

LoRaWAN マルチホップ通信における 送信制御および同期制御を用いた省電力化に関する検討

志田 洋斗[†] 蕪木 碧仁[†] 安達 宏一[†]

[†] 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
E-mail: †{shida,kaburaki,adachi}@awcc.uec.ac.jp

あらまし LoRaWAN では各端末が自律分散的にパケットを送信するため、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てしまう。衝突回避法として、時刻同期をした上でのリソース割り当て法があるが、一般に廉価な LPWAN 端末のクロックは高精度ではなく、時間経過とともに機器間での同期ズレが発生してしまう。また端末-GW 間通信のシングルホップの LoRaWAN において、高い伝送速度と広い通信範囲を同時に達成することはできない。マルチホップ通信を用いることで、高い伝送速度を維持したまま、広い通信範囲を達成することが可能である。しかしながら、LoRaWAN マルチホップ通信では、隠れ端末問題や、パケットの送受信を同時に行うことができないことによるスループットの低下、常に受信窓を開く必要によるバッテリー消費などが問題となる。本稿では上記の問題点を解消すべく、自律分散型の適応的なリソース割り当て法および同期ずれ補償法を提案する。具体的には LoRaWAN パケット情報を用いるパケット送信スロットの決定を割り当てることで、送受信側で送受信位置の共有ができ、パケット衝突の回避および無駄な受信窓を開かないことで電力消費を低減できることを示す。

キーワード マルチホップ通信, リソース割り当て, LPWAN, LoRaWAN

Energy-Efficient Multi-hop LoRaWAN with Transmission and Synchronization Control

Hiroto SHIDA[†], Aoto KABURAKI[†], and Koichi ADACHI[†]

[†] Advanced Wireless and Communication Research Center, The University of Electro-Communications
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo 182-8585
E-mail: †{shida,kaburaki,adachi}@awcc.uec.ac.jp

Abstract In LoRaWAN, each node transmits packets autonomously, so packet collisions occur when multiple nodes transmit packets at the same time and frequency channel. However, the clocks of inexpensive LPWAN nodes are generally not highly accurate, and synchronization errors can occur between devices over time. In addition, in single-hop LoRaWAN, it is not possible to achieve high data rates and a wide communication range at the same time. By using multi-hop communication, it is possible to achieve a wide communication range while maintaining a high data rate. However, LoRaWAN multi-hop communication suffers from the hidden node problem, throughput degradation due to the inability to transmit and receive packets simultaneously, and power consumption due to the need to constantly open the receive window. This paper proposes an autonomous distributed adaptive resource allocation method and clock drift compensation method to solve the above problems. Specifically, we show that by assigning packet transmission slot decisions based on LoRaWAN packet information, the transmitting and receiving sides can share transmission and reception locations, avoid packet collisions, and reduce power consumption by avoiding unnecessary opening of reception windows.

Key words Multi-hop communication, Resource allocation, LPWAN, LoRaWAN

1. はじめに

近年、様々な機器をインターネットに接続し、情報通信を行うモノのインターネット (IoT: Internet-of-Things) の研究

開発が進められている [1]。無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) を構成する一部 IoT 端末はバッテリー駆動が要求される。さらにスマートシティやスマート農業などでは広範囲に IoT 端末を配置することとなる。そのため、

省電力かつ長距離伝送が可能な通信規格の需要が増加している。このような要求を満たす通信方式として LPWAN (Low Power Wide Area Network) が注目されている [2]。LPWAN は通信速度が遅いものの、低い消費電力で広範囲の通信エリアを提供可能である。LPWAN は免許不要周波数帯 (アンライセンスバンド) を用いるため、他のシステムとの周波数共用を可能とするよう、ゲートウェイ (GW: Gateway) および各端末 (EN: End Node) に対して、特定の周波数チャネルを利用できる時間比率 (DC: Duty Cycle) が規定されている [3]。DC により、特定の周波数チャネルにおける高頻度なパケット送信を抑制し、パケット衝突の発生確率を低減する。現行の規格 [4] における DC は、使用する周波数チャネルに関係なく、単位時間あたりの全周波数チャネルでの占有時間が規定値以下となるように制限されている。すなわち、EN 毎に DC が規定されている。今後、通信システムの多様化に伴い、単位時間あたりの各周波数チャネルの占有時間が規定値以下になるように制限を緩和することが検討されている [5]。

LPWAN の一種である LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) [6] はアンライセンスバンドを使用することから、導入コストが低く、広く普及している。LoRaWAN の物理 (PHY: Physical) 層では、チャープスペクトラム拡散 (CSS: Chirp Spread Spectrum) 変調に基づいた LoRa (Long Range) 変調を用い、長距離かつ低消費電力な通信を実現している。LoRa 変調では 1 シンボルあたりで送信するビット数を拡散率 (SF: Spreading Factor) として定義し、一般に 7 から 12 の範囲で設定可能である。SF を大きくすることで雑音耐性が向上し長距離通信を可能とするが、伝送レートが低下するというトレードオフが存在する。即ち、端末-GW のシングルホップ通信では高い伝送レートと長距離通信を同時に達成することはできない。

