

高度無線環境情報共有型無線センサネットワークの研究開発

Research and Development for Enhanced Wireless Sensor Networks with Sharing Information of Wireless Environment

研究代表者

田久 修 信州大学
Osamu Takyu Shinshu University

研究分担者

安達 宏一
Koichi Adachi
慶應義塾大学
Keio University

太田 真衣
Mai Ohta
工学院大学
Kogakuin University

藤井 威生
Takeo Fujii
電気通信大学
The University of Electro-Communications

研究期間 令和5年度～令和7年度

概要

本研究では、IoT や CPS の無線インフラとして期待される低電力広域通信 (LPWAN) を対象に、高いデータ到着率を実現する新たなネットワークを確立した。具体的には、他端末のアクセス検知性能を認識する高度化センシング、認識結果を無線環境情報とし、パケットレベルインデックス変調 (PLIM) によりオーバーヘッドなしで端末間共有することでパケット到着率を向上するリソース最適化、そして、分数拡散率による変調方式を確立した。これらの機能により LPWAN のデータ到着率の向上を実現し、LPWAN と周波数を共用する WiFi Halow との共存環境で安定したデータ到着率を実現した。

Abstract

We construct novel wireless communications for low power wide area networks (LPWAN), which is most powerful wireless infrastructure for supporting IoT and CPS. These composed of the following three function. First one is the enhanced sensing scheme for recognizing the access detection possibility of each node, second one is the optimal resource allocation based on the wireless environment information, which are gathered by the packet level index modulation with no overhead. Third one is a baseband modulation scheme based on fractional spreading factor. We show the high data arrival rate achieved even under the frequency spectrum sharing between the LPWAN and the WiFi Halow.

1. まえがき

低電力広域通信 (LPWAN) は、アンライセンスバンドの自律無線システムであり、敷設制約が少なく様々な用途への利用が期待される。しかし、アクセス制御で用いるキャリアセンスは広域に配備したセンサ端末 (端末) のアクセスを検知できず、パケット衝突で情報が欠落する。IoT (Internet of Things) や CPS (Cyber-Physical Systems) によりセンサ数が増えた場合、LPWAN による情報集約は破綻する懸念がある。本研究課題では、チャンネルの混雑度やセンシング性能などの無線環境情報をセンサ間で共有し、各センサが無線環境を把握して適切な周波数資源を利用する、「高度無線環境情報共有型無線センサネットワーク」を確立する。図1に全体コンセプトを示す。本センサネットワークは、電波のセンシングとプロトコル解析を統合することで無線環境を高度に把握する高度化センシング技術 (機能1)、端末が把握した無線環境をオーバーヘッド無しに共有できるパケットレベルインデックス変調 (PLIM) による情報共有法とそれに基づくリソース割り当て機能 (機能2)、さらに、LPWAN で用いられる拡散変調方式に小数分解能拡散率を新たに導入することで、同時アクセス数を拡大する Fractional SF 機能 (機能3) を確立した。これら三機能が統合することで、膨大な数のセンサを利用した場合にも安定したデータ到着率を達成し、限られた周波数資源においても効果的な環境認識を可能にする新たなセンサネットワークを導出した。

2. 研究内容及び成果

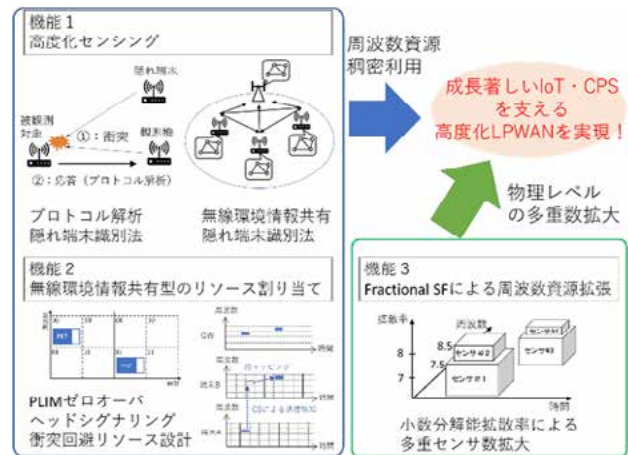
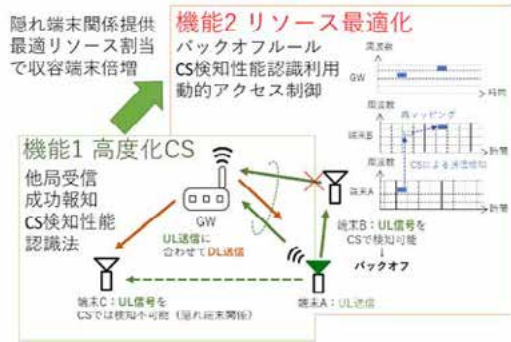
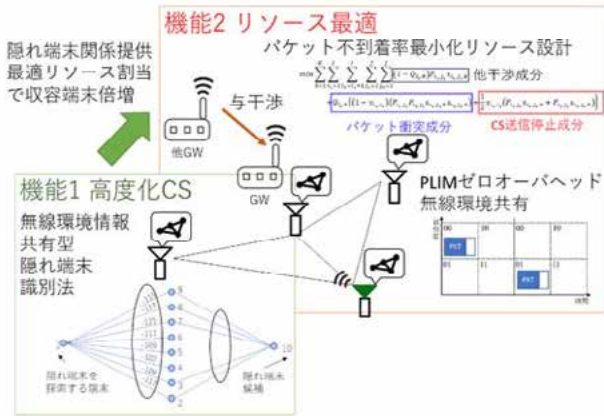


図1 本研究課題のコンセプト

確立したセンサネットワークでは、機能1と2が密接に機能する二つの無線アクセス方法を確立した。一つ目は、無線環境に応じたアクセス制御プロトコルから暗黙的に無線環境を把握する間接型、二つ目は無線環境情報をパケットレベルインデックス変調 (PLIM) で通知する直接型である。図2に各無線アクセス法の概要を示す。そこで、間接型と直接型に分け、各構成機能について詳細を説明する。また、機能3の Fractional SF はベースバンド信号処理による同時アクセス時に発生する干渉を軽減する機能である。これら機能1～3を統合利用することで、掛け算的に収容端末数の増加が見込まれる。さらに、機能3では、



(a) 間接型のコンセプト (インプリシット型)



(b) 直接型のコンセプト (PLIM)

図2 新たに確立した無線アクセス法

ソフトウェア無線機に実装し、実機検証において Fractional SF の有効性を明らかにした。また、本センサネットワークの適用事例として、920MHz 帯 LPWAN と WiFi Halow と周波数共有の実証検証を進め、その有効性を報告する。

2.1. 高度化センシングとリソース割り当て法が連携する無線アクセス法 (間接型 (インプリシット型))

本研究開発項目では、端末からの明示的な通知無しで、端末間の相互関係を集約局 (GW) が把握するゼロオーバーヘッドな無線環境情報共有を実現した。この手法では、PLIM をベースとした LoRaWAN システムにおいて、端末がキャリアセンス (CS) により他端末の packets 送信を検知してバックオフしたこと及び、どの端末の packets 送信を CS によって検知したかを、端末からの明示的な通知なしに GW にて推定することで、等価的に各端末の無線環境情報集約を行う。GW は各端末が送信時に、既知のマッピングルールに基づき再マッピングを判断することで、端末間の無線環境情報を推定する。推定した無線環境情報を Spectrum Clustering で解析することで、端末の相互関係に基づくクラスタリングが可能となる。

