

# LoRaWANにおけるClassBモードを用いた端末クラスタリングの検討

更屋 貴大<sup>†</sup> 蕪木 碧仁<sup>†</sup> 安達 宏一<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  
E-mail: †{t.saraya, kaburaki, adachi}@awcc.uec.ac.jp

**あらまし** 無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) の普及に伴い, 低消費電力で長距離通信が可能な省電力広域無線ネットワーク (LPWAN: Low-Power Wide-Area Networks) が注目を集めている. 特に, LPWANの中でも免許不要帯域を使用する LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) は様々なアプリケーションで既に運用が開始されている. LoRaWAN を用いるシステムの多くは, 広域なエリアでの通信を想定しており, 隠れ端末によるパケット衝突がしばしば問題になる. 隠れ端末問題によるパケット衝突を回避するために, 端末のクラスタリング手法が多く提案されている. しかしながら, 多くのクラスタリング手法において通知にかかるオーバーヘッドとパケット衝突による通知失敗が問題となっている. そこで本稿では, LoRaWAN システムの端末モードの一つである Class B に着目し, オーバーヘッドを低減したクラスタリング手法を提案する. 計算機シミュレーションにより, 本提案手法が ALOHA やランダムにクラスタリングを行う手法と比較して, パケット配信率 (PDR: Packet Delivery Rate) を最大でそれぞれ約 9% と約 7% 向上可能であることを示す.

**キーワード** WSN, LPWA, LoRaWAN, LoRaWAN Class B, ビームフォーミング, パケット配信率

## Packet Collision Avoidance Using Clustering in LoRAWAN ClassB

Takahiro SARAYA<sup>†</sup>, Aoto KABURAKI<sup>†</sup>, and Koichi ADACHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> The University of Electro-Communications, Advanced Wireless & Communication Research Center  
1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan  
E-mail: †{t.saraya, kaburaki, adachi}@awcc.uec.ac.jp

**Abstract** Low-power wide-area networks (LPWANs), which enable long-distance communications with low power consumption, are attracting attention with the spread of wireless sensor networks. In particular, long range wide area network (LoRaWAN) using unlicensed frequency is used in various applications. However, due to its wide coverage area, LoRaWAN suffers from hidden node problem. Many node clustering methods have been proposed to alleviate the hidden node problem. However, many clustering methods suffer from notification overhead and unsuccessful notification due to packet collisions. In this paper, we proposes a clustering method with reduced overhead by focusing on LoRaWAN Class B mode. Numerical results showed that the proposed method can achieve a higher packet delivery rate (PDR) compared to ALOHA and the random clustering method by up to approximately 9% and 7% respectively.

**Key words** WSN, LPWA, LoRaWAN, LoRaWAN Class B, Beamforming, PDR

### 1. はじめに

近年, モノのインターネット (IoT: Internet-of-Things) の発展に伴い, 様々なモノに搭載されたセンサが通信を行う無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) が急速に普及してきている [1]. WSN では, 広大なエリアに多数のセンサ (以降, 端末と呼ぶ) を配置し, 各端末が長期間にわ

たって低データレートで通信を行うようなアプリケーションが多く想定されている. 一般に WSN で用いられる端末は, 設置場所やコストなどの観点から小型で安価な端末による運用が求められる. また, 高頻度なバッテリー交換は想定されておらず, 低消費電力での稼働が要求される. そのため, 低消費電力で長距離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 [2]. 特に

LPWAN の中でも、免許不要帯域を使用する LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) は産業界および学術界で注目を集めている [3] [4]. 一般に、LoRaWAN では ALOHA 方式に基づく簡易なランダムアクセス方式が用いられている. ALOHA 方式において、各端末は上りリンク (UL: Up Link) を生じた直後に情報集約局 (GW: GateWay) へとパケットを送信する. ALOHA 方式では、UL パケット送信時に他端末との協調動作等を行わないため、GW にて複数端末からの UL パケットが競合するパケット衝突が多発する. パケット衝突により、端末からの送信データが失われてしまうため、LoRaWAN においてパケット衝突回避技術の研究が急務となっている [5]. パケット衝突回避のための一つの手法としてキャリアセンス (CS: Carrier Sensing) がある. CS では、端末がパケットを送信する前に、使用予定周波数チャネルの使用状態を一定時間確認する. CS により使用予定周波数チャネルが使用中と判断した場合、端末は送信を中止し、バックオフ処理または別の周波数チャネルでの送信を行うことでパケット衝突を回避する. しかしながら、広大な通信エリアを持つ WSN では端末間の距離が離れているため、他端末の送信信号の検出に失敗する隠れ端末問題が発生する.