また、MAC (Medium Access Control) 層には簡易な ALOHA 方式を用い、消費電力を抑えることが可能である^(注1)。しかし LoRaWAN では各 EN があらかじめ割り当てられた周波数チャネルから 1 つを選択し、自律分散的にパケットを送信する。そのため ALOHA 方式では、同じ周波数で同時送信されるパケットを検知できず、パケット衝突が発生してしまう。ALOHA と比較すると複雑だが、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) 方式を適用し、キャリアセンス (CS: Carrier Sense) をすることでパケット衝突を回避し、伝送特性を向上させることができる [7]。他にも衝突回避法として、時分割多元接続 (TDMA: Time Division Multiple Access) などの時刻同期をした上でのリソース割り当て法があるが、一般に LPWAN の廉価な EN のクロックは高精度ではなく、時間経過とともに EN を含む機器間での同期ズレが発生する [8]。また、同期のためには、制御信号などのネットワークに対するオーバーヘッドが増加するため、LoRaWAN において厳密な時刻同期が必要なリソース割り当て法の適用は困難であると考えられる。

LoRaWAN 通信において、高い伝送レートと長距離通信を

同時に達成する手法としてマルチホップ通信が挙げられる [9]。端末と GW 間に中継機を挟むマルチホップ通信では、高い伝送レートを維持したまま、広い通信範囲を達成することが可能である。しかしながら、LoRaWAN マルチホップ通信にはいくつかの問題点がある。まずマルチホップ通信では、CS 範囲外の端末からの同時送信によりパケット衝突してしまう隠れ端末問題が発生しやすい。具体的には、送信機から中継機 1、中継機 2、受信機の順にマルチホップ通信するシステムでは、中継機 2 の送信は送信機からは検知できない可能性が高く、送信機と中継機 2 の送信パケットが衝突する可能性がある。またパケット衝突以外にも、LoRaWAN 端末の半二重通信による制限により、パケットの送受信を同時に行うことができず、シングルホップ通信と比較してシステム全体のスループットが低下してしまう。スループット向上のためには高頻度な中継を必要とするが、それには中継機の電力を多く要し、加えて、受信側ではパケットがいつ届くか分からないため常に受信窓を開く必要があり、中継によるバッテリー消費が問題となる。またマルチホップの場合、同期のための信号は 1 度に通信範囲内の 1 ホップ先にしか送れず、2 ホップ以上先との同期にはさらなる時間的なオーバーヘッドを要する。

本研究では、従来のマルチホップ LoRaWAN が抱える上記の問題点を解消すべく、自律分散型の適応的なリソース割り当て法を提案する。干渉耐性の高さや、より多くのシステムに適用可能とするため、本提案では、各端末がパケットの送信に利用するリソースを動的に選択する。具体的には、ホップする順番となるインデックスおよび LoRaWAN パケット [10] のヘッダに含まれる送信端末のパケットカウンタを用いてパケット送信スロットおよび使用周波数チャネルを選択する。これにより受信側と送信側で、送信されるパケットの時刻および使用周波数チャネルを共有でき、パケット衝突の回避および受信窓を開き続けることによる電力消費を低減する。

本稿の構成を述べる。2 節ではシステムモデルについて述べる。3 節では提案手法について送信側と受信側の手順およびスリープ時間の制御について述べ、4 節では特性評価を述べる。5 節では本稿のまとめを行う。

2. システムモデル

2.1 各送受信機器

本研究では、 M 台の機器 ($M = \{0, \dots, m, \dots, M-1\}$) によるマルチホップ通信を想定する。一般性を失うことなく、それぞれの機器にはホップする順番となるインデックス $m \in \mathcal{M}$ が割り当てられているものとし、それらのインデックスは各機器間で既知であるとする。送信機 ($m = 0$) から $M-2$ 台の中継機 ($m \in \{1, 2, \dots, M-2\}$) を経て、GW ($m = M-1$) にパケットを送信する上り通信環境を想定する。送信機は、固定時間長 T_{pkt} [sec] の N_{pkt} 個のパケット ($\mathcal{I} = \{0, \dots, i, \dots, N_{\text{pkt}}-1\}$) を 1 つずつ順に送信するものとする。ここで、 i 番目のパケットにはパケットカウンタ $D_i^{\text{pkt}} = i$ が含まれ、そのパケットを正しく受信できた受信機はパケットカウンタ D_i^{pkt} を取得することができる。中継機および GW (以降：受信機器 $m_r \in \mathcal{M} \setminus \{0\}$)

