

ユビキタスセンシングのための LoRaWAN による近接検知・広域測位技術

代表研究者

邵 成龍

九州工業大学 大学院情報工学研究院 助教

1 はじめに

過去数年間、長距離広域ネットワークである LoRaWAN (Long-Range Wide Area Network) は、多様な IoT (Internet of Things) アプリケーションを実現する有望な無線ネットワークプラットフォームとして着目されている[1][2]。これにより、大量の低電力 LoRaWAN 端末デバイス (ミリワット) が、低データレート (キロビット/秒) で長距離 (数キロメートル) にわたって LoRaWAN ゲートウェイに無線で送信できるようになった。これらの魅力的な機能により、低消費電力かつ長距離の方法で無線センシングを実現することが可能になった。これは、高消費電力と小規模なセンシング範囲に制限されている Wi-Fi や ZigBee などの従来の無線技術に基づく既存のセンシングシステムとはまったく異なる。

LoRaWAN のこの優位性に着想を得て、本研究は初めて試みとして、IoT デバイスにおけるユビキタスセンシングの可能性を探ることを目指している。具体的には、「ユビキタスセンシング」とは、関与するすべてのネットワークノード (LoRaWAN 端末デバイスまたはゲートウェイ) に、他のノードの存在を知覚し、位置情報を認識する能力を提供することを目指す。これには、LoRaWAN における無線信号に基づく近接検知と広域測位のセンシング機能が含まれる。近接検知は端末デバイス側で実行され、受信した信号を分析して近くに端末デバイスがあるかどうかを判断する。広域測位は、送信された信号を分析してゲートウェイ側ですべての端末デバイスの位置情報を認識することに焦点を当てている。このため、本研究では、近接検知と広域測位技術の共同設計を備えた初めての LoRaWAN アーキテクチャを開発することを目指す。

本研究の初年度には、LoRaWAN による近接検知アルゴリズムを開発し、広域測位のための LoRaWAN 受信信号の強度と位相情報を取得した。構築した大学キャンパス規模の LoRaWAN テストベッドに基づいて、提案した技術が良好に機能することがわかった。ただし、この実験結果は、深刻な信号歪みのない安定した環境で得られた。LoRaWAN テストベッドで移動物体 (車両や歩行者など) や端末デバイス間で信号の衝突があった場合、近接検知の精度と、広域測位のために取得された信号の強度と位相が大きく影響を受けることが実験を通じてわかった。このことから、移動物体や信号衝突の存在下で、より堅牢で信頼性の高い近接検知と広域測位を実現する新たな LoRaWAN アーキテクチャを開発する本年度の研究に至った。

2 研究成果

2-1 都市部で大規模 LoRaWAN 実験モデルの構築

図 1 に示すように、市販の LoRaWAN ハードウェアを使用して、実世界の LoRaWAN テストベッドを構築した。このテストベッドには、90 個の Dragino LoRa シールド[3]が LoRaWAN 端末デバイス (ID : D1-D90) として含まれている。3 つのゲートウェイは、Semtech SX1302 のチップセットを搭載した Dragino DL0S8N[4]を使用して実装されている。このテストベッドは、600×600 メートルの大きさの都市部環境に導入されている。90 個の端末デバイスを、D1-D15、D16-D30、D31-D45、D46-D60、D61-D75、D76-D90 の 6 つのグループに分類し、それらに割り当てられた拡散係数 (SF: spreading factor) はそれぞれ 7、8、9、10、11、12 である。一般的に、より小さな SF を使用する端末デバイスは、より大きな SF を使用するものよりもゲートウェイに比較的近い位置にある。この設定の下では、各端末デバイスの信号送信はゲートウェイによって聞かれることができる。ゲートウェイと端末デバイス間の距離は 30-550 メートルの範囲になる。各端末デバイスは、LoRaWAN 1.0.2/1.0.3 Class A 端末デバイスをサポートする MCCI LoRaWAN LMIC ライブラリ[5]に基づいて実装されている。ゲートウェイで受信したデータは、The Things Stack v3.20.0[6]に基づいて実装されたバックエンドネットワークサーバに転送される。このテストベッドでは、移動する物体 (車両や歩行者など) による LoRaWAN 信号の歪みや、端末デバイス間の信号衝突が頻繁に発生した。