LoRaWAN システムにおいてパケット配信率 (PDR: Packet Delivery Rate) 特性を向上させるため、多くの研究が行われている. 文献 [6] では、端末のランダムクラスタリングに基づくスケジューリング方式を検討している. 計算機シミュレーションにより、大規模システムにおいて優れた PDR を達成することが示されているが、隠れ端末問題に起因するパケット衝突の回避は困難となっている. 文献 [7] では、LoRaWAN において教師なし学習のひとつである  $k$ -means を用いたクラスタリングの適用が検討され、距離規範の端末クラスタリングにより PDR 特性を改善できることが示されている. しかし、GW で決定した  $k$ -means によるクラスタリング結果を端末に通知する方法については検討されていない.

そこで本研究では、LoRaWAN における動作モードのひとつである Class B モードに着目する. Class B モードの端末は、一定周期で設定されるピングスロットと呼ばれる下りリンク (DL: DownLink) 受信窓において、マルチキャストパケットを受信することが可能である. 本研究では、GW に複数アンテナを具備し、ビームフォーミングを用いて端末にマルチキャストパケットを送信する. マルチキャストを用いることでクラスタ通知にかかるオーバーヘッドを最小限に抑える. 各端末は、受信したピングスロットの位置およびその受信信号電力に基づきクラスタ化される. 提案手法の有効性を確認するために、ランダムに端末をクラスタリングした場合、および端末が ALOHA プロトコルを使用する場合との比較を行う. 計算機シミュレーションの結果より PDR が最大で約 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 節では LoRaWAN の概要と動作モードについて説明し、第 3 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 4 節で提案手法である Class B モードおよびビームフォーミングを用いた

クラスタリングと端末のパケット送信時間制御について説明する. 第 5 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 6 節はまとめである.

## 2. LoRaWAN

LPWAN の一つである LoRaWAN は、米国の SEMTECH 社が策定した免許不要帯域を使用する無線通信規格である [8]. LoRaWAN の物理層では、周波数を時間的に変化させて信号を拡散するチャープスペクトラム拡散 (CSS: Chirp Spread Spectrum) 変調方式が採用されている. LoRa 変調では拡散率 (SF: Spreading Factor) と呼ばれるパラメータを無線環境に応じて変更することにより、データレートおよび雑音耐性が変化する. LoRAWAN はさまざまなアプリケーションに対応するため、下記に示す 3 つの動作モードが用意されている [9].

- Class A: 基本の動作モードであり、全ての LoRa 端末に実装されている. Class A の端末は GW への UL 送信の後に 2 回の短い DL 受信窓を開く. 端末は、直前の UL 送信で使用した周波数チャネルに対して 1 回目の DL 受信窓を開く. 1 回目の受信窓で DL 送信を受信できなかった場合に限り、予め GW と端末で共有されている DL 専用チャネルで 2 回目の DL 受信窓を開く. このタイミング以外での GW から端末への DL 送信は不可能である.

- Class B: Class A の動作に加えて、定期的に DL 受信窓を開く. 端末は定められた時間で DL 受信窓を開き、定期的に GW から時間同期ビーコンを受信する.

- Class C: DL 受信窓を常に開き、UL 送信を行うときのみに DL 受信窓を閉じる.

Class A の端末は UL 送信を行った直後にのみ受信窓を開くため、他の Class と比較して最も消費電力が少なく、電池駆動の端末に適した Class である. しかし、GW が DL パケットを端末に送信したい場合、その端末からの UL 送信を受け取るまで待機しなければならない. 他の Class と比較して最も DL 送信の遅延が大きくなる. Class B の端末は Class A の動作に追加して定期的に受信窓を開くため、Class A 端末と比較して消費電力は増加するものの GW からの DL 送信の遅延は少なくなる. Class C の端末は常に受信窓を開くため、GW からの DL パケット送信における遅延は最も少なくなる. ただし、消費電力が他の Class と比較して非常に大きくなり、電池駆動の端末に向かない. 本研究では、Class B の端末動作に着目した端末クラスタリング手法を提案する.

