

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の 推定法および補償法

鶴見 康平[†] 蕪木 碧仁[†] 安達 宏一[†] 田久 修^{††} 太田 真衣^{†††}
藤井 威生[†]

[†] 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, 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

^{††} 信州大学 電子情報システム工学科, 〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1

^{†††} 福岡大学 電子情報工学科, 〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1

E-mail: [†]{k.tsurumi,kaburaki,adachi,fujii}@awcc.uec.ac.jp, ^{††}takyu@shinshu-u.ac.jp, ^{†††}maiohta@fukuoka-u.ac.jp

あらまし 近年, IoT (Internet of Things) がさまざまな目的で使われている. IoT の要件である長距離通信と省電力を満たす通信方式として, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) が挙げられる. LoRaWAN において 1 パケットあたりで伝送できるデータ量を増大する手法として, パケット型インデックス変調 (PLIM: Packet-Level Index Modulation) が提案されている. PLIM では各端末において, 送信周波数チャネルおよび送信時間スロットの組み合わせ (インデックス) を選択しパケットを送信する. パケットを受信した GW は送信された周波数チャネルと送信スロットの組み合わせを推定し情報を得る. しかしながら一般的に, ゲートウェイ (GW : GateWay) と端末間のクロックの進み具合には違いがあるため, GW と端末間の同期ずれ (クロックドリフト) が生じ, 正しく時間スロットインデックスを推定出来ない可能性がある. 本稿では, クロックドリフトを考慮した時間スロットインデックス推定法を提案し, 計算機シミュレーションと実機での実験によってクロックドリフトの影響を抑制できることを示す.

キーワード LPWA, インデックス変調, 受信処理

Clock Drift Estimation and Compensation for Packet-Level Index Modulation

Kohei TSURUMI[†], Aoto KABURAKI[†], Koichi ADACHI[†], Osamu TAKYU^{††}, Mai OHTA^{†††}, and
Takeo FUJII[†]

[†] Advanced Wireless & Communication Research Center, The University of Electro-Communications,
1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan

^{††} Department of Electrical and Computer Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagao 380-8553, Japan

^{†††} Department of Electronics and Computer Science, Fukuoka University,

8-19-1, Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180, Japan

E-mail: [†]{k.tsurumi,kaburaki,adachi,fujii}@awcc.uec.ac.jp, ^{††}takyu@shinshu-u.ac.jp, ^{†††}maiohta@fukuoka-u.ac.jp

Abstract Recently, Internet-of-things (IoT) devices are used for various purposes. Long range wide area network (LoRaWAN) is one of the enabling communication systems that meet the IoT requirement. The authors have proposed packet-level index modulation (PLIM) to increase the number of bits conveyed by one data packet for LoRaWAN. In PLIM, each end node (EN) selects a combination of the frequency channel and the time slot, i.e., index, to transmit an additional information bit sequence. PLIM requires stringent clock alignment between an EN and the gateway (GW). Generally, frame synchronization misalignment (clock drift) between the GW and each EN deteriorates the time slot index detection. In this paper, we propose a clock drift estimation and compensation method. Computer simulation results and experimental results show that the proposed method can suppress the impact of clock drift.

Key words LPWA, Index modulation, Receiver processing

1. はじめに

近年, IoT (Internet of Things) がさまざまな目的で使われている [1]. IoT では長距離通信と省電力が重要である. これらの要件を満たす通信技術として, 省電力広域ネットワーク (LPWAN : Low Power Wide Area Network) がある. LPWAN の中で特に LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) はアンライセンスバンドを用いており, 導入コストが低く注目を集めている. LoRaWAN は チャープスペクトル拡散 (CSS : Chirp Spread Spectrum) 変調を採用しており長距離通信が可能である [2].

LoRaWAN では, 各端末 (EN : End Node) が, パケット送信時に複数の周波数チャネルの中からランダムに送信周波数チャネルを選択し, ALOHA プロトコルに基づきパケットをゲートウェイ (GW : GateWay) に送信する (日本では, パケット送信前に利用する周波数チャネルの空き状況をキャリアセンス (CS : Carrier Sense) により確認することが規定されている [3]). CS に失敗し多数の端末が同時に同じ周波数チャネルでパケットを送信した場合は, GW ではパケットの衝突が発生し, パケット配信率 (PDR : Packet Delivery Rate) の低下を招く. また LoRaWAN においてパケットの送信は送信比率 (DC : Duty Cycle) によって制限されるため, 各端末は送信回数を単純に増やすことはできない. 端末には機能的に制約があるので, 複雑でない方法でパケットあたりのデータ量を増やす必要がある. 文献 [4] ではシステム内に存在する端末間の同期を想定し, 送信する時間スロットによって追加の情報ビットを送信する IMMA (Index Modulation Multiple Access) が提案されている. IMMA では送信するデータを, 送信する時間スロットによって伝送する部分と, 直交振幅変調によって伝送する部分の二つに分割する. これによって周波数利用効率と BER 特性が向上することが明らかにされている. しかしながら, IMMA は時分割多元接続 (TDMA : Time Division Multiple Access) をベースとしているため, 端末間の同期が必要である, また, 時間方向へのインデックス割り当てしか検討されていない.