(注1)：国や地域によっては、送信前のキャリアセンスが必須の地域も存在する。

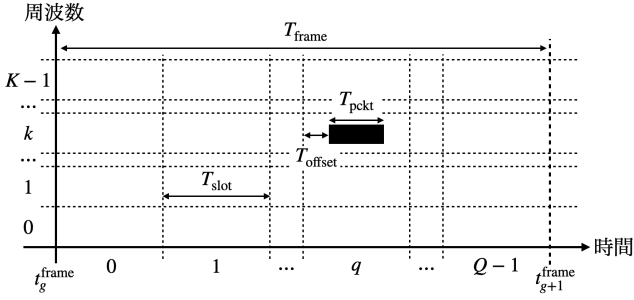


図1 パケット送受信フレームの構成

は、送信機および中継機（以降：送信端末 $m_t \in \mathcal{M} \setminus \{M-1\}$ ）からパケットが1つ届くまでは受信待機状態とし、全ての周波数チャンネルの受信窓（以降：全受信窓）を開いて待機する。中継機は、送信機および自身よりインデックスの小さい中継機からパケットを受信後、パケット送信が可能となる。

図1に示すように、システムはフレーム時間長 T_{frame} [sec] を T_{slot} [sec] の Q 個の時間スロットおよび K 個の周波数チャンネルへと分割する。そのため、フレーム内で利用可能な無線リソース（スロット）数は $Q \times K$ となる。時間的に連続なフレームを検討し、 g 番目のフレームの開始時刻を t_g^{frame} と表記する。

LoRaWAN 端末は一般に半二重通信のため送受信を同時に行うことはできない。そのため例えば、送信機 ($m=0$) と中継機 ($m=1$) の送信タイミングは別である必要がある。本研究では、各機器のインデックス m が偶数の端末は偶数番目のフレームを、奇数の端末は奇数番目のフレームを送信フレームとし、交互に送信を行うものとする。送信フレームでは、各機器はフレーム内の1つのスロットでパケットを送信する。この時、スロット内の先頭時刻からオフセット時間 T_{offset} [sec] を設けてパケットを送信する。逆に送信を行わない方のフレームを受信フレームとし、パケットの受信を行う、

2.2 クロックドリフト

一般に廉価な LPWAN 端末のクロックは高精度では無いため、GPS などの外部入力がない場合には、機器間に時刻ズレが発生する。この時刻ズレは、時間の経過とともに蓄積されていく。本研究では、送信機 $m=0$ に対する他の機器 $m \in \mathcal{M} \setminus \{0\}$ の相対的な時刻ズレをクロックドリフトと定義する。送信機に対する他の機器 $m \in \mathcal{M} \setminus \{0\}$ の同期時刻 t_m^{sync} [sec] からパケット送信開始時刻 t_m^{tx} [sec] までに発生するクロックドリフト T^d [sec] は次式で与えられる。

$$T^d [\text{sec}] = \int_{t_m^{\text{sync}}}^{t_m^{\text{tx}}} \Delta T_m^d(t) dt \quad (1)$$

ここで、 ΔT_m^d は単位時間で正規化した機器 m の正規化クロックドリフトを表し、 $\Delta T_m^d \sim \mathcal{N}(\mu_m, \sigma_m^2)$ でモデル化されるものとする [11]。ここで $\mathcal{N}(\mu_m, \sigma_m^2)$ は平均 μ_m 、分散 σ_m^2 となるガウス分布を表す。

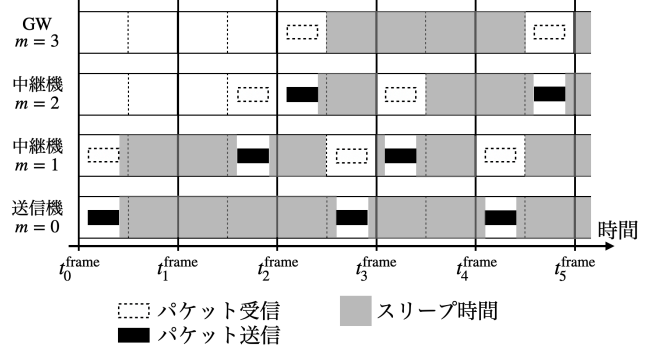


図2 提案手法の通信例 ($K=1, Q=2$)

3. 提案手法

3.1 概要

本節では、提案手法全体の流れを説明する。送信機は、開始時刻を0番目のフレームの開始時刻 $t_{m_t,0}^{\text{tx}}$ [sec] とし、最初のフレームを含む偶数フレームの場合に3.2節のパケット送信手順に沿って送信スロットおよび送信開始時刻を決定しパケットを送信する。

