

受信信号から推定可能な端末相互関係に基づくクラスタリングの検討

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

[†] 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: [†]{t.saraya, kaburaki, adachi, fujii}@awcc.uec.ac.jp, ^{††} takyu@shinshu-u.ac.jp, ^{†††} maiohta@fukuoka-u.ac.jp

あらまし 近年, IoT の発展に伴い低消費電力かつ長距離通信を可能とする LoRaWAN に代表される LPWAN に注目が集まっている. 日本において, 免許不要帯域を用いる LoRaWAN では, 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が, 通信エリアが広大な場合には, CS で他端末のパケット送信を検知できない隠れ端末問題が顕著となる. 筆者らは以前, パケット送信の周波数チャンネルと時間スロットにインデックスを付加し, スループットを向上させるパケット型インデックス変調 (PLIM) を提案した. 本稿では LoRaWAN システムにおいて, PLIM の動作原理を活用して, 追加情報なく端末間の相互関係を情報集約局 (GW) が集約する手法を提案し, その情報をもとにしたクラスタリング及びリソース割り当てを検討する. 計算機シミュレーションにより, 提案手法が従来手法と比較してパケット配信率 (PDR) を最大 13% 改善できることを示す.

キーワード WSN, LPWA, LoRaWAN, 無線環境情報, 隠れ端末問題, クラスタリング

Received Signal Aided Implicit Node Clustering in LPWAN

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

[†] 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, Nagano, 380-8553 Japan

^{†††} Department of Electronics and Computer Science, Fukuoka University
8-19-1 Nanakuma, Jonan, Fukuoka, 814-0180 Japan

E-mail: [†]{t.saraya, kaburaki, adachi, fujii}@awcc.uec.ac.jp, ^{††} takyu@shinshu-u.ac.jp, ^{†††} maiohta@fukuoka-u.ac.jp

Abstract LPWANs, including LoRaWAN, that enable low-power consumption and long-distance communication have been attracting attention along with the development of the IoT. In Japan, it is mandated to perform carrier sensing (CS) before packet transmission. However, the hidden terminal problem becomes more serious as the communication area becomes larger. We previously proposed packet-level index modulation (PLIM), which adds indexes to the frequency channel and time slot of packet transmission to increase throughput. This paper proposes a method to aggregate the relationships among nodes without requiring explicit signaling and then develops a clustering and resource allocation method that utilizes the obtained information. Computer simulation results show that the proposed method improves PDR by up to 13% compared to the conventional method.

Key words WSN, LPWA, LoRaWAN, Radio Environmental, Hidden Terminal Problem, Clustering

1. はじめに

Society 5.0 で実現する社会ではモノのインターネット (IoT: Internet of Things) が重要な構成要素となっている。この社会では、様々なモノや人はネットワークでつながり、知識や情報が共有されるようになる。IoT 技術の発展により回路の小型化や低消費電力化が可能となったことで、無線通信機能を具備した多数のセンサによって構築される無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) が急速に普及している [1]。WSN が適用される多くのアプリケーションでは、広範囲に多数のセンサ (以降、端末とする) が固定配置され、長期間にわたり低データレートで通信を行う運用形態が想定される。一般に、WSN で用いられる端末は、設置の自由度やイニシャルコストの面から小型かつ安価であることが求められる。また、バッテリー駆動の端末の場合、端末のバッテリー交換にかかるランニングコスト削減の観点から、端末は低消費電力で動作することが望ましい。このような背景から、低消費電力かつ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) に大きな注目が集まっている [2] [3]。

一般的に、LPWAN では端末やゲートウェイ (GW: Gateway) は固定配置されており、各端末が定期的に観測したデータ等の少量の情報を GW に送信する。その際に、免許不要帯域を用いる LPWAN では、他のシステムとの周波数共用の観点から GW 及び端末に対して、DC (Duty-Cycle) 制約と呼ばれる単位時間あたりの送信時間制限が設けられている。また同様の観点から、パケット送信直前に使用予定周波数チャネルの使用状況を一定時間確認するキャリアセンス (CS: Carrier Sense) を行うことが義務付けられている。CS により使用予定の周波数チャネルが使用中と判断した場合、端末はパケット送信をキャンセルもしくはバックオフする必要がある。しかしながら、通信エリアが広大な場合、他端末のパケット送信を CS にて検知できない隠れ端末問題が顕著となるため、隠れ端末問題により発生するパケット衝突は、LPWAN における通信品質向上において大きな問題となっている [4]。

