

# エネルギー効率と計算の軽量性に配慮した LoRaWAN における信号衝突の解決に向けた研究

九州工業大学 大学院情報工学研究院

シャオ チョンロン

## 1. はじめに

長距離広域ネットワーク (LoRaWAN: Long-range wide area network) は、スマートグリッド、資産追跡、接続型農業などの IoT (Internet of Things) ソリューションとして主要な選択肢を代表している [1]-[3]。LoRaWAN は多くの産業用 IoT アプリケーションで使用が容易で、迅速に展開できることが証明されている。また、オープンソースソフトウェアであるため、学術研究者が現在の LoRaWAN アーキテクチャを改良する新しいアイデアを実装することも容易である。LoRaWAN は、端末デバイス、ゲートウェイ、ネットワークサーバー、アプリケーションサーバーの 4 つの要素で構成されている。端末デバイスは主にセンサーデータを収集し、それを無線でゲートウェイに送信する。ゲートウェイはブリッジとして受信データをバックエンドのネットワークサーバーに転送する。ネットワークサーバーは、重複データのフィルタリングなどの LoRaWAN 管理を行う。アプリケーションサーバーはデータを収集し、対応するアプリケーションを実現する。

LoRaWAN の重要な特徴の 1 つは、LoRa (LoRaWAN の物理層) 信号が異なる拡散係数 (SF: Spreading factor) で変調されている場合、多くのケースで直交可能であり、同じ物理チャンネル内でデコード可能であることである [4][5]。つまり、1 つの物理チャンネルが、異なる SF を持つ直交論理チャンネルでの同時 LoRa 送信に利用できる。たとえば、中心周波数 CF と帯域幅 BW を持つ物理チャンネルがある場合、SF7 と SF8 で変調された 2 つの LoRa 信号を、それぞれ {CF,BW,SF7} と {CF,BW,SF8} の直交論理チャンネルを介して同時にデコードできる。

しかし、直交論理チャンネルの利点にもかかわらず、現在の LoRaWAN では、同時 LoRa 送信が信号衝突やデコード失敗を頻繁に引き起こす [6]-[9]。これは主に、同じ物理チャンネル上に構築された非直交論理チャンネルの存在によるものである。特に、同じ SF を使用する端末デバイスは、同じ物理チャンネルへのアクセスに ALOHA プロトコルを採用している。これにより、端末デバイス間での信号衝突を避けるのが困難である。さらに、デバイスごとのチャンネルアクセス時間にデューティサイクル (例: ヨーロッパでは 0.1%、1%、10% [10][11]) の制限が適用されていても、多数の端末デバイスが共存し、大規模な信号衝突が発生すると、ネットワーク全体のパフォーマンスが低下する可能性がある。[12]によると、信号衝突の結果として、ネットワーク容量は理論的最適値の 18%にまで低下することが統計的に示されている。このような背景の下、過去数年間にわたり、非直交論理チャンネルでの同時 LoRa 送信を可能にするためのさまざまな LoRa 信号衝突解決ソリューションが登場した [13]-[21]。これらのソリューションは、信号衝突を解決する可能性を示しているが、離散フーリエ変換 (DFT: Discrete Fourier transform) や信号サンプルの復元などの複雑な信号処理操作を冗長に実行するため、かなりの計算負荷を導入している。

この問題を軽減するために、本研究は非直交論理チャンネルでの同時 LoRa 送信を実現するための、より軽量の信号衝突解決アプローチである LiLoRa の設計を紹介する。LiLoRa の中心と

なるのは、衝突したチャープの復調結果を、振幅と周波数の観点から単に比較するという新しい手法である。この手法では複雑な演算を必要としない。さらに、LiLoRa では、LoRa 信号の衝突が発生した場合、関係するすべての LoRa 信号の衝突チャープについて、単一の復調操作のみを実行する。理論的な分析と実験的な評価によれば、LiLoRa は複雑な信号処理操作を必要としないため、信号衝突解決のための計算負荷を大幅に削減することに成功している。一方で、LiLoRa は衝突信号のデコード性能を既存の研究と同等のレベルに維持している。