文献 [5] で著者らはパケット型インデックス変調 (PLIM : Packet-Level Index Modulation) を提案した. 端末はパケット生成の時間間隔を時間スロットに分割し, どの周波数チャネルと時間スロットでパケットを送信するかを決定する. そして GW ではどの周波数チャネルと時間スロットでパケットが受信されたかを検出して, パケットによるデータに加えて追加のデータを受信することが可能になる. IMMA と PLIM で異なる部分は前者は端末間での同期が必要だが, 後者では必要ではないという事である. これは, 複雑な処理を行うことが困難な IoT 端末にとって非常に重要である.

一般的に GW と端末の持つクロックの進み具合にはずれが生じる [6]. このクロック間に生じる進み具合の違い (クロックドリフト) によって GW において正しく時間スロットインデックスを推定出来ない可能性がある. 文献 [6] では, LoRa 端末における送信パケットの低オーバーヘッドのスケジューリングアルゴリズムを提案されている. 主な目的は, 端末間のクロックをいかに同期させるかにある. そのため, 端末は GW からの同期

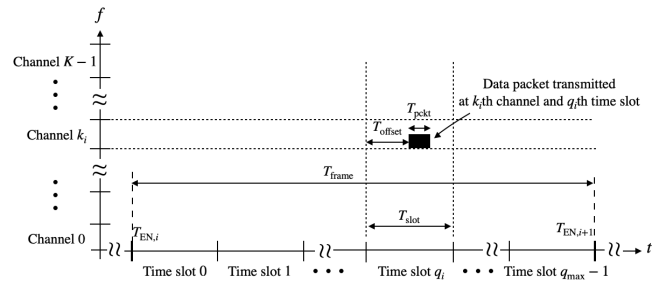


図 1 PLIM の概要

信号が必要のため集中制御型の通信システムを採用していない場合は非常に困難である.

PLIM では, 端末間の同期は必要ないが, 端末と GW との間で厳密な同期が必要である. 本稿では端末間の同期は目的とせず, PLIM に必要な各端末と GW 間に生じる同期ずれの解消方法に焦点を当てる. 本稿ではクロックドリフトを考慮した PLIM の時間スロットインデックス推定法および補償法を提案し, 計算機シミュレーションおよび実際に LoRaWAN の実機を用いて提案手法がクロックドリフトの影響を抑制できることを示す.

以下に本稿の構成を示す. 第 2 節で, PLIM の概要を説明する. 第 3 節では, クロックドリフトの測定およびモデル化を行い, 得られた結果から第 4 節ではクロックドリフトを考慮した PLIM について述べる. 第 5 節でシミュレーションと実験による提案手法の特性を評価する. 最後に第 6 節で本稿の結論を述べる.

2. PLIM

2.1 PLIM の動作について

本稿では 1 台の GW と端末における $i (> 0)$ 回目パケットの上りリンク通信を考える. 利用できる周波数チャネル数は K 個とする. 端末はパケットを時間間隔 T_{frame} [sec] で生成するものとする. 端末は図 1 の通り, 生成の時間間隔 T_{frame} を分割し複数の時間スロットを作成する. 時間スロットの時間長 T_{slot} [sec] は次式で与えられる [5].

$$T_{\text{slot}} = \alpha \times T_{\text{pkt}} \quad (1)$$

ここで $\alpha (\geq 1)$ は時間スロットのスケールファクタであり T_{pkt} [sec] はパケットの時間長である. この時, 利用可能な時間スロット数 q_{max} は以下のように与えられる.

$$q_{\text{max}} = \left\lfloor \frac{T_{\text{frame}}}{T_{\text{slot}}} \right\rfloor \quad (2)$$

ここで $\lfloor \cdot \rfloor$ は床関数である.