LPWAN 規格の一つである LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) は免許不要帯域を用いることや導入コストの低さから、注目が集まっており広く普及している [3] [5]。LoRaWAN の MAC (Medium Access Control) 層には 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。この方式は消費電力を抑えることができる一方で、他端末との協調動作を行わないためパケット衝突が発生する可能性が高い。パケット衝突回避方法としては、先述した CS に加えて、時分割多元接続 (TDMA: Time Division Multiple Access) を用いて各端末に排他的にリソース割り当てを行う手法がある [6]。しかしながら、多くの LPWAN で用いられる安価な端末と GW との間では、時刻同期ズレが発生してしまう [7]。従って、TDMA ベースのリソース割り当ての実現のためには定期的に時刻同期を行うことも考えられるが、LoRaWAN が低データレートであることや DC 制約により、オーバーヘッドの増加がスループット低下など通信に与える影響が大きく現実的ではない。

これらの問題を解決する手法として、パケットレベルインデックス変調 (PLIM: Packet-Level-Index Modulation) が文献 [8] で提案されている。この手法では送信パケットの周波数チャネルと送信タイミングにインデックスを付加することにより、DC 制約を考慮しつつスループット向上を実現してい

る。さらに、文献 [9] ではチャンネルアクティビティ検出 (CAD: Channel Activity Detection) に基づく PLIM が提案されている。この手法では、PLIM を拡張しサブフレームを導入することによって、CS にて他端末のパケット送信を検知した際にバックオフしてパケットを送信することを可能としている。しかしながら、この手法では隠れ端末問題に対する直接的なアプローチは取られていないため、CS で互いのパケット送信を検知できない端末同士での衝突が発生してしまう問題がある。この問題を解決する単純な方法は、互いのパケット送信が衝突することが多い端末に直交周波数チャネルを割り当てることである。しかし、広域ネットワークかつ端末の機能も限られているため、各端末に対する周波数チャネル割り当ての決定は非常に困難である。また、各端末がキャリアセンスで他端末のパケット送信を検知したかなどの、周囲の無線環境情報を GW に通知することも、同様の理由から困難である。そのため、オーバーヘッドを必要としない無線環境情報の収集が求められている。文献 [10] では、GW が端末からの受信パケットから得られる情報のみに基づき通信のオーバーヘッド無しで無線環境情報を推定し、推定した情報をもとに無線リソースを割り当てることによりパケット配信率 (PDR: Packet Delivery Rate) を向上する手法が提案されている。

本稿では PLIM をベースとした LoRaWAN システムにおけるオーバーヘッドを必要としない無線環境情報認識手法を提案する。この手法では、端末が CS により他端末のパケット送信を検知してバックオフしたこと及び、CS によってどの端末のパケット送信を検知したかを GW にて推定することで無線環境情報認識を行う。また、収集した無線環境情報を活用したりリソース割り当ても提案し、計算機シミュレーションにより提案手法がランダム割り当て方式と比較して、PDR を 13% 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 節では想定する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無線環境認識とその活用方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

本研究では図 1 に示す通り、1 台の GW を中心とした半径 R [m] の円形通信エリアを持つ LoRaWAN システムを想定する。通信エリア内にランダムに配置された M 台の端末は T_f [sec] 毎にパケットを 1 つ生起し、GW に送信する。端末と GW は後述するクロックドリフトの影響を受けるが、GW と各端末間はクロックドリフトを推定し補正され時刻同期が取られているものとする [11]。各端末は GW からの肯定応答 (ACK: Acknowledgement) を要求しない Unconfirmed パケットを送信する。また、各端末および GW は、 K 個の直交する周波数チャネルを使用可能とし、使用する拡散率 (SF: Spreading Factor) は GW における受信信号対雑音比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio) をもとにして事前に決定されているものとする。

2.1 伝搬路モデル

本研究では、パスロスおよびシャドウイングを考慮した伝搬路モデルを使用する。端末 m と GW との距離が d_m [m] で与えられる時、端末 m におけるパスロス $P_{\text{Loss}}(d_m)$ [dB] は次式で与えられる [12]。

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

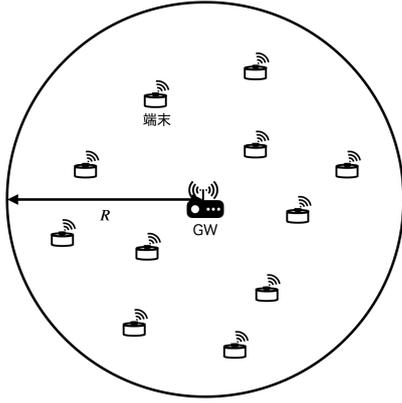


図1 システムモデル

ここで、 f_c は搬送波周波数 [MHz], α, β, η 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 [dBm] は次式で表される.