## 2. 先行研究

最近、LoRa 信号の非直交論理チャネルでの衝突解決に関する学術的な探求が、さまざまなシステムモデルとともに登場している。特に、LoRa 信号の衝突解決に特化した代表的かつ注目すべきソリューションについて簡単にまとめる [13]–[21]。LiLoRa のように、これらの解決策は LoRa 送信機の変更を必要とせず、単一アンテナの LoRa 受信機を使用して衝突解決を行う。具体的には、[13]で提案された Choir は、LoRa で使用される標準の DFT 操作よりも大きなサイズ (10 倍) の DFT 操作を使用して、送信機と受信機の周波数オフセットを活用し、衝突信号を分離する。衝突信号の異なる復調結果を直接区別するために、FTrack [14]、SCLoRa [15]、CoLoRa [16]、Pyramid [17]、CIC [18]、および AlignTrack [19]は、衝突信号の各シンボルの複数の部分に対して繰り返し DFT を実行する。さらに、LoRa の標準復調プロセスに加えて、NScale [20]は衝突信号をさらにカスタマイズされた復調スキームを適用して分析する。さらに、mLoRa [21]は、LoRa 信号の事前に知られている波形に基づくサンプル単位の信号復元技術を提案している。

これらのアプローチは LoRa 信号の衝突をうまく解決することができるが、衝突信号がどれだけうまく復調されるかに焦点を当て、採用された技術の複雑さについては考慮していない。その結果、これらの研究では複雑な信号処理アルゴリズムの冗長な実行により、かなりの計算負荷が導入されている。これらの既存のソリューションとは異なり、LiLoRa は信号復調性能とそれに伴う計算負荷の両方を考慮に入れることで、関連する研究コミュニティに新しい貢献をしている。

## 3. LoRa 信号の概要

チャープ拡散スペクトル (CSS: Chirp spread spectrum) は、LoRa 信号で使用されている変調方式である [22]。図 1 の左側のサブ図に示されているように、CSS ベースの LoRa 信号は複数のスライスで構成され、各スライスはチャープと呼ばれる。各チャープは、周波数領域で線形に増加する。BW/2 の周波数に到達すると、増加は  $-BW/2$  から再開する。単一の LoRa 信号について、すべての関連するチャープは、SF によって決まる同じ時間持続時間を持っている。SF は通常 7 から 12 の範囲で、チャープに含まれるデータビットの数を示す。特に、チャープはその初期周波数 (図 1 の左側のサブ図で  $f_1$ – $f_3$  など) でデータを符号化する。

信号の復調において、LoRa は複数の復調ウィンドウを利用し、それぞれがチャープに一致する。各復調ウィンドウ内で、LoRa はチャープと、 $-BW/2$  から  $BW/2$  まで広がる未変調のアップチャープの共役複素数であるローカルに生成された参照チャープとの掛け算を行う。この掛け算結果にダウンサンプリングと DFT を適用すると、図 1 の左側のサブ図に示すようなピ

ーク DFT ビンが現れ、その周波数インデックスはチャープの初期周波数（符号化されたデータ）を示す。

しかし、図 1 の右側のサブ図に示すように、非直交論理チャネルでの LoRa 信号の衝突（すなわち、同じ物理チャネルで同じ SF を使用している場合）は、関与する各信号のデータ復号失敗を引き起こす可能性がある。これは主に、各復調ウィンドウ内で複数の DFT ビンが現れ、LoRa がそれらに関連する信号を認識できないためである。

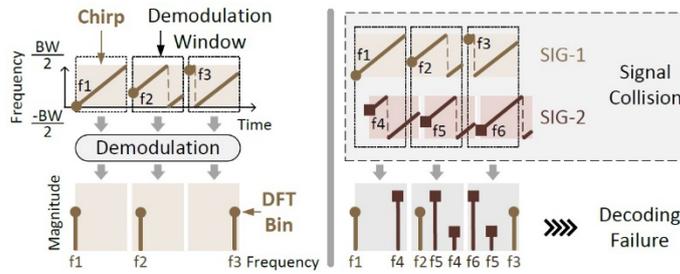


図 1. LoRa の復調における信号衝突なし（左）と信号衝突あり（右）の状況

#### 4. LiLoRa の設計

##### 1) LiLoRa の概要

図 2 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。LiLoRa 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 LoRa 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。