2.2 端末での送信について

端末で i 回目に送信するデータ系列 \mathbf{B}_i とすると, \mathbf{B}_i はパケットによるデータ系列 $\mathbf{B}_{\text{pkt},i}$ とインデックスによって送信するデータ系列 $\mathbf{B}_{\text{plim},i}$ に分割される. 端末は $\mathbf{B}_{\text{plim},i}$ に基づいて, パケットによるデータ量 $\mathbf{B}_{\text{pkt},i}$ を送信する周波数チャネル k_i と時間スロット q_i を決定し, 以下のタイミングで送信する.

$$t_{\text{EN},i} = t_{\text{EN},0} + (i \times T_{\text{frame}}) + (q_i \times T_{\text{slot}}) \quad (3)$$

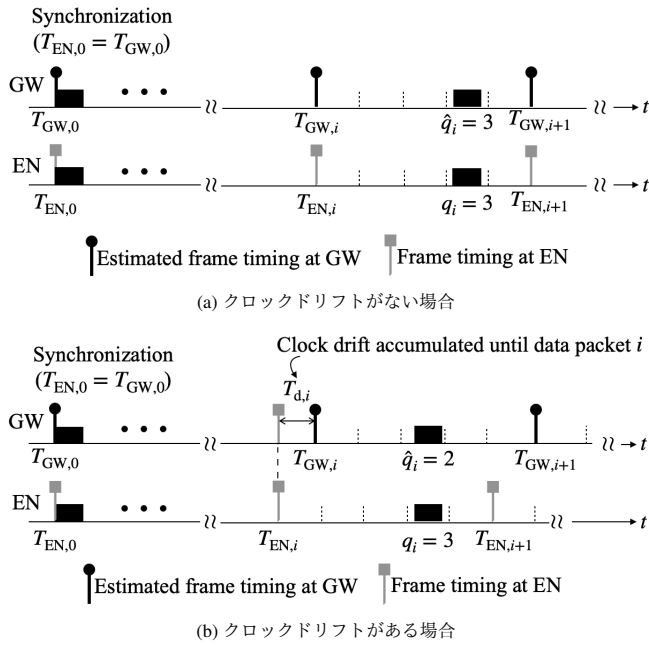


図2 クロックドリフトによって発生する誤検出 ($T_{d,i} < 0$ の場合)

ここで $t_{EN,0}$ [sec] は 端末における最初の送信フレームの開始時刻である。各端末は、GW と各端末間で既知の時間スロット Q_0 で最初の packets を送信することで、GW との初期同期補足を行う。

GW において正しくインデックスが検出された場合、各端末からは packet によって伝送されるデータに加え、インデックスによるデータ $B_{plim,i}$ を受信できる。

2.3 GW での受信について

GW では受信される周波数チャネル k_i がわかっている。また、 i 回目の受信において時間スロットインデックス q_i を以下のように推定する。

$$\hat{q}_i = \max\left(0, \min\left(q_{\max-1}, \left\lfloor \frac{(t_{GW,i} - T_{GW,i})}{T_{\text{slot}}} \right\rfloor\right)\right) \quad (4)$$

ここで $\max(\cdot)$ は引数の中で大きい値の方を返す関数、 $\min(\cdot)$ は引数の中で小さい値の方を返す関数である。 $t_{GW,i}$ は i 回目の packet 受信時刻である。 $T_{GW,i}$ は送信フレーム i の開始時刻であり、以下のように計算される。

$$T_{GW,i} = T_{GW,0} + i \times T_{\text{frame}} \quad (5)$$

2.4 クロックドリフトの影響について

クロックドリフトが原因で端末と GW の時間同期にずれが生じた場合、時間スロットインデックスの誤検出が発生する。本稿でクロックドリフトは GW と端末間の相対的な時間のずれを表すものとする。クロックドリフトによって初期同期補足を行っていても、時間が経過するにつれて同期は失われる。クロックドリフトが存在する場合、端末の送信タイミングは以下のように表される。

