

複数周波数チャネル LoRaWAN における ACK を用いた 情報送信タイミングの割り当て方法の検討

陳 慕穎[†] 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: †{chen,adachi,fujii}@awcc.uec.ac.jp, ††takyu@shinshu-u.ac.jp, †††maiohta@fukuoka-u.ac.jp

あらまし 近年, IoT や M2M 通信の発展により, WSN 技術が産業, ヘルスケアなど多くの分野で応用されている。また至急性を要さず, データ量が大きくない情報の収集において, 低消費電力かつ多端末通信が可能な通信規格として LoRaWAN が注目されている。LoRaWAN の特徴により, 省電力な環境下においてもセンサ端末が情報を多く送信することにより高精度な観測及びデータ収集が可能になる。一方で LoRaWAN は分散型ネットワークであるため, 多数の端末が同時にデータパケットを送信した際にはパケット衝突が生じ, 情報が損失してしまう恐れがある。従って, パケット衝突を避ける送信間隔を調整することが重要である。本研究では, 複数パケットの同時送信により生じる情報損失を回避するために, 情報集約局 (FC) から端末へ返される ACK 信号を利用した送信間隔制御法を提案する。制御信号を送る代わりに, 2 つの ACK 受信窓が ACK を受け取るタイミングをそれぞれビット “0” とビット “1” を受け取ったものとする。よって, 低オーバーヘッドな適応的な送信周期の操作を可能とする。計算機シミュレーションにより, 提案手法は従来の手法と比較してパケット配信率 (PDR) を向上でき, さらに同程度の観測精度を達成しつつ送信パケット数を最大で 25% 程度削減できることを示す。

キーワード LPWA, LoRaWAN, WSNs, パケット配信率

Transmission Timing Control Using ACK Signal in LoRaWAN with Multiple Frequency Channels

Muying CHEN[†], Koichi ADACHI[†], Osamu TAKYU^{††}, Mai OHTA^{†††}, and Takeo FUJII[†]

[†] Advanced Wireless and Communication research Center (AWCC),

The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo 182-8585

^{††} Shinshu University, 4-17-1, Wakasato, Nagano, 380-8553

^{†††} Fukuoka University, 8-19-1, Nanakuma, Jonan, Fukuoka 814-0180

E-mail: †{chen,adachi,fujii}@awcc.uec.ac.jp, ††takyu@shinshu-u.ac.jp, †††maiohta@fukuoka-u.ac.jp

Abstract Long range wide area network (LoRaWAN) enables low-power and long-range communication suitable for wireless sensor networks (WSNs). Since LoRaWAN is a decentralized network, packet collision may occur if multiple nodes send data packets simultaneously. It is necessary to adjust the node's transmission interval properly to avoid such packet collisions. This paper proposes a transmission interval control strategy that takes advantage of an acknowledgment (ACK) signal from a fusion center (FC) to each node. Instead of transmitting a controlling signal, the FC selects one of two receiving windows for ACK packet transmission to indicate 0 or 1. Thus, it does not incur any overhead. The proposed method adaptively changes the transmission interval of each LoRaWAN node by utilizing the ACK signal returned from the FC. Computer simulation results show that the proposed method can reduce the number of transmitted packets while achieving the same observation accuracy level as conventional methods.

Key words LPWA, LoRaWAN, WSNs, PDR

$$T_{\text{wait}} = \left(\frac{1-G}{G} \right) \times T_{\text{pkt}}, \quad (1)$$

ここで, T_{pkt} はパケット長 [s] を表す, また各パケットの送信期間は Dwell Time を越さないものとする.

2.2 チャンネルモデル

本稿では, 各 FC と端末間の通信チャンネルとして距離に依存する伝搬損失と空間相関のあるシャドウイング損失を考慮する. また端末間の通信チャンネルでは距離に依存する伝搬損失と対数正規分布するシャドウイング損失を考慮する.