中継機は3.3節のパケット受信手順に沿ってパケット受信後に、受信パケットを転送するフレームおよび以降のパケットを受信するフレーム時刻を計算する。また3.2節のパケット送信手順に沿って送信スロットおよび送信開始時刻を決定しパケットを送信する。これにより送受信の時刻が計算できるため、3.4節に沿ってスリープ時間を設ける。この時、図2に示すように、例えば送信機 $m=0$ と中継機 $m=2$ は同じ偶数フレームで送信することになるが、3.2節のパケット送信手順によって送信されるパケットのスロットおよび周波数チャンネルはそれぞれ異なるため、衝突を回避しつつ、また中継機 $m=1$ は送信機 $m=0$ のパケットのみを受信することが可能となる。

GWは3.3節のパケット受信手順に沿ってパケット受信後に、以降のパケットを受信するフレーム時刻を計算する。

各機器では、2.2節で説明したようにクロックドリフトによる時刻ズレが発生する。そのため受信機器 $m_r \in \mathcal{M} \setminus \{0\}$ は上記のような送受信制御を、同期制御をした上で行う。初めにパケットを受信した際に3.3.1節の初期同期を行い、その後はパケットを受信するたびに3.3.2節の逐次同期を行う。これによりクロックドリフトによる時刻ズレを補償し、パケット衝突を回避した送受信手法を実現する。

3.2 パケット送信手順

送信端末 $m_t \in \mathcal{M} \setminus \{M-1\}$ は、 $i \in \mathcal{I}$ 番目パケット D_i^{pcnt} の送信スロット q および周波数チャンネル k の組 (q, k) を次式のように決定する。

$$q(m_t, D_i^{\text{pcnt}}) = \text{mod}(f_q(m_t, D_i^{\text{pcnt}}), Q) \quad (2)$$

$$k(m_t, D_i^{\text{pcnt}}) = \text{mod}(f_k(m_t, D_i^{\text{pcnt}}), K) \quad (3)$$

ここで、 $\text{mod}(\cdot, \cdot)$ は剰余演算、 $f_q(m_t, D_i^{\text{pcnt}})$ と $f_k(m_t, D_i^{\text{pcnt}})$ は、送信端末のインデックス m_t とパケットカウンタ D_i^{pcnt} に

よって一意に定まる任意の関数である。パケット送信開始時刻 $t_{m_t, j}^{\text{tx}} [\text{sec}]$ は、送信フレームの開始時刻 $t_{m_t, i}^{\text{txframe}} [\text{sec}]$ を用いて以下で表される。

$$t_{m_t, i}^{\text{tx}} = t_{m_t, i}^{\text{txframe}} + q(m_t, D_i^{\text{pcnt}})T_{\text{slot}} + T_{\text{offset}} \quad (4)$$

この時、送信機の場合は 0 番目のフレームの開始時刻 $t_{m_t, 0}^{\text{tx}} [\text{sec}]$ から送信フレームの開始時刻 $t_{m_t, i}^{\text{txframe}}$ を計算し、中継機 $m_t \in \mathcal{M} \setminus \{0, M-1\}$ は、後述する推定した送信フレームの開始時刻 $t_{m_t, i}^{\text{txframe}}$ を用いる。

3.3 パケット受信手順

3.3.1 初期同期

受信機器 $m_r \in \mathcal{M} \setminus \{0\}$ は、送信端末 $m_t = m_r - 1$ からパケット D_i^{pcnt} を初めて時刻 $t_{m_r, i}^{\text{recv}} [\text{sec}]$ で受信した場合、同期時刻 $t_{m_r}^{\text{sync}} [\text{sec}] = t_{m_r, i}^{\text{recv}}$ を保持する。そして g 番目のフレーム開始時刻の推定値 $t_g^{\text{frame}} [\text{sec}]$ を以下のように計算する。

$$t_g^{\text{frame}} = t_{m_r}^{\text{sync}} - T_{\text{offset}} - q(m_r - 1, D_i^{\text{pcnt}})T_{\text{slot}} + (g - 2 \cdot D_i^{\text{pcnt}} - m_r + 1)T_{\text{frame}} \quad (5)$$

中継機 $m_r \in \mathcal{M} \setminus \{0, M-1\}$ の場合、受信したパケット D_i^{pcnt} を送信するフレームの開始時刻 $t_{m_r, i}^{\text{txframe}}$ を以下の式を用いて推定する。

$$t_{m_r, i}^{\text{txframe}} = t_{m_r, i+2}^{\text{frame}} \quad (6)$$

また受信機器 $m_r \in \mathcal{M} \setminus \{0\}$ は以降のパケット D_j^{pcnt} ($j > i$) の受信スロット開始時刻 $t_{m_r, j}^{\text{rvSlot}}$ を次式に基づき推定する。

$$t_{m_r, j}^{\text{rvSlot}} = t_{m_r, i+2j}^{\text{frame}} + q(m_r - 1, D_j^{\text{pcnt}})T_{\text{slot}} \quad (7)$$

