

## パケット型インデックス変調における 適応的インデックスマッピング手法

鈴木 康介<sup>†</sup> 安達 宏一<sup>†</sup> 太田 真衣<sup>††</sup> 田久 修<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> 福岡大学 工学部 電子情報工学科 〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1

<sup>†††</sup> 信州大学 工学部 電子情報システム工学科 〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1

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

**あらまし** IoT (Internet-of-Things) の発展に伴い、多端末通信が可能な LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) が注目されている。しかし、デューティサイクル (DC: Duty Cycle) と呼ばれる送信時間の制約により、送信パケット数の増加によるスループットの向上はできない。そこで、パケット型インデックス変調 (PLIM: Packet-Level Index Modulation) は、データパケットの周波数チャネルと送信タイミングの組合せをインデックスとして情報を付与することで、スループットを向上させる。本稿では、利用可能な全ての周波数チャネルと送信タイミングに対してインデックスを適応的に割り当てることにより、パケット衝突を回避するインデックスマッピング手法を提案する。数値計算により、EN (End Node) とゲートウェイで必要となるメモリサイズを増大させることなく、提案手法が従来のインデックスマッピング手法と比較してスループットを向上できることを示す。

**キーワード** LPWAN, LoRaWAN, インデックス変調

### Flexible Index Mapping Scheme for Packet-Level Index Modulation

Kosuke SUZUKI<sup>†</sup>, Koichi ADACHI<sup>†</sup>, Mai OHTA<sup>††</sup>, Osamu TAKYU<sup>†††</sup>, and Takeo FUJII<sup>†</sup>

<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 Electronics Engineering and Computer Science, Faculty of Engineering, Fukuoka University  
8-19-1, Nanakuma, Jonan, Fukuoka 814-0180

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

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

**Abstract** Long range wide area network (LoRaWAN) attracts attention due to its ability to realize massive machine-type communication (MTC); however, its throughput is limited by the duty cycle (DC). Packet-level index modulation (PLIM) increases the throughput by utilizing a data packet's frequency channel and transmission timing as an information-bearing index. This paper proposes a flexible index mapping scheme to fully utilize the available frequency channels and transmission timings to increase the number of bits transmitted by an index and avoid packet collision of PLIM. Numerical results show that the proposed scheme improves the throughput without increasing the required memory size of end nodes.

**Key words** LPWAN, LoRaWAN, index modulation

#### 1. はじめに

近年、IoT (Internet-of-Things) の発展に伴い、多端末通信が可能な省電力広域無線ネットワーク (LPWAN: Low Power Wide Area Network) が注目されている [1]–[3]。そのような多

元接続環境では、多数の EN (End Node) が限られた無線リソースを共有して通信するため、複数の EN が同一周波数チャネルで同時にデータパケットを送信した場合、パケット衝突が発生し、受信機であるゲートウェイ (GW: Gateway) がデータを正しく受信できない可能性がある。また、LPWAN では

GW を含むノード毎に対して、特定の周波数チャネルを利用できる時間率 (DC: Duty Cycle) が規定されている [4]. そのため、送信データ量を増やすために送信パケット数を増やすことができない.

LPWAN の一種である LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) [5] は、物理 (PHY: Physical) 層でチャープスペクトラム拡散 (CSS: Chirp Spread Spectrum) 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. また、MAC (Medium Access Control) 層では ALOHA 方式を用い、CSMA (Carrier Sense Multiple Access) のような複雑な処理は行わないため、消費電力を抑えることができる. しかし、数千台の EN がネットワークに接続されるような環境ではパケット衝突を回避できない [6], [7]. また、LoRaWAN はアンライセンスバンドを使用するため、特定の周波数チャネルにおいて他システムからの干渉が大きくなる可能性がある. その場合、他システムからの干渉によるパケット損失を回避するため、その周波数チャネルを禁止周波数チャネルとして使用を避ける必要がある.

LoRaWAN 環境におけるパケット衝突の回避のために、リンク調整とリソース割当ての 2 つの観点から多くの手法が提案されている [8]. 文献 [9] では、GW からのビーコン信号を用いたリンク調整手法を提案している. この手法では、簡易的なスケジューリングにより、各 EN の送信周波数チャネル、拡散係数 (SF: Spreading Factor)、送信電力、送信タイミングを動的に決定するビーコン信号を受信する必要があるため EN の消費電力が増加するものの、パケット衝突を回避することによりパケット誤り率 (PER: Packet Error Rate) を約 20% 低減可能であることが計算機シミュレーションにより示されている. 文献 [10] では、スロット送信とランダムスロット遅延を用いた衝突回避法が提案され、従来の LoRaWAN と比べ、データ伝送の信頼性と公平性が大幅に改善されることが実機実験により示されている. しかし、EN 間でスロット同期する必要があり、無線リソースのオーバーヘッドと EN の消費電力の増加を招いてしまう. 文献 [11] では、SF と周波数チャネルの直交性を用いたりソース割当てアルゴリズムが提案されており、計算機シミュレーションと実機実験により、従来の LoRaWAN と比べて最大で 40% スループットを増大できることが示されている.