2.1.1. チャンネルアクティビティ検出に基づいた PLIM

チャンネルアクティビティ検出に基づいた PLIM の動作概要を述べる。図3にその概要を示す。端末の packets 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。さらに、 T_{subf} sec のサブフレームを Q 個の時間スロットに等分割する。端末は事前に GW と共有されているマッピングルールを元に、packets を送信する周波数チャネルおよび時間スロットを決定する。端末は packets を $s = 0$ からマッピングし、CS により他端末の UL packets 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。 $s = S -$

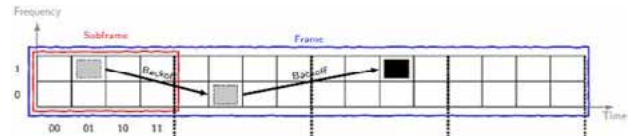


図3. チャンネルアクティビティ検出に基づく PLIM

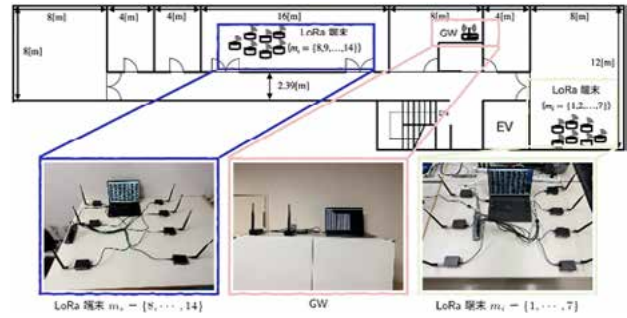


図4. 端末設置環境 (電気通信大学東 10 号館 4 階)

1)においても CS により他端末の UL packets 送信を検知した場合、packets を破棄する。

2.1.2. 提案手法

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 packets 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、各クラスターへと直交リソースを割り当てる。

(無線環境情報集約) 提案手法の動作概要を概説する。CS を用いて互いの 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。端末 B が端末 A の UL 送信を検知して、UL packets を次のサブフレームにバックオフする。マッピングルールとデマッピングによって得られた PLIM ビット系列から、GW は端末 B が本来使用する予定であった送信インデックスを推定する。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 UL 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、GW においてオーバーヘッドなしに端末 B が端末 A の UL 送信を CS により検知可能であると推定することができる。

(無線環境情報の活用) 推定した無線環境情報の活用の一つとして端末の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る。スペクトラルクラスタリングによって得られた各クラスターに対して、異なる直交するリソースを割り当てることを考える。

2.1.3. 実機実験

提案手法の有効性を確かめるための実機検証を行なった。DC 制約を考慮し送信間隔は 8 sec とした。端末は 14 台を 7 台ずつの 2 グループに分けて、図4に示すように、隠れ端末問題を意図的に発生させるために、異なる部屋に LoRaWAN 端末を設置した。さらに、各端末に 30dB の減衰器を導入した。無線環境情報推定のため、実機実験を 70 時間行った。今回の実験ではグループの端末が異なる部屋に存在し、CS にて互いの packets 送信を検知できないため、クラスタリング結果として、2 つのクラスターに分類される必要がある。結果として、推定の総回数 (39,698 回) 中、推定成功 36,016 回、推定失敗 3,388 回、誤推定 244 回となった。なお、ここにおける推定失敗とは、GW における推定を行った際に該当する端末なしとなった回数であり、

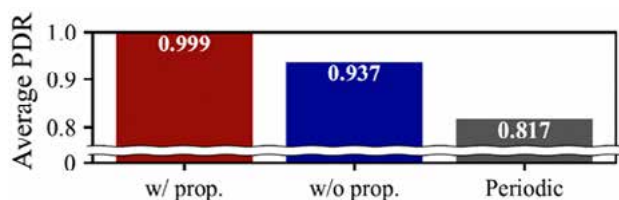


図 5. 平均 PDR 特性

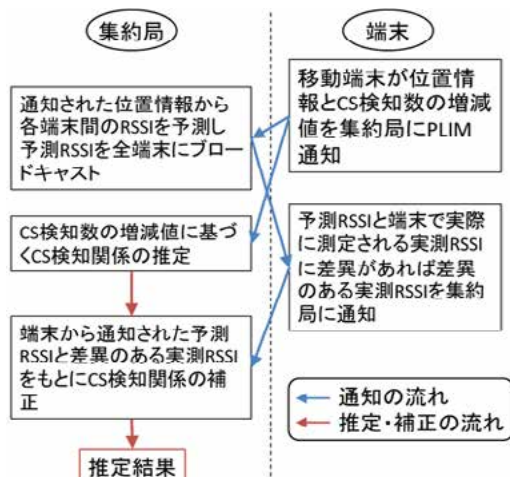


図 6 変動時の隠れ端末関係通知法

誤推定とは推定を行った際に端末間の無線環境情報を推定できたが、その組み合わせが間違っていたことを表している。この推定をもとにスペクトラルクラスタリングを実行した結果、互いに CS 可能な端末のみが含まれる 2 つのクラスタが得られた。図 5 に平均パケット配信率 (PDR) 特性を示す。クラスタ毎に直交する周波数チャネルを割り当てた (w/ prop.) は直交チャネルを割り当てない場合 (w/o prop.) と端末が周期的にパケットを送信する場合 (Periodic) と比較して大幅に PDR 特性を改善できていることがわかる。結果より、実際の環境に即した期待通りのクラスタリング結果が得られていることがわかる。また、現実の環境では少なからず推定失敗や誤推定などが発生してしまうものの、提案手法が実環境に適用可能な堅牢性を持つことが確認できた。

2.2. 高度化センシングとリソース割り当て法が連携する無線アクセス法 (直接型)

端末が受信電解強度 (RSSI) を計測することで、端末相互のキャリアセンス検知可能を識別する隠れ端末特定法を確立した。そして、端末が識別した隠れ端末特定結果等を通知する方法に PLIM を用いることを想定し、PLIM の高度化を進めた。そして、無線環境の集約結果を利用し、各端末のアクセスタイミングを指定する時間リソース割り当て法を確立し、収容可能な端末数の拡大を実現した。以降は、各機能を詳細に説明する。

2.2.1. RSSI 計測情報の共有による隠れ端末特定法

LPWAN ではパケット衝突を回避するため、他端末の電波を検出する CS により他端末のパケットアクセスを認知する。しかし、CS に要する時間を短く抑えるため、エネルギー検出が用いられるが、電力が一定低下になるとパケットアクセスが見逃される。パケットアクセスを見逃す隠れ端末状態を回避するため、他端末がパケット復調により観測できる RSSI に注目した。パケット復調による RSSI はキャリアセンスに比べて検出感度が高く、キャリアセンスで不