3.3.2 逐次同期 (クロックドリフト補償)

受信機器 $m_r \in \mathcal{M} \setminus \{0\}$ は、2 目以降のパケット D_j^{pcnt} ($j > i$) を時刻 $t_{m_r, j}^{\text{recv}} [\text{sec}]$ で受信次第、同期時刻を $t_{m_r}^{\text{sync}} = t_{m_r, j}^{\text{recv}}$ に更新する。そして、更新した同期時刻 $t_{m_r}^{\text{sync}}$ を元に式 (5)~(7) を用いて、 g 番目のフレームの開始時刻 $t_g^{\text{frame}} [\text{sec}]$ 、パケット D_i^{pcnt} の送信フレームの開始時刻 $t_{m_r, i}^{\text{txframe}}$ 、パケット D_l^{pcnt} ($l > i$) の受信スロットの開始時刻 $t_{m_r, l}^{\text{rvSlot}}$ を再推定し更新する。

3.4 スリープ時間制御

各機器は送受信を行わない期間にスリープ状態となることで、消費電力を削減する。受信機器 $m_r \in \mathcal{M} \setminus \{0\}$ は送信端末 $m_t \in \mathcal{M} \setminus \{M-1\}$ から 1 目目のパケット受信が完了次第、スリープ状態となり、全受信窓を閉じる。その後、式 (4) を用いて導出した $t_{m_r, i}^{\text{tx}} [\text{sec}]$ になったら中継機のスリープを解除し、パケットを転送したあと再びスリープ状態となる。そして式 (7) を用いて導出した $t_{m_r, i}^{\text{rvSlot}} [\text{sec}]$ になったら、受信機器は $T_{\text{slot}} [\text{sec}]$ の間スリープを解除し、パケットの受信待機をする。以降も同様にスリープと送受信を繰り返す。

2 目以降のパケット受信時、クロックドリフトの時刻ズレにより、受信機器が想定するパケット受信開始時刻 $\tilde{t}_{m_r, j}^{\text{recv}} = \tilde{t}_{m_r, j}^{\text{rvSlot}} + T_{\text{offset}} [\text{sec}]$ と、実際の受信開始時刻 $t_{m_r, j}^{\text{recv}} [\text{sec}]$ は異なっている。この時刻ズレを考慮して受信するために、推定した受信スロットの開始時刻 $\tilde{t}_{m_r, i}^{\text{rvSlot}} [\text{sec}]$ でスリープ

表 1 評価諸元

パラメータ	値
機器台数 M	4
送信パケット数 N_{pkt}	100
フレーム長 T_{frame}	2.825 [sec]
パケット長 T_{pkt}	{72, 123, 226} [msec]
周波数チャンネル数 K	4
時間スロット数 Q	2 ~ 40
デューティサイクル Δ_{DC}	0.01
最小平均値 μ_{min}	-1.91×10^{-3}
最大平均値 μ_{max}	0.28×10^{-3}
最小分散値 σ_{min}^2	9.59×10^{-11}
最大分散値 σ_{max}^2	3.19×10^{-10}
消費電流 (送信時) $I_{\text{CC}}^{\text{tx}}$	30 [mA]
消費電流 (受信時) $I_{\text{CC}}^{\text{rx}}$	5.5 [mA]
消費電流 (スリープ時) $I_{\text{CC}}^{\text{slp}}$	0.9 [μ A]
電源電圧 V_{CC}	3.3 [V]

を解除し、受信スロット全体で受信待機をする。

4. 特性評価

計算機シミュレーションを用いて提案手法の性能を評価する。表 1 に評価諸元を示す。各送信端末において、周波数チャンネル毎のデューティサイクル Δ_{DC} を満たす最短の送信周期として、フレーム長 $T_{\text{frame}} [\text{sec}]$ を次式で決定する。

$$T_{\text{frame}} = \frac{T_{\text{pkt}}}{2K \cdot \Delta_{\text{DC}}} \quad (8)$$