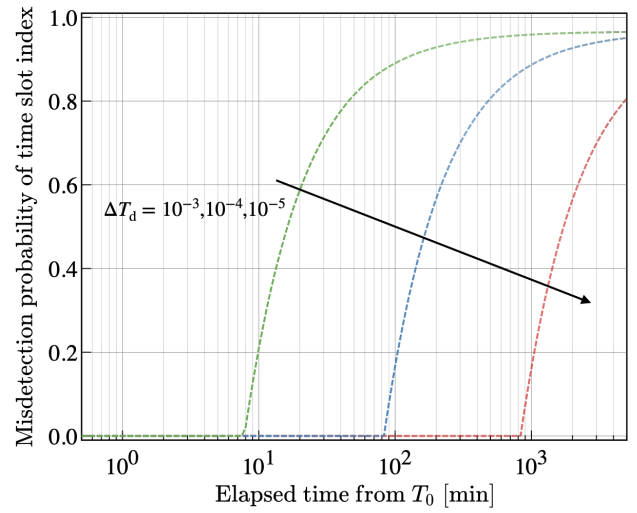


図3 クロックドリフトを補償しない場合の誤検出確率

表1 実験に用いたパラメータ

パラメータ	値
搬送波周波数 f_c	924.0 & 924.2 [MHz]
帯域幅 W	125 [kHz]
パケットの生成間隔 T_{frame}	100 [sec]
時間スロットの時間長 T_{slot}	1 [sec]
拡散率 S	10
キャリアセンスレベル	-80 [dBm]
キャリアセンス時間	5 [msec]

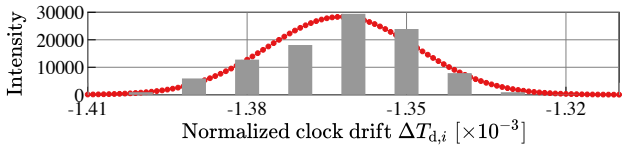
$$\begin{aligned} t_{EN,i} &= T_{EN,0} + (i \times T_{\text{frame}}) + (q_i \times T_{\text{slot}}) \\ &= T_{GW,0} + (i \times T_{\text{frame}}) + (q_i \times T_{\text{slot}}) + \int_{T_{r,0}}^{T_{r,i}} \Delta T_d(t) dt \quad (6) \\ &= T_{GW,i} + (q_i \times T_{\text{slot}}) + T_{d,i} \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta T_d(t)$ は単位時間あたりのクロックドリフトを表す。また i 回目の受信時のクロックドリフト $T_{d,i}$ は $\Delta T_d(t)$ が最初の packet 受信時刻 $T_{r,0}$ から i 回目の packet 受信時刻 $T_{r,i}$ まで蓄積した値となる。

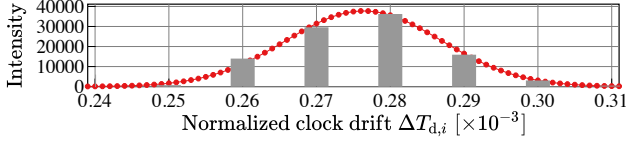
図3にクロックドリフトによる時間スロットインデックスの誤検出確率に与える影響を示す。 $T_{\text{frame}} = 30$ [sec] と $T_{\text{slot}} = 1$ [sec] と設定し簡単のために $\Delta T_d(t) = \Delta T_d$ 、すなわちクロックドリフトを一定とした。 $T_0 = T_{GW,0}$ から時間が経過するにつれてインデックスの誤検出確率が増加する、従って、GW で正しくインデックスを検出するためクロックドリフトによる同期のずれを補償する必要がある。

3. クロックドリフトのモデル化

クロックドリフトを測定するために、市販の LoRaWAN の GW (Dragino LG-01 [7]) と端末 (LoRa Mini Dev-JP) で屋内環境での実験を行なった。表1に実験に用いたパラメータを示す [5], [8]~[10]。実験では、 $T_{\text{frame}} = 100$ [sec] 毎に端末から packet を送信し、GW との時刻ずれを観測した。単位時間あたりのクロックドリフト $\Delta T_{d,i}$ を以下で定義する。



(a) 端末 1



(b) 端末 2

図4 クロックドリフトの測定結果

表2 正規化クロックドリフトの平均と分散および, p 値

	p 値	平均 μ [sec]	分散 σ^2 [sec ²]
端末 1	0.0214	-1.36×10^{-3}	1.98×10^{-10}
端末 2	0.68	0.28×10^{-3}	1.12×10^{-10}

$$\Delta T_{d,i} \triangleq \frac{(T_{GW,i} - T_{GW,i-1}) - T_{frame}}{T_{frame}} \quad (7)$$

実験から得られた $\Delta T_{d,i}$ について平均 μ , 分散 σ^2 は次のように与えられ, 端末毎の測定結果は表2に表される.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \Delta T_{d,i}, \\ \sigma^2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (\Delta T_{d,i} - \mu)^2 \end{array} \right. \quad (8)$$

図4に実験から得られた $\Delta_{d,i}$ のヒストグラムを表す. プロットされた点は表2の平均と分散から得られる正規分布 $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ を表す. 図から $\Delta T_{d,i}$ は近似的に正規分布とモデル化できる.