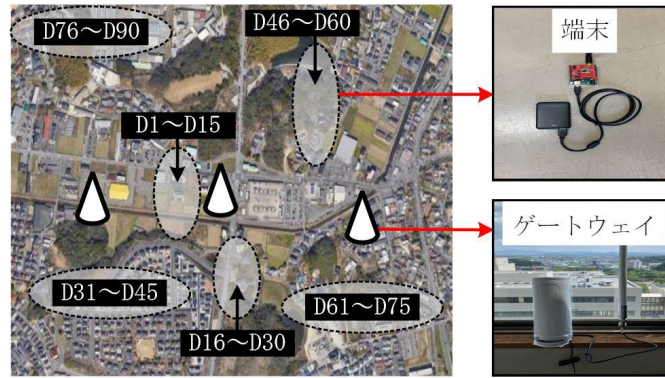


図 1：都市部規模の LoRaWAN モデル。

2-2 移動物体の存在下での LoRaWAN による近接検知技術の開発と性能評価

(1) 近接の定義

近接検知のターゲットデバイス (target) が近接検知の検知器 (detector) に近接 (CPC: close physical contact) しているということは、図 2 に示しているように、そのアンテナが検知器のアンテナの電磁近傍場 (electromagnetic near field) にあることを意味する。この領域では、信号の波面はほぼ球状になるが、電磁遠方場 (electromagnetic far field) では平面である[7]。数学的には、近傍場と遠方場を区別する境界は、検知器のアンテナから距離 $d_{nf} = 2L^2/\lambda$ にある。 L は検知器のアンテナの最大寸法 (通常は長さ) であり、 λ は信号の波長である。さらに、近傍場は反応性の領域 (reactive field) と放射性の領域 (radiating field) にさらに分かれることがある。反応性の近傍場は誘導効果を持ち、非伝播で領域に保存された膨大なエネルギーが含まれている。放射性の近傍場では、対応する信号の逆結合がアンテナ信号と逆位相であるため、誘導エネルギーを効率的に生成することができない。一方、遠方場では、信号エネルギーは効果的な放射パターンを持つ伝播形式である。原則として、反応性と放射性の近傍場を区別する境界は、検知器のアンテナから距離 $d_{rr} = 0.62\sqrt{L^3/\lambda}$ に伸びる。したがって、915 MHz 周波数帯の LoRaWAN 信号受信用に検知器に取り付けられた半波長アンテナがある場合、 d_{nf} と d_{rr} の理論値はそれぞれ 16.4 cm と 7.2 cm である。

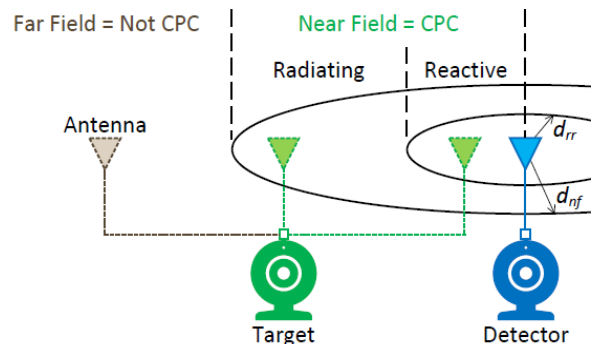


図 2：近接 (CPC) の定義。

(2) LoRaWAN による近接検知の実現可能性

LoRaWAN 信号による近接検知を達成するためには、LoRaWAN 信号が近傍場と遠方場でそれぞれどのような独特の特徴を持っているかを理解する必要がある。そのために、2 個の HackRF One ソフトウェア無線機[8] を LoRaWAN 送信機 (ターゲットデバイス) と受信機 (検知器) として使用する実験を実施した。それぞれを VART900 半波長アンテナ[9] が取り付けられたテーブルに置く。2 つのデバイスの配置に特に制約を加えない。LoRaWAN 送信は、914.9 MHz の中心周波数と 125 KHz の帯域幅を持つ LoRaWAN アップリンクチャネル 63 で行われる[10]。各 LoRaWAN パケットのペイロードサイズはランダムに設定され、SF は 8 に設定されてる。特に、LoRaWAN 受信機は、標準の LoRaWAN 信号復調を行わずに、連続的に加算サンプルの振幅 (ASM: additive sample magnitude) を計算する。ASM は、一連の基帯信号サンプル (G) を対象にして、その振幅の合計の平均を取

ることによって得られる。セクション 2-3 (1) で説明されている d_{nf} の理論値に基づいて、受信機の近傍場 (5 cm) と遠方場 (25 cm) にターゲットデバイスを移動させ、LoRaWAN パケットに関連する ASMS (additive sample magnitude sequence) が異なる特徴を示すかどうかを観察する。

受信機で採用されたナイキスト (Nyquist) サンプリングレートが 125 KHz であるため、まず G を 2^{SF} (すなわち 2^8) に設定する。これは、1 つの LoRaWAN チャープ内の信号サンプルの数に対応する。図 3 (a) に示している結果は、近傍場 LoRaWAN パケットに関連する ASMS が大幅で不規則な変動 (irregular fluctuation) を経験する一方、遠方場の場合の ASMS は比較的安定 (stable) または周期的な変動 (periodic fluctuation) であることを示している。ASMS が近傍場と遠方場で異なる特性を示す理由は次の通りである。基本的に、送信される LoRaWAN 信号のサンプルは同じ振幅を持つ。したがって、複数のコピーの信号が多重経路効果によって組み合わせられて破壊的に結合される遠方場の場合に受信される信号では、対応する ASMS の要素 (すなわち ASM) は類似した値を持ち、それにより安定した ASMS が得られる。しかし、多重経路効果によって引き起こされる信号コピーが遠距離で構築的に結合される場合、受信される信号サンプルの振幅が異なる場合があり、その結果として得られる ASMS は安定せずに変動する。特に、受信される信号が単一の信号の複数のコピーの組み合わせであり、ASM の計算が LoRaWAN 信号の基本単位 (チャープ) に基づいているため、ある一定の期間で類似した ASM が現れ、この期間は周囲の多重経路環境に依存する。これが遠方場で周期的に変動する ASMS に対応している。実際、この現象は近傍場の場合にも存在する。近傍場の ASMS が周期的に変動するのは、信号の電気および磁気成分によって形成されるベクトルが、近傍場で信号の伝播方向に平行な面で回転するためである。これにより、検知器とターゲットデバイスの間のアンテナ間で信号が反復的に偏向し、ASMS の周期性がぼやける。しかし、遠方場では、上記のベクトルが信号の伝播方向に直交し、検知器とターゲットデバイスの比較的長い距離により、信号の偏向が軽微であるためである。

さらに、 $G < 2^{SF}$ および $2^{SF} < G < 2^{SF+1}$ と設定して、この観察が G の選択と関係ないかどうかを確認する。図 3 (b) と (c) に示している結果は、比較的安定しているだけでなく、遠方場の ASMS が近傍場で観察されるように激しく不規則に変動することも示している。これにより、ASMS を使用して近傍場と遠方場を識別することが困難になる。したがって、LoRaWAN による近接検知において $G = 2^{SF}$ の設定で得られた ASMS を使用することが実現可能で信頼性がある。