## 3. システムモデル

本研究では図 1 に示す様に、1 台の GW を中心とした半径  $R$  [m] の円形の通信エリア内に  $M$  台の LoRa 端末がランダムに配置された LoRaWAN システムを想定する. GW は  $x$  軸,  $y$  軸上に原点を対称として配置されている等間隔線形アレイアンテナ (ULA: Uniform Linear Array) を具備するものとする. 各 LoRa 端末は送信周期  $T$  [sec] 毎に、パケットを一つ生じし GW へ送信する. ただし、各 LoRa 端末はパケット送信前に CS を行う. CS により他 LoRa 端末のパケット送信を検知した

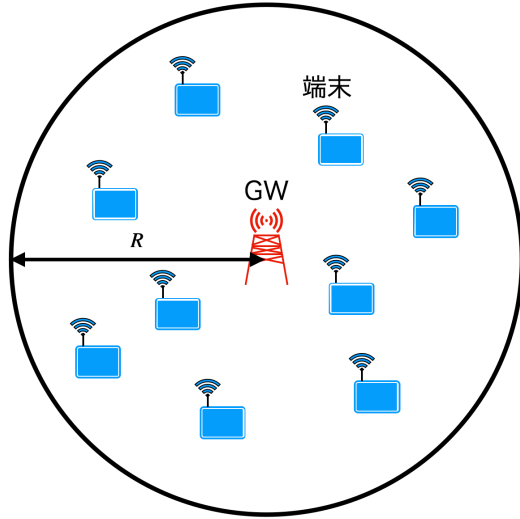


図1 システムモデル

場合、ランダムな時間待機（バックオフ）をしてからパケットを送信する。このバックオフは端末に割り当てられたサブフレーム内で行う。ここで、サブフレームとはフレーム長をパケット送信周期  $T[\text{sec}]$  として、 $T$  をクラスタ数  $C$  で等分割した時間スロットの一つを指す。この際、端末において送信パケットが次のサブフレームに被らないようにするため、自身のパケット送信時間長を考慮した上でバックオフを行う。LoRa 端末は、GW からの ACK 返信を必要としない Unconfirmed メッセージとしてパケットを GW に送信する。そのため、LoRa 端末は GW でのパケット衝突や信号対雑音比（SNR: Signal-to-Noise Ratio）閾値を下回ることによるパケットロスと認識することができない。従って、再送は行わないものとする。拡散率  $SF_{sm} \in \{7, 8, 9, 10\}$  は、GW における受信 SNR により決定するものとし、UL パケットが受信可能となる最も低い SF を選択する。また、各端末において、GW からの DL パケットは理想的に受信できるものとする。

### 3.1 伝搬路モデル

本研究ではパスロスおよび対数正規分布に従うシャドウイングを考慮した伝搬路モデルを使用する。通信エリア内に配置された LoRa 端末  $m$  と GW との距離が  $d_m [\text{km}]$  で与えられる時、LoRa 端末  $m$  におけるパスロス  $P_{\text{Loss}}(d_m) [\text{dB}]$  は次式で与えられる [10]。

$$P_{\text{Loss}}(d_m) = 10\alpha \log_{10}(d_m) + \beta + 10\eta \log_{10}(f_c) \quad (1)$$

ここで、 $f_c$  は搬送波周波数 [MHz]、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\eta$  はそれぞれ伝搬係数、伝搬損失オフセット、搬送波係数を表す。

LoRa 端末  $m$  が送信したパケットの GW での受信信号電力  $P_{r,m} [\text{dBm}]$  は次式で表される。

$$P_{r,m} = P_{t,m} - P_{\text{Loss}}(d_m) - \psi \quad (2)$$

ここで、 $P_{t,m} [\text{dBm}]$  は LoRa 端末  $m$  の送信電力、 $\psi [\text{dB}]$  は対数正規分布に従うシャドウイングを表す。

### 3.2 ビームフォーミング

$K$  素子半波長ダイポールアンテナの ULA を考える。なお、

本研究では、GW に具備されたアンテナと各 LoRa 端末のアンテナは同一平面内に存在することを仮定する。

ここで、 $k$  番目のアンテナからの LoRa 端末  $m$  までのチャンネルは次式で表される。[11]

$$h_{m,k} = \omega_k \exp\left(-\frac{j2\pi d_m f_c}{c}\right) \exp\left\{-j2\pi\left(m - \frac{M-1}{2}\right)\Delta_t \Omega_m\right\} \quad (3)$$