このとき、 $T_{\text{pkt}} [\text{sec}]$ は帯域幅 $W [\text{Hz}]$ および拡散率 SF によって異なるため、今回は帯域幅 $BW = 125 [\text{kHz}]$ 、拡散率 $SF = \{7, 8, 9\}$ に該当する $T_{\text{pkt}} = \{72, 123, 226\} [\text{msec}]$ を使用した。これにより最も $T_{\text{pkt}} [\text{sec}]$ の長い拡散率 9 に対応した T_{frame} を設定した。オフセット時間 T_{offset} は時間スロットの中心で送信させるため、 $T_{\text{offset}} = (T_{\text{slot}} - T_{\text{pkt}})/2$ とした。各端末のクロックドリフト値に用いる平均値 μ_{m_r} および分散値 $\sigma_{m_r}^2$ は、文献 [11] の実機実験より得られた平均値および分散値の最小値、最大値の範囲 $[\mu_{\text{min}}, \mu_{\text{max}}]$ 、 $[\sigma_{\text{min}}^2, \sigma_{\text{max}}^2]$ をとる一様乱数より決定した。提案で用いる任意の関数は $f_q(m_t, D_i^{\text{pcnt}}) = f_k(m_t, D_i^{\text{pcnt}}) = m_t + D_i^{\text{pcnt}}$ とした。各消費電流 I_{CC} および電源電圧 V_{CC} は、EASEL 社の 920MHz 帯無線モジュールのパラメータを元に決定した [12]。

本稿では、複数のパケットが同一周波数で同時に送信された場合にパケット衝突と判定し、両パケットを破棄する。また受信スロットに完全にパケットが収まる場合にパケット送受信成功、それ以外の場合は受信失敗とする。

4.1 PDR 特性

ここでは提案手法のパケット配信率 (PDR: Packet Delivery Rate) 特性を評価する。図 3 に、経過時間に対する PDR を示す。ここで時間スロット数 Q は提案手法が動作する最低数である 2 としている。このときの PDR は次式で決定する。

$$\text{PDR}_1(t) \triangleq 1 - \frac{N_u^{\text{fail}}(t)}{N_u^{\text{pkt}}(t)} \quad (9)$$

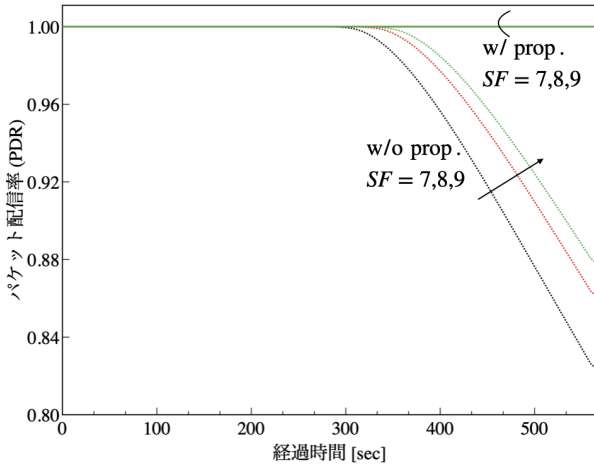


図3 経過時間に対する PDR

ここで $N_u^{\text{pkt}}(t)$ は時刻 t までに、送信機から送信された合計パケット数を表す。一方 $N_u^{\text{fail}}(t)$ は時刻 t までに、GW に届くまでの間のどこかでパケット受信に失敗し、破棄された合計パケット数を表す。また提案手法である逐次同期（クロックドリフト補償）を行なった場合を“w/ comp.”、逐次同期を行わない場合を“w/o comp.”と表記している。逐次同期を行なった“w/ comp.”では拡散率 SF の値に限らずパケット損失なく通信可能なことがわかる。また逐次同期無しの“w/o comp.”では一定時間経過後、PDR の低下が始まっている。これはクロックドリフトの蓄積により、受信側で想定していた受信スロットにパケットが取まらなくなり PDR が低下したと言える。また拡散率の大きいもの、即ち $T_{\text{pkt}}[\text{sec}]$ の大きいものからクロックドリフトの影響を受けやすく、PDR の低下の開始が早いことがわかる。

次に、時間スロット数 Q が提案手法の PDR 特性に与える影響を図4に示す。このときの PDR は次式で決定する。

$$\text{PDR}_2 \triangleq \frac{N_u^{\text{suc}}}{N_{\text{pkt}}} \quad (10)$$

ここで、 N_{pkt} は全送信パケット数を表し、 N_u^{suc} は、パケット衝突や送信失敗せずに GW まで送信できたパケット数を表す。時間スロット数 Q を増やすことでより多くのスリープ時間を設けられることにつながるが、 Q を増やすことで、時間スロット長 T_{slot} 、およびその中で設ける時間オフセット長 T_{offset} が短くなり、クロックドリフトの影響を吸収できなくなる。また図4からもわかるように、 SF 値が大きいほど T_{pkt} の大きく、クロックドリフトの影響を受けやすいため、PDR の低下の開始が早くなっている。特に今回のシミュレーション値(表1)では、 $SF = 9$ は $Q = 11$ まで、 $SF = 8$ は $Q = 19$ まで、 $SF = 7$ は $Q = 29$ までは、PDR を 1 に保つことができているが、それ以上に Q を増やすとクロックドリフト値を吸収できなくなり、PDR が低下している。