筆者らは以前、LoRaWAN において周期的に生成されるデータに着目した、パケット型インデックス変調 (PLIM: Packet-Level Index Modulation) を提案した [12]. PLIM は、インデックス変調 (IM: Index Modulation) [13] の一種であり、送信パケットの周波数チャネルと時間スロットの組合せ (インデックス) に追加の情報を付与することで、DC の制約下で従来の LoRaWAN 規格を変更することなくビットレートを向上できる. インデックスと追加の情報 (PLIM ビット系列) の対応表をリソースマップとして EN と GW で事前に共有しておくことで、情報の変調・復調が可能となる. 計算機シミュレーションによって従来の LoRaWAN と比べてビットレートを最大で 30% 程度向上可能であることを明らかにしている. しかし、PLIM にはインデックスによる伝送を最大限に活かすために

解決すべき 3 つの問題点がある. 1 つ目は、複数の EN が同一の PLIM ビット系列を周期的に選択した場合、周期的なパケット衝突が発生する可能性がある点である. 2 つ目は、使用可能リソース数の制約である. 周波数チャネルと時間スロットで PLIM ビット系列を直接表現するため、周波数チャネル数と時間スロット数がそれぞれ 2 の整数乗となる必要があり、余剰なリソースにはインデックスを付与できない. 3 つ目は、リソースマップを変更する際に大きなオーバーヘッドを必要とする点である. これは、他システムが通信を始めることなどにより特定の周波数チャネルの使用状況が変化した際に、GW がインデックスのリソースマップを変更して EN と共有するために、ネットワークの通信オーバーヘッドまたは EN に大きなメモリサイズを必要とするものである.

本稿では、従来の LoRaWAN および PLIM が抱える問題点を解消すべく、PLIM における適応的なインデックスマッピング手法を提案する. 具体的には、禁止周波数チャネルが与えられた時に、利用可能な周波数チャネルと時間スロットを最大限に利用することでパケット衝突を回避する、情報ビット系列からインデックスへのマッピング手法を提案する.

本稿の構成を述べる. 2 節ではパケット型インデックス変調の概要と問題点について述べる. 3 節では提案手法について述べ、4 節では数値計算結果を述べる. 5 節では本稿のまとめを行う.

## 2. パケット型インデックス変調 (PLIM)

### 2.1 概要

ここでは、一般性を失うことなく  $N$  台の EN のうち特定の 1 台の EN と GW が  $K$  個の周波数チャネルを用いて通信することを考える. また、各々の EN が  $T_{\text{frame}}$  [sec] ごとにデータパケットを生起するものと仮定する. 時間長  $T_{\text{frame}}$  のフレームは、時間長  $T_{\text{slot}}$  [sec] の  $Q$  個の時間スロットに等分割される.

EN は情報ビット系列  $\mathbf{B} = (b_0, b_1, \dots, b_i, \dots, b_{B-1})^\top$  を生成する. ここで、 $b_i \in \{0, 1\}$  は  $i$  番目の情報ビット、 $B$  は情報ビット系列長、 $(\cdot)^\top$  は転置操作である. 次に、 $\mathbf{B}$  を PLIM ビット系列  $\mathbf{B}_{\text{plim}} = (b_0, b_1, \dots, b_{B_{\text{plim}}-1})^\top$  とペイロードビット系列  $\mathbf{B}_{\text{pl}} = (b_{B_{\text{plim}}}, b_{B_{\text{plim}}+1}, \dots, b_{B_{\text{plim}}+B_{\text{pl}}-1})^\top$  に分割する. ここで、 $B_{\text{plim}}$  と  $B_{\text{pl}}$  はそれぞれ PLIM ビット系列とペイロードビット系列のビット数であり、 $B_{\text{plim}} + B_{\text{pl}} = B$  となる. そして、 $\mathbf{B}_{\text{pl}}$  を用い、従来の LoRaWAN と同様の処理によってデータパケットを生成する. 最後に、 $\mathbf{B}_{\text{plim}}$  を用い、式 (1) で示される任意のインデックスマッパー  $\mathcal{F}$  によって決定される周波数チャネル  $k \in \mathcal{K} = \{0, 1, \dots, K-1\}$  と時間スロット  $q \in \mathcal{Q} = \{0, 1, \dots, Q-1\}$  でデータパケットを送信する.

$$(k, q) = \mathcal{F}(\mathbf{B}_{\text{plim}}) \quad (1)$$

GW は周波数チャネル  $\tilde{k} \in \mathcal{K}$  でデータパケットを受信し、受信時間スロット  $\tilde{q} \in \mathcal{Q}$  を推定する [12]. 得られた周波数チャネルと時間スロットの組  $(\tilde{k}, \tilde{q})$  を式 (2) で表されるインデックスデマッパー  $\mathcal{F}^{-1}$  に入力し、PLIM ビット系列  $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{plim}} = (\tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_i, \dots, \tilde{b}_{B_{\text{plim}}-1})^\top$ ,  $\tilde{b}_i \in \{0, 1\}$  を復調する.

