

チャープインデックス空間分割に基づく LoRa信号の誤検出確率低減手法

Chirp Index Grouping-Based LoRa Signal Detection

鶴見康平 蕪木碧仁 安達宏一
Kohei Tsurumi Aoto Kaburaki Koichi Adachi

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
Advanced Wireless & Communication Research Center, The University of Electro-Communications

1 まえがき

近年、省電力広域ネットワークの一種である LoRaWAN が注目されている。LoRaWAN の物理層には、チャープスペクトラム拡散 (CSS) 変調方式が用いられている。CSS では送信情報ビット列に基づき、チャープ系列を選択し、信号を時間的にチャープさせることにより帯域内で拡散する。受信機では、チャープ信号の逆拡散を行うことで、拡散利得を得ることができるため、雑音や干渉に対して高い耐性を有している。しかしながら、雑音などの影響により、受信機でチャープの検出誤りが発生した場合には、大幅に特性が劣化してしまう。近年、チャープ系列を複数のグループに分割し伝送することで、伝送効率を向上させる手法が提案されている [1]。本稿では、チャープインデックス空間を分割し、そのグループ番号を、筆者らが以前提案したパケット型インデックス変調 (PLIM) [2] により通知することで、チャープインデックスの誤検出を低減する手法を提案する。

2 LoRa 変調の概要

拡散率を SF とすると CSS シンボルは 2^{SF} チップから構成され、シンボル m を送信する時の第 l チップは以下のように表せる。

$$\varphi_m[l] = 1/\sqrt{2^{SF}} \exp(j2\pi((l+m)_{\text{mod}2^{SF}})^2/2^{SF+1}) \quad (1)$$

この時、受信信号 $r[l]$ は次式のようにになる。

$$r[l] = \varphi_m[l] + \sum_{m'=0}^{2^{SF}-1} w_{m'} \varphi_{m'}[l] \quad (2)$$

ここで、 $w_{m'}$ は AWGN を表す。受信機では $r[l]$ に対して基本チャープ $\varphi_m[0]$ による逆拡散を行い、離散フーリエ変換 (DFT) 処理を行う。これにより得られる第 n 周波数成分 $\mathcal{F}_n(\varphi_m)$ は次式で与えられる。

$$\mathcal{F}_n(\varphi_m) = \sum_{l=0}^{2^{SF}-1} r[l] \varphi_0^*[l] \exp(-j2\pi nl/2^{SF}) \quad (3)$$

受信機は $|\mathcal{F}_n(\varphi_m)|$ が最大となる $n \in \{0, 1, \dots, 2^{SF}-1\}$ を送信シンボルと判定する。しかしながら、雑音の影響により図 1 に示すような誤判定が生じる。必ずしも隣接するチャープへと誤るわけではないため、チャープインデックスへの情報ビット系列割当などでこの問題を解決するのは非常に困難である。

3 提案手法

PLIM では、周期的なパケット送信間隔を一定の時間スロットへと分割し、時間スロットと使用する周波数チャネルの組み合わせにより PLIM ビットを通知する。提案

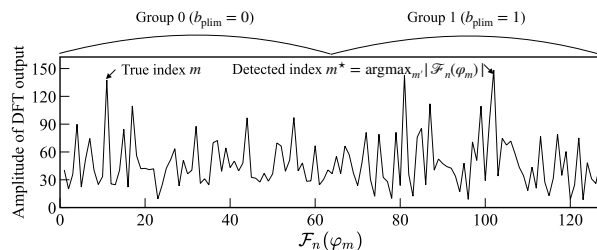


図 1 雑音によるチャープインデックスの誤検出とインデックス空間分割

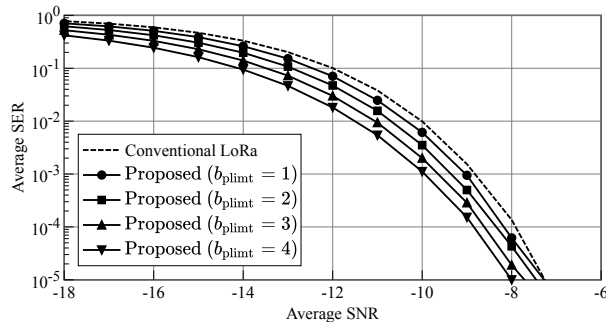


図 2 シンボル誤り率 (拡散率 $SF = 7$)

手法では、チャープインデックス空間を直交する部分空間へと分割し、その部分空間のインデックスを PLIM により伝送する (図 1)。この時、PLIM で通知可能なビット数を b_{plim} とすれば、部分空間の数は $2^{b_{\text{plim}}}$ 個となる。受信機で検出された PLIM ビットを活用して DFT の処理後の送信シンボルの探索領域の絞り込みを行う。

4 シミュレーション結果

提案手法の有効性を評価するため信号対雑音電力比 (SNR) に対するシンボル誤り率 (SER) を計算機シミュレーションを用いて評価した。1 シンボルあたりに用いる PLIM ビット数 (b_{plim}) をパラメータとした。図 2 に示す通り、提案手法を用いることによって通常の LoRa と比較して SER 特性を改善でき、 b_{plim} を増やすことでさらに大きな改善効果が得られることを確認した。

5 まとめ

本稿では CSS 変調のチャープインデックス空間を部分空間へと分割し、その部分空間に関する情報をパケット型インデックス変調 (PLIM) で通知することで、SER 特性を改善する手法を提案した。

謝辞 本研究の一部は JSPS KAKENHI Grant Number JP22K04086 によって行われた。参考文献 [1] Q. Yu, et al., "Group-Based CSS Modulation: A Novel Enhancement to LoRa Physical Layer," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, Mar. 2022. [2] K. Adachi, et al., "Packet-Level Index Modulation for LoRaWAN," *IEEE Access*, 2021.