

# クロックドリフト補償誤差に起因するパケット衝突回避法の検討

Probabilistic Transmission for Packet Collision due to Imperfect Clock Drift Compensation

蕪木 碧仁<sup>1</sup> 安達 宏一<sup>1</sup> 田久 修<sup>2</sup> 太田 真衣<sup>3</sup> 藤井 威生<sup>1</sup>  
Aoto Kaburaki Koichi Adachi Osamu Takyu Mai Ohta Takeo Fujii

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<sup>1</sup>  
Advanced Wireless & Communication Research Center, The University of Electro-Communications  
信州大学<sup>2</sup> 福岡大学<sup>3</sup>  
Shinshu University Fukuoka University

## 1 まえがき

モノのインターネット (IoT) 技術の発展に伴い、学術界および産業界において様々な IoT システムが近年検討されている [1]. 特に低コストで長距離通信が可能な省電力広域ネットワーク (LPWAN) が普及しつつある. 温度や湿度などの特定データを収集するシステムでは、観測データを周期的に送信する周期的トラフィックとなる [2]. 筆者らは以前、端末とゲートウェイ (GW) 間のクロックドリフトを活用した周期的トラフィック環境における無線リソース制御法を提案した [3]. 文献 [3] の手法では、GW で推定した端末のクロックドリフトおよび送信予定時刻を基に、端末のクロックドリフトの補償、パケット衝突回避可能な周波数チャネルおよび送信オフセット時間の割当てを行う. しかし、端末のクロックドリフトは確率的に変化するため、クロックドリフト補償時に小さな補償誤差が発生する. GW はこの補償誤差を把握困難なため、適切な無線リソース制御が出来ず、一部の端末のパケット配信率 (PDR) が著しく低下する問題がある. そこで本稿では、端末にパケット送信中止確率を導入し確率的にパケット送信を中止することで低 PDR となる端末数が減少することを計算機シミュレーションにより示す.

## 2 システムモデル

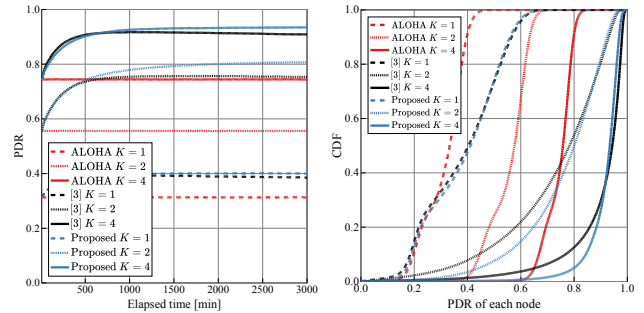
本稿では、1 台の GW を中心とした半径  $r$  [m] の円形の通信エリア内に  $I$  台の端末がランダムに固定配置された LoRaWAN を想定する. 各端末は直交する  $K$  個の周波数チャネルを使用可能とする. 端末  $i \in \mathcal{I}$  はランダムに設定された上り通信 (UL) パケット生成周期  $G_i^p \sim U(1, G_{\max}^p)$  [sec] に従い全端末で共通のデータ長の UL パケットを生起するものとする. ここで、 $G_{\max}^p$  [sec] は最大 UL パケット生成周期、 $U(a, b)$  は  $[a, b]$  の整数値を生起する一様乱数を表す. なお、端末では単位時間あたり正規分布に従うクロックドリフトが発生するため、実際の UL パケット生成周期は  $G_i^{p'}$  となる [4]. 端末  $i$  は生起した UL パケットを周波数チャネル  $k_i \in \mathcal{K}$  を用いて GW へ送信する. なお後述する送信中止確率により、一部 UL パケットの送信を中止する.

## 3 提案手法

本提案では、クロックドリフト補償誤差による連続的なパケット衝突を回避するため各端末にパケット送信中止確率  $p_i$  を導入する. ToA が長かつパケット生成周期が短い端末ほど連続的なパケット衝突が深刻となる. そこで、ToA およびパケット生成周期を考慮した次式で与えられる送信中止確率行列  $\mathbf{P}$  から端末  $i$  の ToA および UL パケット生成周期に対応した  $\mathbf{P}$  の成分を送信中止確率  $p_i$  として割り当てる.

$$\mathbf{P} = \alpha f(\mathbf{s} \otimes \mathbf{c}^T) \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$  は最大送信中止確率、 $\mathbf{s}$  は ToA 候補ベクトル、 $\mathbf{c}$  最大 UL パケット生成周期を 1 とした送信頻度ベ



(a) PDR (b) 端末毎 PDR の CDF 特性  
図 1: シミュレーション結果

クトル、 $\otimes$  は直積演算子、 $f(\mathbf{X})$  は行列  $\mathbf{X}$  の全成分を  $\mathbf{X}$  の最大値で正規化する関数を表す. なお、GW は文献 [3] にて提案したアルゴリズムにより、クロックドリフト補償および周波数チャネル  $k_i$  と送信オフセット時間  $T_i^d$  の適応的な割当てを行う.

## 4 計算機シミュレーション

本項では半径  $r = 895$  [m] の円形の通信エリア内に  $I = 1000$  台の端末を配置した. 最大 UL パケット生成周期を 10 分間、最大送信中止確率  $\alpha = 0.1$  とした. 図 1(a) に各手法の 10 分毎の平均 UL パケット配信率 (PDR), 図 1(b) に各端末の PDR の累積分布関数 (CDF) 特性を示す. 比較のために、純 ALOHA プロトコルを使用した “ALOHA”, 文献 [3] を使用した特性も示す. 図 1(a) より、提案手法は ALOHA と比較して、時間経過とともに平均 PDR を最大で約 25% 向上できていることがわかる. また周波数チャネル数  $K = 2$  の時、提案手法は文献 [3] に対して改善度が大きいことがわかる. これは、無線リソースの空き度合いと送信中止確率による PDR 低下のバランスが良いためである. 図 1(b) より、提案手法は [3] と比較して低 PDR となる端末数が減少していることがわかる. これは、確率的に一部パケットの送信を中止することで連続的なパケット衝突が回避されるようになったためである.

## 5 まとめ

本稿では、クロックドリフト補償誤差による連続的なパケット衝突を回避するため、端末にパケット送信中止確率を導入することを提案した. これにより、連続的なパケット衝突を回避し、従来手法と比較して低 PDR 端末数を減少させることができることを確認した.

謝辞 本研究開発は総務省 SCOPE(受付番号 JP205004001) の委託を受けて行われたものである. 参考文献 [1] Jouhari M., et al., “A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges”, *arXiv* 2022, arXiv:2202.11082. [2] V. Gupta, et al., “Modelling of IoT traffic and its impact on LoRaWAN”, in *Proc. GLOBE-COM*, Dec. 2017. [3] 蕪木ら, “LPWAN におけるクロックドリフトを活かしたリソース割り当て法,” 信学技法, 2022 年 8 月. [4] K. Tsurumi, et al., “Simple Clock Drift Estimation & Compensation for Packet-Level Index Modulation and its Implementation in LoRaWAN,” *IEEE IoTJ*, 2022.