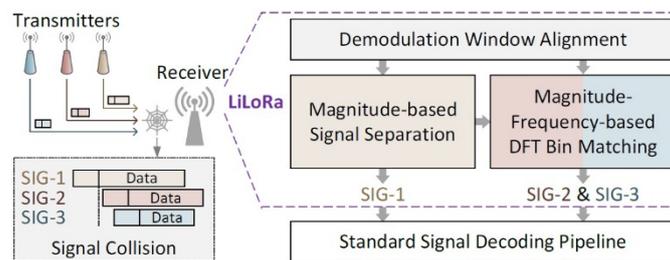


図 2. LiLoRa の概要

##### 2) 復調ウィンドウの調整

[14]–[20]で採用されているような単一の LoRa チャープに対する繰り返しの LoRa 復調操作を行う代わりに、LiLoRa は複雑な DFT 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 LoRa 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、LiLoRa は最初に SIG-1 を衝突から分離し、その後復号する。LiLoRa 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。LoRa 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 3 に示されるように、LiLoRa 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。

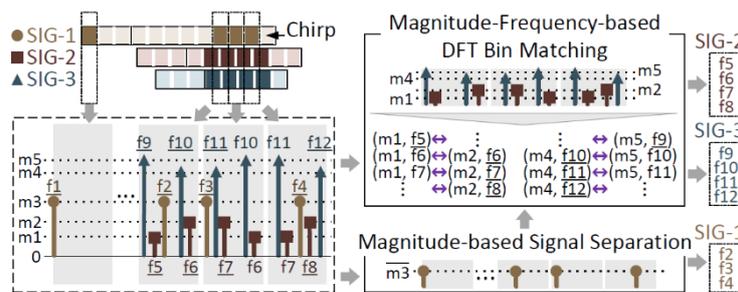


図 3. DFT ビンの振幅と周波数情報に基づく信号 SIG-1、SIG-2、および SIG-3 の分離

### 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、LiLoRa 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。LiLoRa はまず、残りの DFT ビンの振幅を観察する。図 3 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、LiLoRa 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、LiLoRa 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 3 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、LiLoRa 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. LiLoRa の実装

LiLoRa の性能評価のために、本研究では商用の LoRa 端末デバイスとソフトウェア定義無線機 (SDR: Software-defined radio) を使用して、実世界の LoRaWAN テストベッドを構築した。図 4 に示すように、LoRa 送信機として 10 個の Dragino LoRa シールドを Arduino Uno [23] にインストールし、LoRa 受信機として HackRF One SDR [24] を使用する。信号の受信と処理については、SDR は Intel Core i7-1250U プロセッサと 16GB のメモリを搭載したラップトップコンピュータに接続されている。信号送信機能は、MCCI LoRaWAN LMIC ライブラリに基づいて送信機で実装されている。SDR では、基本的な LoRa 信号受信パイプラインは、GNU Radio ライブラリの LoRa トランシーバ実装に基づいている。

本研究では、物体の遮蔽/反射や人間の動きによる予測不可能なチャネルフェーディングが発生する屋内外の環境で LoRaWAN テストベッドを構築した。図 4 に示すように、屋内環境はオフィスで、屋外環境は大学キャンパスである。受信機の周囲に送信機を任意の場所に配置し、各送信機から送信される信号が最小 SF (SF7) が使用されている場合でも受信機で復調できることを確認した。各送信機には一意の識別子 (T1~T10) が割り当てられ、これを各アップリンクパケットのペイロードの先頭を含めて受信機に送信する。送信機は受信機からのダウンリンク送信を要求しない。送信機と受信機間の距離は、屋内環境で 1~3 メートル、屋外環境で 40~70 メートルである。各送信機は ALOHA プロトコルに基づいて動作し、平均送信間隔 1 秒で信号を送信し、送信電力は 20 dBm である。送信される各信号は、長さが 40~50 バイトのランダムなペイロードを含む。特に指定がない場合、LoRa アップリンクチャンネル 63 を使用し、中心周波数 914.9 MHz、帯域幅 125 KHz の設定で進行する。LoRa の送信は SF8 および CR (coding rate) = 4/8 の設定で行われる。