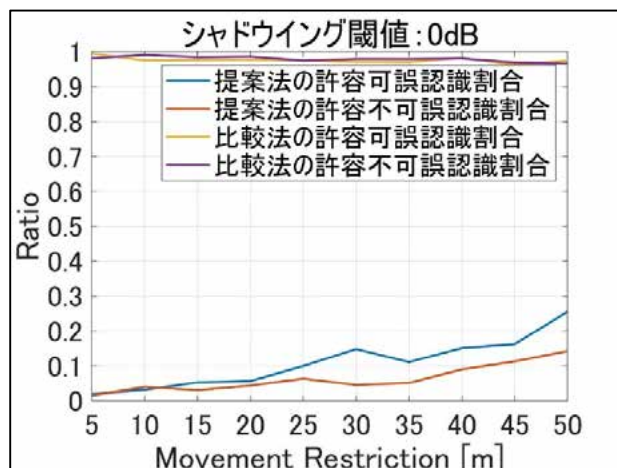


図 7 キャリアセンス検知性能識別率

検知となった端末の受信電力を評価できる。そこで、各端末が RSSI を計測し、計測結果を一つの情報集約局に集計することで隠れ端末関係を把握する方法を確立した。さらに、端末の移動による隠れ端末関係の変化に対して、RSSI の変動が生じた結果に絞り込み、各端末が通知するアルゴリズムを確立した (図 6)。提案アルゴリズムの有効性を検証するため、シミュレーション評価を実施した。図 7 にその結果を示す。結果の許容可誤認識割合は、キャリアセンス可能だが不可能と御認識した場合であり、誤認識が生じたとしても、周波数共用をする他システムへの与干渉は回避できる点で許容される。一方、許容不可誤認識割合は、キャリアセンス不可能だが可能と判断する割合であり、他システムへの与干渉発生の原因となるため、許容されない。比較法として本稿提案法を用いない場合と比較すると、比較法は高い確率で誤りが生じるのに対して、移動距離が 25m 以内であれば提案法は 10% 以内に誤りを抑えらえる。これより、提案法が端末の移動に伴う無線環境が生じた場合にも、移動に伴う RSSI の変化が生じた端末に限定して RSSI 通知することで、無線環境の変化を適切に更新し、隠れ端末の高い識別精度を維持できる。

2.2.2 差動化 PLIM (PLIM) による追加情報伝送

パケットの送信時間や送信チャネルを伝送情報に応じて切り替える PLIM は、パケット内のデータに追加で情報を伝送できる。920MHz 帯 LPWA では送信時間制約により送信待機時間を設けられている。そこで、この待機時間を情報に応じて切り替える PLIM が確立することで、PLIM による追加のデータ伝送が可能になる。この PLIM を利用することで、端末間の RSSI 計測結果の通知とセンシング結果の通知を両立できるため、オーバーヘッドが生じない無線環境情報の共有が可能になる。

PLIM では、時間スロットと周波数チャネルインデックスを用いて情報伝送を行うため、端末と GW 間でフレーム時刻同期が必要となる。1 度時刻同期を行ったとしても、時間経過とともに端末の時刻がクロックドリフトによってずれ、クロックドリフトの影響は経過時間とともに累積することが知られている。IoT システムなど、ネットワークを構成する端末数が多い場合、現実的に運用するためには端末 1 台の価格をなるべく抑制する必要がある。このため、無線機に用いられる発振器は技術基準適合認定を受けた比較的精度の高い発振器が用いられるものの、送信タイミングの時間制御は無線通信に用いられる発振器とは異なる精度の低い発振器が用いられることが一般的である。

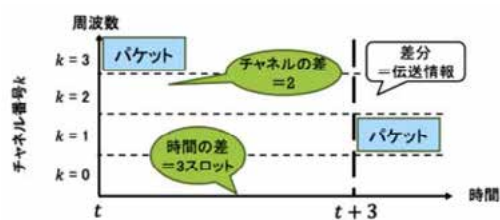


図8 提案：差動 PLIM の動作概要

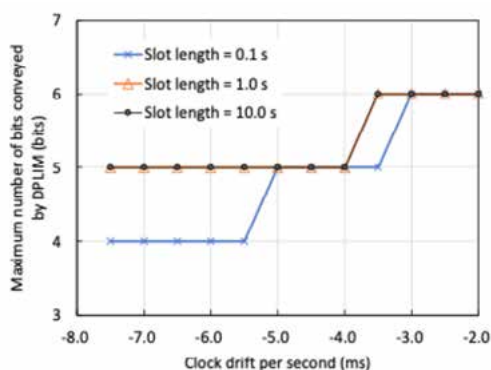


図9 クロックドリフト対伝送可能ビット数

(提案手法) 我々が提案する差動化 PLIM では、従来のチャンネルと時間スロットのインデックスにダイレクトにシンボルを割り当てる手法ではなく、連続するパケット番号のチャンネルインデックスの差分および時間スロットインデックスの差分に対してシンボルの割り当てを行う。これにより、クロックドリフトが累積する経過時間を、時刻同期の実施後から経過した時刻ではなく、連続するパケット間に限定することができるため、従来の PLIM よりもクロックドリフトの影響を軽減することが可能となる。イメージ図を図8に示す。

(シミュレーション評価) 提案法を用い、スロット長の違いによる、伝送可能なビット数を評価した。図9に示すように、スロット長を0.1秒と短くした場合でもマージンを大きくとって場合とほぼ同等な性能を維持できることが示された。

2.2.3. PLIM における温度特性を利用したクロックドリフト推定法

本研究課題では、精度の低い発振器が PLIM に及ぼす影響について実機を用いて明らかにしてきた。精度の低い発振器は温度補償がない発振器である場合が多く、温度補償がない発振器は温度によって精度が変動することも知られている。IoT システムなどでは、端末が屋外に設置されることも想定され、設置環境は過酷であると予想される。したがって、気温の変化に準ずる温度変化や、端末自身の制御に伴う CPU などの温度上昇が原因となり、発振器のクロックドリフト特性が変動することが予想される。

クロックドリフト特性の影響を緩和させるために、時間スロット長にマージンを設けると保守的に設計されるため、長ければ長いほど累積クロックドリフトの影響は緩和される一方で、パケットの送信間隔 (PLIM ではフレーム長) が長くなるため、送信間隔におけるシステムの要求条件に合わない可能性がある。また、1 フレーム内に設定できる時間スロット数が少なくなった場合、PLIM で送信できるビット数が減少し、スループットが低下する原因となる。したがって、マージンは小さく、時刻同期回数は少なく、PLIM シンボル誤りを抑制する手法の確立が必要である。

(実機製作) ここでは、端末の伝送する温度情報をもちに

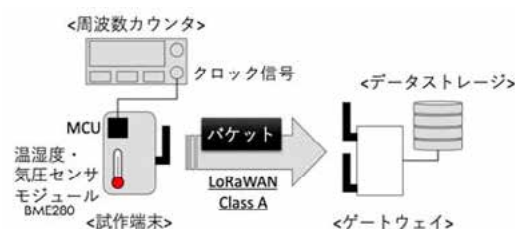


図10 実験系模式図

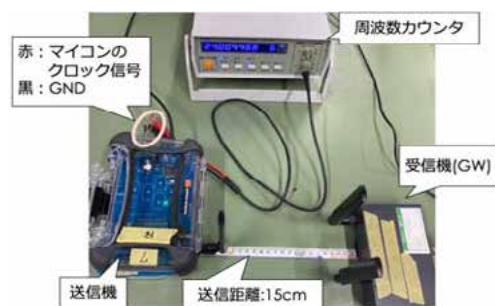


図11 クロックドリフト導出実験系

表1 実験パラメータ

パケット送信間隔	3.4 s	中心周波数	923.4 MHz
拡散率 (SF)	8	帯域幅 (BW)	125 kHz
LoRaWAN	Class A	1パケット内のシンボル数	45.25 symbols

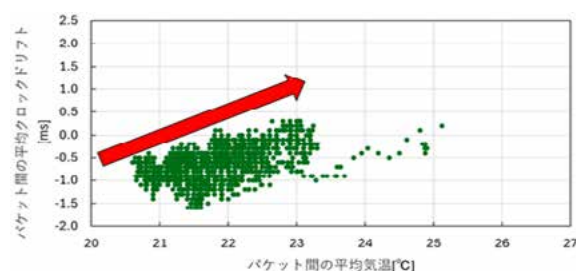


図12 温度とクロックドリフトの相関関係

GW がクロックドリフトを推定し、クロックドリフトの温度特性を用い、時刻ずれを補正する手法を提案した。提案法において、実機無線機を用い、図10に示す実験系を用いた実機無線機による実験を実施するため、図11に示した LoRaWAN 無線機 (送信機) を作製した。