ここで、 $c [\text{m/s}]$  は光速、 $\omega_k$  は送信アンテナ  $k$  の重み、 $\Delta_t$  は波長で正規化されたアンテナ間隔、 $\Omega_m$  は GW から見た LoRa 端末の方角の余弦である。 $\Omega_{t,d}$  を送信ビームフォーミングの最大放射角  $\phi_{t,d}$  の余弦とすると、 $\omega_k$  は次式で表される。

$$\omega_k = \exp\left\{j2\pi\left(m - \frac{M-1}{2}\right)\Delta_t \Omega_{t,d}\right\} \quad (4)$$

GW における総送信電力を  $P_{t,GW} [\text{W}]$  とすると、端末における受信電力  $P_{r,m}$  はチャンネルの双対性を利用して式 (2) より次式で表される。

$$P_{r,m} = \frac{1}{M} \left| \sum_{m=0}^{M-1} \text{Re}\{\omega_k h_{m,k}\} \right|^2 P_{t,GW} - P_{\text{Loss}}(d_m) - \psi \quad (5)$$

### 3.3 端末におけるキャリアセンス

各 LoRa 端末は UL パケットを送信する前に、使用予定の周波数チャンネルに対して CS を行う。CS により周波数チャンネルの状態を確認し観測された電力が CS 閾値以上であった場合、GW および他 LoRa 端末が周波数チャンネルを使用中と判定する。日本において、LoRaWAN が使用する 920 [MHz] 帯で電波を発射する場合、CS を行うことが義務付けられている。そのため、本研究ではパケット送信直前に CS を  $T_{CS} [\text{ms}]$  間行う。また全 LoRa 端末は共通の CS 閾値  $\gamma_{CS} [\text{dBm}]$  を持つと仮定する。よって、LoRa 端末  $m$  において CS 期間中に観測した電力  $P_{CS,m}$  が  $P_{CS,m} < \gamma_{CS}$  を満たす場合、周波数チャンネルが空いていると判断し UL パケット送信を開始する。一方、 $P_{CS,m} \geq \gamma_{CS}$  となる場合、バックオフ処理を行う。

### 3.4 GW におけるパケット受信成功判定

GW でのパケット受信成功判定は、受信 SNR および受信信号対干渉比（SIR: Signal-to-Interference Ratio）に基づいて行う。GW において 1 台の端末からのみ UL パケットを受信した場合、その UL パケットの受信 SNR が表 1 に示す閾値を超えている場合受信成功とする [12]。また、GW において複数のパケットが同時に受信された場合、キャプチャ効果を考慮し、最初に到着したパケットに対し受信 SNR と SIR が閾値を超えている場合のみ受信成功とする [13]。

## 4. 提案手法

広大な通信エリアに多数の LoRa 端末が配置されていることによる隠れ端末が存在する問題に対して、LoRaWAN の Class B モードを利用した LoRa 端末のクラスタリングを行う。LoRa 端末のクラスタリングを行う際、ピングスロットを活用し、GW でのビームフォーミングにより得られる受信信号電力を考慮

表 1 SNR および SIR 閾値

SF	SNR 閾値 $\Gamma_{\text{SNR},s_m}$ [dB]	SIR 閾値 $\Gamma_{\text{SIR},s_m}$ [dB]
7	-7.5	-11
8	-10.0	-13
9	-12.5	-16
10	-15.0	-19

