

# 分数拡散率を用いた LoRa 信号における復調処理の検討

Demodulation Scheme in LoRa Signals Using Fractional Spreading Factor

齊藤 稜弥  
Ryoya Saito

安達 宏一  
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 はじめに

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) は IoT に代表される多端末かつ広域なシナリオの要求に応える通信技術として採用されている通信規格である [1]. LoRaWAN は拡散率を変更することで同じ周波数帯を用いて多元接続が可能である反面, 拡散率の変更により, データレートが低下してしまう問題がある. 本稿では, 拡散率を整数値から等価的な分数値に拡張することにより前述のデータレートの低下を抑制する FSF-LoRa (Fractional Spreading Factor-LoRa) に焦点を当て, 筆者らが以前提案した手法と比較して雑音耐性のある復調処理を提案し, その特性を計算機シミュレーションにより示す.

## 2 FSF-LoRa [2]

通常の LoRa 信号を特徴づけるパラメータである拡散率  $s$  と帯域幅  $W$  [Hz] に加えて, FSF-LoRa ではフラクショナル係数  $\rho$  ( $0 \leq \rho < 1$ ) を導入する. FSF-LoRa ではチップ長  $T_c = 1/B$  [sec], シンボル長  $T_s = 2^s \cdot T_c$  [sec] を  $1 + \rho$  倍に伸長した LoRa 信号を用いる. FSF-LoRa の受信機では, 信号の折り返しを避けるため  $(1 + \rho)T_c/q$  の間隔で受信信号をサンプリングする ( $q > 1$ ). シンボル  $m \in \mathcal{M} = \{0, \dots, 2^s - 1\}$  送信時の FSF-LoRa の等化低域通過信号は以下のように表される.

$$x_m[k] = \frac{1}{\sqrt{2^s}} \exp\left(j2\pi \cdot (1 + \rho) \frac{((k + qm) \bmod 2^s)^2}{q^2 2^{s+1}}\right) \quad (1)$$

## 3 提案手法

受信信号を  $\{c_m[k]\}$  とすると, デ・チャープならびに DFT 処理後の信号は以下ようになる.

$$d[n]_m := \sum_{k=0}^{q^2 s - 1} \underbrace{c_m[k] x_0^*[k]}_{\text{dechirped signal}} \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{(1 + \rho)}{q \cdot 2^s} nk\right) \quad (2)$$

この時, 従来の LoRa 信号では, 所望シンボル以外の周波数インデックス ( $n \neq m$ ) には雑音成分のみが現れるが, FSF-LoRa では, 自己干渉による影響が強くなるため, 信号検出前に補正を行う必要がある.

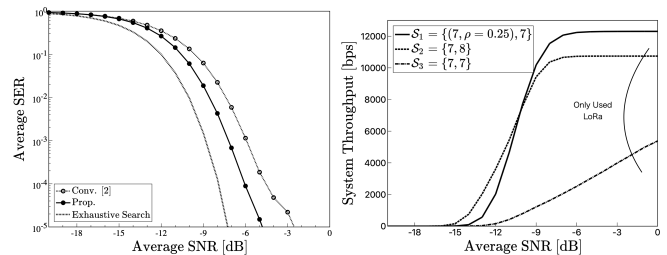
自己干渉での周波数インデックスと所望信号シンボル周波数インデックスとの距離を  $\Delta n_{si2} := \Delta n_{si3} - 2^s$ ,  $\Delta n_{si3} := \left\lfloor \frac{q \cdot 2^s}{(1 + \rho)} + \frac{1}{2} \right\rfloor$  と置く. これにより, 以下の 2 通りに示す通り, 提案する自己干渉補正を行う.

1.  $0 \leq n < q \cdot 2^s \cdot \rho / (1 + \rho)$  の時,

$$d_{\text{cor}}[n]_m = \frac{|d[n]_m| + |d[n + \Delta n_{si3}]|}{2} + |d[n + \Delta n_{si2}]| \quad (3)$$

2.  $q \cdot 2^s \cdot \rho / (1 + \rho) \leq n < 2^s$  の時,

$$d_{\text{cor}}[n]_m = |d[n]_m| + |d[n + \Delta n_{si2}]| \quad (4)$$



(a) 平均 SER 特性

(b) システムスループット特性

図 1. シミュレーション結果

式 (3)(4) を用いて, 以下の通り送信シンボルを推定する.

$$\hat{m} = \operatorname{argmax}_{n \in \mathcal{M}} (d_{\text{cor}}[n]_m) \quad (5)$$

## 4 全探索復調

FSF-LoRa の性能の限界となる全探索復調では, 式 (6) に示す通り, シンボル毎に信号の時間系列の内積を取り, 最大値をとるシンボルを推定シンボルとする.

$$\hat{m} = \operatorname{argmax}_{j \in \mathcal{M}} |\langle c_m[k], x_j[k] \rangle| \quad (6)$$

## 5 計算機シミュレーション

2 端末がゲートウェイ (GW) へと信号を送信している AWGN 環境下での平均シンボル誤り率 (SER) 特性とスループット特性をそれぞれ図 1 に示す. この時, 1 パケットは 10 LoRa シンボルから構成されているものとし, 端末間の信号対干渉比 (SIR) は 0 [dB] とした. FSF-LoRa のフラクショナル係数とオーバーサンプリング係数は  $\rho = 0.25$  と  $q = 2$  を用いた. 図 1 (a) より, 提案手法を用いることで, 既存手法と比較して  $\text{SER} = 10^{-4}$  [dB] を達成するのに必要な所要 SNR をおよそ 1.5 [dB] ほど低減できていることが分かる. また, 全探索復調は  $(q \cdot 2^s)^2$  の計算量であるが, 提案した復調では  $(q + 1) \cdot 2^s$  の計算量まで削減されている. 図 1 (b) に示す通り, 提案手法は  $S_2$  のシステムと比較して約 14% スループットを向上できている. これは ( $s = 7, \rho = 0.25$ ) の FSF-LoRa は  $s = 8$  の LoRa に比べ周波数利用効率が高いためである. また, 2 端末が  $s = 7$  を用いる従来の LoRa では信号同士の干渉により SER 特性が  $10^{-1}$  付近でフロアを敷くため,  $S_3$  ではスループット特性が  $S_2$  のおよそ 50% に留まっている.

## 6 まとめ

本稿では, FSF-LoRa の新しい復調処理の提案を行った. 2 端末環境下での特性評価により, 既存の LoRa 拡散率と比較し, 約 14% スループットを向上できることを示した. 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.

### 参考文献

- [1] M. Jouhari, et al., "A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges," *IEEE Commun. Surv. & Tutor.*, vol. 25, no. 3, pp. 1841-1876, May, 2023.
- [2] 齊藤ら, "LoRa 信号における分数拡散率の検討および復調方法の提案," *信学技報*, vol. 123, no. 224, RCS2023-129, pp. 7-12, 2023 年 10 月.