットを検知することが可能である。また周波数チャンネル数が多い場合、提案手法は切り替え可能な周波数チャンネル数が増加するため、 H_c を 0 に漸近できていることが確認できる。しかし、周波数チャンネル数が少ない場合、 H_c が 0 に漸近できていない。これは、周波数チャンネルに空きが少なく、2 台以上の隠れ端末が端末 i と同じ送信タイミングで送ることで、隠れ端末検知に必要となる DL パケットを GW が送信できないためである。さらに周波数チャンネルの切り替え先に隠れ端末が存在する可能性が高まっていることも原因であると考えられる。

次に、図 4 に端末毎の PDR の CDF 特性を示す。図 4 より、CSMA-x では PDR が 0 となる端末が発生していることが確認できる。これは周期的な UL 環境であるため、隠れ端末関係にある端末間では常にパケット衝突が発生し続けてしまうためである。一方提案手法は全ての周波数チャンネル数において PDR が 0 となる端末の発生を抑制できていることが確認できる。これは、提案手法では観測情報に基づき送信タイミングを変更するため、連続的なパケット衝突を回避することが可能であることが理由である。さらに、提案手法では受信窓タイミングでの CS により DL 検知と判定した場合、周波数チャンネルおよび送信タイミングが変更されるため、CSMA-x と比較してパケット衝突回避を行いやすい。

図 5 に $C = 72$ における各端末数ごとの 10 分間の平均 PDR を示す。図 5 より、周波数チャンネル数が多く端末数が少ない場合、提案手法は PDR を 1 付近に漸近できていることが確認できる。これは、無線リソースに余裕があるため隠れ端末問題によるパケット衝突が支配的となっており、提案手法により隠れ端末関係の端末が異なる周波数チャンネルを使うようになったためである。しかし、提案手法は GW からの DL 送信および観測データに基づく送信タイミング変更が存在するため、これらによるパケット衝突により PDR=1 とはならない。提案手法は CSMA-x と比較して最大約 9% 平均 PDR を改善できていることがわかる ($K = 2, I = 500$)。

5. まとめ

本研究では、端末における CS と UL 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て法を提案した。本提案手

法では、UL トラフィックの周期性を活用し効率的に時間および周波数チャンネルにおける空きリソースの探索を端末が行う。特に、受信窓タイミングでの CS により隠れ端末向け DL 信号を検知することで周波数チャンネルを切り替え、隠れ端末問題による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 9% 改善可能であることを示した。今後の課題として、提案手法では回避が困難であった複数隠れ端末によるパケット衝突の回避を目指す。

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 JP205004001) 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] 鈴木せい, 赤池伸一・他, "科学技術・イノベーション基本法と第 6 期科学技術・イノベーション基本計画", 研究 技術 計画, vol. 36, no. 3, pp. 345–355, 2021.
- [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] 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.
- [8] A. Kaburaki, K. Adachi, O. Takyu, M. Ohta, and T. Fujii, "Resource Allocation for Periodic Traffic in Wireless Sensor Network," in *Proc. IEEE WCNC International Workshop on Smart Spectrum (IWSS 2023)*, 2023.
- [9] 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.
- [10] J. Ortín, M. Cesana, and A. Redondi, "Augmenting LoRaWAN Performance With Listen Before Talk," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 6, pp. 3113–3128, June 2019.
- [11] 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.
- [12] Semtech, "Semtech SX1272 Datasheets," [online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1272>.
- [13] 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.
- [14] Z. Wang, E. K. Tameh, and A. R. Nix, "Joint Shadowing Process in Urban Peer-to-Peer Radio Channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 52–64, 2008.