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

ここで、 P_t [dBm] は送信電力, ψ [dB] は空間相関を有し対数正規分布に従うシャドウイングを表す.

2.2 クロックドリフト

本稿ではクロックドリフトによる影響を考慮する. 一般に LPWAN で用いられる端末は安価であるため, GPS などを用いた定期的な時刻同期がない場合, 発振器の製造公差などの影響で端末間で時刻ズレが発生する. 端末によって時刻ズレの平均, 分散が異なるため時間経過とともに蓄積されていく. 本稿では GW に対する端末の相対的な時刻ズレをクロックドリフトと定義する. 端末 m において, GW と同期を行った時刻 t_m^{sync} から i 番目のパケット送信時刻 t_m^i までに発生するクロックドリフト T^d は次の式で与えられるものとする [11].

$$T^d [\text{sec}] = \int_{t_m^{\text{sync}}}^{t_m^i} \Delta T_m^d(t) dt \quad (3)$$

ここで、 ΔT_m^d は単位時間で正規化した端末 m における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 [11]. ここで、 $\mathcal{N}(\mu_m, \sigma_m^2)$ は平均 μ_m , 分散 σ_m^2 となる正規分布を表す.

2.3 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, キャプチャ効果を考慮し受信 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 台の端末からのみパケットを受信した場合, そのパケットの受信 SNR が閾値を超えている場合受信成功とする [13]. 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, 最初に到着したパケットに対してのみ受信 SNR と SIR により受信成功判定を行い, 遅れて受信したパケットは全て復調できないものとする [14].

2.4 チャンネルアクティビティ検出に基づいた PLIM [9]

文献 [8] では, LoRaWAN システムのスループット向上を目的として, インデックス変調の一種である PLIM が提案されている. PLIM はパケットを送信する周波数チャネルおよび送信タイミングをインデックスとして扱うことで, DC 制約を考慮した上で LoRaWAN の規格を変更することなくスループットを向上させることが可能となる. しかし, PLIM では送信タ

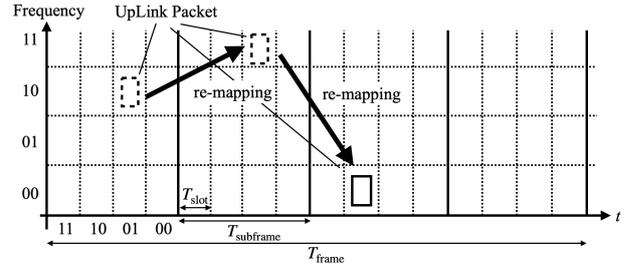


図2 CAD に基づく PLIM の動作概要図 ($K = 4, Q = 4$)

イミングにも情報を持たせているため, CS により他端末の送信を検知した場合にはバックオフによる送信延期を行うことができず, パケットを破棄する必要がある. そこで, そのようなパケット破棄を回避する方法として, PLIM にサブフレームを導入し CAD に基づきリマッピングする手法が提案されている [9].

CAD に基づく PLIM の概念図を図 2 に示す. ここでは, 一般性を失うことなく M 台の端末の中の特定の端末に着目し, GW へ K 個の周波数チャネルを用いて通信することを考える. 各端末はそれぞれ固有のデバイスアドレス \mathbf{B}_{addr} を所持している. また, 送信される各パケットは固有の値であるパケットカウンタ \mathbf{B}_{pcnt} を所持するものとする. また, 端末のパケット生起間隔 T_f [sec] をフレーム長と定義し, 1 フレームを S 個のサブフレームに等分割する. これにより, サブフレームの時間長は $T_{\text{subf}} = T_f/S$ [sec] となる. さらに, T_{subf} を Q 個の時間スロットに等分割しその時間長を $T_s = T_{\text{subf}}/Q$ [sec] と定義する.