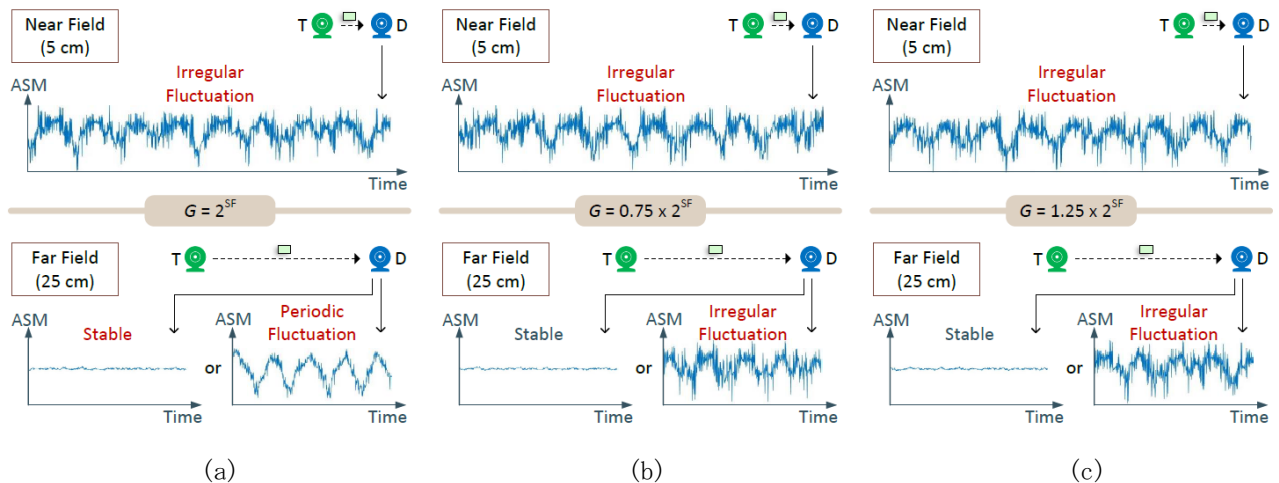


図 3：静的 LoRaWAN において異なるデバイス距離と G の設定で観察された ASMS。

T：ターゲットデバイス；D：検知器。

(3) 静的 LoRaWAN における ASMS 変動の定量化

ASMS が与えられた場合、提案した近接検知技術はまず ASMS の特徴的な変動を評価する。図 3 (a) の実験結果に基づき、もし特に変動がない場合、ASMS が比較的安定していると結論付けることができ、したがって遠方場からの LoRaWAN 伝送に由来していると考えられる。それ以外の場合は、さらなる ASMS 分析が必要である。そのため、提案した近接検知技術は、ASMS の変動度を二乗平均平方根誤差 (RMSE: root mean square error) を通じて定量化する。数学的には、提案した近接検知技術は、次の式に基づき、まず対応する平均値

$\bar{a}$ を計算することにより、ASMS の RMSE を取得する。

$$\bar{a} = \frac{1}{M - G + 1} \sum_{n=0}^{M-G} a[n]$$

ここで、 M は LoRaWAN パケットペイロード内の信号サンプルの数である。 $\bar{a}$ に基づいて、次の式により標準偏差（つまり、RMSE）が導出される。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M - G + 1} \sum_{n=0}^{M-G} \left(\frac{a[n] - \bar{a}}{a_{\max}} \right)^2}$$

ここで、 $a_{\max}$ は $a[n]$ の最大値を示し、ASMS の正規化に使用される。あらかじめ定義された閾値 α を用いて、 $\text{RMSE} \leq \alpha$ の結果は、ASMS が比較的安定であることを意味し、図 4 に示している「非近接」(Not CPC) の決定を示す。 $\text{RMSE} > \alpha$ の場合、ASMS は変動するものと判断され、提案した近接検知技術はさらにその変動が比較的明確な周期性を持つかどうかを調査する。これはセクション 2-3 (4) で詳述している。 α の値は、実験によって経験的に決定される。

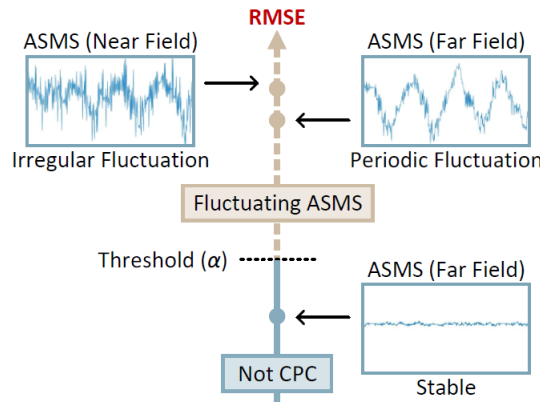


図 4 : ASMS 変動の定量化による近接検知。

(4) 静的 LoRaWAN における ASMS 周期性の有無の検討

ASMS に顕著な変動が見られる場合、提案した近接検知技術はさらに、近傍場と遠方場を区別するために、それが比較的明確な周期性を示すかどうかを調査する。図 3 (a) の結果によると、近傍場と遠方場での変動する ASMS は、その性質上互いに異なることがわかる。実際、両方とも基本的に周期的である。近傍場の ASMS が遠方場のものとは異なるように見える主な理由は、近傍場の場合、検知器と対象デバイスのアンテナ間で繰り返し信号偏向が発生するためである[7]。その結果、近傍場では各信号サンプルで重大な振幅および位相変形が観察され、結果として ASMS は明確な周期性なしに変動するようになる。