$$\tilde{\mathbf{B}}_{\text{plim}} = \mathcal{F}^{-1}(\tilde{k}, \tilde{q}). \quad (2)$$

そして、従来の LoRaWAN と同様の処理によってデータパケットを復調し、ペイロードビット系列  $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{pl}} = (\tilde{b}_{B_{\text{plim}}}, \tilde{b}_{B_{\text{plim}}+1}, \dots, \tilde{b}_{B-1})^\top$  を得る。最後に、PLIM ビット系列  $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{plim}}$  とペイロードビット系列  $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{pl}}$  を結合し、情報ビット系列  $\tilde{\mathbf{B}} = (\tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_{B-1})^\top$  を得る。

## 2.2 問題点

従来の PLIM [12] には、インデックス伝送を最大限に活かすために解決すべき3つの問題点がある。1つ目に、複数の EN が同じインデックスを選択すると、周期的にパケット衝突が発生してデータパケットが損失する可能性がある。2つ目に、インデックス割当てに利用可能なリソース数に制約がある。従来の PLIM では、周波数チャンネルと時間スロットに PLIM ビット系列を直接割り当てるため、 $\log_2 K \in \mathbb{N}^+$  と  $\log_2 Q \in \mathbb{N}^+$  の制約がある。したがって、図1に示すように、余剰リソース ( $K \times Q - 2^{\lceil \log_2 K \rceil + \lceil \log_2 Q \rceil}$ ) はインデックス伝送に利用できない。3つ目に、リソースマップ更新時に必要なオーバーヘッドが大幅に増加する。同一周波数チャンネルを利用する他システムによって特定の周波数チャンネルの干渉状態が変化した場合、GW はリソースマップを更新し、EN と再共有する必要がある。リソースマップの更新は、更新の度に GW が EN に対してリソースマップを送信する方法と、予め全パターンのリソースマップを GW と EN で共有する方法がある。更新の度に共有する場合はネットワークのオーバーヘッドが増加し、予め共有する場合は EN で必要なメモリサイズが増加する。

1つ目の問題点を解決すべく、文献 [14] では周期的なパケット衝突の回避法が提案されている。具体的には式 (3) を用い、パケット ID  $i \in \mathbb{N}^+$  と EN の ID  $z \in \mathbb{N}^+$  に応じて10進表現の PLIM ビット系列  $D_{\text{plim}}$  をシフトする。

$$D_{\text{plim}} = D'_{\text{plim}} + i \times z \quad (3)$$

ここで、 $D'_{\text{plim}}$  は初回のパケット送信における PLIM のビット系列であり、 $D_{\text{plim}} \geq 2^{\lceil \log_2 K \rceil + \lceil \log_2 Q \rceil}$  のとき、サイクリックシフトされる。この手法は、同一の PLIM ビット系列を連続で送信する場合のみビットシフトし、PLIM ビット系列が変化する場合はビットシフトせずに送信する。生起ビット系列に偏りがある場合は、送信リソース (送信周波数チャンネルと送信時間スロット) に偏りが生じる可能性がある。また、同一の PLIM ビット系列を連続で送信する場合でも、同一リソースを周期的に使用する可能性がある。具体的には、EN の ID がリソース数の約数となる場合、同一のリソースが周期的に選択される。例えば、 $K = 4, Q = 4, z = 8, D'_{\text{plim}} = 0$  のとき、 $D_{\text{plim}} = 0$  ( $2i \in \mathbb{N}^+$ ),  $8$  ( $2i - 1 \in \mathbb{N}^+$ ) となり、0 と 8 の PLIM ビット系列が繰り返し選択される。以上のように、生起ビット系列や EN の ID によって送信リソースに偏りが生じ、パケット衝突率が増加する可能性がある。