(実機実験) 実機により、温度とクロックドリフトの相関を求めた。表1にパラメータを示す。図12に示すように、温度とクロックドリフトの相関関係を示すことができた。

2.2.4. 端末間キャリアセンス検知関係による無線環境情報を活用したリソース割り当て法

2.2.1により確立した計測 RSSI から他端末のキャリアセンス検知可否を判断し、各端末から情報集約局 (GW) に集約し、隠れ端末関係を把握できる。そこで、キャリアセンス検知可否の情報を無線環境情報として利用した、リソース割り当て法を確立した (図13)。端末間のキャリアセンス検知可否を事前に把握することで、パケットの衝突確率を数式でモデル化できる。次に、アクセス時間を分割したスロットを形成し、端末がパケットを送信できる時間帯を指定する仕組みを取り入れた。これにより、同一スロット時には、できる限りキャリアセンス検知ができる端末が同じスロットに割り当てることでパケット衝突を避けられる。一方、膨大な数の端末がアクセスする場合には、

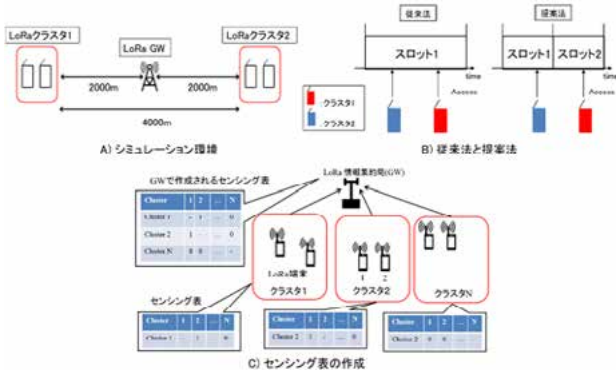


図 13 無線環境情報（センシング表）を利用下リソース割り当て法の概要

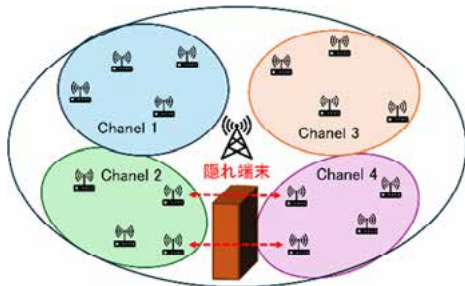


図 14 評価環境（端末のグループ（クラスタ化）と隠れ端末関係の模式図）

スロット数が有限であり、隠れ端末関係を完全に回避したスロット割り当てが困難になる。そこで、導出したパケット衝突確率から、各スロットに端末を割り当てた場合のパケット衝突確率を導出し、それを最小化するスロット（リソース）割り当て法を確立した。具体的には、パケットロス確率の近似式を用いて、焼きなまし法によりチャンネル割り当てを最適化する。

パケットロス確率の近似式は以下のようになる。

$$P_{k,j}(x_j) = \frac{(1 - \alpha_j(x_j))P_N^2 + 2P_N}{2(1 + P_N - \alpha_j(x_j)P_N)} * (1 - p)^{\alpha_{k,j}(x_j)(N_j(x_j)-1)} + 1 - (1 - p)^{\alpha_{k,j}(x_j)(N_j(x_j)-1)}$$

提案法の有効性をシミュレーションで評価した。端末数 40 台から 400 台に対して、8 つのチャンネルに割り当てを行う。図 14 に端末の空間的な配置と端末グループクラスタの関係を示す。隠れ端末の割合は 1.5% とした。この環境において、割り当てを最適化した提案法とランダム割り当てした方法でシミュレーションを行った。ランダム割り当てでは 1000 回試行し、平均値を random_avg、最悪値を random_worst として評価している。pure aloha はチャンネルにすべて隠れ端末が収容された理論上の最悪値となる。一方 csma はチャンネルに隠れ端末がない理論値を表している。シミュレーション結果より、パケットロス確率 10% での収容可能な端末数を比較すると提案法はランダム割り当ての最悪値よりも 200 台の増加、平均値よりも 100 台の増加が見られる。

（ネットワークシミュレーション検証）LPWAN のアクセスプロトコルを再現したネットワークシミュレータ「Senargie」により提案法の有効性を検証した。提案法の最大の能力を発揮すると想定される、端末を二つにクラスタ化した。つまり、クラスタ内では、端末相互にはキャリアセンスでアクセスを検知可能であるが、クラスタ間は距離があり、アクセス検知は困難な状況である。図 16 の結

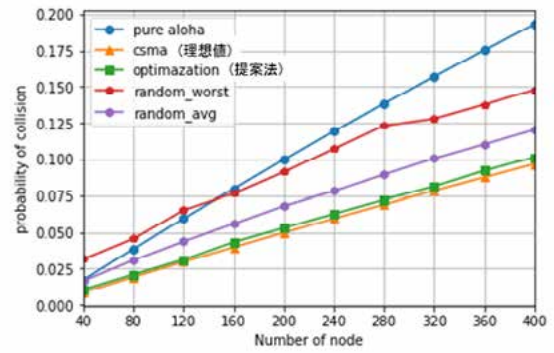


図 15 ノード数に対するパケット衝突率

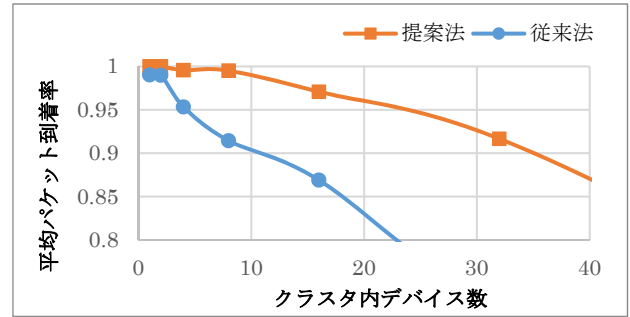


図 16 無線環境情報（センシング表）を利用下リソース割り当て法の概要

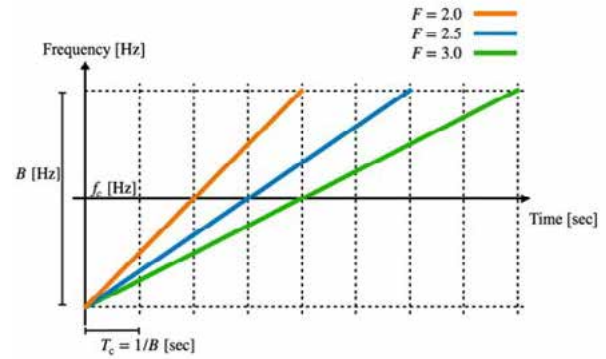


図 17 FSF-LoRa 概念図

果より、既存の LPWAN では、1 クラスタ当たり 10 端末（全体で 20 端末）を超えるとデータ到着率が 90% を低下するのに対して、提案法は、約 35 端末（全体で 70 端末）まで増大しても、90% のデータ到着率を達成し、収容端末数を 3.5 倍程度拡大でき、提案法の有効性を確認した。