2.2.1 FC と LoRaWAN 端末間のチャンネルモデル

FC と LoRaWAN 端末間のチャンネル間の距離減衰には Cost231 Walfisch Ikegami モデル [7] を用いる. FC と端末 n 間の距離を r_n [m] とした時, パスロス $L_{\text{FC}}(r_n)$ [dB] は次式で与えられる.

$$L_{\text{FC}}(r_n) = L_0(r_n) + L_{\text{rts}} + L_{\text{ms}}(r_n) \quad (2)$$

$L_0(r_n)$ は GW と端末 n の距離 r_n における自由空間損失, L_{rts} は建物による回折と散乱による損失, $L_{\text{ms}}(r_n)$ は複数鏡面反射 (Multi-screen diffraction) による損失をそれぞれ表し, 次式で与えられる.

$$\begin{cases} L_0(r_n) = 32.4 + 20 \log r_n + 20 \log f_c \\ L_{\text{rts}} = -16.9 - 10 \log W + 10 \log f_c + 0.01 \\ L_{\text{ms}}(r_n) = L_{\text{bsh}} + k_a + 18 \log r_n + k_f \log f_c + 9 \log B \end{cases} \quad (3)$$

ここで, h_{FC} [m] は FC のアンテナ高, h_{ED} [m] は端末のアンテナ高, f_c [MHz] は搬送波周波数である. また, B [m] は建物間の距離, W [m] は道幅, L_{bsh} はシャドウイング利得であり, その他の係数 k_a と k_f は以下で与えられる.

$$\begin{cases} L_{\text{bsh}} = -18 \log(1 + (h_{\text{FC}} - h_{\text{ED}})) \\ k_a = 54 + 0.8(h_{\text{FC}} - h_{\text{ED}}) \\ k_f = -4 + 0.7(f_c/925 - 1) \end{cases} \quad (4)$$

2.2.2 LoRaWAN 端末間のチャンネルモデル

LoRaWAN 端末 n と端末 m 間のパスロス $L_{\text{ED}}(n, m)$ は式 (5) で表される.

$$L_{\text{ED}}(n, m) = 10\alpha \log_{10}(r_{n,m}) + \beta + 10\gamma \log_{10}(f_c) + \eta \quad (5)$$

ここで, $r_{n,m}$ は LoRaWAN 端末 n と m 間の距離, $\eta \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ シャドウイング損失をであり, σ [dB] はゼロ平均ガウス確率変数の標準偏差である. α は距離による経路損失の増加に関連する係数, β はパスロスのオフセット値に関連する係数, γ は周波数によるパスロスの増加に関連する係数である.

2.3 SNR と SIR

LoRaWAN では, 拡散率 (SF) を変更することによって, データレートおよび通信可能距離を柔軟に変更可能である. 拡散率 SF は 1 つの CSS シンボルで送信できるビット数を表し, SF が大きいほどデータレートは低くなるが, 受信感度が高くなる. 使用する周波数帯域を B [Hz] とすると, CSS シンボルのチッ

表 1 SNR 閾値と SIR 閾値

SF	Threshold Γ_{SNR} [dB] [5]	Threshold Γ_{SIR} [dB] [6]
7	-6	-11
8	-9	-13
9	-12.5	-16
10	-15	-19
11	-17.5	-22
12	-20	-24

プ長は $T_c = 1/B$ [sec] となる. したがって, CSS シンボル長は次式で与えられる.

$$T_s = T_c \times 2^{\text{SF}} \quad (6)$$

高い拡散率を用いることで, 受信感度が高くなるためより遠方の FC でも信号を受信でき, 干渉耐性も高くなる. 一方で, 式 (6) から分かるように, 拡散率 SF を増加させると, シンボル長 T_s は 2 の累乗に従って長くなる. そのため, 無線端末数が増大した場合には, 干渉の影響を受ける可能性が高くなることが予測される.