これを念頭に置いて、ASMS の周期性を調査する目的は、重大なサンプル変形が見られるかどうかを評価することである。他の周期性検出技術が対象信号内の隠れた波の周期性を認識するのとは異なり、提案した近接検知技術の目的は単純に ASMS が比較的明確な周期性を示すかどうかを判断することである。このため、提案した近接検知技術は、ASMS に関する周波数領域の視点を取り、基本的な周期性に対応する周波数成分を除いた一定の一連の周波数成分の総強度を評価する。図 5 に示すように、これは ASMS の上でランダムに選択された $G = 2^{\text{SF}}$ 連続要素に対する ASMS のパワースペクトル密度 (PSD: power spectral density) をまず取得することによって達成される。その後ピーク値に基づいて正規化操作が行われる。得られた G の PSD ビンの中で、最も高いピンは ASMS の基本的な周期性を示し、他の比較的弱いピンはサンプル変形に関連してい

る。最も高いビンサンプル変形とは関係ないため、提案した近接検知技術はこれを無視し、サンプル変形の調査には比較的弱いビンにのみ焦点を当てる。具体的には、提案した近接検知技術は、より高い強度を持つ K 個の比較的弱い PSD ビンを活用し、その集約された強度をサンプル変形の度合いとして計算する。そして、実験的に決定された閾値 β が導入される。提案技術は、得られたサンプル変形度が β よりも大きい場合、ターゲットデバイスが検知器の近くにあることを決定し、それ以外の場合は遠方場にあることを決定する。

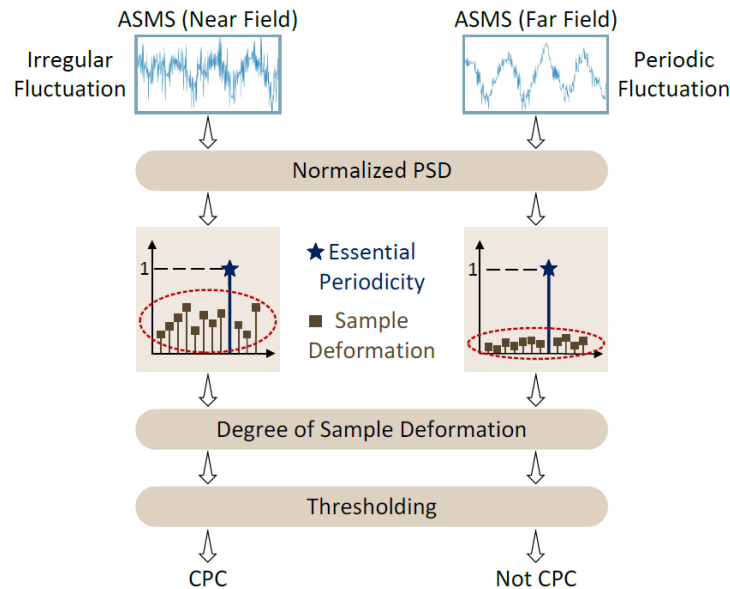


図 5：ASMS 周期性の検討による近接検知。

(5) 移動する LoRaWAN 端末デバイスに関する近接検知

モバイル LoRaWAN の場合、移動物体による LoRaWAN 信号の歪みがあった場合、ASMS は、電磁近傍場と同様に電磁遠方場でも不規則な変動を頻繁に示すため、近接検知の信頼性が低下することが観察した。この問題への対策として、本研究での提案技術は図 6 に示すように設計されている。ターゲットデバイスが検知器の電磁近傍場または電磁遠方場に移動している場合、提案技術は検知器にターゲットデバイスから N 個の信号を収集させる必要がある。各受信信号に対して、提案技術は ASMS を計算する。その後、提案技術は ASMS の正規化されたパワースペクトル密度 (PSD) を算出し、生成された全ての PSD ビンの振幅を集約する。この結果は、 N 個の信号を受信した後に N 個の要素を含むセットに格納される。その後、提案技術は N 個の値の分散 (variance) を計算する。ASMS の不規則な変動は主に電磁近傍場でのアンテナ間信号反射や、電磁遠方場でのマルチパス (multi-path) 効果によって引き起こされるため、結果として得られる分散は一般的に電磁近傍場よりも電磁遠方場で大きくなる。したがって、提案技術は分散に関するしきい値設定方法を使用して、ターゲットデバイスが検知器に対して CPC 状態にあるかどうかを判断する。

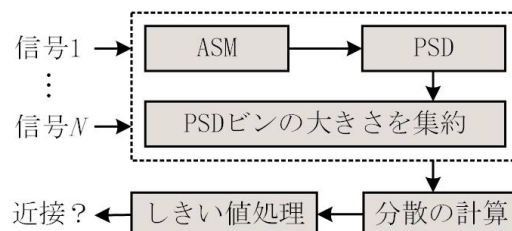


図 6：モバイル LoRaWAN における近接検知。

(6) LoRaWAN による近接検知技術に関する性能評価

提案した近接検知技術の性能評価のために、2 つの HackRF One ソフトウェア無線機[8]を使用し、それぞ

れに半波長 VERT900 アンテナ[9]が取り付けられている。1つはターゲットデバイスとして、もう1つは検知器として機能する。提案した近接検知技術の評価は、 3.6×2.7 メートルの大きさの家庭環境で行われる。この環境は、近くに物体が少なく、静的でクリアな無線環境を提供する。検知器を固定位置に配置し、一定の T-D (target-detector) 距離を考慮して、図 7 に示すように、検知器の周囲にターゲットデバイスを 20 か所の均等に分布させる。近傍場と遠方場を区別する理論的な境界は、セクション 2-2 (1) で説明したように、検知器からの距離 $d_{nf} = 16.4$ cm にある。