2.3. 機能 3：フラクショナル SF の送信法

本研究開発項目では、LoRaWAN（Long Range Wide Area Network）で用いられる LoRa 変調の資源割当自由度を高めることを目的として、分数拡散率を導入した FSF（Fractional Spreading Factor）-LoRa を提案した。従来の LoRa では、物理層の主要パラメータである拡散率（SF：Spreading Factor）が整数値に限られているため、耐雑音性とデータレートのトレードオフに対して粗い制御しかできないという課題があった。そこで、拡散率を拡張し分数値も取れるようにしたものが、FSF-LoRa である。図 17 の概念図に示すように、FSF を変化させるとチャープ信号の時間長および周波数変化の傾きを細かい粒度で変化させることが可能となる。さらに、FSF の選択肢が増えることはシステム内で利用可能な準直交的な通信パラメータの候補数の増加を意味し、FSF-LoRa は従来の LoRa が持つ段階的なパラメータ設計を

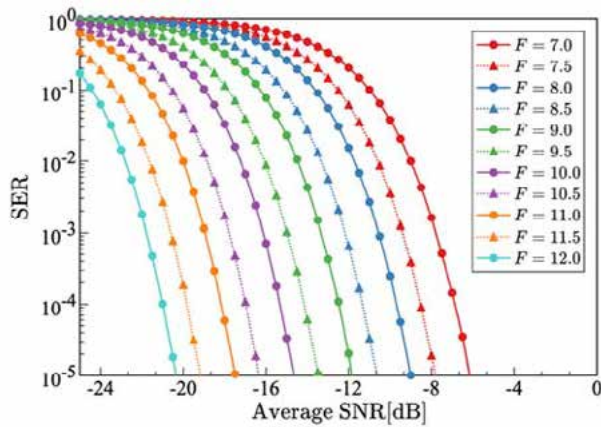


図 18 FSF-LoRa の平均 SNR 対 SER 特性

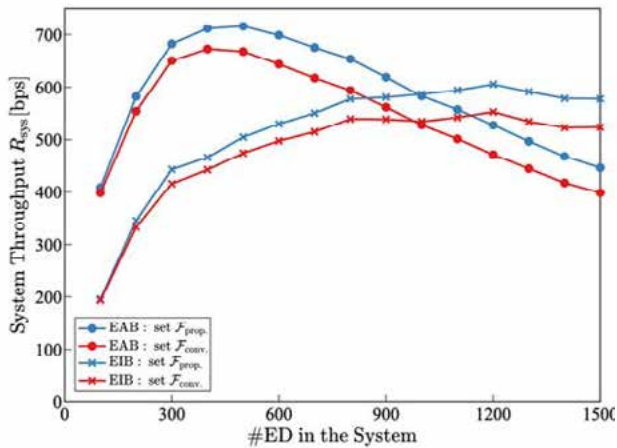


図 19 システムスループット

細粒度化すると同時に、多数端末を収容するための多重化手段を拡張する方式として位置付けられる。FSF-LoRa の特性を定量的に確認するために、平均信号電力対雑音電力比 (SNR : Signal-to-Noise Ratio) に対するシンボル誤り率 (SER : Symbol Error Rate) 特性を評価した (図 18)。図 18 より、FSF の値を 7.0 から 12.0 まで変化させた場合、各曲線はおおよそ等間隔となり、所望の誤り率を達成するために必要な平均 SNR が FSF の値に比例して小さくなるが見て取れる。特に、整数値の拡散率だけでなくその中間値の FSF を導入することで、従来であれば隣接する 2 つの整数値のいずれかを選ばざるを得なかった条件に対して、中間に相当する受信特性を与えられる。これは、LoRa 信号における耐雑音性と伝送効率のトレードオフを、より細かく制御できることを示している。そのため提案法は整数値拡散率のみの従来方式に比べて、通信環境に応じた適応的な資源割当を行うことが可能となる。

さらに、FSF-LoRa がシステム全体に与える効果を確認するため、端末数に対するシステムスループット特性を評価した。図 19 に示すように、提案する FSF-LoRa を用いた場合には、従来の整数値の拡散率集合を用いた場合と比較して、拡散率の割り当て手法である EAB (Equal Area Based) および EIB (Equal Interval Based) のいずれの拡散率割当方法においても高いスループットが得られている。

6.2. フラクショナル SF の送信法 (帯域可変型)

LoRaWAN は、物理層の変調方式として LoRa 変調を採用している。LoRa 信号は異なる拡散率 (SF: Spreading Factor) 間では準直交する性質を持つため、異なる SF の

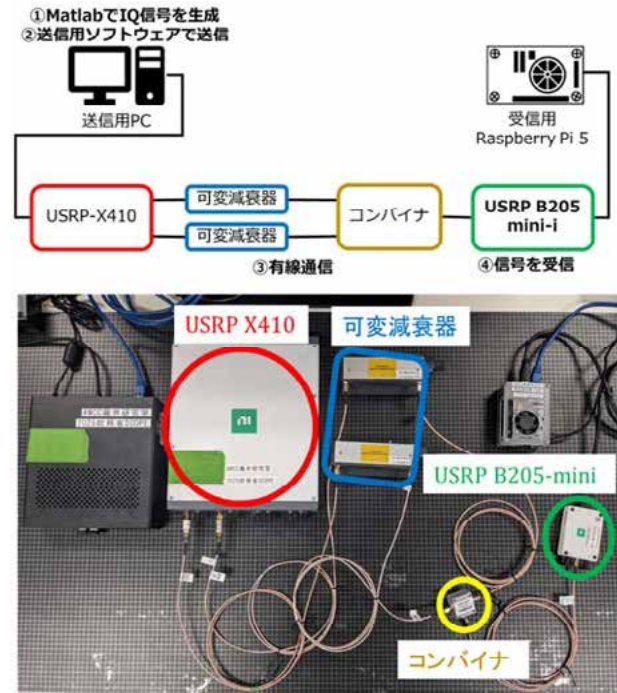


図 20. 実験系

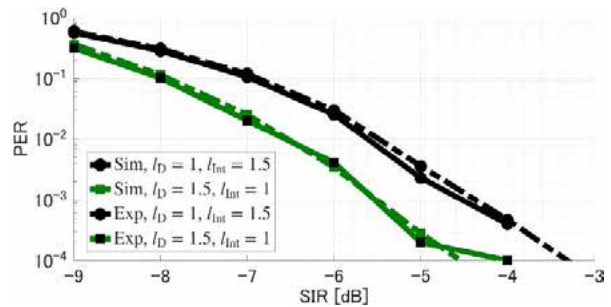


図 11. 信号対干渉電力比に対するパケット誤り率
複数信号は同時受信が可能である。一方、同一 SF の信号が重畳した場合、全信号の同時受信は干渉キャンセラの利用などに限定される。この課題への対策として、帯域幅可変 LoRa が提案されている。本方式を使用することで、同一 SF の複数信号の同時受信が可能となる。しかし、帯域幅可変 LoRa を用いた場合においても、遠近問題が課題となり得る。LoRaWAN は長距離通信が可能な無線通信技術であるため、各送信ノードとゲートウェイ間の距離に大きな差が生じる可能性がある。その結果、近傍ノードからの信号が干渉となり、受信電力が弱い遠方ノードからの信号の復調に失敗する恐れがある。そこで本研究では、帯域幅可変 LoRa の干渉特性を調査する。さらに、計算機シミュレーションによる評価に加え、ソフトウェア無線機を用いた実機実装による検証を行う。

帯域幅可変 LoRa は、変調時の帯域幅を従来の $1/l$ 倍に圧縮して信号を生成する手法である。ここで、 l はシンボル長比率を表し、非整数の値を取り得る。帯域幅を圧縮することにより、シンボル長は従来の l 倍となる。一方、受信時に復調する際は、従来の l 倍のサンプリング長でサンプリングを行うことで、従来 LoRa と同等の信号を得ることができ、従来の LoRa 信号の受信用アルゴリズムを活用して復調処理を行うことが可能である。