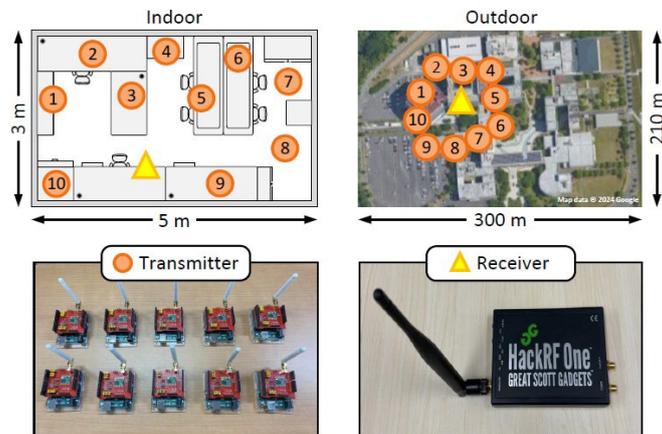


図 4. 実験環境および対応するテストベッドのトポロジー

## 6. LiLoRa に関する性能評価

図 4 に示された屋内および屋外の環境で、LiLoRa のパフォーマンスを評価する。パフォーマンス比較のため、既存のアプローチ (Choir [13]、FTrack [14]、SCLoRa [15]、CoLoRa [16]、Pyramid [17]、CIC [18]、AlignTrack [19]、NScale [20]、mLoRa [21]) をベンチマークソリューションとして選定する。

LiLoRa がベンチマークアプローチよりも軽量なソリューションであることを証明するために、計算オーバーヘッドを比較する。図 5 (a) は、異なる SF 設定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。LiLoRa は、すべてのベンチマークアプローチの中で最も軽量なソリューションである NScale でさえも、衝突解決に必要な操作が少ないことがわかった。これは、LiLoRa が衝突するすべての信号に対してワンショットの復調操作を行うことによるものである。さらに重要なのは、SF8 の場合、図 5 (b) に示すように、LiLoRa が FTrack、SCLoRa、CoLoRa、CIC、AlignTrack、mLoRa と比較して、衝突に関与する信号数が増えるにつれて、削減される計算オーバーヘッドの量が増加する点である。Choir、Pyramid、NScale と同様に、LiLoRa は原則として衝突における信号数 ( $m$ ) に制限されない。ここで使用される  $m$  は、計算オーバーヘッドの理論分析のためのもので、実験設定には関連しない。また、LiLoRa の軽量性を  $m = 3$  および SF8 の設定を例にとって定量化する。図 5 の結果に基づき、LiLoRa は既存アプローチと比較して計算オーバーヘッドを 50%~99%削減することがわかった。