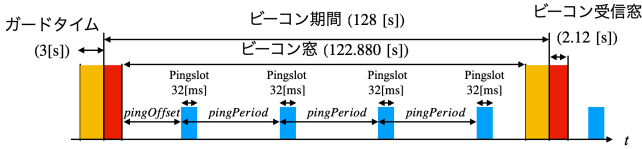


図 2 Class B ビーコン期間概略図

する。さらに、各クラスに属する LoRa 端末に対して UL パケットの送信時間制御を行うことによって隠れ端末問題を低減する。

#### 4.1 LoRaWAN Class B

ここでは、本提案手法のベースとなる LoRaWAN の Class B モードについて紹介する。各 LoRa 端末は、Class B モードの機能が実装されている場合、自動的に Class A と Class B とを切り替えることができる。システム内に Class B の LoRa 端末が存在するとき、GW は 128 [s] に 1 回、時間同期のためのビーコンをブロードキャストする。GW がビーコンを送信してから次のビーコン送信開始までをビーコン期間と呼ぶ。1 ビーコン期間における LoRa 端末動作の概要を図 2 に示す。ビーコン窓の期間は 4096 個のスロットに分割され、先頭から順に 0 から 4095 までのインデックスが振られる。LoRa 端末はビーコンスロット内で時間が長が 32 [ms] のピングスロットを  $PingPeriod$  [s] 毎に  $PingNb$  回開く。このとき  $PingNb$  は 2 の冪乗である必要がある。 $pingOffset$  は、LoRa 端末がビーコン期間で 1 回目に開く受信窓のスロット番号であり、0 から  $PingPeriod - 1$  の間で端末 ID を元に擬似ランダムに選択される。Class B 端末に対して、GW は 1 回の DL 送信で、以下に示す 2 つの方法のどちらかを使用することができる [9]。

- ユニキャスト：単一の LoRa 端末を対象として送信
- マルチキャスト：マルチキャストグループ ID が同一の LoRa 端末群を対象として送信

なお本研究では、GW は Class B モードの LoRa 端末に対し、マルチキャストのみを使用する。LoRaWAN の仕様で Class B モードをサポートする LoRa 端末は全端末共通のマルチキャストグループ ID を持つと規定されているため、追加での鍵や ID の共有は必要ない。

本提案において、全 LoRa 端末は共通のマルチキャスト ID を用いて、Class B モードで動作を開始する。全 LoRa 端末が共通のマルチキャスト ID を用いて通信を行うことにより、 $pingOffset$  の値が共通となり、同時刻に全ての端末が受信窓を開く。ピングスロットにてクラスタリングのための DL 送信をすることによって、Class A や Class B のユニキャストを用い

る場合と比較して大幅にオーバーヘッドを削減可能となる。また、Class A や Class B のユニキャストを用いて DL 送信を行う場合、他端末からの UL によるパケット衝突が発生する可能性が存在する。本手法では DL 信号を送信される時間において、全 LoRa 端末が Class B モードで動作し受信窓を開いているため、同一時刻に UL 送信を行っている LoRa 端末は存在せず、UL パケットと DL パケットの衝突は起こらない。

#### 4.2 ビームフォーミングを用いたクラスタリング

LoRaWAN Class B モードのピングスロットにてマルチキャストの DL 信号をビームフォーミングを用いて送信する。クラスタリングのために、GW に具備された  $x$  軸上の ULA と  $y$  軸上の ULA を用いて  $\pm\phi_{t,d}$  方向にビームフォーミングを行う。また、電力  $P_t$  と SF を  $N$  回変更してビームフォーミングの信号を受信できる LoRa 端末の範囲を変更する。GW は 1 ビーコン期間内では電力、SF を固定してアンテナパターンのみ変更する。LoRa 端末は DL 信号の受信に成功したビーコン期間の数に応じて所属クラスタを絞り込み、ビーコン期間内の各ピングスロットにおける受信電力の強度によりクラスタを決定する。ここで、GW に最も近いクラスタ群は同一クラスタとする。また、GW から距離が離れているクラスタでは端末の配置の広がりが大きくなり、隠れ端末問題が顕著に現れてしまう。そのため、追加で  $\pm\phi'_{t,d}$  方向にビームフォーミングを行い、端末は DL 信号の受信成功可否によってクラスタを分割する。

#### 4.3 端末の UL パケット送信時間制御

クラスタリングに失敗した端末は、周期  $T$  のフレーム内で 1 度パケットを生起し送信する。クラスタリングに成功した LoRa 端末は周期  $T$  をクラスタリング数で等分したサブフレームのうち自身が割り当てられているサブフレーム内で 1 度パケットを生起し送信する。CS によって、GW や他の LoRa 端末の送信が検知されたときは前述のとおりランダムバックオフを行った後、送信を試みる。この時、距離規範によってクラスタリングされていることにより、各サブフレーム内では距離の近い LoRa 端末が送信している確率が高いため、隠れ端末問題が低減される。