端末は送信情報ビット系列 $\mathbf{B} = (b_0, b_1, \dots, b_i, \dots, b_{B-1})^T$ を生成する. ここで, b_i は i 番目の情報ビットであり, B は情報ビット系列長, $(\cdot)^T$ は転置を表す. 次に, \mathbf{B} を PLIM ビット系列 \mathbf{B}_{plim} とペイロードビット系列 \mathbf{B}_{pl} に分割する. \mathbf{B}_{pl} は LoRaWAN 規格に則りペイロードで送信する. 端末は, \mathbf{B}_{plim} , 自身のデバイスアドレス \mathbf{B}_{addr} とパケットカウンタ \mathbf{B}_{pcnt} を引数とするインデックスマッパー $\mathcal{F}(\mathbf{B}_{\text{plim}}, \mathbf{B}_{\text{addr}}, \mathbf{B}_{\text{pcnt}})$ によって一意に決定される周波数 $k \in K = \{0, 1, \dots, K-1\}$ 及び時間スロット $q \in Q = \{0, 1, \dots, Q-1\}$ でパケットを送信する.

インデックスマッパー \mathcal{F} の動作について説明する [9]. まず, PLIM ビット系列 \mathbf{B}_{plim} , デバイスアドレス \mathbf{B}_{addr} , パケットカウンタ \mathbf{B}_{pcnt} の 10 進数表現をそれぞれ $D_{\text{plim}}, D_{\text{addr}}, D_{\text{pcnt}}$ とした場合, 送信符号 X を次式のように計算する.

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

ここで, $N_{\text{res}} = K \times Q$ は使用可能なリソース数, $s \in \{0, 1, \dots, S-1\}$ は送信サブフレームインデックスを表す. 端末は $s = 0$ から送信開始し, CS により他端末のパケット送信を検知した場合バックオフし, 次のサブフレームへリマッピングを行う. $s = S-1$ においても CS により他端末のパケット送信を検知した場合, パケットを破棄する. $\text{mod}(m, n)$ は m を n で除算した時の余りを表し, 次の式で計算される.

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

ここで $\lfloor \cdot \rfloor$ は床関数を表し, 小数点以下を切り捨てて整数に変換する. また, $f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcnt}}, s)$ は $D_{\text{addr}}, D_{\text{pcnt}}$ と s によって出力値が一意に定まる任意の関数である. 最後に, 端末は送信インデックス (k, q) (使用周波数チャネルと送信タイムスロット

トの組)を以下のように計算する.

$$(k, q) = (\lfloor X/Q \rfloor, \text{mod}(X, Q)) \quad (6)$$

GW と各端末間で発生しているクロックドリフトの推定および補正により, GW はある時刻 t^i に受信したパケットのサブフレームおよびタイムスロット \tilde{q} を次の式で推定することができる.

$$\begin{cases} \tilde{s} = \lfloor (t^i - T_f + T^d) / (T_{\text{subf}}) \rfloor \\ \tilde{q} = \lfloor (t^i - T_f + T^d - T_{\text{subf}} \times \tilde{s}) / Q \rfloor \end{cases} \quad (7)$$

GW は周波数 \tilde{k} とタイムスロット \tilde{q} でパケットを受信した時, まずパケットを復調して \mathbf{B}_{addr} と \mathbf{B}_{pcnt} を取り出す. 次にこれらを 10 進数に変換し D_{addr} と D_{pcnt} を得る. 次に式 (8) で送信符号の推定値 \tilde{X} を求める.

$$\tilde{X} = \tilde{k}Q + \tilde{q} \quad (8)$$

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

$$\tilde{D}_{\text{plim}} = \text{mod}(\tilde{X} - f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcnt}}, \tilde{s}), N_{\text{res}}) \quad (9)$$

最後に, 得られた \tilde{D}_{plim} を 2 進数に変換し $\tilde{\mathbf{B}}_{\text{plim}}$ を得る.

CAD に基づいた PLIM を用いることにより, CS によって他端末のパケット送信を検知した際に次のサブフレームにバックオフ可能なため, サブフレーム数 S だけ同じパケット送信を試行することが可能となる. なお, 文献 [9] においては CAD を用いているが, 代わりに CS を用いることも可能である.

3. 提案手法

3.1 概要

本研究では, PLIM の動作原理を活用して, 追加情報なく端末間の相互関係を GW に集約する手法を提案する. ここで, 提案手法によって集約する端末間の相互関係 (以後, 無線環境情報とする) とは, 特定の端末同士が CS によって互いの UL 送信を検知可能であるという関係のことを指す.