4.2 消費電力評価

ここでは提案手法の消費電力を評価する。送信、受信、スリープ時における消費電力を表2に示す。この時、それぞれの消費

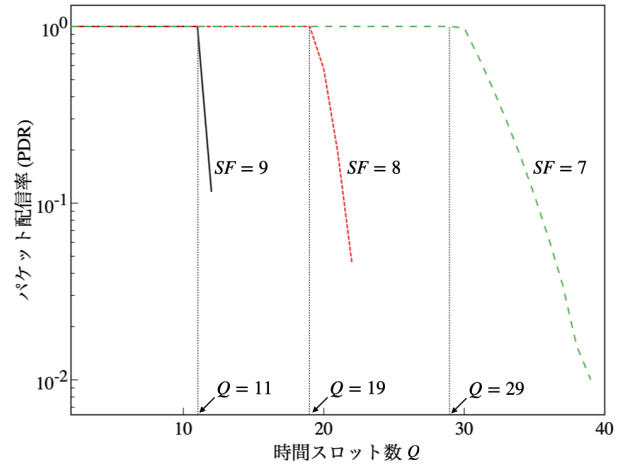


図4 時間スロット数に対する PDR

表2 送受信時およびスリープ時の消費電力

	送信時 W_{tx}	受信時 W_{rx}	スリープ時 W_{slp}
消費電力	99 [mW]	18.15 [mW]	2.97 [μ W]

電力は各状態の時における消費電流 I_{CC} と電源電圧 V_{CC} の積で求められる。

一般にマルチホップ通信では受信側から送信されてくるパケットの時刻はわからないため、受信窓を常に開き続ける必要がある。これを比較手法とする。一方、提案手法は、受信側から送信パケット時刻が推定可能なため、それ以外の時間をスリープ時刻とすることで消費電力を削減可能である。今回はこの2つを比較する。まず送信を行う送信フレームの消費電力量 J_{tx} は、比較手法および提案手法ともに、次式のように表される。

$$J_{\text{tx}} = W_{\text{slp}} \times (T_{\text{frame}} - T_{\text{pkt}}) + W_{\text{tx}} \times T_{\text{pkt}} \quad (11)$$

どちらの手法においても送信フレームでは、パケット送信期間 T_{pkt} 以外は、スリープ状態として計算をする。

次に比較手法の受信フレームの消費電力量 $J_{\text{rx,conv}}$ は、次式のように表される。

$$J_{\text{rx,conv}} = W_{\text{rx}} \times T_{\text{frame}} \quad (12)$$

上記の式であるように比較手法では常に受信窓を開き続けるため、受信フレーム全体をパケット受信待機とし、計算を行う。

次に提案手法の受信フレームの消費電力量 $J_{\text{rx,prop}}$ は、次式のように表される。

$$J_{\text{rx,prop}} = W_{\text{slp}} \times (T_{\text{frame}} - T_{\text{slot}}) + W_{\text{rx}} \times T_{\text{slot}} \quad (13)$$

提案手法では受信側においても送信されるパケットのスロットが推定可能なため、その時間スロット以外の時間をスリープ状態として計算をする。

そして、比較手法の単位時間あたりの消費電力量 J_{conv} は式(14)で、提案手法の単位時間あたりの消費電力量 J_{prop} は式(15)で求められる。

$$J_{\text{conv}} = J_{\text{tx}} + J_{\text{rx,conv}}, \quad (14)$$

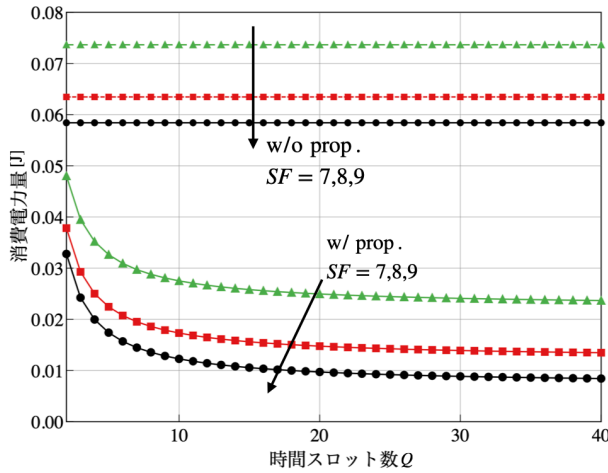


図5 時間スロット数に対する消費電力量

$$J_{\text{prop}} = J_{\text{tx}} + J_{\text{rx,prop}}. \quad (15)$$

以上から各 SF 値における、時間スロット数 Q に対する単位時間あたりの消費電力量を、図5に示す。比較手法を“Conv.”、提案手法を“Prop.”と表記し、各拡散率 SF において評価を行っている。比較手法“Conv.”は、受信フレームでは常に受信窓を開く必要があり、式(12)からもわかるように、時間スロット数によらず一定の消費電力量を必要とする。ただ SF が小さいほどパケット送信時間 T_{pkt} が短いため、送信フレームの消費電力量 J_{tx} が小さくなり、全体の消費電力量 J_{conv} は小さくなる。一方提案手法“Prop.”では、時間スロット数 Q を大きくすることで時間スロット長 T_{slot} を小さくでき、受信フレームの消費電力量 $J_{\text{rx,prop}}$ を小さくすることができる。これにより、時間スロット数 Q を大きくするほど、全体の消費電力量 J_{prop} を抑えることができている。