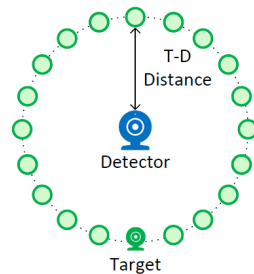


図 7：実験においてターゲットデバイスと検知器の相互位置。

まず、静的 LoRaWAN における近接検知の実験結果として、全体的な検知精度は図 8 (a) に示している。提案した近接検知技術は、ほとんどのターゲットデバイスの位置で 100%の精度で近傍場と遠方場を区別できることが観察された。しかし、ターゲットデバイスが検知器から 14 cm から 20 cm 離れた場合、全体的な検知精度がわずかに低下することが観察された。これは、セクション 2-2 (2) で説明されているように、近傍場と遠方場の移行領域で時折近接検知の失敗が発生する可能性があることと一致している。検知遅延は図 8 (b) に示しており、近接検知は平均して約 331 ms かかり、410 ms 以内に完了することができる。検知遅延は主に、セクション 2-2 (3) での RMSE の導出およびセクション 2-2 (4) での PSD の計算に起因する。検知遅延は、提案した近接検知技術の実装に使用されるハードウェア（たとえば、ラジオフロントエンド、メモリ、およびバックエンド信号処理ユニット）に依存する。提案した近接検知技術の検知精度への SF の影響をさらに調査する。明確さのために、全体的な検知精度ではなく最悪の場合の検知精度を対象とする。図 8 (c) に示している対応する結果は、SF を変更しても最悪の場合の検知精度に大きな影響を与えないことを示している。これは、提案した近接検知技術が近接検知のためにすべての可能な SF を使用する能力を証明している。

モバイル LoRaWAN の場合における提案された近接検知技術の性能評価に関して、図 9 (a) は、 $N=9$ の場合、特に電磁遠方場で静的 LoRaWAN の場合よりもはるかに高い近接検知精度 (CDA: CPC detection accuracy) を達成していることを示している。これは、分散の計算を利用して電磁近傍場と電磁遠方場を区別する手法の有効性を証明している。また、電磁遠方場での平均 CDA を計算することにより、図 9 (b) は、モバイル LoRaWAN の場合における提案技術が、 N の値に関係なく静的 LoRaWAN の場合よりも信頼性の高い近接検知を可能にすることを示している。ただし、 N を増やすことで CDA を向上させることが可能であるが、それにより近接検知の遅延が増加する可能性があることにも注意が必要である。

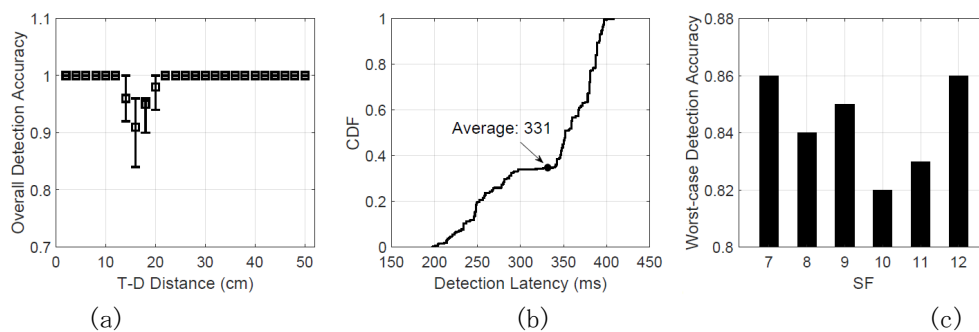


図 8：静的 LoRaWAN における近接検知技術に関する性能評価の結果。
(a) 全体的な検知精度。(b) 検知遅延。(c) 最悪の場合の検知精度。

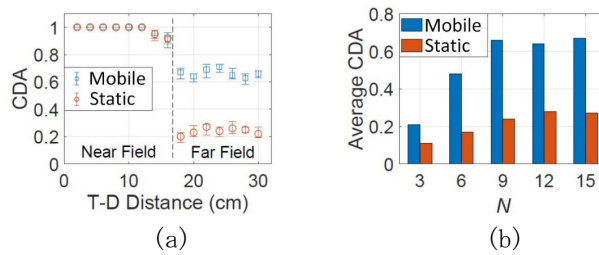


図9：移動する LoRaWAN 端末デバイスに関する近接検知技術の評価結果。
(a) 検知精度。(b) 平均検知精度。

2-3 移動物体の存在下での LoRaWAN による広域測位技術の開発と性能評価

本研究では、モバイル LoRaWAN のケースで端末デバイスの位置検出を実現するために、LoRaWAN ゲートウェイを1つだけ使用するフィンガープリントベースの LoRaWAN 広域測位技術を開発した。

(1) CSI (channel state information) フィンガープリント

LoRaWAN 信号の安定した CSI データを抽出するために、以下の操作を取り入れる：デチーピング (dechirping)、高速フーリエ変換 (FFT: fast Fourier transform)、プリアンブルキャリブレーション、振幅計算のための位相回転補正、および位相推定のための2つのアンテナ間の位相差の利用である。パケット受信時、CSI は、パケットのプリアンブルの振幅と位相スペクトルを標準的なアップチープと比較することで取得される。プリアンブルは以下の計算の信頼できる基準となる。

振幅: このプロセスはデチーピングとプリアンブルへの FFT 適用から始まる。これは、 $Y(f) = F[r(t)]$ として表され、最初の周波数ビンにピークが確認される。CSI の振幅は、受信したプリアンブルのピーク高さを標準的なアップチープのピーク高さで割ることで決定される。ピーク高さ推定への FFT 位相回転の影響を打ち消すために、周波数 f および $f - BW$ での位相回転を補正する。これは、 $Y(f) \cdot e^{-j\phi}$ と $Y(f - BW)$ の合計を $\phi \in [0, 2\pi]$ の範囲で最適化することで実現し、ピーク高さを正確に推定する。

位相: まず、2つのアンテナからのピークの位相を計算する。その後、2つのアンテナ間の位相差を導出し、時間を通じてより安定した位相データを取得する。これらの操作により、安定した CSI データの抽出が保証されるだけでなく、同じ免許不要周波数帯で動作する他の無線システムからの干渉の影響も最小限に抑えられる。特に、隣接するゲートウェイからのセルエッジ干渉については考慮していない。