LoRaWAN は非常に低データレートな通信方式であることに加えて, DC による単位時間あたりの送信時間に制約が定められている. そのため, 端末から追加の上りリンク (UL: Up-Link) パケットを用いて無線環境情報を GW に集約することは現実的ではない. そこで, 提案手法では PLIM をベースとしたシステムを想定し, GW において UL パケットの周波数チャネルと受信タイミングにインデックスが付加されていることを利用して, GW で無線環境情報を推定する. また, 推定した無線環境情報をもとにクラスタリングを実行し, 各クラスタへのリソース割り当てまで行う.

3.2 無線環境情報集約

提案手法の動作概要を図 3 に表す. ここでは, 一般性を失うことなく CS にて互いの UL 送信を検知可能な関係にある端末 A と端末 B 及び GW を考える. 図 3 のように端末 B が端末 A の送信を検知して, UL パケットを次のサブフレームにバックオフしたとする. この時, 端末 B は次のサブフレームへのリマッピングを式 (4), (6) に基づいて行う. このリマッピングルールは事前に GW と各端末間で共有されているため, パケットを受信した GW は, デマッピングすることが可能となる. これにより GW は, 端末 B が CS によって端末 A の送信を検知したサブフレーム s' における端末 B の送信インデックス (k', q')

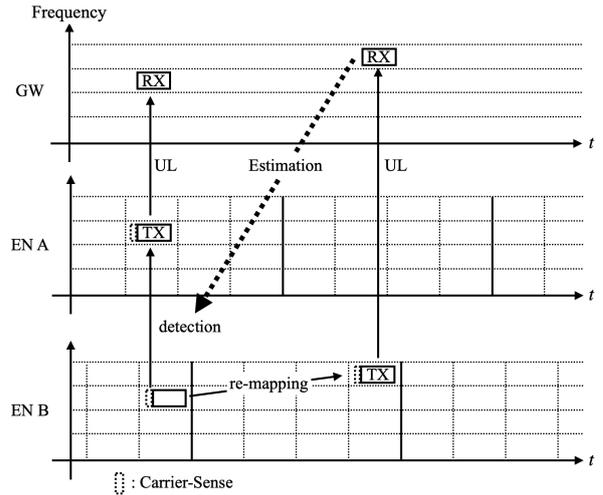


図 3 無線環境情報集約の動作概要図

を次式から推定する.

$$\begin{aligned} (k', q') &= (\lfloor X'/Q \rfloor, \text{mod}(X', Q)) \\ &= (\lfloor (\text{mod}(\tilde{D}_{\text{plim}} + f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcnt}}, s'), N_{\text{res}})) / Q \rfloor, \\ &\quad \text{mod}(\text{mod}(\tilde{D}_{\text{plim}} + f(D_{\text{addr}}, D_{\text{pcnt}}, s'), N_{\text{res}}), Q)) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで, GW において \tilde{D}_{plim} は推定された $\tilde{s}, \tilde{k}, \tilde{q}$ より式 (9) を用いて計算され, D_{addr} および D_{pcnt} は端末 B のパケットを復調することにより得られる. 式 (10) の送信インデックス推定により端末 B が CS により他端末の送信を検知した時刻を GW が推定することが可能となる. また, 推定した時刻において GW は端末 A と通信していることから, 端末 A と端末 B は CS にて互いの UL 送信を検知可能な関係にあると推定することができる. これにより, GW においてオーバーヘッドなしで端末 B が端末 A を CS 可能であると推定することができる.

3.3 無線環境情報の活用

推定した無線環境情報の活用方法の一つとしてクラスタリングを考える. クラスタリング手法としてスペクトラルクラスタリングを用い, 端末間の距離規範に近いクラスタを形成することを目標とする. これにより, 同一クラスタに所属する端末は距離的に近傍に存在するため, CS により互いを検知可能になる可能性が高い. そこで, 異なるクラスタに対して直交するリソースを割り振ることによって, 隠れ端末問題による影響を低減できると考えられる.