### 5. 計算機シミュレーション

#### 5.1 シミュレーション諸元および評価指標

伝搬路は都市部における見通し外 (NLoS: Non-Line-of-Sight) 環境を想定したモデルを使用する [10]。また、全てのパケットは受信機からの ACK の返信を要求しない Unconfirmed メッセージとし、各 LoRa 端末の使用する SF は SNR 規範により理想的に割り当てられているものとする。その他のシミュレーション諸元は表 2 に示す通りである。

本研究では、提案するクラスタリングと送信制御手法を評価するためにパケット配信率 (PDR: Packet Delivery Rate) を用いる。PDR は LoRa 端末が生起した総パケット数に対し GW で受信に成功したパケット数により算出する。受信に成功したパケットとは、総生起パケットからバックオフする際にフレーム長が不足し破棄したパケットと GW において衝突したパケット及び GW にて SNR と SIR の閾値を下回ったパケッ

表 2 シミュレーション諸元

端末台数 $M$	{100,200,...,1000}
拡散率 $s_m$	{7,8,9,10}
帯域幅 $BW$	125 [kHz]
送信電力 $P_t$	13 [dBm]
CS 閾値 $\gamma_{CS}$	-110 [dBm]
CS 時間 $T_{CS}$	5 [ms]
伝搬係数 $\alpha$	4.0
伝搬損失オフセット $\beta$	9.5
搬送波係数 $\eta$	4.5
シャドウイング標準偏差	3.48 [dB]
雑音電力スペクトル密度 $\sigma^2$	-174 [dBm/Hz]
雑音指数 $NF$	10 [dB]
ペイロードサイズ	160 [bit]
1 ビーコン期間に LoRa 端末が開く受信窓数	4
クラスタ数 $C$	13
パケット送信周期 $T$	10 [min]
中心搬送波周波数 $f_c$	923.2 [MHz]
エリア半径 $R$	800 [m]
波長で正規化された送信アンテナ間隔 $\Delta_t$	1/2
アンテナ素子数 $K$	6

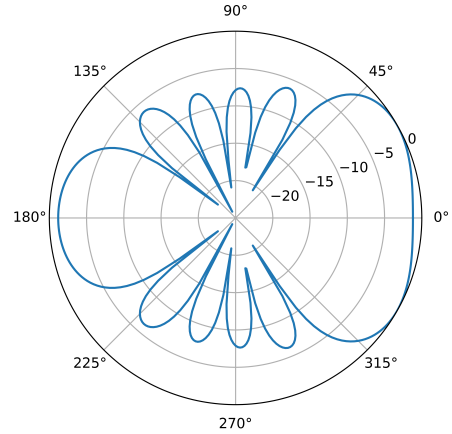


図 3 アンテナパターン ( $\phi_{t,d} = 6/\pi$ )

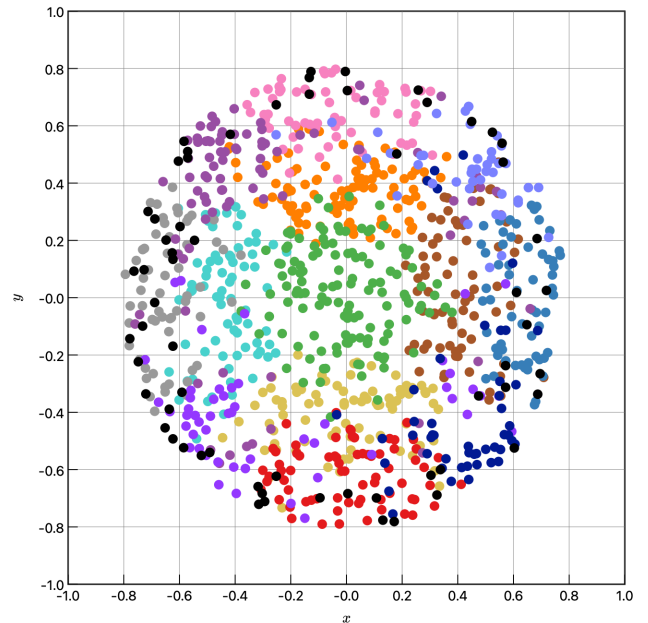


図 4 ビームフォーミングによるクラスタリング ( $M = 1000$ )