図 20 に本実験における実験系を表す。USRP X410 を用いて、2 つのポートからそれぞれ所望信号と干渉信号を送信する。送信信号は可変減衰器を通過した後、コンパイ

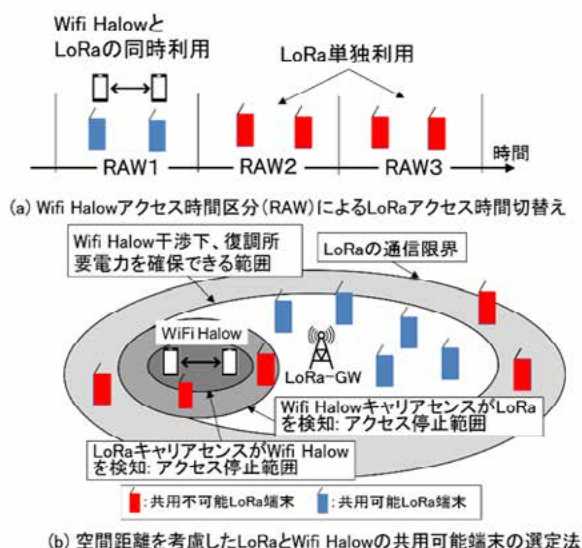


図 22 提案アクセス時間切替と LoRa 端末選択

ナを用いて重畳される。重畳された信号は、受信機である USRP B205 mini-i で受信され、復調処理が行われる。図 21 は実験結果を表す。実験の結果、実機実装を用いた場合においても、シミュレーションと同等の復調性能を達成できることが示された。具体的には、目標の packet 誤り率 (PER: Packet Error Rate) を 10^{-2} とした際、所望信号および干渉信号のシンボル長比率がそれぞれ $l_D = 1$ 、 $l_{int} = 1.5$ の場合は $SIR \geq -5$ dB の環境下において、また $l_D = 1.5$ 、 $l_{int} = 1$ の場合は $SIR \geq -6$ dB の環境下において目標 PER が達成可能であることが確認された。これにより、異なるシンボル長比率の帯域幅可変 LoRa を用いることで、干渉電力が所望電力を上回る環境においても復調可能であることが示され、帯域幅可変 LoRa の耐干渉性が明らかとなった。

2.4. 応用検証

2.4.1 WiFiHalow と高度センサネットワーク周波数共用

ここまで確立した高度センサネットワークシステムにおいて同一規格の端末間で高いデータ到着率を確立できることを示した。高度センサネットワークシステムでは、無線環境認識機能を利用することで、他のシステムとの周波数を共用する際にも、適切なアクセス制御に変更し、高いデータ到着率を維持できる。

そこで、920MHz 帯を利用する LPWAN 規格である LoRa と Wi-Fi Halow の周波数共用を対象に、高度センサネットワークシステムを前提としたアクセス制御を提案し、実機検証をもとに有効性の検証を進めた。

まず、LPWAN (LoRa) と異システムの IEEE802.11ah (WiFi Halow) が同一周波数を共用する環境で、WiFi Halow と同一周波数共用が可能となる LoRa 端末の選択法とアクセス時間を切り替える方法を確立した。WiFi Halow では、Restricted Access Window (RAW) という送信時間区分でアクセス時間を指定する (図 22(a))。そこで、LoRa と WiFi Halow のキャリアセンス性能や干渉耐性能力の観点で、LoRa 端末と WiFi Halow の同時アクセスに必要なとなる離隔距離を導出し、離隔を確保した LoRa 端末が、WiFi Halow の送信する RAW 時間に同時アクセスをする (図 22(b))。これにより、LoRa 端末がアクセス可能な時間タイミングが拡大し、単位時間当たりのアクセス量を軽減する負荷分散が可能になる。一方、離隔を確保できない LoRa 端末は、

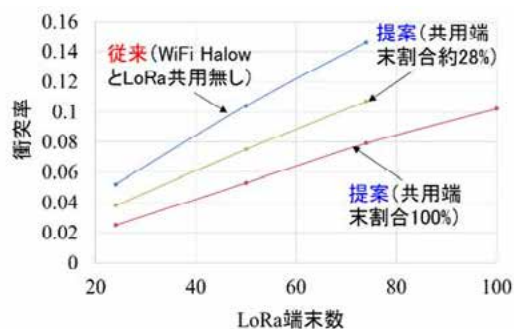


図 23 衝突率対収容 LoRa 端末数の結果

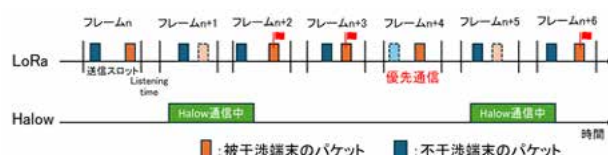


図 24 提案 WiFi Halow の検知法と優先制御のフロー

WiFi Halow のアクセスが無い RAW 時間にアクセスすることで、WiFi Halow のパケット衝突を回避する。図 23 にパケット衝突率の結果を示す。比較のため、WiFi Halow のアクセスがない RAW 時間に限定して LoRa 端末がアクセスした場合を従来法とした。図より、衝突率が 0.1 (情報集約率 90% に相当) において、提案法は負荷分散により LoRa 端末数を最大で 2 倍拡大した。

これらの周波数共用の問題点として、LoRa は約 10km のカバレッジを持つ一方 Halow は 1km 程度のカバレッジであるため、Halow からの干渉を受ける LoRa と干渉を受けない LoRa でアクセス機会に差が生まれる点が挙げられる。この問題に対し、私たちの提案法では、Halow 通信停止中に干渉を受けた LoRa が通信を行う優先制御を用いてアクセス機会を保障することで LoRa 間のアクセス機会の差を低下する。

本提案法では、Halow との共用のために LoRa の通信方式を一部変更している。LoRa は 15 秒間を 1 フレームとし、1 フレーム間で 1 回パケットを送信する。ただしフレームの最後の 2 秒間 (Listening Time) はパケット送信を行わず、Halow が通信中であるかをセンシングする。この LoRa を用いた優先制御の流れについて図 24 を用いて説明する。Halow が通信を開始すると Halow からの干渉を受ける LoRa はセンシングにより送信を停止する。その後の Listening Time において Halow 通信中であると判断し、次のフレームで集約局に Halow に通信を邪魔されていたことを伝えるフラグを立てる。集約局ではフラグを受信してから 2 フレーム間フラグを立てている LoRa を集約する期間が設けられており、2 フレーム後優先通信に入りフラグを立てている端末のみ通信を許可し、フラグを立てていない Halow に邪魔されていない端末は送信を停止する。これによりアクセス機会の差を低減する。

本研究では Halow と LoRa が周波数共用する際に確立した LoRa の優先制御アルゴリズムを実機実装した。図 25 がセンサ端末、図 26 が情報集約局、そして図 27 が情報集約局のフロントパネルである。フロントパネルでは、端末が通知した優先フラグをリアルタイムで確認でき、優先制御が機能する様子を確認できる。

この提案法の有効性を評価するため実機検証を行った。実機検証の様子を図 28 に示す。Halow の近くに被干渉端末として 1 台 LoRa (端末 0) を設置し、離れた場所に LoRa 集約局と不干渉端末として 3 台 LoRa (端末 1~3) を設置し



図 25 開発したセンサ端末



図 28 実験環境 (Halow と LoRa)