3.3.1 スペクトラルクラスタリング [15]

スペクトラルクラスタリングは教師なし学習に分類されるクラスタリングアルゴリズムの一つであり, データ点とその間の類似度を元にクラスタリングを行う. ここで, 辺の重みをデータ点間の類似度とした正の重み付き無向グラフ $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ を考える. この時, \mathcal{V} はデータ点 v_i の集合を表し, \mathcal{E} は全データ点 v_i と v_j 間の重み $w_{ij} \geq 0$ の集合を表す. 本稿では, データ点は各端末とし, データ点間の類似度に 3.1 節で推定した情報を用いる. 具体的にはデータ点間の重みを, GW における対応する端末間の無線環境情報推定回数とする (GW において一度も推定されなかった端末対に対応するデータ点間の重みは 0 とする). ここで, 無線環境情報推定回数とは 3.2 節における一連の流れを経て, GW にて端末間の無線環境情報を推定できた時

に1回とカウントしたものである。これにより、GWにより推定した無線環境情報を元にしたグラフが作成できる。このグラフは端末の位置関係を反映しており、CSで互いのパケット送信を検知可能な位置関係にある端末間のみが正の重みを持つ辺で繋がり、隠れ端末関係にある端末間の辺の重みは0となる。これにより、クラスタリングの入力は端末台数、端末間の位置関係を反映した対応するデータ点間の類似度およびクラスタ数となり、端末は距離規範でクラスタ化される。

スペクトラルクラスタリングのアルゴリズムについて説明する。まず、GWにより推定した情報から作成したグラフの隣接行列 \mathbf{W} を求める。ここで隣接行列 \mathbf{W} は i 行 j 列目の要素に $w_{ij} = w_{ji}$ を持つ対称行列である。次に、隣接行列 \mathbf{W} に対する次数行列を \mathbf{D} を次式のように求める。

$$\mathbf{D} = \text{diag} \left(\sum_{j=1}^M w_{1j}, \dots, \sum_{j=1}^M w_{ij}, \dots, \sum_{j=1}^M w_{MM} \right) \quad (11)$$

ここで、 $\text{diag}(\cdot)$ は主対角上にベクトルの要素を持つ正方対角行列を表す。得られた \mathbf{W} と \mathbf{D} を用いて、グラフラプラシアン行列 \mathbf{L} を得る。

$$\mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{W} \quad (12)$$

次に、正規化ラプラシアン \mathbf{L}_{sym} を次式で計算する。

$$\mathbf{L}_{\text{sym}} = \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{L} \mathbf{D}^{-1/2} \quad (13)$$

ここで、正規化ラプラシアンの固有値を昇順に k 個 u_1, \dots, u_k 計算し、対応する固有ベクトルを列として並べた行列 \mathbf{U} を作成する。最後に \mathbf{U} を列ピボット QR 分解し、特異値分解に基づいてクラスタリングを行う [16]。スペクトラルクラスタリングでは、文献 [15] で提案されているような \mathbf{U} を k -means によりクラスタリングする手法と比較して、性能が堅牢かつ良好であり、 k -means において起こるような初期値により結果が変わってしまう問題がなく、反復計算も必要ないといった特徴がある。

3.3.2 リソース割り当て

スペクトラルクラスタリングにより距離規範に近いクラスタが形成されていることが期待されるため、異なるクラスタに属する端末間と比較して、同一クラスタに所属する端末間の距離は必然的に近くなる。従って、異なるクラスタに属する端末同士と比較して同一クラスタに属する端末間では CS 可能な確率が高くなる。そのため、異なるクラスタに対して直交周波数リソースを割り当てることにより隠れ端末問題によるパケット衝突を低減することができる。

4. 計算機シミュレーション

4.1 シミュレーション諸元と評価指標

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し、伝搬係数 $\alpha = 4.0$ 、伝搬損失オフセット $\beta = 9.5$ 、搬送波係数 $\eta = 4.5$ とした [12]。また、端末 i の正規化クロックドリフト平均値 μ_i および分散値 σ_i はそれぞれ $[-1.91 \times 10^{-3}, 0.28 \times 10^{-3}]$, $[9.59 \times 10^{-11}, 3.19 \times 10^{-10}]$ の範囲をとる一様乱数により決定した [11]。その他のシミュレーション諸元は表 1 に示す通りである [17]。本稿では、提案手法の評価のためにパケット配信率 (PDR: Packet Delivery Rate) を用いる。ここで、PDR は端末が生起した総パケット数に対する GW で受信に成功したパケット数で計算する。受信に成功したパケットとは、GW において衝突したパケットと端末にて