CSI フィンガープリント: Wi-Fi とは異なり、パケットが複数のチャンネルを占有するのにに対し、LoRaWAN パケットは毎回1つのチャンネルで送信される。8チャンネルで動作するゲートウェイを考慮すると、ノードは8つのパケットを送信するよう指示され、それぞれが別々のチャンネルで送信される。これにより、 2×8 の次元を持つフィンガープリントが得られ、8つのチャンネルにわたる2つのアンテナの周波数応答をキャプチャする。

(2) CSI 生成モデルと位置認識型拡散モデルの構築

高次元の CSI 表現を導出するために、複素数値オートエンコーダを開発した。エンコーダ Φ は、3つの複素数値全結合ブロックで構成されている。各ブロックの後には ReLU 関数を適用し、非線形性を導入することで、エンコーダが CSI データ内の高次の表現を効果的に捉えられるようにする。各レイヤーの次元は、前のレイヤーの次元の2倍になる。エンコーダ構造に並行して、デコーダ Ψ も3つの複素数値全結合ブロックで構成されている。デコーダは、エンコードされた表現から元の CSI データを再構築する。高次元のサイズから始まり、デコーダ内の各全結合ブロックは次元を半分に減少させ、最終的に元の CSI ベクトルを再構築する。デコーダ Ψ から再構築された CSI ベクトルを取得した後、L2 損失を計算する。これにより、複素数値オートエンコーダを訓練します。

位置認識型拡散モデルは、順方向と逆方向の2つのマルコフ連鎖で構成されている。順方向連鎖では、生データにノイズを加える代わりに、生の CSI ベクトルの高次表現である信号ベクトルを使用し、一連のノイズ付き信号ベクトルを生成する。逆方向連鎖では、ノイズ除去モジュールを通じてノイズを正確に引き算することが重要なタスクである。信号への位置効果を考慮し、このモジュールは、各時間ステップにおいて、ノイズ付き信号ベクトルとリンクベクトルの両方を入力として、ノイズを推定する。信号ベクトルとリンク

ベクトルを融合してノイズ推定を強化するために、アテンション層が組み込まれている。この推定されたノイズをノイズ付きベクトルから引くことで、次のノイズ除去ステップの入力を生成する。この反復プロセスは進行し、最終的に初期の信号ベクトルを回復する。新しい信号ベクトルを生成するには、2つの入力が必要である：リンクベクトルと、ガウス分布からサンプリングされたランダムノイズベクトルである。その後、逆方向のマルコフ連鎖を通じて、祖先サンプリングを適用する。

（３）LoRaWAN による広域測位技術に関する性能評価

提案した LoRaWAN による広域測位技術の性能評価には、図 1 に示す LoRaWAN テストベッドを使用する。90 個の LoRaWAN 端末デバイスに対する広域測位のために、3 個の LoRaWAN ゲートウェイを導入する。表 1 に示しているように、訓練データ比率によって 90 個の端末デバイスの位置に関する測定誤差の平均値を観察する。結果は、提案技術が端末デバイスの位置を 7 メートル未満の誤差で検出できること、そして、訓練データの比率を増やすことでこの誤差をさらに減少させることができることを示している。この実験結果は、本研究で提案した広域測位技術がモバイル LoRaWAN のケースで実現可能であることを証明している。

表 1：LoRaWAN 端末デバイスの位置測定誤差（単位：メートル）。

訓練データ比率	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
位置測定誤差	6.5	6.2	5.5	4.7	3.5

2-4 信号衝突下での LoRaWAN による近接検知・広域測位技術の開発と性能評価

本研究では、LoRaWAN 信号衝突下での近接検知・広域測位を実現するために 2 段階のアプローチを採用することを目指している。具体的には、信号衝突を解決する信号処理アルゴリズムを提案し、衝突から分離された目的の信号を使用して近接検知・広域測位を行う。特に、信号衝突の解決のために、以下のように複雑な計算をせずに、衝突信号の復調結果を振幅と周波数の観点から比較するだけの新しい手法を設計した。

（１）提案した LoRaWAN 衝突解決技術の概要

図 10 は、同一の拡散係数 (SF) を持つ非直交論理チャネルで送信される 3 つの信号 (SIG-1、SIG-2、SIG-3) 間の衝突を解決する提案技術の基本構造を示している。提案技術はまず SIG-1 のデータ非含有部分を基に信号の同期と復調ウィンドウの調整を行う。その後、SIG-1 の信号プリアンブルに関する復調結果の振幅情報を活用して、衝突から SIG-1 を分離する。続いて、提案技術は復調結果の振幅および周波数を解析することで、SIG-2 と SIG-3 を同時に認識する。これら 3 つの信号の復調結果を抽出し、それぞれの信号を復号するために標準的な LoRaWAN 信号のデコーディングパイプラインに転送する。なお、提案技術は事前に衝突する信号の数を知る必要はない。より多くの信号を含む衝突を解決するために、提案技術は最初に SIG-1 を処理し、その後他の信号を同時に復調するという類似の操作を行う。

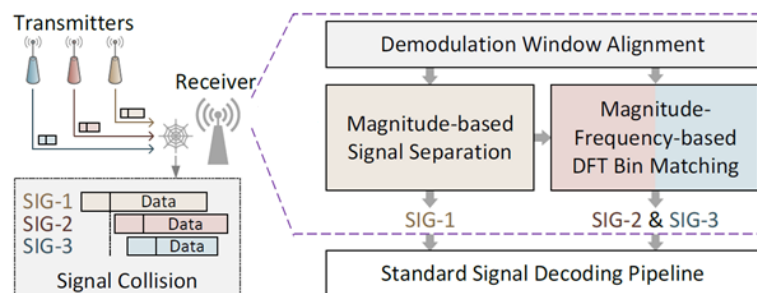


図 10：提案した LoRaWAN 衝突解決技術の概要。

（２）復調ウィンドウの調整

[11]–[13]で採用されているような単一の LoRaWAN チャーブに対する繰り返しの LoRaWAN 復調操作を行う代わりに、提案技術は複雑な DFT (discrete Fourier transform) 手法の冗長な使用を回避するためにワンショット復調を採用する。そのためには、ワンショット復調を進める各復調ウィンドウの位置を慎重に決定