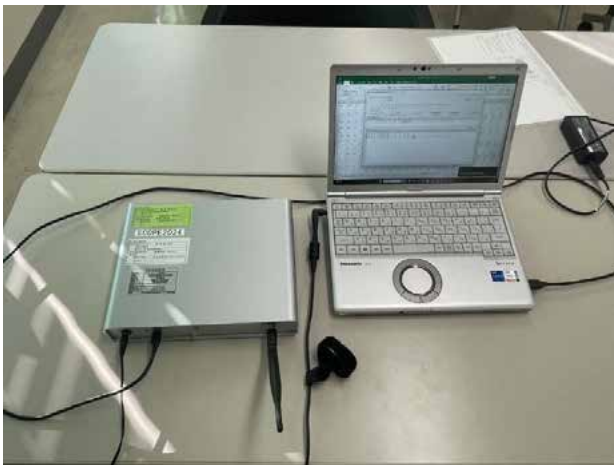


図 26 開発した情報集約 (GW) 装置

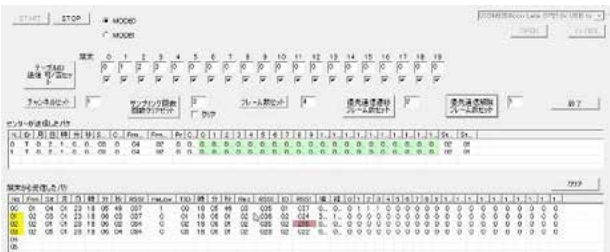


図 27 開発した情報集約 (GW) 装置のコントロールパネル

た。Halow は減衰器を用いて干渉エリアを狭めることで室内での検証を可能としている。この環境において、優先制御を行う提案法と優先制御を行わない比較法とでそれぞれ 10 分間 (40 フレーム) 共用通信を行い、LoRa のパケット到達率を評価した。

結果を表 2 に示す。提案法では優先通信に 7 回入り、被干渉端末である端末 0 のパケット到達率の増加させた。一方優先通信では不干渉端末が送信を止めるため端末 1~3 のパケット到達率が低下している。現時点では、各手法でのパケット到達率の最悪値は提案法の方が悪くなってしまっており過剰に被干渉端末を優先していることが考えられ、優先制御に移行する条件を一部修正することで、端末間のアクセス公平性の適切に向上できる。

表 2 実験結果

	端末 0	端末 1	端末 2	端末 3
比較法	28/40	32/40	35/40	34/40
提案法	31/40	31/40	30/40	27/40

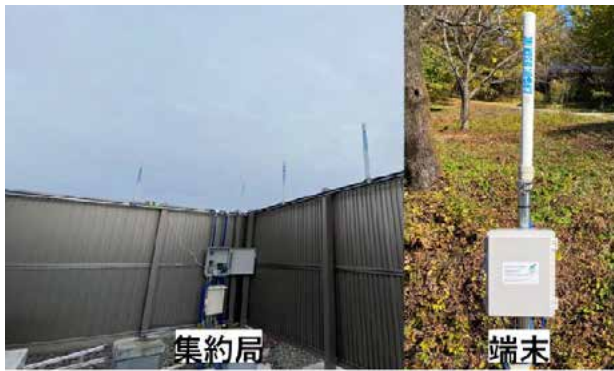
2.4.1. 実際のセンサ情報収集における高度化センシング無線センサネットワークの適用検証

信州大学では塩尻市と共同で、河川及び湖における水位及び温度状態をモニタリングするため、LPWAN における無線センサシステムを設置し、2022 年より実施し、約 2 年間継続的にモニタリングを実施した。図 29 の (a) に集約局とセンサ端末、(b) に河川沿いにおけるセンサ配置の様子を示す。長期間にわたり、センサデータを蓄積した結果は、より実用的な情報として想定され、その情報の収集精度を本研究開発で確立した高度化ワイヤレスセンサネットワークにおいて検証することは、実証に向けた検証やその課題を明らかにするうえで有効である。そこで、高度化ワイヤレスセンサネットワークの一つの機能である PLIM において実際の観測データを利用した情報集約について検証を実施した。

PLIM は、送信時刻と周波数チャネルの組み合わせをインデックスとして情報を伝送する技術である。LPWA の通信時間制限下においても追加情報を送信できるため、スループット拡大が期待できる。複数センサによる多元接続環境では、異なるセンサが同一インデックスを選択するとパケット衝突が発生し、データ欠落を引き起こす。従来研究では、各センサの観測値の確率分布 $P_{i,j}$ に基づき、2 パケット衝突確率を最小化する最適なインデックスマッピングが提案されている。しかし、実装において実際の確率分布 $P_{i,j}$ を事前に得ることは困難であり、確率分布 $P_{i,j}$ の推定手法が課題となっている。本研究では、気温データの周期的な季節変動に着目し、前年同月のデータを用いて確率分布 $P_{i,j}$ を推定するマッピング最適化手法を提案する。長野県塩尻市に設置された気温センサの実測データ (2023 年・2024 年) を用いたシミュレーションにより、提案手法の有効性を検証する。

(前年同月データを用いた月次マッピング手法) 本研究では、気温データの周期的な季節変動を利用し、翌年の各月の通信に対して前年の同月の気温分布データを用いて送信インデックスの最適化を行う手法を提案する。例えば、2024 年 1 月の通信には 2023 年 1 月の気温分布で最適化したマッピングを使用する。

1. 前年同月の気温データに量子化 (-10 °C ~ 40 °C を 40 段階) を行い、各センサ i における量子化レベル j の



(a) 集約局及びセンサ端末の概観



(b) 河川（鋳物師川）沿いの集約局とセンサ端末配置

図 29 塩尻市内に配備した LPWAN システム

出現頻度から確率分布 $P_{i,j}$ を算出

2. 2 パケット衝突確率を目的関数とした数理最適化に基づき、焼きなまし法を用いて最適マッピング $x_{i,j,k}$ を設計

3. 設計したマッピングを翌年同月に適用し月次更新

図 30 に提案手法のフロー図を示す。

各月の通信成功率を図 31 に示す。既存法としてランダムなマッピングテーブルを用いた場合（ランダムマッピング）に比較して、提案法（前年同月データで最適化した結果）が優れたパケット到着率を達成している。特に、7 月、8 月ではランダムマッピングと比較して 4.5%以上の改善を示した。提案法は、理想的に情報集約対象月の統計データを既知とした場合（当該月の実データで最適化した結果）と多くの月で同等の結果が得られており、適切なマッピング設計が可能であることが分かる。

3. 今後の研究成果の展開

高度ワイヤレスセンサネットワークにおける高度化センシング機能やリソース割り当てについては、既存の LPWAN のモジュールを利用した実装まで完了しているため、早期の実用化が期待される。しかし、実用化に向けた課題として、環境認識のため端末側の稼働時間が拡大し、電力消費の拡大に伴う短寿命化がある。電力消費を削減するためには、端末の駆動の一時停止であるスリープ機能が必要となる。スリープ機能との連携を意識するため、環境を認識とスリープを取り入れた時間スケジュールを確立する必要がある。スリープの導入の結果、環境変化に対する時間的な追従性の低下、加えて、面的に広がる端末の空間粒度が粗くなることが懸念される。そのため、環境変化の速さに応じたスケジュール設計が必要であり、切り替わりが生じる動的な環境変化に対しては、スケジュールも動的設計となるため、その具体化が必須の課題としてあり、