表 1 シミュレーション諸元

エリア半径 R	500 [m]
端末台数 M	{100,200,...,2000}
中心搬送波周波数 f_c	923.2 [MHz]
拡散率 SF_m	{7,8,9,10}
帯域幅 BW	125 [kHz]
送信電力 P_t	13 [dBm]
パケット送信周期 T	2 [min]
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 σ^2	-174 [dBm/Hz]
雑音指数 NF	10 [dB]
相関距離 d_{cor}	50 [m]
ペイロードサイズ	160 [bit]
クラスタ数 K	4

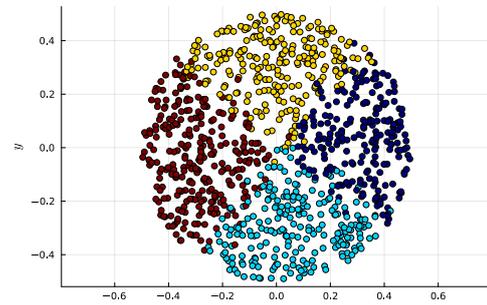


図 4 クラスタ結果 ($K = 4$)

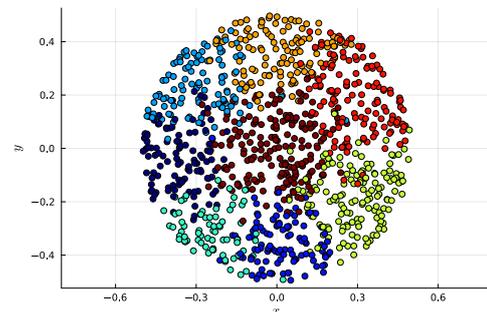


図 5 クラスタ結果 ($K = 8$)

破棄したパケット及び GW にて SNR と SIR の閾値を下回ったパケットの数を総生起パケット数から引いたものである。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。

- 距離規範のスペクトラルクラスタリング: 端末間の距離が理想的に把握できていたものとしてクラスタリングの入力値に用いてクラスタ化し、リソース割り当てを行なったものであり、実質的な上界を示す。

- CAD に基づいた PLIM [9]: クラスタリング及びリソース割り当てを行わずに、各端末が全ての周波数チャネルを使用できるとしたものの。

4.2 スペクトラルクラスタリング結果

スペクトラルクラスタリング結果の一例を図 4, 5 に示す。クラスタ毎に色を分けて表現しており、GW におけるクラスタリング結果を端末の位置にプロットしたのとなっている。ここで、端末の位置情報は GW において未知であるにも関わらず、クラスタ数に関わらず概ね距離規範にてクラスタリングされていることが分かる。なお、この結果は複数回試行した計算機シミュレーションにおける一例であるが、全ての試行において同

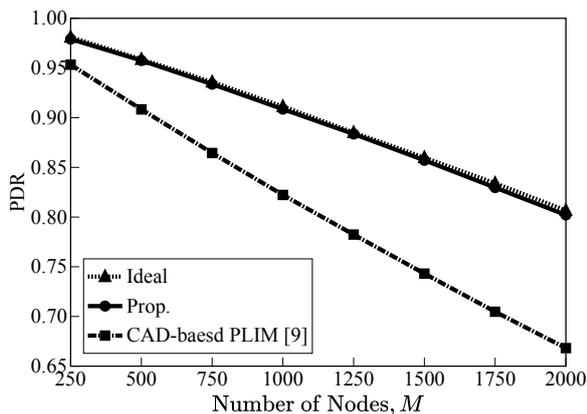


図 6 端末台数対 PDR

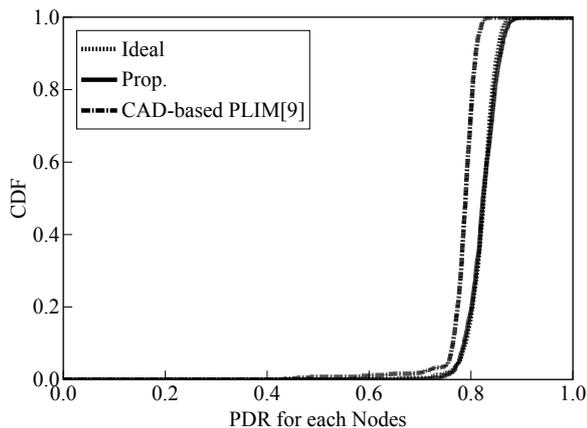


図 7 各端末の PDR に対する CDF ($M = 1000$)