端末に割り当てられた拡散率を i とする. ここで, $i \in [7, 8, \dots, 12]$ であり, 拡散率 i を用いて同時に送信をしている LoRaWAN 端末の集合を \mathcal{N}_i と表す. この時, 受信信号電力対雑音電力比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio) は次式で与えられる.

$$\text{SNR}_n = \frac{P_{\text{ED},n}}{\sigma_v^2} \quad (7)$$

ここで, $P_{\text{ED},n}$ は FC における LoRaWAN 端末 n からの受信信号電力, σ_v^2 は FC における加法性白色ガウス雑音 (AWGN: Additive White Gaussian Noise) の電力を表す. また, $\mathcal{N}_i \neq \emptyset$ の場合, 同一拡散率 i を用いてパケットを送信している端末が存在する. その場合, 端末 n からの受信信号は同一 SF 間干渉を受ける. FC における信号対干渉電力比 (SIR: Signal-to-Interference Ratio) が $\Gamma_{\text{SIR}} = 6$ [dB] 以上となった場合, キャプチャ効果によりパケットの受信が成功となる [5]. 端末 n の FC における SIR は次式で与えられる.

$$\text{SIR}_n \triangleq \frac{P_{\text{ED},n}}{\sum_{n' \in \mathcal{N}_i} P_{\text{ED},n'}} \quad (8)$$

LoRaWAN 端末のパケットは, SNR と各 SF における干渉軽減を考慮した SIR がそれぞれ閾値を超えている場合に受信に成功するものとする [5]. FC がパケットの受信に成功した場合, パケットを送信した LoRaWAN 端末に ACK を送信する. また, すべてのパケットにおいて再送はしないものとする. ここからは一般性を失うことなく端末インデックス n を省略し, 第 m パケット受信時の処理について述べる.

2.4 観測データとパケットモデル

本稿では, LoRaWAN 端末は室温といったアナログデータ $d(t) \in [d_{\text{min}}, d_{\text{max}}]$ を Δ_1 [sec] おきに観測するものとする. ここで d_{min} はアナログデータの最小値, d_{max} はアナログデータの最大値を表す. その際, 端末は $d(t)$ に標準正規分布に従う環境誤差が含まれた $d_{\text{obs}}(t)$ を観測するものとする.

$$d_{\text{obs}}(t) = d(t) + e, \quad (9)$$

ここで、 $e \sim \mathcal{N}(0, \sigma)$ は標準正規分布に従う乱数を表す。パケットは LoRaWAN 端末の識別情報などの基本データと観測データから構成されるものとする。観測データは、量子化された後に送信される。

端末は観測データ $d_{\text{obs}}(t)$ を特定の時間 $t \in \{\dots, t[m-1], t[m], t[m+1], \dots\}$ において FC に送信する。 $t[m]$ は m 個目のデータパケットが端末から FC に送信される時刻を指す。送信周期の集合を、 $\mathcal{T} = \{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_S\}$ とする。各端末は \mathcal{T} から送信周期の一つを選択し、 $(m-1)$ 個目のパケットと m 個目のパケット間の送信周期は $\Delta[m] \in \mathcal{T}$ と定義する。

$$\Delta[m] \triangleq t[m] - t[m-1], \quad (10)$$

$$t[m] = t[0] + \sum_{m'=1}^m \Delta[m']. \quad (11)$$

なお、最初のパケットの生成時刻 $t[0]$ は一様ランダム時刻 $\mathcal{U}(0, \Delta_s)$ に従って発生する乱数から決定される。端末の観測データ $d_{\text{obs}}(t)$ はあらかじめ定められた量子化ビット数 Z で線形量子化を行い、送信データ $d_{\text{tx}}(t)$ に変換後送信される。量子化レベル数 I は $I = 2^Z$ で与えられる。量子化を行う区間 $[d_{\min}, d_{\max}]$ を I 階調に分割し、量子化ステップ幅 Δd_z 及び、量子化代表値集合 $\mathcal{Z} = \{d_{z,0}, d_{z,1}, d_{z,2}, \dots, d_{z,I-1}\}$ を得る。なお量子化代表値集合 \mathcal{Z} の要素 $d_{z,i}$ は、次式で与えられる。

$$d_{z,i} = \begin{cases} d_{\min} + \Delta d_z & (i = 0) \\ d_{z,i-1} + \Delta d_z & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (12)$$