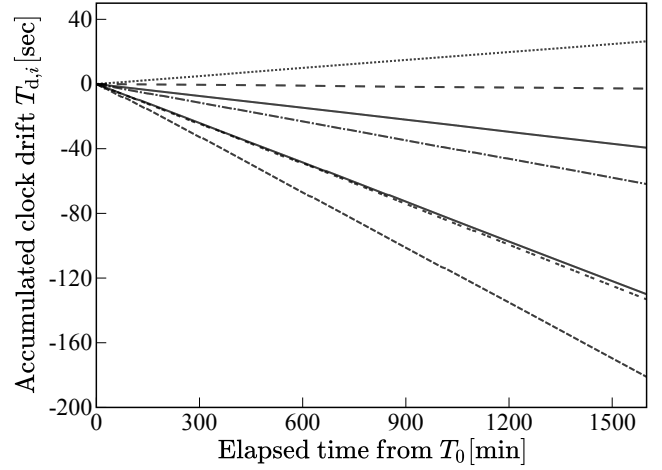
次に $\Delta T_{d,i}$ の正規分布によるモデル化が妥当であるかを確認する. ここではコルモゴロフ=スミルノフ検定を行い正規性を確かめた[11].

今回は, 検定において p 値が0.01以下の場合を有意であるとす. ここで p 値は仮説に反する統計量が観測される確率をいう. 端末におけるクロックドリフトの p 値は表2の通りでいずれの場合も帰無仮説を棄却しない.

以上よりクロックドリフトは $\Delta T_{d,i} \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ とモデル化できる. したがって, i 回目のパケット受信までに蓄積したクロックドリフトは次式で与えられる.

$$T_{d,i} = T_{d,i-1} + \int_{(i-1) \times T_{frame}}^{i \times T_{frame}} \Delta T_d(t) dt \quad (9)$$

ここで $T_{d,0} = 0$, $\Delta T_d(t) \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ とする. 図5に $T_{GW,0} = T_0$ から蓄積されるクロックドリフト $T_{d,i}$ を示す. クロックドリフトの値は平均値 μ に対して, 分散 σ^2 の値が十分小さいためおよそ線形的に変動しているとわかる. 以下では観測結果に基づいたGWにおけるクロックドリフトの推定法及び補償法を提案する.

図5 クロックドリフト $T_{d,i}$ [sec] の測定結果例

4. 提案手法

4.1 端末の動作

端末はパケット i を, 以下の時間 $t_{EN,i}$ で送信する.

$$t_{EN,i} = T_{EN,0} + (i \times T_{frame}) + (q_i \times T_{slot}) + T_{offset} \quad (10)$$

ここで, T_{offset} [sec] は各時間スロットにおける, 時間スロット開始時間からの送信タイミングのオフセットを表す. T_{offset} の効果でクロックドリフトが小さければその影響を吸収可能である.

4.2 GWの動作

GWにおいて, i 回目の受信前に $j (< i)$ 回目を受信に成功しているものとする. この時クロックドリフトの推定値 $\hat{T}_{d,j}$ から j 回目と i 回目の間に生じたクロックドリフトの推定値 $\hat{T}_{c,i}$ を以下のように計算する.

$$\hat{T}_{c,i} = \left(\frac{\hat{T}_{d,j}}{t_{GW,j} - T_{GW,0}} \right) \times (t_{GW,i} - t_{GW,j}) \quad (11)$$

次にGWはクロックドリフトを補償し時間スロットインデックスを以下のように検出する.

$$\hat{q}_i = \max \left(0, \min \left(q_{\max} - 1, \left\lfloor \frac{(t_{GW,i} - T_{GW,i} - (\hat{T}_{d,j} + \hat{T}_{c,i}))}{T_{slot}} \right\rfloor \right) \right) \quad (12)$$

続いて送信フレーム i の開始時刻を次のように推定する.

$$\hat{T}_{GW,i} = t_{GW,i} - (\hat{q}_i \times T_{slot}) - T_{offset} \quad (13)$$

その後, GWはクロックドリフトの推定値 $\hat{T}_{d,i}$ を以下のように更新する.

$$\hat{T}_{d,i} = \hat{T}_{d,j} + \{(\hat{T}_{GW,i} - \hat{T}_{GW,j}) - (i - j) \times T_{frame}\} \quad (14)$$