様のクラスタリング結果が得られている。

4.3 端末台数に対する PDR 特性

端末台数に対する PDR 特性を図 6 に示す。クラスタリングを行わない従来手法 (CAD-based PLIM) では、端末数の増加に伴い、隠れ端末問題の顕在化ならびに CS 検知による送信中止により PDR 特性が劣化していることがわかる。一方で、提案手法は CAD に基づく PLIM と比較して PDR を最大約 13% 改善できていることがわかる。これは、提案手法により同一周波数を用いて送信する端末が近傍に存在する可能性が高くなり、CS により他端末の packets 送信を検知できる確率が高まったからである。結果より、提案手法を適用することにより隠れ端末問題による影響は低減されたとと言える。

4.4 各端末の PDF に対する CDF 特性

端末台数 $M = 1000$ における各端末の PDR の CDF 特性を図 7 に示す。提案手法により、CAD に基づく PLIM 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。特に、PDR が 0.7 を下回る端末がほとんど存在しなくなり、端末間の PDR の公平性が上がっていると言える。

5. まとめと今後の課題

本稿では PLIM ベースの LoRaWAN における追加のオーバーヘッドを必要としない無線環境情報推定と推定した情報をもとにしたクラスタリング及びリソース割り当てを提案した。計算機シミュレーションにより、提案手法は従来手法と比較して PDR を最大 13% 改善させ、隠れ端末問題が低減可能であることを示した。今後の課題として、推定精度の向上や隠れ端末の間接的な特定などについて検討する。

謝辞 本研究開発は総務省 SCOPE (受付番号 JP235004002) の委託によるものである。

文 献

- [1] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of Things for Smart Cities," *IEEE IoTJ*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, Feb. 2014.
- [2] M. Jouhari, N. Saeed, M.-S. Alouini, and E. M. Amhoud, "A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 25, no. 3, pp. 1841–1876, Feb. 2023.
- [3] 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, Jan. 2017.
- [4] B. Reynders, Q. Wang, P. Tuset-Peiro, X. Vilajosana, and S. Pollin, "Improving Reliability and Scalability of LoRaWANs Through Lightweight Scheduling," *IEEE IoTJ*, vol. 5, no. 3, pp. 1830–1842, Mar. 2018.
- [5] O. Georgiou and U. Raza, "Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?" *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 162–165, Apr. 2017.
- [6] T. Polonelli, D. Brunelli, A. Marzocchi, and L. Benini, "Slotted ALOHA on LoRaWAN-Design, Analysis, and Deployment," *Sensors*, vol. 19, no. 4, p. 838, Feb. 2019.
- [7] J. Haxhibeqiri, I. Moerman, and J. Hoebeke, "Low Overhead Scheduling of LoRa Transmissions for Improved Scalability," *IEEE IoTJ*, vol. 6, no. 2, pp. 3097–3109, Oct. 2019.
- [8] K. Adachi, K. Tsurumi, A. Kaburaki, O. Takyu, M. Ohta, and T. Fujii, "Packet-Level Index Modulation for LoRaWAN," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 12 601–12 610, Jan. 2021.
- [9] K. Suzuki, K. Adachi, M. Ohta, O. Takyu, and T. Fujii, "Packet-Level Index Modulation Based on Channel Activity Detection," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, pp. 1–1, Aug. 2023.
- [10] N. Aihara, K. Adachi, O. Takyu, M. Ohta, and T. Fujii, "Q-Learning Aided Resource Allocation and Environment Recognition in LoRaWAN With CSMA/CA," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 152 126–152 137, Oct. 2019.
- [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 IoTJ*, vol. 9, no. 16, pp. 15 089–15 099, Aug. 2022.
- [12] 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.1411-12-202308-I/en>, Aug. 2023, (Accessed Nov., 2023).
- [13] "Semtech SX1272-Long Range Low Power RF Transceiver 860–1000 MHz With LoRa Technology, May. 2023, [online] Available:," <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1272>, (Accessed Nov., 2023).
- [14] 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, Jan. 2018.
- [15] U. von Luxburg, "A Tutorial on Spectral Clustering," *Statistics and Computing*, no. 4, pp. 395–416, Aug.
- [16] A. Damle, V. Minden, and L. Ying, "Simple, direct and efficient multi-way spectral clustering," *Information and Inference: A Journal of the IMA*, vol. 8, no. 1, pp. 181–203, Jun. 2018.
- [17] M. Series, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced," [online]. Available: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2135-1-2009>, Dec. 2009, (Accessed Nov., 2023).