

パケット型インデックス変調を用いる LoRaWAN の実装評価

Experimental Evaluation of Packet-Level Index Modulation in LoRaWAN

安達 宏一¹ 鶴見 康平¹ 蕪木 碧仁¹ 田久 修² 太田 真衣³ 藤井 威生¹
Koichi Adachi Kohei Tsurumi Aoto Kaburaki 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¹
Advanced Wireless & Communication Research Center, The University of Electro-Communications
信州大学² 福岡大学³
Shinshu University Fukuoka University

1 まえがき

筆者らは、LPWAN (Low Power Wide Area Network) の一つである LoRaWAN において、パケット型インデックス変調 (PLIM: Packet-Level Index Modulation) を提案した [1]. PLIM は、ノードから送信されるパケットの多くが周期的に生成され、時間軸において疎であることに着目し、既存の標準化技術を変更することなく伝送効率を向上させることが可能である. 各ノードは生成された情報に基づき、パケットの送信周波数チャネルおよび時間スロット (インデックス) を決定することで、パケット内で送信されるデータに加えて、インデックスにより情報を伝送する. 本稿では、PLIM を市販の LoRaWAN 端末およびゲートウェイ (GW: GateWay) に実装した結果について報告する. また安価なノードと GW 間のクロックドリフトに起因する時間インデックス誤検出を避けるための補償法 [2] も実装し、その効果を評価する.

2 時間インデックス検出法

PLIM では、ノード間での時間同期は必要ないが、GW とノード間では、時間インデックス検出のため同期を行う必要がある. 安価なノードではクロックドリフトによる時間同期ずれが生じる. しかしながら、同期ズレを補償するためにノードに複雑な処理を行わせることは難しく、また送信タイミング補正などの情報を GW からノードへと通知することも難しい. そのため、本検討においては、各ノードが初期パケットを必ず時間インデックス 0 で送信することで、GW と各ノード間の初期時間同期を確立する手法を用いる. 確実に初期時間同期を行うために、パケット 0 は GW からの ACK 信号を要求する Confirmed パケットとして送信する. 各ノードは GW から ACK 信号を受信するまで、時間インデックス 0 で Confirmed パケットを送信し続けるものとした. それ以降のパケットは ACK 信号を要求しない Unconfirmed パケットとして送信するものとする. ここからは、一般性を失うことなく任意のノードから送信されたパケット ($i > 0$) に関する処理を説明する. パケット i の時間インデックス推定値 \hat{q}_i は式 (1) のように求められる.

$$\hat{q}_i = \lfloor (t_i - (i \times T_{\text{frame}}) - \Delta \hat{T}_{\text{CD},j} - T_0) / T_{\text{slot}} \rfloor \quad (1)$$

ここで、 t_i [sec] はパケット i の受信時刻開始、 T_{frame} [sec] はパケットの送信間隔、 $\Delta \hat{T}_{\text{CD},j}$ [sec] は、GW が受信に成功したパケット j ($< i$) から求めたクロックドリフトの推定値、 T_0 [sec] はパケット 0 の受信開始時刻 (初期同期時刻)、 T_{slot} [sec] は時間スロット長、 $\lfloor \cdot \rfloor$ は床関数である. クロックドリフトの推定値 $\Delta \hat{T}_{\text{CD},i}$ は、GW において T_{frame} と T_{slot} が既知であるとし、式 (2) のように再帰的に求める ($\Delta \hat{T}_{\text{CD},0} = 0$) [2].

$$\Delta \hat{T}_{\text{CD},i} = \Delta \hat{T}_{\text{CD},j} + (\hat{T}_i - \hat{T}_j) - (i - j) \times T_{\text{frame}} \quad (2)$$

ここで、 \hat{T}_i はパケット i が送信されるフレーム開始時刻の推定値であり、次式のように求められる.



図 1: 実機の写真

表 1: PDR と時間インデックス検出率

	補償なし	補償あり
パケット配信率	98.0%	98.1%
時間インデックス検出率	8.1%	91.5%

$$\hat{T}_i \triangleq t_i - (\hat{q}_i \times T_{\text{slot}}) - T_{\text{off}} \quad (3)$$

ここで、 T_{off} [sec] はノードでのパケット生成などにより生じる予測不可能な遅延を吸収するパケット送信開始時間のオフセット値である.

3 PLIM の実機実装結果

ノードと GW に LoRaWAN 対応の 2 台の IoT センサモジュール LoRa mini-JP と Dragino LG-01 を用いて屋内実験を行なった [3]. なお、LG-01 の最大同時受信周波数チャネル数は 1 つであるため、今回は時間インデックスのみを用いる PLIM とした. 各ノードは $T_{\text{frame}} = 30$ [sec] 毎にパケットを生成するものとし、 $T_{\text{slot}} = 1$ [sec]、 $T_{\text{off}} = 200$ [msec] と設定した. ノードは、データパケットのペイロード部分に、ノード ID と使用する時間インデックス q_i を格納し送信する. GW では、パケットを復調し、ノード ID を確認した後、式 (1) により \hat{q}_i を求める. もし $\hat{q}_i \neq q_i$ となった場合には、その時間インデックスの検出に失敗したものとみなす.

表 1 にクロックドリフトを補償しない場合 (式 (1) において $\Delta \hat{T}_{\text{CD},j} = 0$ としたもの) と補償した場合のパケット配信率 (PDR: Packet Delivery Rate) と時間インデックス検出率を示す. 補償しない場合、端末と GW 間で生じる同期ずれの影響によって時間インデックス検出率が非常に低くなっていることが分かる. 一方で、補償した場合には、パケットの受信毎にクロックドリフトを推定し補償値を更新することによって、優れた時間インデックス検出率が達成できていることが分かる.

4 まとめ

本稿では、筆者らが以前提案したパケット型インデックス変調 (PLIM) を実機実装により、GW と端末間でクロックドリフトが生じるような環境でも、時間インデックスを高精度に検出可能であることを示した.

謝辞 本研究開発は総務省 SCOPE (受付番号 205004001) の委託を受けて行われたものである. 参考文献 [1] K. Adachi, et al., "Packet-Level Index Modulation for LoRaWAN," *IEEE Access*, 2021. [2] 鶴見ら, "パケット型インデックス変調におけるクロックドリフト補償法," 2021 総大 2021 年 3 月. [3] Dragino Technology Co., Limited.