最後に FC に送られる送信データ $d_{\text{tx}}(t)$ は式 (13) で与えられる。

$$d_{\text{tx}}(t) = d_{z,i^*}, \quad (13)$$

ここで

$$i^* = \arg \min_{0 \leq i < I} |d_{\text{obs}}(t) - d_{z,i}|. \quad (14)$$

3. 提案手法

FC で受信した値から次の受信時刻にて受信される値の予測を行い、受信値と予測値の誤差を求め、さらに、誤差の変化率を基に周期の更新を決定する閾値を適応的に求める。

3.1 データ予測

単純指数平滑法 [9] を用いて値の予測を行う。 $m-1$ 個目の受信値 $d_{\text{rec}}[m-1]$ 、予測値 $\tilde{d}[m-1]$ と平滑化定数 $\alpha \in (0, 1)$ より、FC が受信する m 個目の受信値 $d_{\text{rec}}[m]$ を次式のように予測する。

$$\tilde{d}[m] = \alpha d_{\text{rec}}[m-1] + (1 - \alpha) \tilde{d}[m-1] \quad (15)$$

予測値に対し、FC において実際にデータが受信されたあと、受信値と予測値の相対誤差 v を求める。

$$v[m] = \left| \frac{d_{\text{rec}}[m] - \tilde{d}[m]}{d_{\text{rec}}[m]} \right| \quad (16)$$

表 2 閾値の更新方法

ACK	送信周期の操作	閾値設定
00	周期を長くする	$c < \Gamma_{\text{low}}$
01	周期を変えない	$\Gamma_{\text{low}} \leq c < \Gamma_{\text{high}}$
10	周期を短くする	$\Gamma_{\text{high}} \leq c$

3.2 送信周期の更新

図 2 に周期の更新の概略図を示す。閾値の設定には式 (17) で与えられる 2 つの相対誤差の変化率 $c[m]$ を用いる。

$$c[m] = \left| \frac{v[m]}{v[m-1]} \right| \quad (17)$$

$c[m]$ が小さい場合、正規化誤差も小さくなるため観測情報の傾向が容易に予測可能である。一方で $c[m]$ が大きい場合、正規化誤差も大きくなる。従って、観測する情報を増やすために送信間隔を短く変える必要がある。そこで、 $c[m]$ を閾値 Γ_{low} と Γ_{high} と比較することで、現在利用している送信周期が適切化判断する。閾値 Γ_{low} と Γ_{high} GW がデータパケットを受信後に更新される

以下に閾値の更新ステップを示す。

(1) 変化率の集合 $\mathcal{W} = \{0, 0, \dots, 0\}$ を設定。

(2) FC はデータを受信後、式 (17) により $c[m]$ を算出する。

(3) 連続値である $c[m]$ をステップサイズ ϵ に従って離散値 r に変換。

$$r = \left\lfloor \frac{c[m]}{\epsilon} \right\rfloor. \quad (18)$$

(4) $\mathcal{W}[r] = \mathcal{W}[r] + 1$ に更新。

(5) 部分集合 $\tilde{\mathcal{W}} = \{\mathcal{W}[\pi_0], \mathcal{W}[\pi_1], \dots, \mathcal{W}[\pi_{M-1}]\} \subseteq \mathcal{W}$ such that $\mathcal{W}[\pi_0] \geq \mathcal{W}[\pi_1] \geq \dots \geq \mathcal{W}[\pi_{M-1}] \geq \dots \mathcal{W}[\pi_{R-1}]$.

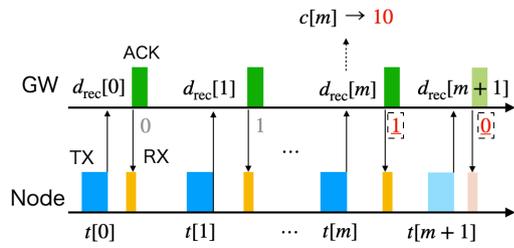
(6) 閾値をそれぞれ $\Gamma_{\text{low}} = \epsilon \times r_{\min}$ と $\Gamma_{\text{high}} = \epsilon \times r_{\max}$ より設定。ここで $\epsilon \times r_{\min}$ と $\epsilon \times r_{\max}$ はそれぞれ式 (19) にて表される。

$$\begin{cases} r_{\min} = \arg \min_{r' \in \{0, 1, \dots, M-1\}} \mathcal{W}[\pi_{r'}] \\ r_{\max} = \arg \max_{r' \in \{0, 1, \dots, M-1\}} \mathcal{W}[\pi_{r'}] \end{cases}. \quad (19)$$