図6に提案したクロックドリフトの補償の動作概要について示す. クロックドリフトに対する対処をしない場合, 端末によっ

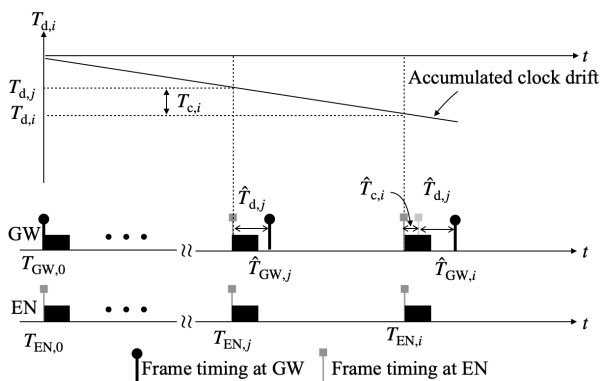


図6 $q_j = q_i = 0$ と設定した場合のクロックドリフト補償方法 ($\mu < 0$ かつ $\sigma^2 = 0$ の場合)

て送信される時間スロットインデックス q_i と GW で推定される時間スロットインデックスの推定値 \hat{q}_i 間にはクロックドリフトによるずれが生じる。提案手法によって \hat{q}_i を求める際に推定値 $\hat{T}_{d,j}$ と $\hat{T}_{c,i}$ を差し引き、クロックドリフトによるずれを補償する

また PLIM でクロックドリフトの推定精度を高めるため、一回目と二回目の送信で事前に決定した時間スロットで送信する。すなわち $q_0 = Q_0$ かつ $q_1 = Q_1$ と設定し、 Q_0 と Q_1 は端末と GW で既知であるとする。この時 GW において初期クロックドリフトは以下のように計算される。

$$\hat{T}_{d,1} = (t_{GW,1} - Q_1 \times T_{slot}) - (t_{GW,0} - Q_0 \times T_{slot}) - T_{frame} \quad (15)$$

5. クロックドリフトの推定法および補償法の実装

LoRaWAN の GW (Dragino LG-01) にクロックドリフト推定法および補償法を PLIM とともに実装し評価した。パケットの生成間隔は $T_{frame} = \{30, 130\}$ [sec] , 時間スロット長は $T_{slot} = 1000$ [sec] と設定した。また送信タイミングオフセットを $T_{offset} = \{0, 300, 500\}$ [msec] , 時間スロットインデックス検出への影響を確認するため周波数チャネル数を $K = 1$ と設定した。最初に GW と端末間での初期同期並びに、初期クロックドリフト $T_{d,1}$ を求めるために、端末では GW から ACK 信号が二回返ってくるまで Confirmed メッセージを送信し続ける。端末が GW からの ACK 信号を受信しなかった場合は、Confirmed メッセージを送り続けて初期クロックドリフトを計算し直す。

以下の図では実線がシミュレーションの結果を、丸のプロットは実機実験の結果を示し、時間スロットインデックスの誤検出が発生する送信回数の理論値を破線で表す。ここで理論値は端末毎に表 2 に与えられるパラメータ μ を用いて、時間スロットの境界を初めて超える送信回数から算出した値である。

5.1 送信タイミングのオフセットによる影響

図 7 にパケット生成間隔が $T_{frame} = 30$ [sec] とした場合の端末 1 と端末 2 に対して送信タイミングオフセット T_{offset} が時間スロットインデックスの誤検出確率に与える影響を示す。

端末では今までのパケット生成から送信開始まで、端末の処

理能力の限界によって約 200 [msec] かかる場合がある。従って以下では、 $T_{offset} = 300$ [msec] の場合と 500 [msec] のみの実験結果を示す。図 7 が示す通り、実機による実験結果は計算機シミュレーション結果とよく一致していることが分かる。さらに、理論的に求めた誤検出が起き始める時間とも立ち上がりがよく一致していることが分かる。また T_0 から時間経過に従い、クロックドリフトが蓄積されて誤検出確率が上昇する。これは蓄積されたクロックドリフトの値が時間スロットの境界を超えた場合に GW は時間スロットインデックスを誤検出するからである。端末 1 の場合は、 T_{offset} を十分に大きく設定することで、インデックスの誤検出が発生しづらくなるが端末 2 の誤検出確率は、 T_{offset} を大きく設定するほどインデックスの誤検出が発生しやすくなる。図 2 および表 4 から、正規化されたクロックドリフトの平均 μ は、端末 1 ($\mu_1 = -1.36$ [msec]) では負の値をとり、端末 2 ($\mu_2 = 0.28$ [msec]) では正の値を取る。したがって、 T_{offset} を大きく設定した場合、端末 1 では時間スロットの境界から遠ざかるので誤検出が発生しづらく、端末 2 では時間スロットの境界から近づいてしまうので誤検出が発生しやすい。