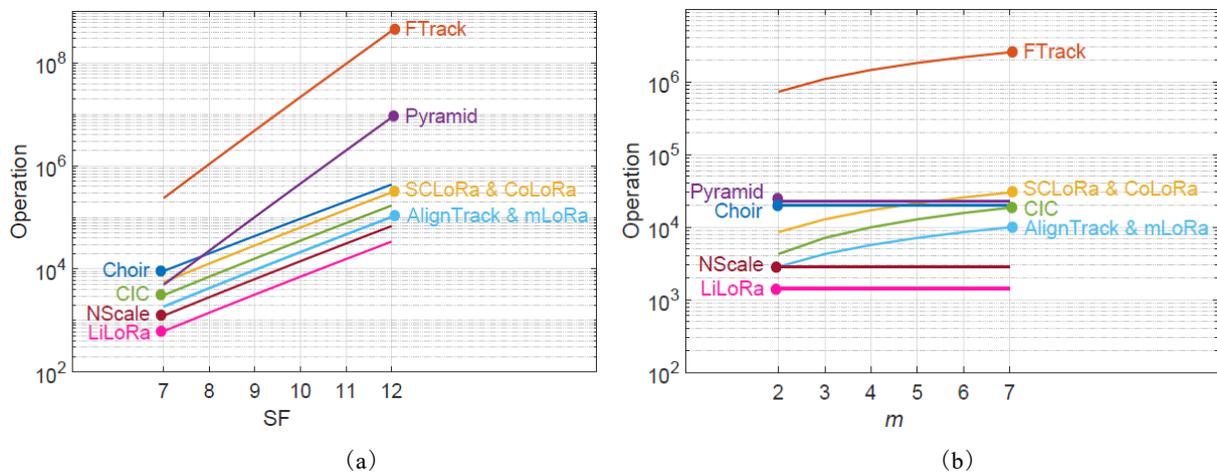


図 5. SF (a) と  $m$  (b) の異なる設定における各ソリューションの計算オーバーヘッド

さらに、LiLoRa をベンチマークソリューションと LoRa 信号衝突解決の観点から比較する。公平な比較のために、特定の数 ( $m$ ) の信号が含まれる衝突に焦点を当てる。例えば、 $m = 3$  の場合、図 6 (a) と (b) ではそれぞれ平均チャープ誤り率 (CER: Chirp error rate) と達成されたスループットを示している。ベンチマークソリューションの結果は、対応する研究から直接取得されている。なお、Choir [13]と CoLoRa [16]は CER について評価されておらず、CIC [18]はスループットについて評価されていない。また、すべてのベンチマークソリューションが屋内および屋外の両方のケースで評価されているわけではないため、LiLoRa の結果は屋内および屋外環境で得られた対応する値の平均として計算されている。

図 6 (a) から、AlignTrack [19]が最小の CER を達成しており、LiLoRa は AlignTrack 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。同様に、これらのソリューションによって達成されるスループットは、図 6 (b) に示すように同じオーダーの大きさである。AlignTrack は LiLoRa よりもわずかに (8%) 高いスループットを達成しているが、これは主に AlignTrack の評価において採用された実験設定 (例えば、信号送信間隔、衝突状況、SF、実験環境) の違いによるものである。これが、AlignTrack のコア技術が LiLoRa を大きく上回っていることを意味するわけではない。計算オーバーヘッドが LiLoRa によって削減されること(図

5に示されている)と相まって、LiLoRaがLoRa信号衝突解決において実現可能で優れていることが証明される。

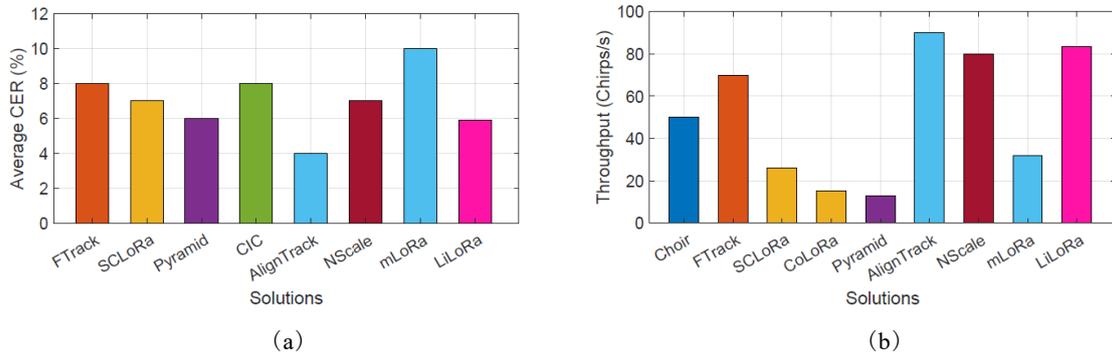


図 6. 各ソリューションの衝突解決性能の比較。(a) チャープ誤り率。(b) スループット

## 7. まとめ

本研究では、非直交論理チャネルでの LoRa 信号の同時送信を可能にする LiLoRa を提案した。LiLoRa は、既存のソリューションと比べて非常に軽量な方法を提供する。これは、衝突に関与する LoRa 信号のすべての衝突するチャープに対して、シンプルな一回のデモジュレーション操作を実行することによって実現されている。理論的な分析と実際の環境での評価により、既存のソリューションと比較して、LiLoRa は計算オーバーヘッドを大幅に削減しつつ、信号衝突解決のパフォーマンスを同等に達成できることが証明されている。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