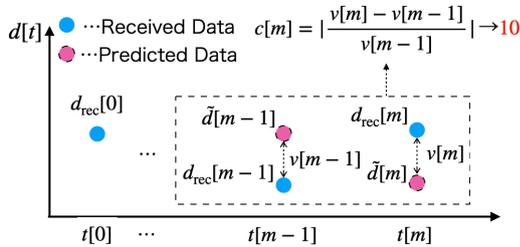
上記の閾値設定方法は $c[m]$ の特性を利用している。 $c[m]$ が過去に集められた他の $c[m]$ と近い値であれば予測が正確に行われていることが考えられる。一方で値が大きく異なる場合は、誤差 $v[m]$ が大きな値となっている。この場合、受信値は急激な変化を持つがゆえに、予測が正確に行われなくなったことを意味する。この受信値は外れ値と定義する。そこで、近い値を示す許容可能な範囲 $[\Gamma_{\text{low}}, \Gamma_{\text{high}}]$ を設定し、 $c[m]$ がこの範囲に含まれるか含まれないかで、予測が正確に行われているかが判断可能となる。

3.3 データ補間

LoRaWAN 端末にて最短の周期 Δ_1 ごとにデータを観測する。しかしながら、端末が Δ_1 より長い周期 Δ_s を用いる場合、一部の観測データは FC に送信されない。さらに FC はパケッ



(a) データ予測ならびに誤差



(b) ACK 信号を用いた周期更新

図 2 周期の更新の概略図

ト衝突によって観測データを受信できない可能性も考えられる。従って、これらの失われたデータをスプライン補間 [10] を用いて補間する。

3.4 ACK 信号を用いた端末への送信周期更新通知

LoRaWAN 端末は、Confirmed パケットを送信した場合、パケット送信後、規定の受信タイミングで 2 つの受信窓を開くことで FC から ACK パケットを受信する。本提案では、この LoRaWAN の受信窓の性質を利用し、FC から LoRaWAN 端末に送られる ACK 信号をどちらの受信窓で受信するかを用いて送信周期の操作を行う。LoRaWAN 端末の 1 つ目の受信窓で ACK を受信した場合はビット “0” を受け取ったものとし、2 つ目の受信窓で ACK を受信した場合はビット “1” を受け取ったものとする。FC においてパケットが正しく受信されなかったり、他端末からの干渉により ACK が連続する 2 つのパケットに対して受信されなかった場合、送信周期の操作は行わないものとする。各送信周期の更新方法に対する ACK の割当てと閾値の設定を表 2 に示す。

4. シミュレーション評価

計算機シミュレーションにより提案手法の特性を評価する。今回用いたシミュレーション諸元を表 1 に示す。シミュレーションエリアは $L \times L = 1 \times 1$ [km²] とし、その中に $N = 100$ 台の端末が一様ランダムに配置されているものとした。周波数は $f_c = 920$ [MHz] 帯を用い、帯域幅は $B = 125$ [kHz] とした。各 ED は DC 比 1 [%] と Dwell time = 400 [ms] を守りつつパケットを送信するものとした。また、ED の送信パケットは FC からの ACK 返信を必要とする Confirmed パケットを想定した。本稿では、 $\alpha = 4.00$, $\beta = 10.2$, $\gamma = 2.36$ と $\sigma = 7.60$ とした [8]。

4.1 評価指標

評価指標として、送信パケット数の削減率 (PRR: Packet

Reduction Rate) に加え、パケット配信率 (PDR: Packet Delivery Rate) と誤差率 (ER: Error Rate) を累積分布関数 (CDF: Cumulative Distribution Function) で評価した。

a) PRR

PRR は提案手法による送信パケット数の削減量を評価するために、パケット送信数が最も多い周期 Δ_1 と比較を行う。

$$\text{PRR} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} Q_{\Delta_1, n} - \sum_{n=0}^{N-1} Q'_n}{\sum_{n=0}^{N-1} Q_{\Delta_1, n}} \quad (20)$$