トを引いたものである。提案手法の有効性を確認するために以下の手法と比較検討を行う。

ALOHA プロトコル： 端末はパケットを生起後、即パケット送信を開始し CS は行わない。

ランダムクラスタリング： 端末は提案手法と同数のクラスタにランダムに割り当てられているものとし、送信時間制御、CS、バックオフを行うものとする。

## 5.2 ビームフォーミング変数決定とクラスタリング

$y$  軸上に  $x$  軸対称となるように配置した GW の送信アンテナを使用し  $\phi_{t,d} = 6/\pi$  として、 $h_k$  をプロットしたものが図 3 である。 $\phi_{t,d} = 6/\pi$  と設定することにより、およそ  $-\pi/4$  から  $\pi/4$  の範囲において利得が高くなる。これと  $x$  軸上に  $y$  軸対称となるように配置したアンテナからを使用して、SF と電力を  $(s_m, P_{t,m}) = \{(10, 13), (8, 9), (7, 1)\}$  と変化させて 3 回ずつビームフォーミングを行う。SF と電力は各クラスタに属する端末台数に大きな偏りが生じないように、エリアの面積を元に決定する。所属クラスタの決定では、GW からの DL 信号を受け取った回数と時刻を元に判定を行う。GW から離れているクラスタをさらに分割するために、 $\phi_{t,d} = 4/\pi$  かつ  $(s_m, P_{t,m}) = \{(10, 13)\}$  として送信する。クラスタリングの結果を図 4 に示す。図 4 より一番外側に 8 個、一つ内側に 4 個、中心に 1 個のクラスタが形成されていることが分かる。クラスタに所属しない端末を黒丸で表しており、全体の端末台数の 6% ほど存在するが、これはシャドウイングの影響であると考えられる。また、異なるクラスタに所属する端末が入り組んでいる理由は、図 3 からメインローブとバックローブの利得差が小さ

くシャドウイングの影響を受けるためだと考えられる。

## 5.3 端末台数に対する PDR 特性

端末台数に対する PDR を図 5 に示す。提案手法は ALOHA とランダムにクラスタリングを行う手法と比較してそれぞれ、最大約 9%、7% PDR を改善している。これは、提案手法により各サブフレーム内で送信している LoRa 端末が近傍に存在する可能性が高くなり、CS で他端末の送信信号を検知できる可能性が高くなったからである。ランダムにクラスタリングしているものと比較して隠れ端末問題は軽減されたと言える。

## 5.4 各 LoRa 端末の PDR に対する CDF 特性

端末台数  $M = 1000$  台における各 LoRa 端末の PDR の CDF 特性を図 6 に示す。提案手法が ALOHA とランダムにクラスタリングを行う手法と比較して全ての PDR に対して特性が改善されていることがわかる。これは、提案手法により分割されたクラスタ間の PDR に大きな不公平が発生していないことを