## 3. 提案手法

本稿では、インデックスで送信するビット数を増加し、パ

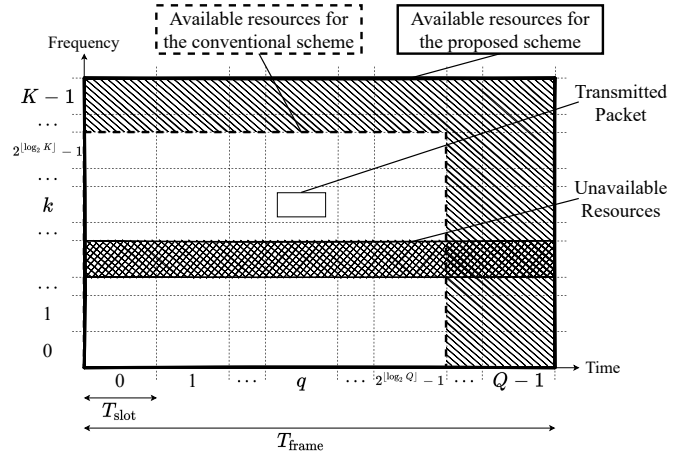


図1 パケット型インデックス変調における使用可能リソース

ケット衝突を回避するため、全ての使用可能なリソースに対して適応的にインデックスをマッピングする手法を提案する。具体的には、LoRaWAN パケット [5] のヘッダに含まれるデバイスアドレス  $\mathbf{B}_{\text{addr}}$  とパケットカウンタ  $\mathbf{B}_{\text{pcnt}}$  を用いたインデックスマッパー  $\mathcal{F}$  とインデックスデマッパー  $\mathcal{F}^{-1}$  を提案する。インデックスマッパー  $\mathcal{F}$  は、PLIM ビット系列  $\mathbf{B}_{\text{plim}}$  を送信周波数チャンネルと時間スロットのインデックス  $(k, q)$  に変換し、インデックスデマッパー  $\mathcal{F}^{-1}$  は、受信パケットの周波数チャンネルと時間スロットのインデックス  $(\tilde{k}, \tilde{q})$  を PLIM ビット系列  $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{plim}}$  に変換する。デバイスアドレス  $\mathbf{B}_{\text{addr}}$  は 4 byte で表現される EN 固有の値であり、パケットカウンタ  $\mathbf{B}_{\text{pcnt}}$  は 2 byte で表されるパケット固有の値である。提案手法は、従来手法 [12], [14] における問題点を解消する。

提案手法に用いる変数として、使用可能周波数チャンネル  $A = \{a_0, a_1, \dots, a_k, \dots, a_{K-1}\}$  を定義する。 $a_k$  は周波数チャンネル  $k$  の使用可否を表し、使用可能である場合を  $a_k = 1$ 、使用不可である場合を  $a_k = 0$  と定義する。よって、使用可能周波数チャンネル数  $K_a$  と使用可能リソース数  $R$  はそれぞれ  $K_a = \sum_{k=0}^{K-1} a_k$  ( $0 < K_a \leq K$ ),  $R = K_a \times Q$  と表せる。

### 3.1 インデックスマッピング手法

EN は PLIM ビット系列  $\mathbf{B}_{\text{plim}}$ 、デバイスアドレス  $\mathbf{B}_{\text{addr}}$ 、パケットカウンタ  $\mathbf{B}_{\text{pcnt}}$  をそれぞれ  $D_{\text{plim}}, D_{\text{addr}}, D_{\text{pcnt}}$  で表される10進数に変換する。そして、式 (4) で表される送信符号  $X$  を計算する。

$$X = \text{mod}(D_{\text{plim}} + f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcnt}}), R) \quad (4)$$

ここで、 $\text{mod}(m, n)$  は  $m \in \mathbb{N}$  の  $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$  による剰余 (modulo) を表し、次式で定義される。

$$\text{mod}(m, n) = m - \left( n \times \left\lfloor \frac{m}{n} \right\rfloor \right) \quad (5)$$

ここで、 $\lfloor \cdot \rfloor$  は床関数、 $f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcnt}})$  は  $D_{\text{addr}}$  と  $D_{\text{pcnt}}$  によって一意に定まる任意の関数である。式 (5) より、 $0 \leq \text{mod}(m, n) < n$  であり、 $m, n$  が負値の場合にも適用可能である。最後に、 $X$  を式 (6) に代入して送信インデックス  $(k, q)$  を求め、得られた周波数チャンネル  $k$  と時間スロット  $q$  を

表 1 評価諸元

Parameter	Value
EN 数 $N$	200
周波数チャンネル数 $K$	16
時間スロット数 $Q$	150
パケットサイズ $D$	5 [byte]
送信周期 $T$	60 [sec]
送信可能周波数チャンネル数 $K_a$	$\{1, \dots, 16\}$

**Algorithm 1** Proposed Index Mapper  $\mathcal{F}$ **Require:**  $\mathcal{K}, \mathcal{Q}, \mathcal{A}, f$  {Pre-sharing with GW and EN}**Require:**  $\mathbf{B}_{\text{plim}}$  {Obtained from Information Divider}**Require:**  $\mathbf{B}_{\text{addr}}, \mathbf{B}_{\text{pcent}}$  {Obtained from LoRaWAN header}**Ensure:**  $(k, q)$ 

- 1: Convert  $\mathbf{B}_{\text{plim}}$  into a decimal number and assign to  $D_{\text{plim}}$
- 2: Convert  $\mathbf{B}_{\text{addr}}$  into a decimal number and assign to  $D_{\text{addr}}$
- 3: Convert  $\mathbf{B}_{\text{pcent}}$  into a decimal number and assign to  $D_{\text{pcent}}$
- 4:  $X = \text{mod}(D_{\text{plim}} + f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcent}}), R)$
- 5:  $(k, q) = \left( \lfloor X/Q \rfloor + \sum_{k=0}^{\lfloor X/Q \rfloor} (1 - a_k), \text{mod}(X, Q) \right)$

**Algorithm 2** Proposed Index Demapper  $\mathcal{F}^{-1}$ **Require:**  $\mathcal{K}, \mathcal{Q}, \mathcal{A}, f$  {Pre-sharing with GW and EN}**Require:**  $(\tilde{k}, \tilde{q})$  {Obtained from Transmission Timing Detector}**Require:**  $\mathbf{B}_{\text{addr}}, \mathbf{B}_{\text{pcent}}$  {Obtained from LoRaWAN header}**Ensure:**  $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{plim}}$ 