## 参考文献

- [1] M. Jouhari, E. M. Amhoud, N. Saeed, and M. S. Alouini, "A survey on scalable LoRaWAN for massive IoT: Recent advances, potentials, and challenges," arXiv:2202.11082, pp. 1–30, February 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] 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.
- [4] 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, April 2018.
- [5] S. Yu, X. Xia, N. Hou, Y. Zheng, and T. Gu, "Revolutionizing LoRa gateway with XGate: Scalable concurrent transmission across massive logical channels," in Proc. of ACM MobiCom, 2024.
- [6] C. Shao, O. Muta, W. Wang, and W. Lee, "Toward ubiquitous connectivity via LoRaWAN: An overview

- of signal collision resolving solutions,” IEEE Internet of Things Magazine, vol. 4, no. 4, pp. 114–119, December 2021.
- [7] M. Mishra, D. Koch, M. O. Shahid, B. Krishnaswamy, K. Chintalapudi, and S. Banerjee, “OpenLoRa: Validating LoRa implementations through an extensible and open-sourced framework,” in Proc. of USENIX NSDI, 2023.
- [8] C. Shao and O. Muta, “When LoRaWAN meets CSMA: Trends, challenges, and opportunities,” IEEE Internet of Things Magazine, vol. 7, no. 1, pp. 90–96, January 2024.
- [9] C. Shao, O. Muta, Q. Du, K. R. Dandekar, and X. Wang, “Multiple access in large-scale LoRaWAN: Challenges, solutions, and future perspectives,” IEEE Consumer Electronics Magazine, vol. 13, no. 5, pp. 36–46, September 2024.
- [10] ETSI, “Short range devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1000 MHz; Part 2: Harmonised standard for access to radio spectrum for non-specific radio equipment,” Harmonised European Standard, EN 300 220-2 V3.2.1, June 2018.
- [11] The Things Network – Regional Parameters. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/>.
- [12] N. Abramson, “The ALOHA system: Another alternative for computer communications,” in Proc. of ACM November 17-19, 1970, Fall Joint Computer Conference, 1970.
- [13] R. Eletreby, D. Zhang, S. Kumar, and O. Yagan, “Empowering low-power wide area networks in urban settings,” in Proc. of ACM SIGCOMM, 2017.
- [14] 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.
- [15] B. Hu, Z. Yin, S. Wang, S. Wang, Z. Xu, and T. He, “SCLoRa: Leveraging multi-dimensionality in decoding collided LoRa transmissions,” in Proc. of IEEE ICNP, 2020.
- [16] S. Tong, Z. Xu, and J. Wang, “CoLoRa: Enabling multi-packet reception in LoRa,” in Proc. of IEEE INFOCOM, 2020.
- [17] Z. Xu, P. Xie, and J. Wang, “Pyramid: Real-time LoRa collision decoding with peak tracking,” in Proc. of IEEE INFOCOM, 2021.
- [18] M. O. Shahid, M. Philipose, K. Chintalapudi, S. Banerjee, and B. Krishnaswamy, “Concurrent interference cancellation: Decoding multi-packet collisions in LoRa,” in Proc. of ACM SIGCOMM, 2021.
- [19] Q. Chen and J. Wang, “AlignTrack: Push the limit of LoRa collision decoding,” in Proc. of IEEE ICNP, 2021.
- [20] S. Tong, J. Wang, and Y. Liu, “Combating packet collisions using nonstationary signal scaling in LoRa networks,” in Proc. of ACM MobiSys, 2020.
- [21] X. Wang, L. Kong, L. He, and G. Chen, “mLoRa: A multi-packet reception protocol in LoRa networks,” in Proc. of IEEE ICNP, 2019.
- [22] S. Corporation, “AN1200.22 LoRa modulation basics,” White Paper, Revision 2, May 2015.
- [23] Dragino Arduino Shield featuring LoRa technology. [Online]. Available: <https://www.dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html>.
- [24] Great Scott Gadgets HackRF One. [Online]. Available: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/>.