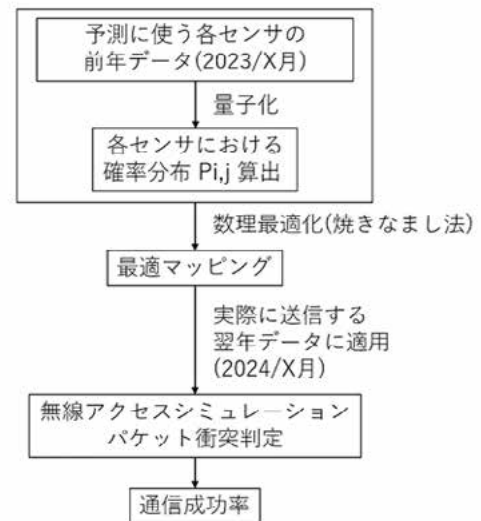


図 30 提案 PLIM のマッピング設計法

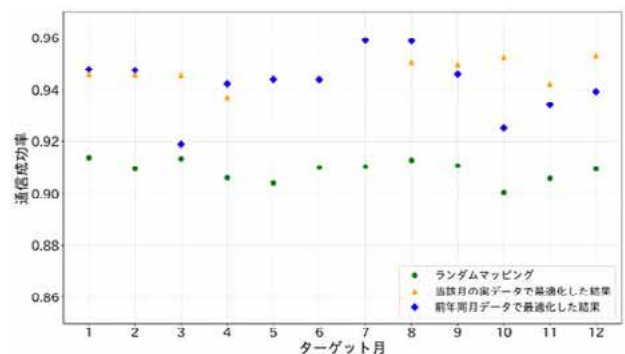


図 31 各月におけるパケット到着率

現在も検討を進めている。

一方、LPWA の LoRa 変調における分数拡散率（フラクショナル SF）については、信号フォーマットの変更が必要になるため、モジュールの開発が必要になる。よって、半導体メーカーとの共同開発に加えて、海外展開を意識した、世界的な通信規格の標準化を進める必要がある。その実現には、通信フォーマットの形成方法、同期補足用のパイロット信号構成など、精密な規格設計が必要となる。その設計には、想定される利用シーンを包括できるように、評価検証を続ける必要があり、継続的に実施している。

高度ワイヤレスセンサネットワークでは、無線環境状況を高度に把握することで、自律的な無線アクセスを適切に切り替えることにより、パケット衝突の抑制することでパケット到着率の改善を実現した。既存技術であるキャリアセンスによるパケット発信の有無のみを認識した無線アクセス制御は、センサネットワーク以外にも WiFi などで用いられている。そこで、本研究課題で確立した多角的な無線環境認識結果を活用し、WiFi を例にアクセス制御に取り入れる検証も進めている。このように他の無線通信規格への応用についても積極的にその可能性を追求するように検証を継続的に進めている。

4. むすび

本研究課題では、チャンネルの混雑度やセンシング性能などの無線環境情報をセンサ間で共有し、各センサが無線環境を把握して適切な周波数資源を利用する、「高度無線環境情報共有型無線センサネットワーク」を確立した。無線環境として、端末相互のキャリアセンシング検知性能を把握するため、アクセス制御の結果から検知性能を把握する

インプリシットな環境認識法を確立した。また、受信電解強度 (RSSI) を利用したキャリアセンシング検知性能を端末が把握し、それをパケットレベルインデックス変調 (PLIM) によるオーバーヘッドが生じない通知方法で情報集約局に通知し、無線環境を認識する方法を確立した。無線環境認識結果を利用し、時間或いは周波数のリソースを適切に割り当てることで、キャリアセンシング検知不全に伴うパケット衝突を生じる隠れ端末を回避しながら、データ到着率を向上するリソース最適設計を進め、端末の収容台数を大幅に拡大することを実現した。また、LPWAN で用いられる、チャープ変調方式における拡散率を柔軟に切り替えることができるフラクショナル SF 法を確立し、同時アクセス可能な端末数の拡大をソフトウェア無線機による実機実験により実証した。また、920MHz 帯 LPWA と周波数を共用する WiFi Halow との共用を想定した、他システムとの周波数共用の検証を進め、WiFi Halow への与干渉及び、信号検知性能を物理的な距離でモデル形成し、共用可能な LPWA 無線端末を特定する方法を確立した。さらに、Wifi Halow の信号を検知するプロトコルを実装し、Halow のアクセスに応じた送信機会を切り替える方法を確立し、他システムとの周波数共用が促進できる可能性を明らかにした。

これらの結果に基づき、将来的な実装の展開、他の技術への移転についても引き続き検証を進めており、本課題の早期実用化及び更なる無線通信システムの高度化と周波数利用効率を向上するアクセス制御方法の確立を引き続き進めていく。

【査読付き誌上発表論文】

- [1] Osamu Takyu, Keita Takeda, Ryuji Miyamoto, Koichi Adachi, Mai Ohta, Takeo Fujii, "An Environment-Aware Adaptive Data-Gathering Method for Packet-Level Index Modulation in LPWA" sensors vol.24, no.8, 18 pages (2024 年 4 月 14 日)
- [2] Aoto Kaburaki, Koichi Adachi, and Osamu Takyu, "Tackling Hidden Node Problem Utilizing Traffic Periodicity and Downlink Carrier Sense in LPWAN," IEEE Internet of Things Journal, vol. 12, no. 6, pp. 6536-6547 (2025 年 3 月 15 日)
- [3] Mai Ohta, Hiroki Matsuura, Hitoshi Yamasaki, Takeo Fujii, "Implementation of differential packet-level index modulation using LoRaWAN for IoT systems," in *IEICE Transactions on Communications*, Aug. 2025.

【査読付き口頭発表論文】

- [1] Ryoya Saito and Koichi Adachi, "FSF-LoRa: Fractional-Spreading-Factor-LoRa for Flexible Resource Allocation," in *Proc. IEEE VTC2024-Fall*, Washington DC, USA, 7-10, Oct. 2024, pp.1-5.
- [2] Hitoshi Yamasaki, Hiroki Matsuura, Mai Ohta, Makoto Taromaru, "Frame Design for Differential Packet-Level Index Modulation implemented by LoRaWAN," *ICUFN 2023*, pp. 168-172.
- [3] K. Aoki, O. Takyu, K. Adachi, M. Ohta and T. Fujii, "Resource Allocation Based on Relation Information of Hidden Node for Minimizing Packet Error in LPWA," 2025 IEEE 102nd Vehicular Technology Conference (VTC2025-Fall), Chengdu, China, 2025, pp. 1-7,

【口頭発表】

- [1] Mai Ohta, "【招待講演】 Packet-Index Level Modulation and Its Implementation," IEICE, ICETC

2024 (福岡県北九州市) (2024 年 11 月 26 日)

- [2] 青木慶太、田久修、安達宏一、太田真衣、藤井威生、"Wi-Fi Halow と LoRa の周波数共用に向けたアクセス制御の実機検証," 電子情報通信学会技術研究報告書、SR2025-94, pp. 35-37 (2026 年 3 月)

- [3] 脇田仁、藤井威生、"複数信号重畳時に干渉影響を低減可能な帯域幅可変 LoRa の実装および評価" 電子情報通信学会技術研究報告書、SR (2026 年 5 月発表予定)

【申請特許リスト】

- [1] 田久修、水野将大、無線通信ネットワーク内隠れ端末特定方法、日本、特願 2023-212695、2023 年 12 月 18 日
- [2] 齊藤稜弥、安達宏一、藤井威生、復調器、復調方法及び復調プログラム、日本、特願 2024-053888、2024 年 3 月 28 日
- [3] 更屋貴大、安達宏一、通信システム、通信方式及び通信プログラム、日本、特願 2024-142675

【受賞リスト】

- [1] Osamu Takyu, Outstanding Contribution Award, IEICE ICETC 2023、2023 年 11 月 30 日
- [2] Toshi Ito, Encouragement Award IEEE VTS Japan Chapter, 2024 年 10 月
- [3] Keita Aoki, Encouragement Award IEEE VTS Japan Chapter, 2025 年 10 月