5.2 クロックドリフトの推定法および補償法の効果

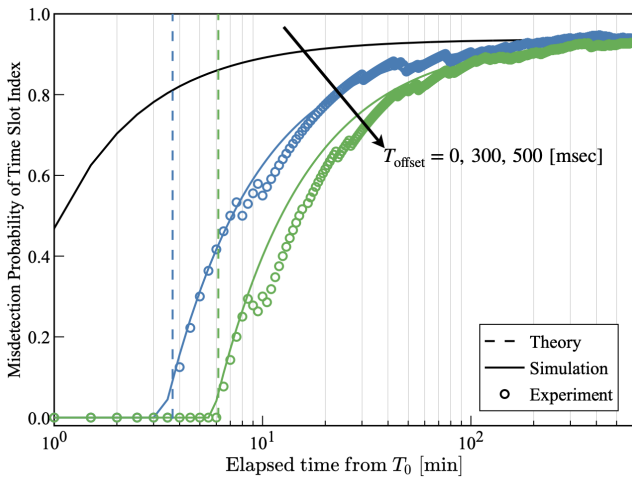
図 8 に、パケット生成間隔は $T_{frame} = \{30, 130\}$ [sec] と設定し、送信タイミングオフセットは $T_{offset} = 300$ [msec] とした場合における時間スロットインデックスの誤検出確率を示す。図 8 から実験結果とシミュレーション結果は近い値を取っていることがわかる。クロックドリフトが補償されていない場合、時間の経過とともに誤検出の確率が上昇する。ここで収束する誤検出確率が $T_{frame} = 30$ [sec] より $T_{frame} = 130$ [sec] の方が高いのは、 \hat{q}_i が時間スロットインデックスとしてとり得ない値をとった場合、式 (12) で示すように検出スロットインデックスの補正が入るのだが、パケットの生成間隔が長くなる、すなわち時間スロット数が多くなるとその補正の発生確率が下がるためである。

一方、提案するクロックドリフト推定法および補償法を適用した場合、誤検出確率は 0 に保たれる。

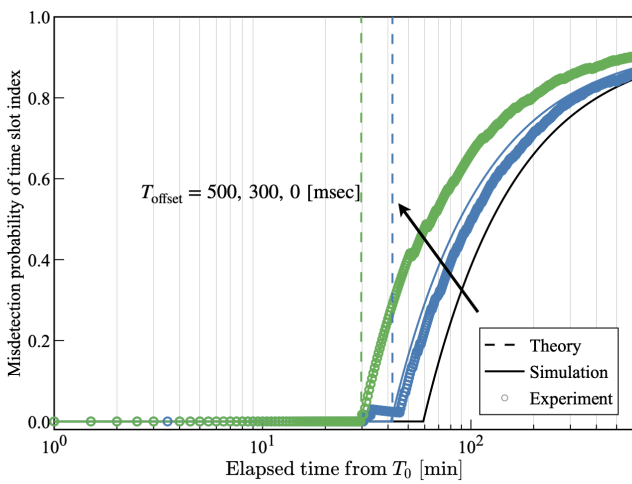
6. まとめ

PLIM では、端末がパケットを送信する時間スロットと周波数チャネルを決定し、GW ではどこで送信されたかを推定してパケットのデータに加えて、追加のデータを取得する。この時、各端末と GW の間には厳密な同期が必要である。しかし、LoRa の簡易な端末により、同期がずれてしまう。これによって時間スロットインデックスの誤検出が発生し、PLIM の性能を十全に発揮できない。本論文では、PLIM でのクロックドリフト推定法及び補償法を提案した。

まず LoRaWAN の実機を用いたクロックドリフトの測定を行い GW と各端末間のクロックドリフトは、分散が小さい正規分布に従う確率変数によってモデル化できると分かった。得られたクロックドリフトのモデルに基づき、クロックドリフトの推定法および補償法を用いた時間スロットインデックス検出方法を提案した。そして LoRaWAN の実機に、クロックドリフト推定法及び補償法を用いた PLIM を実装した。計算機シミュレー