ここで、 $Q_{\Delta_1, n}$ は LoRaWAN 端末 n が Δ_1 を用いて送信したパケット数を表し、 Q'_n は提案手法を用いて送信したパケット数を表す。

b) PDR

PDR は、端末 n の受信に成功したパケット数 P_n と総送信パケット数 Q_n を用いて次式のように定義する。

$$\text{PDR} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} P_n}{\sum_{n=0}^{N-1} Q_n} \quad (21)$$

c) ER

ER は、端末 n の補間されたデータ $d_{ip, n}$ と観測データ d_n を用いて次式のように定義する。

$$\text{ER} = \left| \frac{d_{ip, n} - d_{obs, n}}{d_{obs, n}} \right| \quad (22)$$

送信周期は $\Delta_1 = 1$ [min], $\Delta_2 = 2$ [min], $\Delta_3 = 4$ [min], $\Delta_4 = 8$ [min] の 4 種類を用い、提案手法は Δ_1 から周期の操作を始める。

4.2 シミュレーション結果

はじめに提案手法において閾値決定に係る数値 M の評価を行う。図 3 は M ごとの異なる送信間隔の選択率を表している。図から M の値が増加するにつれ、 Δ_1 の選択率が増加することがわかる。これは、最大値と最小値の間、すなわち、 Γ_{high} と Γ_{low} の範囲が広くなり、外れ値対象の数が少なくなるため、間隔の制御の頻度が低くなるためである。図 4 から M が小さいほど微細な送信間隔の調整が可能のため、PDR 特性が向上することが確認できる。従って以下では $M = 2$ とする。

PRR, PDR と ER の数値結果を図 5, 図 6, 図 7 に示す。図 5 から提案手法によって PDR = 0 となる端末を 6.5% から 5.7% に低減できることが確認できた。これは、送信周期を調整することによって端末間のパケット衝突を回避できるためである。また、周波数チャネル数を増加しても本提案法が有効であることが確認できる。図 6 から、提案手法によって送信パケット数を最大で 25% 削減できることが確認できる。特性改善可能な端末数は一定数であるため、チャネル数が 2 の場合と 3 の場合では同程度の削減量となる。図 7 より、提案手法を用いることによって、 Δ_1 と同程度の観測精度を達成できることが確認できる。従来、観測データが多いほど、受信精度がよくなると考えられるが、実際には量子化誤差や環境誤差がデータに付加される。従って、送信間隔が短い場合、誤った観測値を多く用いて補間をおこなうことになり、観測精度が劣化する。一方で送信間隔が長い場合、補間によって実際の観測値に近い値が取得可能となる。

表 3 シミュレーション諸元

エリアサイズ	1×1 [km ²]
センサ数	100
シミュレーション時間	6 [hour]
送信電力	13 [dBm]
搬送波周波数	920 [MHz]
帯域幅	125 [KHz]
SF	7
Dwell time	400 [ms]
センサと FC の Duty Cycle	1 %
ペイロードサイズ	11 [Byte]
閾値 r と s のステップサイズ	0.01
周波数チャンネル数	1, 2, 3
平滑化定数 α	0.9
最小データ d_{\min}	0.0 °C
最大データ d_{\max}	40.0 °C

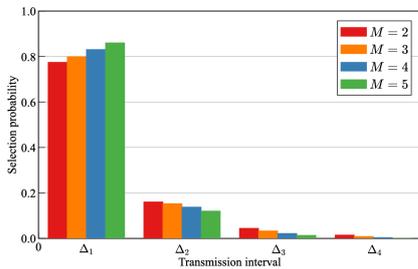


図 3 各送信周期の選択率.