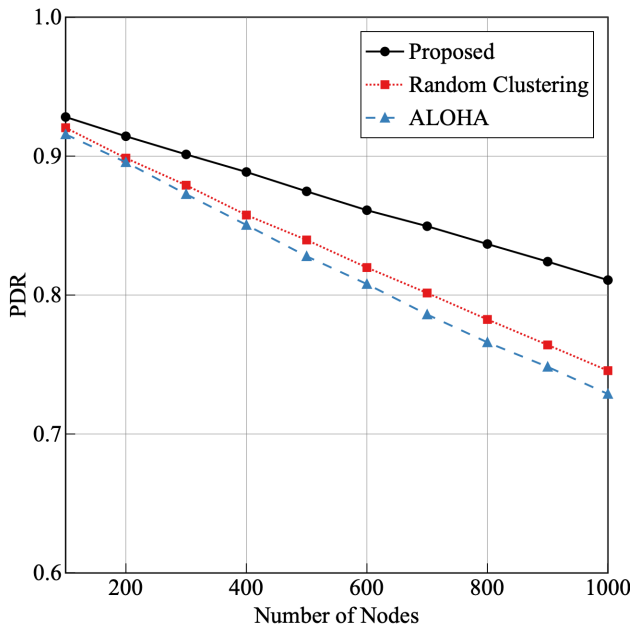


図5 端末台数対 PDR

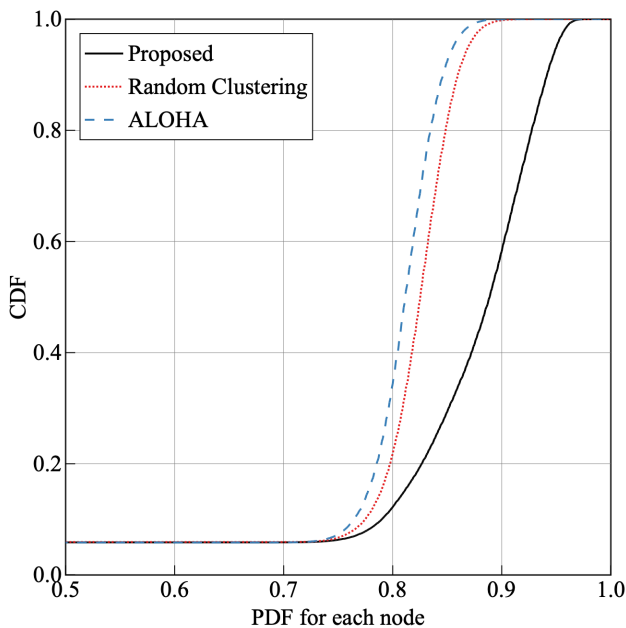


図6 各 LoRa 端末の PDR に対する CDF ( $M = 1000$ )

示している。また、PDR が 0 となる端末が存在していることが図より分かるが、これは提案手法により生じたものではなく、シャドウイングによりパケットの送受信ができない端末が通信エリア内に存在していることによるものである。

## 6. まとめと今後の課題

本研究では LoRaWAN における Class B モードのピンクスロットに着目したクラスタリングと送信時間制御を提案した。本提案手法ではクラスタリングの際にビームフォーミングを用いて DL 送信を行い、各クラスタに所属する端末に対し送信時間を制御する。計算機シミュレーションにより、提案手法

は ALOHA およびランダムにクラスタリングされたモデルと比較して、PDR 特性がそれぞれ 9%, 7% 改善することを示した。計算機シミュレーション結果から、提案手法により隠れ端末問題が低減可能なことを示した。今後の課題として、ビームフォーミングの回数を減らすことによるオーバーヘッドの削減や、端末におけるクラスタ決定アルゴリズムの改良などが挙げられる。

## 文 献

- [1] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of things for smart cities," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014.
- [2] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.
- [3] O. Georgiou and U. Raza, "Low power wide area network analysis: Can lora scale?" *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 162–165, 2017.
- [4] Q. M. Qadir, T. A. Rashid, N. K. Al-Salihi, B. Ismael, A. A. Kist, and Z. Zhang, "Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77 454–77 473, 2018.
- [5] B. Reynders, Q. Wang, P. Tuset-Peiro, X. Vilajosana, and S. Pollin, "Improving reliability and scalability of lorawans through lightweight scheduling," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 1830–1842, 2018.
- [6] G. Lee and J. Youn, "Group-based transmission scheduling scheme for building lora-based massive iot," in *2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC)*, 2020, pp. 583–586.
- [7] M. Alenezi, K. K. Chai, S. Jimaa, and Y. Chen, "Use of unsupervised learning clustering algorithm to reduce collisions and delay within lora system for dense applications," in *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2019, pp. 1–5.
- [8] A. Lavric and V. Popa, "Internet of things and lora™ low-power wide-area networks: A survey," in *Proc. 2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, 2017, pp. 1–5.
- [9] LoRaAlliance, "Lorawan 1.0.4 specification package." [Online]. Available: [https://lorawan-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-104-specification-package/](https://lorawan-alliance.org/resource_hub/lorawan-104-specification-package/) (Accessed May., 2023)
- [10] 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.1411-11-202109-I/en>, 2023.
- [11] D. Tse and P. Viswanath, "Fundamentals of wireless communication, cambridge university press," 2005.
- [12] "Semtech sx1272-long range low power rf transceiver 860–1000 mhz with lora technology, may. 2023, [online] available:."
- [13] D. Croce, M. Gucciardo, S. Mangione, G. Santaromita, and I. Tinnirello, "Impact of lora imperfect orthogonality: Analysis of link-level performance," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 796–799, 2018.