- 1: Convert  $\mathbf{B}_{\text{addr}}$  into binary number and assign to  $D_{\text{addr}}$
- 2: Convert  $\mathbf{B}_{\text{pcent}}$  into binary number and assign to  $D_{\text{pcent}}$
- 3:  $\tilde{X} = \left( \tilde{k} - \sum_{k=0}^{\tilde{k}} (1 - a_k) \right) Q + \tilde{q}$
- 4:  $\tilde{D}_{\text{plim}} = \text{mod}(\tilde{X} - f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcent}}), R)$
- 5: Convert  $\tilde{D}_{\text{plim}}$  into binary number and assign to  $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{plim}}$

用いてデータパケットを送信する。

$$(k, q) = \left( \left\lfloor \frac{X}{Q} \right\rfloor + \sum_{k=0}^{\lfloor X/Q \rfloor} (1 - a_k), \text{mod}(X, Q) \right) \quad (6)$$

データパケット送信時の変調アルゴリズムを Algorithm1 に示す。

**3.2 インデックスデマッピング手法**

GW は周波数チャンネル  $\tilde{k}$ , 時間スロット  $\tilde{q}$  でデータパケットを受信すると, そのパケット復調して  $\mathbf{B}_{\text{addr}}$  と  $\mathbf{B}_{\text{pcent}}$  を検出し, それぞれ  $D_{\text{addr}}$  と  $D_{\text{pcent}}$  で表される 10 進数に変換する。そして, 次式で表される送信符号の推定値  $\tilde{X}$  を求める。

$$\tilde{X} = \left( \tilde{k} - \sum_{k=0}^{\tilde{k}} (1 - a_k) \right) Q + \tilde{q} \quad (7)$$

そして, 次式を用いて PLIM ビット系列  $\tilde{D}_{\text{plim}}$  を求める。

$$\tilde{D}_{\text{plim}} = \text{mod}(\tilde{X} - f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcent}}), R) \quad (8)$$

式 (8) において, 剰余演算の被除数  $\tilde{X} - f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcent}})$  は負値を取る場合があるが, 剰余演算は式 (5) で定義されるため,  $\tilde{D}_{\text{plim}}$  は常に正の値を取る。最後に, 得られた  $\tilde{D}_{\text{plim}}$  を 2 進数に変換することで,  $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{plim}}$  を得る。データパケット受信時の復調アルゴリズムを Algorithm2 に示す。

**4. 特性評価**

数値計算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。一般性を失うことなく, すべての EN が送信周期  $T_{\text{frame}} = 60$  [sec] でデータパケットを生起すると仮定する。EN が生起するデータパケットにおける情報ビット系列の各

ビットは, ベルヌーイ分布に従って生起すると仮定し, “1” が生起する確率を  $p$ , “0” が生起する確率を  $1 - p$  とする。また, 関数  $f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcent}})$  として次式を用いる。

$$f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcent}}) = D_{\text{addr}} + D_{\text{pcent}} \quad (9)$$

以降, 提案マッピング手法を用いた PLIM 伝送を “PLIM w/ Proposed Mapper”, 提案マッピング手法を用いない従来の PLIM 伝送 [12] を “PLIM w/o Proposed Mapper”, 従来の LoRaWAN 伝送を “w/o PLIM” と称す。なお, 生起情報ビット系列の仮定から, 文献 [14] のインデックスマッピング手法を用いた場合の特性は, “PLIM w/o Proposed Mapper” と同等になる。

**4.1 送信リソースの分布**

選択される送信リソースの分布をモンテカルロシミュレーションにより評価する。周波数チャンネル  $k = 5$  のみ使用不可とする。すなわち,  $a_k = 0$  ( $k = 5$ ),  $1$  ( $k \neq 5$ ) と仮定する。周波数チャンネル  $k$  と時間スロット  $q$  の 2 変数によって一意に定まるリソース番号  $r$  を  $r = k \times Q + q$  と定義する。

図 2 に  $p = 0.5$  の場合に選択されるリソースの確率質量関数 (PMF: Probability Mass Function) を示す。提案手法は, 使用不可とした周波数チャンネル  $k = 5$  ( $750 \leq e < 900$ ) を除くすべてのリソースが概ね一様に選択できていることが分かる。一方, 従来手法では周波数チャンネル  $k = 5$  に加え,  $k \geq \lfloor \log_2 K_a \rfloor + \sum_{k=0}^{\lfloor \log_2 K_a \rfloor} (1 - a_k)$  の周波数チャンネルと  $q \geq \lfloor \log_2 Q \rfloor$  の時間スロットが使用されていないことが分かる。これは, 従来手法が  $\lfloor \log_2 K_a \rfloor$  個の周波数チャンネルと  $\lfloor \log_2 Q \rfloor$  個の時間スロットにしかインデックスを割当てられないためである。