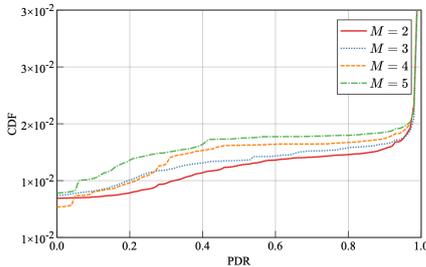


図 4 M ごとの PDR 特性

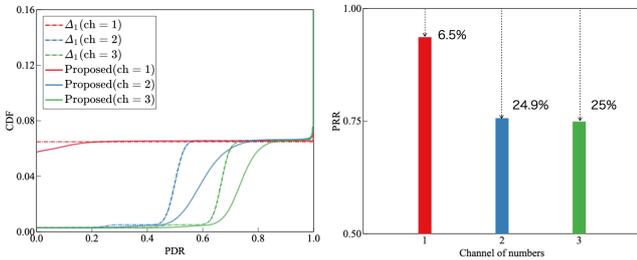
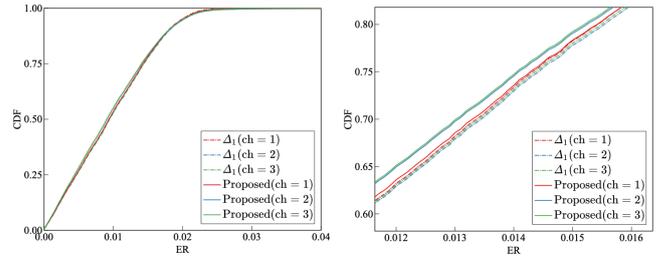


図 5 PDR 特性

図 6 PRR 特性

5. まとめ

本稿では、複数パケットの同時送信により生じる情報損失を回避するための低オーバーヘッドな送信タイミング制御方法を提案した。数値結果より、提案手法により、送信パケット数を削減しつつも、優れた観測精度を実現できることを明らかにした。



(a) $0.0 < ER < 0.04$

(b) $0.002 < ER < 0.004$

図 7 ER 特性

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。

文 献

- [1] D. Evans, “The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything,” Available: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf, accessed Oct. 16, 2020.
- [2] A. Rahman and M. Suryanegara, “The Development of IoT LoRa: A Performance Evaluation on LoS and Non-LoS Environment at 915 MHz ISM Frequency,” in *Proc. 2017 Int. Conf. on Signals and Syst. (ICSifSys)*, pp.163-167, May 2017.
- [3] B. E. Benhiba, A. A. Madi and A. Addaim, “Comparative Study of The Various new Cellular IoT Technologies,” in *Proc. 2018 Int. Conf. on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)*, Dec 2018.
- [4] U. Norenn, A. Bounceur, and L. Clavier, “A Study of LoRa Low Power and Wide Area Network Technology,” in *Proc. 2017 Int. Conf. on Advanced Tech. for Signal and Image Processing (ATSIP)*, pp.1-6, May 2017.
- [5] A. Amichi, M. Kaneko, N. E. Rachkidy, and A. Guiton, “Spreading Factor Allocation Strategy for LoRa Networks under Imperfect Orthogonality,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, 2019, pp.1-7.
- [6] D. Croce, M. Gucciardo, S. Mangione, G. Santaromita, and I. Tinnirello, “Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance,” *IEEE Commun. Lett.*, vol.22, no.4, pp.796-799, Apr. 2018.
- [7] Y. A. Alqudah, “On the Performance of Cost 231 Walfisch Ikegami Model in Deployed 3.5 GHz Network,” in *Proc. 2013 The Int. Conf. on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE)*, pp.46-51, Nov. 2018.
- [8] ITU-R. *Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radio 2018. communication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300MHz to 100GHz*. Accessed: Dec. 21, 2018. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-9-201706-I!!PDF-E.pdf
- [9] M. Fan, Y. Tan, and A. B. Whinston, “Evaluation and design of online cooperative feedback mechanisms for reputation management,” *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol.17, no.2, pp.244-254, Feb. 2015.
- [10] A. Gilat and V. Subramaniam, *NUMERICAL METHODS FOR ENGINEERS AND SCIENTISTS*, 3rd Edition, pp.229-231, Sep. 2013.