する必要がある。SIG-1 のプリアンブル、同期ワード (SW: sync word)、フレーム開始デリミタ (SFD: start frame delimiter) が明確であると仮定した場合、提案技術はまず標準的な LoRaWAN 復調操作を適用して SW フィールドを検出する。その後、SFD フィールドをスキップし、以降の復調ウィンドウを順次設定する。この方法により、SIG-1 の各チャープが復調ウィンドウと整列し、そこで 3 つの信号に対してワンショット復調が適用される。

(3) 振幅に基づく信号分離

SIG-1、SIG-2、および SIG-3 間の衝突ケースにおいて、提案技術は最初に SIG-1 を衝突から分離し、その後復号する。提案技術は、SIG-1 のプリアンブルが他の信号によって汚染されていないという事実に基づいてこれを達成する。具体的には、SIG-1 のプリアンブルを検出した後、復調操作によって生成されたプリアンブルチャープに関連する DFT ビンの振幅情報を活用する。LoRaWAN 信号のチャープは理論的には同じ電力を持つため、対応する DFT ビンの振幅も同一になる。したがって、図 11 に示されるように、提案技術は SIG-1 のプリアンブルチャープに対応する DFT ビンの振幅 (m_3) を基準として使用する。その後、データ部分の DFT ビン ((m_3, f_2) 、 (m_3, f_3) 、 (m_3, f_4)) を検索し、基準振幅と等しい振幅を持つビンを SIG-1 の復調結果として認識する。

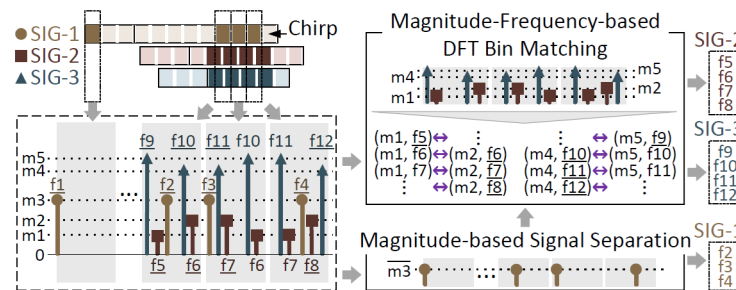


図 11 : DFT ビンの振幅と周波数情報に基づく信号 SIG-1、SIG-2、および SIG-3 の分離。
それぞれの DFT ビンは (ビン振幅、ビン周波数) として表される。

(4) 振幅周波数ベースの DFT ビンマッチング

SIG-1 の DFT ビンを抽出した後、提案技術はそれらを衝突から除去し、続いて残りの DFT ビンを SIG-2 と SIG-3 の間で識別する操作を開始する。提案技術はまず、残りの DFT ビンの振幅を観察する。図 12 に示されるように、SIG-2 と SIG-3 が互いに干渉している場合、各復調ウィンドウ内の復調結果には異なる振幅 (m_1 、 m_2 、 m_4 、 m_5) を持つ 4 つの DFT ビンが含まれる。これは、SIG-2 と SIG-3 が通常、異なる信号強度と復調ウィンドウとの異なるずれパターンを特徴としているためである。この事実に基づき、提案技術は DFT ビンをその振幅に応じて 4 つのグループに分類する。このようにして、同じグループ内の DFT ビン (例: (m_1, f_5) 、 (m_1, f_6) 、 (m_1, f_7)) の振幅は同一であり、他のグループの振幅とは異なる。また、各グループ内の DFT ビンは時間領域での出現順に並べられる。取得したビングループに基づき、提案技術は次にグループマッチングを行い、それぞれ SIG-2 および SIG-3 の DFT ビンを認識する。図 11 に示される SIG-2 と SIG-3 の衝突ケースでは、SIG-2 と SIG-3 は異なる信号持続時間を持っている。そのため、それぞれに関連付けられる DFT ビンの数は異なる。この違いを利用して、提案技術は同じ数の DFT ビンを持つビングループ (例: $(m_1, \cdot)$ および $(m_2, \cdot)$ のグループ) をビンクラスターとしてマッチングする。この方法で、SIG-2 と SIG-3 の衝突は 2 つの個別のビンクラスターに分離される。

(5) LoRaWAN 衝突解決技術に関する性能評価

提案技術の性能評価のため、市販の LoRaWAN 端末デバイスと HackRF One ソフトウェア無線機 [8] を用いて、現実世界での LoRaWAN テストベッドを構築した。具体的には、10 個の Dragino LoRa シールド [3] を送信機として使用し、1 個の HackRF One を受信機として使用している。この実験設定は、既存のアプローチで一般的に採用されている 2~12 の信号を同時に送信するケース [11] - [13] と一致している。図 12 (a) は、異なる拡散係数 (SF) 設定下での各ソリューションの計算オーバーヘッドを示している。提案技術は、すべてのベンチマークソリューションの中で最も軽量のソリューションである [13] と比較しても、衝突解決に必要な操作

が少ないことがわかった。これは、提案技術が衝突するすべての信号に対してワンショット復調操作を採用していることによるものである。また、提案技術が受信機で観測された衝突から各信号をどれだけ効果的に復調および復号できるかを評価する。対象となる指標はチャープ誤り率（CER: chirp error rate）である。CER は、誤って復号されたチャープの数と受信されたチャープの総数との比率を示す。図 12 (b) から、[12] が最小の CER を達成しており、提案技術は[12]よりもわずかに大きな CER を導入していることがわかった。