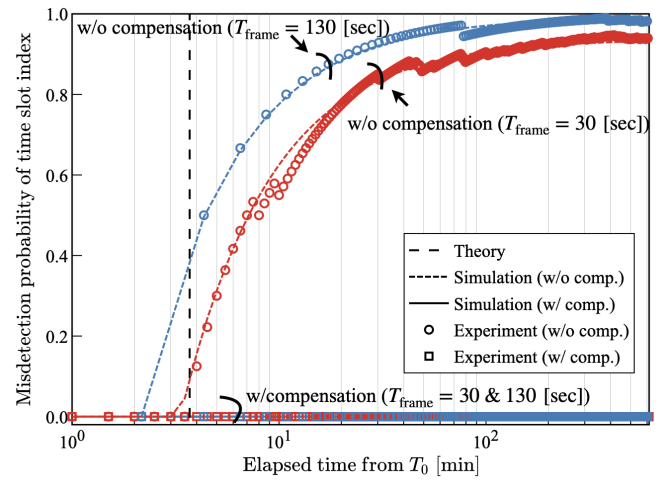


(a) 端末 1

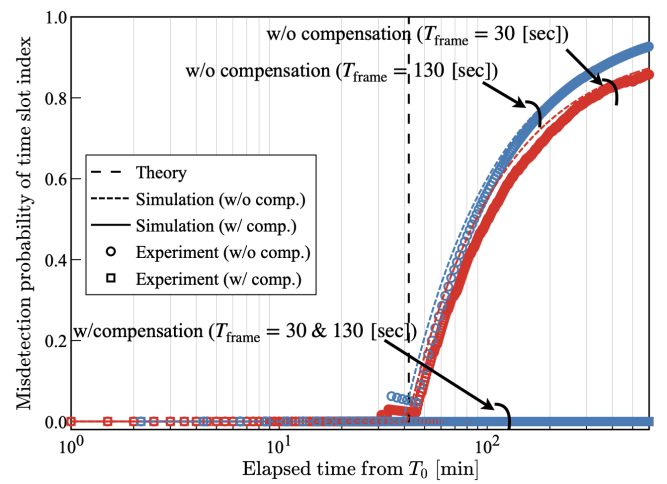


(b) 端末 2

図 7 パケットの生成間隔を $T_{\text{frame}} = 30$ [sec] とした場合における送信タイミングオフセット T_{offset} の誤検出確率に対する影響



(a) 端末 1



(b) 端末 2

図 8 送信タイミングオフセットを $T_{\text{offset}} = 300$ [msec] とした場合におけるクロックドリフトの推定法及び補償法の効果

シミュレーション結果と実験結果から、提案したクロックドリフト推定法及び補償方式により、クロックドリフトの影響を受けた場合も時間スロットインデックスを正しく検出できることが示された。

謝 辞

本研究は、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。

文 献

- [1] J. Haxhibeqiri, E. D. Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, "A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application," *Sensors*, vol.18, no.11, pp.1-38, Nov. 2018.
- [2] L. Vangelista, "Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol.24, no.12, pp.1818-1821, Oct. 2017.
- [3] 920MHz-BAND TELEMETER, TELECONTROL AND DATA TRANSMISSION RADIO EQUIPMENT ENGLISH TRANSLATION, ARIB STANDARD, "ARIB STD-T108 Version 1.3," [online]. Available: <http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/5-STD-T108v1 3-E1.pdf>
- [4] S. Althuni-bat, R. Mesleh, and T. F. Rahman, "A Novel Uplink Multiple Access Technique Based on Index-Modulation Concept," *IEEE*

Trans. Commun., vol.67, no.7, pp.4848-4855, Apr. 2019.

- [5] K. Adachi, K. Tsurumi, A. Kaburaki, O. Takyu, M. Ohta, and T. Fujii, "Packet-Level Index Modulation for LoRaWAN," *IEEE Access*, vol.9, pp.12601-12610, Jan. 2021.
- [6] J. Haxhibeqiri, I. Moerman, J. Hoebeke, "Low Overhead Scheduling of LoRa Transmissions for Improved Scalability," *IEEE Internet Things J.*, vol.6, no.2, pp.3097-3109, Apr. 2019.
- [7] LG01-S IoT Gateway featuring LoRa technology, Available: <http://www.dragino.com/products/lora/item/119-lg01-s.htm>
- [8] LoRa Alliance Technical Committee, "RP2-1.0.1 LoRaWAN Regional Parameters," 2020. [Online]. Available: <https://loralliance.org/resource-hub/rp2-101-lorawan-regional-parameters/>
- [9] A. Waret, M. Kaneko, A. Guitton, and N. E. Rachkidy, "LoRa Throughput Analysis With Imperfect Spreading Factor Orthogonality," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol.8, no.2, pp.408-411, Apr. 2019.
- [10] P. Series, "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz," [online]. Available: <https://www.itu.int/dms/pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-10-201908-I!!PDF-E.pdf>, 2019.
- [11] C. Lemoine, P. Besnier, and M. Drissi, "Investigation of Reverberation Chamber Measurements Through High-Power Goodness-of-Fit Tests," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 49, no. 4, Nov 2007