次に, 生起する情報ビットに偏りがある場合を評価するために, 図 3 に  $p = 0.25$  の場合の選択されるリソースの PMF を示す。提案手法を用いた場合は,  $p = 0.5$  の場合と同様に周波数チャンネル  $k = 5$  を除くリソースに概ね一様に選択インデックスが分布している。一方, 従来手法では  $p = 0.5$  の場合の制約に加え, 使用されるリソースの中でも偏りが生じていることが分かる。これは, 従来手法が PLIM ビット系列をインデックスに直接割り当てるため, 生起ビット系列の偏りがインデックスの偏りに直接影響するためである。

**4.2 スループット**

次に, スループット特性について評価する。理論スループット  $S$  [bps] は次式で表せる。

$$S = P_{\text{suc}} \times (B_{\text{pl}} + B_{\text{plim}}) \times \frac{1}{T_{\text{frame}}} \quad (10)$$

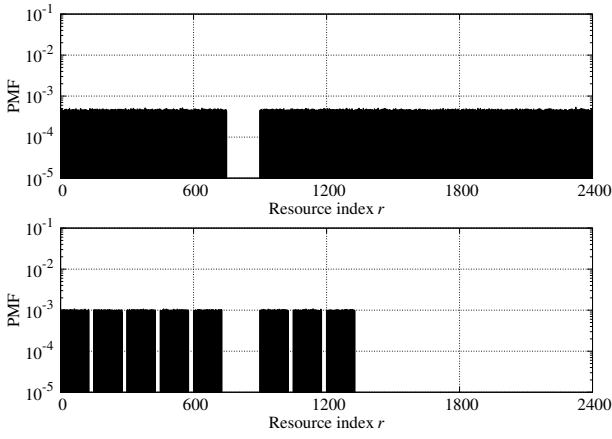


図2 選択リソースの分布 ( $p = 0.5$ , 上: PLIM w/ Proposed Mapper, 下: PLIM w/o Proposed Mapper)

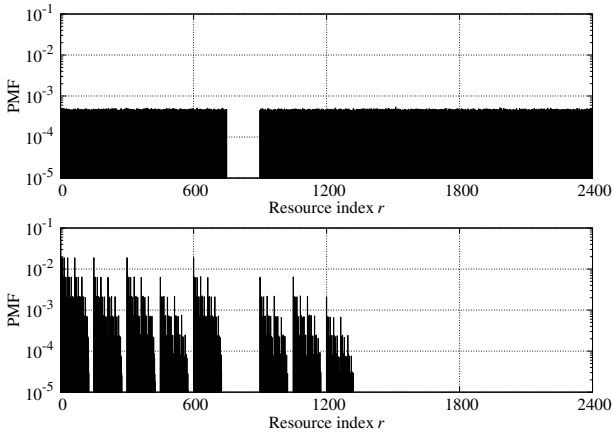


図3 選択リソースの分布 ( $p = 0.25$ , 上: PLIM w/ Proposed Mapper, 下: PLIM w/o Proposed Mapper)

ここで,  $P_{\text{suc}}$  はパケット送信成功確率,  $B_{\text{pl}}$  はデータパケットのペイロードにより送信されるデータサイズ [bit],  $B_{\text{plim}}$  は PLIM により送信されるデータサイズ [bit],  $T_{\text{frame}}$  は送信周期 [sec] であり,  $P_{\text{suc}}$  と  $B_{\text{plim}}$  はそれぞれ次式で表される.

$$P_{\text{suc}} = \sum_{r=0}^{R-1} P_r \times (1 - P_r)^{N-1} \quad (11)$$

$$B_{\text{plim}} = \begin{cases} \lceil \log_2 R \rceil & \text{w/ PLIM} \\ 0 & \text{w/o PLIM} \end{cases} \quad (12)$$

ここで,  $R$  は使用可能リソース数,  $P_r$  はリソース  $r$  が選択される確率,  $N$  は EN 数であり,  $R$  と  $P_r$  は次式で表される.

$$R = \begin{cases} K_a \times Q & \text{w/ Proposed Mapper} \\ 2^{\lceil \log_2 K_a \rceil + \lceil \log_2 Q \rceil} & \text{w/o Proposed Mapper} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_r = \begin{cases} \frac{1}{R} & \text{w/ Proposed Mapper} \\ p^{B_{\text{plim,one}}} \times (1 - p)^{B_{\text{plim}} - B_{\text{plim,one}}} & \text{w/o Proposed Mapper} \end{cases} \quad (14)$$

ここで,  $B_{\text{plim,one}}$  は  $B_{\text{plim}}$  に含まれるビット“1”の個数であり,  $B_{\text{plim,one}} = \sum_{i=0}^{B_{\text{plim}}-1} b_i$  と表せる. なお, PLIM を用い