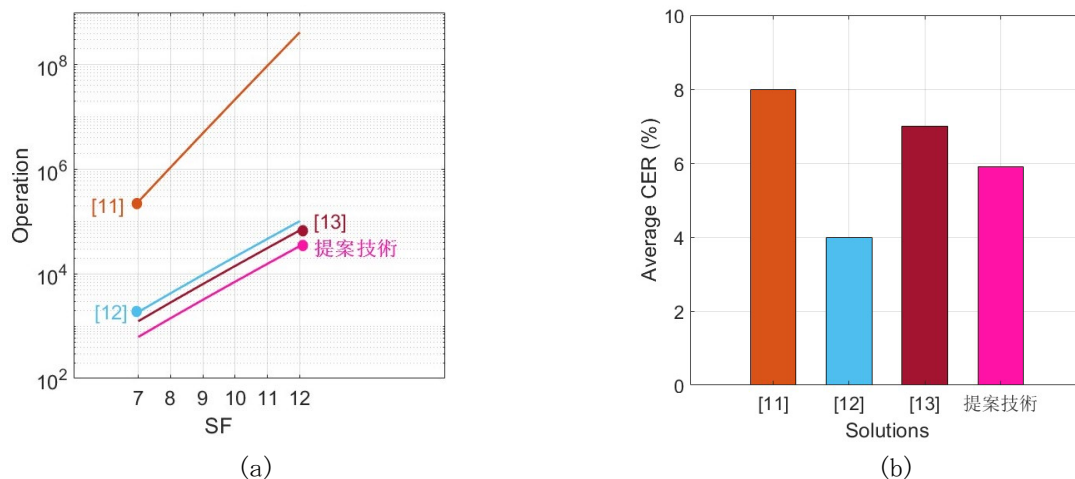


図 12 : LoRaWAN 衝突解決技術に関する性能評価の結果。

(a) 計算オーバーヘッド。(b) チャープ誤り率。

3 まとめ

本研究では、IoT デバイスによるユビキタスセンシングのために、LoRaWAN に基づく無線ネットワーク技術を対象とした新たな近接検知・広域測位技術を創出した。実験結果は、提案した技術が移動物体や信号衝突の存在下でも実行可能で信頼できることを証明している。本研究に基づいて、将来の研究の方向性の 1 つは、世界的な情報通信技術の応用事例に注目し、提案した近接検知と広域測位技術を活用して、LoRaWAN に基づく新たな IoT アプリケーションを開発することである。

【参考文献】

- [1] Z. Sun, H. Yang, K. Liu, Z. Yin, Z. Li, and W. Xu, "Recent Advances in LoRa: A Comprehensive Survey," ACM Transactions on Sensor Networks, Vol. 18, No. 4, pp. 1-44, November 2022.
- [2] C. Li and Z. Cao, "LoRa Networking Techniques for Large-scale and Long-term IoT: A Down-to-top Survey," ACM Computing Surveys, Vol. 55, No. 3, pp. 1-36, February 2022.
- [3] Dragino Arduino Shield featuring LoRa technology. [Online]. Available: <https://www.dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html>.
- [4] Dragino DLOS8N Outdoor LoRaWAN Gateway. [Online]. Available: <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/225-dlos8n.html>.
- [5] IBM MCCI LoRaWAN LMIC Library. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/mcci-lorawan-lmiclibrary/>.
- [6] The Things Network - LoRaWAN Network Server. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/marketplace/product/professionalnetwork-server>.
- [7] Constantine A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design. 4th ed., Wiley, 2016.
- [8] Great Scott Gadgets HackRF One software-defined radio. [Online]. Available: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/>.
- [9] VERT900 Antenna. [Online]. Available: <https://www.ettus.com/all-products/vert900/>.
- [10] LoRa Alliance, "RP002-1.0.0 LoRaWAN Regional Parameters," Whitepaper, 2019.

- [11] X. Xia, Y. Zheng, and T. Gu, “FTrack: Parallel Decoding for LoRa Transmissions,” IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 28, No. 6, pp. 2573-2586, December 2020
- [12] Q. Chen and J. Wang, “AlignTrack: Push the Limit of LoRa Collision Decoding,” in Proceedings of IEEE ICNP, 2021.
- [13] S. Tong, J. Wang, and Y. Liu, “Combating Packet Collisions Using Nonstationary Signal Scaling in LoRa Networks,” in Proceedings of ACM MobiSys, 2020.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Toward Collision-Free LoRaWAN Communication under the Coexistence with Wi-Fi Networks	International Symposium on Computing and Networking	2024 年 11 月
MiWiL: LoRaWAN Packet Airtime Adaptation for Better Coexistence with Wi-Fi Networks	International Conference on Emerging Technologies for Communications	2024 年 11 月
Toward Reliable Detection of Close Physical Contact in Mobile LoRaWAN	International Conference on Emerging Technologies for Communications	2024 年 11 月
Toward Improved Energy Fairness in CSMA-based LoRaWAN	IEEE/ACM Transactions on Networking	2024 年 10 月
Multiple Access in Large-Scale LoRaWAN: Challenges, Solutions, and Future Perspectives	IEEE Consumer Electronics Magazine	2024 年 9 月
CoWiL: Combating Cross-Technology Interference in LoRaWAN	International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN) Workshop – Smart City Communication and Networking	2024 年 7 月
Toward Resilient LoRa Communication under Wi-Fi Interference	IEEE International Conference on Consumer Electronics – Taiwan	2024 年 7 月
TONARI: Reactive Detection of Close Physical Contact using Unlicensed LPWAN Signals	ACM Transactions on Internet of Things	2024 年 4 月