しかし、PDR 特性の結果(図4)から、時間スロット数 Q を一定の数まで増やすと、受信する時間スロット長 T_{slot} 内で、時間長 T_{pkt} のパケットを受信できなくなり、PDR は大幅に低下してしまう。即ち、本提案手法を用いたシステムで、高い PDR を保ちつつ抑えられる消費電力量には限界がある。したがって、図4の PDR が1である時間スロット数 Q の時の消費電力量 J_{prop} (図5)がシステムの性能的な限界値であると言える。この限界値を考慮して、特に今回のシミュレーション値(表1)では、 $SF = 7$ で最大約67.2%($Q = 29$)、 $SF = 8$ で最大約76.5%($Q = 19$)、 $SF = 7$ で最大約79.8%($Q = 11$)の消費電力量を削減できている。

5. まとめ

本研究では、LoRaWAN マルチホップ通信における、パケット情報を用いた自律分散型の適応的なリソース割り当て法を提案する。特に、ホップする順番となるインデックスおよびパケットに含まれるパケットカウンタを用いた送信リソースのマッピングを行なった。これにより送受信側で互いに送信リソースの共有ができ、パケット衝突の回避および無駄な受信窓を開く時間を無くし、特性評価により、提案手法が比較手法と

比べ電力消費量を低減できることを示した。今後の課題として、実機実験を用いた提案手法の組み込みおよび評価を目指す。

文 献

- [1] A. Lavric, A. I. Petrariu, and L. Anchidin, “Internet of things software defined radio technology for LoRaWAN wireless communication: a survey,” in *Proc. Int. Symp. Adv. Topics in Elect. Eng. (ATEE)*, pp. 1–4, Mar. 2021.
- [2] P. Mutescu, A. I. Petrariu, A. Lavric, “Wireless communications for IoT: energy efficiency survey,” in *Proc. Int. Symp. Adv. Topics in Elect. Eng. (ATEE)*, pp. 1–4, May 2021.
- [3] K. Mikhaylov, “On the uplink traffic distribution in time for duty-cycle constrained LoRaWAN networks,” in *Proc. Int. Congress on Ultra Modern Telecommun. and Control Syst. and Workshops (ICUMT)*, pp. 1–6, Dec. 2021.
- [4] “920MHz 帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備,” ARIB STD-T108 1.4 版, 一般社団法人 電波産業会 (ARIB), Apr. 2021.
- [5] 総務省, “920MHz 帯省電力無線システムの高度化に係る技術基準の見直し(案),” https://www.soumu.go.jp/main_content/000452569.pdf, Accessed: Oct. 19, 2022.
- [6] LoRa Alliance Technical Committee, “LoRaWAN™1.1 specification”. [Online]. Available: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm_specification_v1.1.pdf
- [7] J. Ortin, M. Cesana, and A. Redondi, “How do ALOHA and Listen Before Talk Coexist in LoRaWAN ?” in *Proc. IEEE Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.*, 2018, pp. 1–7.
- [8] J. Haxhibeqiri, I. Moerman, and J. Hoebeke, “Low overhead scheduling of lora transmissions for improved scalability,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 3097–3109, 2019.
- [9] Intenet of Things, “Multi-hop communication protocol for LoRa with software-defined networking extension”. Volume 14. June2021. Page 100379. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2542660521000238>
- [10] LoRa Alliance Technical Committee, “LoRaWAN™1.1 Specification”. [Online]. Available: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm_specification_v1.1.pdf
- [11] K. Tsurumi, A. Kaburaki, K. Adachi, O. Takyu, M. Ohta, and T. Fujii, “Simple clock drift estimation & compensation for packet-level index modulation and its implementation in lorawan,” *IEEE Internet Things J.*, 2022.
- [12] 株式会社 EASEL, “特定小電力無線モジュール ES920LR2 データシート Version 1.05,” https://easel5.com/documents/files/ES920LR2%E3%83%87%E3%83%BC%E3%82%BF%E3%82%B7%E3%83%BC%E3%83%88_1.05-1.pdf, Accessed: Aug. 20, 2023.