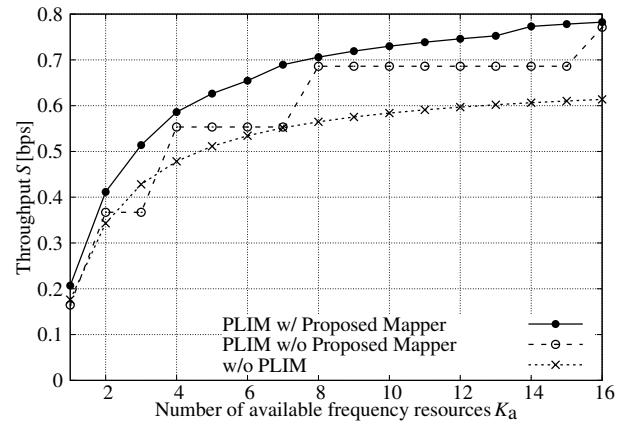


図4 使用可能周波数チャンネル数  $K_a$  に対するスループット  $S$

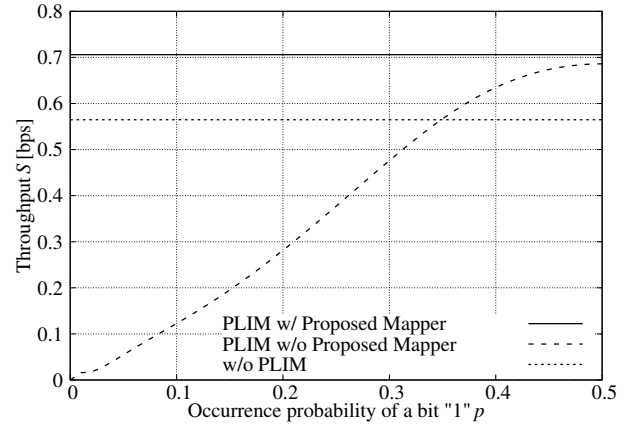


図5 ビット“1”が生起する確率  $p$  に対するスループット  $S$

ない場合,  $R = K_a \times Q$  および  $P_r = \frac{1}{R}$  となる.

図4に,  $p = 0.5$  の場合の使用可能周波数チャンネル数  $K_a$  に対するスループット  $S$  を示す. PLIM を用いた場合,  $K_a$  の値に依らず従来の LoRaWAN 伝送と比較してスループット性能が向上する. これは, PLIM によって追加の情報を送信するためである. また, 余剰リソースがあるとき, すなわち  $\log_2 R - \lceil \log_2 R \rceil > 0$  のとき, 提案手法は従来手法と比較してスループットが向上できている. これは, 提案手法が従来手法では利用できなかったリソースを有効に活用しているためである. 特に,  $K_a = 7$  の時, スループットを約 1.25 倍まで増大できていることが分かる.

図5にビット“1”の生起確率  $p$  に対するスループット  $S$  を示す. 従来のインデックスマッピング手法を用いる PLIM の場合は,  $p$  の値に依らずスループットは一定となる. これは,  $p$  の値に関わらずランダムにリソースが選択されるためである. 一方, 従来手法は  $p$  の値の減少に伴ってスループットが減少する. これは,  $p$  の値が減少するとリソースの偏りがより顕著になり, 複数の EN で同一のリソースが選択される確率が増加し, パケット衝突率が増加するためである.

### 4.3 PLIM に必要なメモリサイズ

次に, EN と GW において PLIM を動作させるために必要なメモリサイズを評価する. 提案手法は周波数チャンネルの使用可否  $A$  のみを必要とするため, メモリサイズ  $D_{\text{prop}}$  は次式

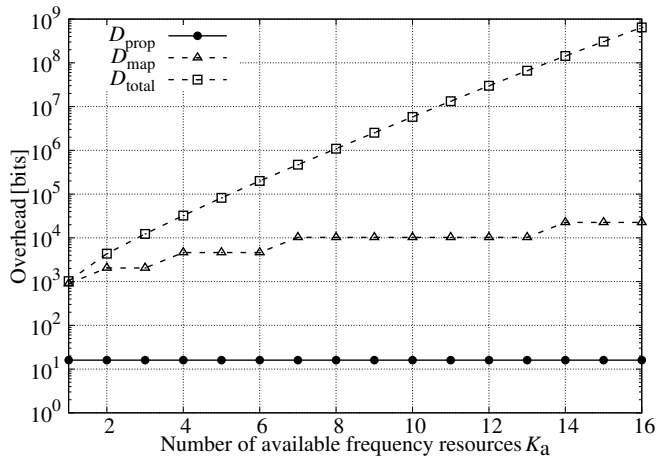


図 6 使用可能リソース数  $R$  に対するメモリサイズ  $D_{prop}$ ,  $D_{map}$ ,  $D_{total}$

で表される.

$$D_{prop}(K) = K \quad (15)$$

一方, 提案手法を用いない場合, 周囲の無線環境の変化により周波数チャネルの割り当てを変更すると, リソースの更新ごとにリソースマップを再共有する必要がある. リソース更新の度にリソースマップを再共有する場合, 必要なメモリサイズ  $D_{map}(K_a, Q)$  は次式で表される.

$$D_{map}(K_a, Q) = R_{rec}(K_a, Q) \times D_{rec}(K_a, Q) \quad (16)$$

ここで,  $R_{rec}(K_a, Q)$  は情報ビットを付与可能なリソース数,  $D_{rec}(K_a, Q)$  はインデックス一つあたりのメモリサイズであり, それぞれ次式で定義される.

$$\begin{cases} R_{rec}(K_a, Q) \triangleq 2^{\lceil \log_2(K_a \times Q) \rceil} \\ D_{rec}(K_a, Q) \triangleq \lceil \log_2(K_a \cdot Q) \rceil \end{cases} \quad (17)$$

ここで,  $\lceil \cdot \rceil$  は天井関数である. また, リソースマップの再共有による通信のオーバーヘッドを避けるため, 全パターンのリソースマップを EN と GW が予め保持する場合, メモリサイズ  $D_{total}(K_a, Q)$  は次式で表せる.

$$D_{total}(K, Q) = \sum_{K_a=1}^K K C_{K_a} \times D_{map}(K_a, Q) \quad (18)$$

ここで,  $mC_n$  は二項係数を表す.

図 6 に使用可能リソース数  $R$  に対するメモリサイズ  $D_{prop}$ ,  $D_{map}$ ,  $D_{total}$  を示す. 提案手法は, 従来手法と比べてメモリサイズを大幅に削減可能である. 特に,  $K_a = 8$  の時, メモリサイズが  $1/640$  ( $D_{map}$  と比較した場合),  $1/68224$  ( $D_{total}$  と比較した場合) に抑えられていることが分かる.

## 5. まとめ

本稿では, パケット型インデックス変調 (PLIM: Packet-level index modulation) のスループット性能を向上させるため, 適

応的なインデックスマッピング手法を提案した. 提案手法は利用可能な全ての周波数チャネルと時間スロットを活用することで, インデックスによる送信ビット数を増加させ, パケット衝突を回避する. 理論性能評価により, 提案手法は従来の PLIM 伝送と比較してスループット性能を約 25% 向上させ, EN と GW の間のオーバーヘッドを大幅に削減することを示した. 今後の課題として, 計算機シミュレーションと実機実験による提案手法の評価が挙げられる.

**謝辞** 本研究開発は総務省 SCOPE (受付番号 JP205004001) の委託を受けて行われたものである.

## 文献

- [1] 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.
- [2] H. Wang and A.O. Fapojuwo, "A Survey of Enabling Technologies of Low Power and Long Range Machine-to-Machine Communications," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 19, no. 4, pp. 2621–2639, 2017.
- [3] A. Lavric and V. Popa, "Internet of Things and LoRa Low-Power Wide-Area Networks: A survey," in *Proc. 2017 Int. Symp. on Signals, Circuits and Syst. (ISSCS)*, pp. 1–5, IEEE, Jul. 2017.
- [4] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.
- [5] LoRa Alliance Technical Committee, "LoRaWAN™1.1 Specification". [Online]. Available: [https://loro-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm\\_specification\\_v1.1.pdf](https://loro-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm_specification_v1.1.pdf)
- [6] M. Lauridsen, B. Vejlgaard, I. Z. Kovacs, H. Nguyen, and P. Mogensen, "Interference Measurements in the European 868 MHz ISM Band with Focus on LoRa and SigFox," in *Proc. 2017 IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, pp. 1–6, Mar. 2017.
- [7] B. Vejlgaard, M. Lauridsen, H. Nguyen, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, and M. Sorensen, "Coverage and capacity analysis of Sigfox LoRa GPRS and NB-IoT," in *Proc. 2017 IEEE 85th Veh. Technol. Conf. (VTC-Spring)*, pp. 1–6, Jun. 2017.
- [8] J. P. S. Sundaram, W. Du, and Z. Zhao, "A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions, and Open Issues," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 22, no. 1, pp. 371–388, 2020.
- [9] B. Reynders, Q. Wang, P. Tuset-Peiro, X. Vilajosana, and S. Pollin, "Improving reliability and scalability of LoRaWANs through lightweight scheduling," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 3, pp. 1830–1842, Jun. 2018.
- [10] Q. L. Hoang, H. P. Tran, W. Jung, S. H. Hoang, and H. Oh, "A Slotted Transmission with Collision Avoidance for LoRa Networks," *Procedia Computer Science*, vol. 177, pp. 94–101, 2020.
- [11] N. Chinchilla-Romero, J. Navarro-Ortiz, P. Munoz, and P. Ameigeiras, "Collision Avoidance Resource Allocation for LoRaWAN," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1218, Feb. 2021.
- [12] K. Adachi, K. Tsurumi, A. Kaburaki, O. Takyu, M. Ohta, and T. Fujii, "Packet-Level Index Modulation for LoRaWAN," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 12601–12610, Jan. 2021.
- [13] T. Mao, Q. Wang, Z. Wang, and S. Chen, "Novel Index Modulation Techniques: A Survey," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 21, no. 1, pp. 315–348, 2019.
- [14] M. Ohta and T. Fujii, "Intra-System Interference Avoidance for Packet-Level Index Modulation in Internet of Things," in *Proc. 2021 Asia-Pacific Signal and Inf. Process. Assoc. Annu. Summit and Conf. (APSIPA)*, 2021 (Accepted for publication).