一般社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
IEICE Technical Report
RCS2022-111(2022-08)

# 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

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

**あらまし**　無線センサネットワークを構築する通信規格として省電力広域ネットワーク（LPWAN）が注目を集めている．LPWAN が使用されるシステムの多くでは，センサが取得した観測データを定期的にゲートウェイ（GW）へと送信する周期的な上り通信（UL）がトラフィックの大部分となる．著者らは以前，UL の周期性を考慮した動的な無線リソース割当て法を提案した．しかしながら，端末のクロック精度に起因する GW と端末間の時刻ズレが未考慮であった．そこで本稿では，クロックドリフトの逐次的補償およびクロックドリフトを考慮したリソース割当てアルゴリズムを提案する．計算機シミュレーションにより，本提案手法が ALOHA および SMAC と比較して，パケット配信率（PDR）を最大でそれぞれ約 20%，16% 向上可能であることを示す．
**キーワード**　WSN，LPWA，LoRaWAN，リソース制御，パケット配信率

# Resource Allocation Scheme Utilizing Clock Drift in LPWAN

Aoto KABURAKI†, Koichi ADACHI†, Osamu TAKYU††, Mai OHTA†††, and Takeo FUJII†

† The University of Electro-Communications, Advanced Wireless & Communication Research Center
1–5–1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182–8585 Japan
†† Department of Electrical and Computer Engineering, Shinshu University
4-17-1, Wakasato, Nagano, 380-8553
††† Department of Electronics and Computer Science, Fukuoka University
8-19-1, Nanakuma, Jonan, Fukuoka 814-0180
E-mail: †{kaburaki, adachi, fujii}@awcc.uec.ac.jp, ††takyu@shinshu-u.ac.jp, †††maiohta@fukuoka-u.ac.jp

**Abstract**　Low-power wide-area networks (LPWANs) have attracted attention recently as a wireless sensor network communication system. Many LPWAN systems tend to exhibit the characteristic that uplink traffic dominates, where nodes transmit the observation data periodically to the server. LPWAN nodes have poor clock accuracy due to simple circuits, causing clock drift. Clock drift causes problems when a centralized control station carries out the scheduling of nodes in the system. This paper proposes a clock drift-aware resource allocation algorithm that sequentially compensates for clock drift. The computer simulation results show that the proposed scheme can improve the average packet delivery ratio (PDR) by 20% compared to the pure ALOHA protocol.
**Key words**　WSN, LPWA, LoRaWAN, Resource control, PDR

## 1. はじめに

近年，様々な機器がインターネットに接続し通信が可能となるモノのインターネット（IoT）技術の発展に伴い，学術会および産業界において IoT システムの検討が活発に行われている [1]．特に無線センサネットワークはスマートシティ，スマート農業など多種多様なアプリケーションを支えるインフラとなっている [1]〜[3]．無線センサネットワークを構築する通


This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.
Copyright ©2022 by IEICE

信規格として省電力広域ネットワーク（LPWAN: Low Power Wide Area Network）が注目を集めている [3]〜[5]．LPWAN はアンライセンスバンドを使用し，低データレートながらも低コストで多接続および長距離通信が可能である．LPWAN を使用するシステムの多くでは，セルラー通信などで考慮されるランダムに発生する上りリンク（UL: Up Link）トラフィックとは異なり，センサが取得した観測データをゲートウェイ（GW: GateWay）へと定期的に送信する周期的な UL が支配的なトラフィックとなる [6]〜[8]．

LPWAN 端末は，一般に低廉化のため ALOHA プロトコルなどの簡易な非同期型ランダムアクセス方式を採用している．簡易な非同期型ランダムアクセス方式においては，端末がランダムに無線リソースを使用するため，他端末と競合した場合パケット衝突が発生する．特に周期的な UL 環境では，送信周期の組み合わせによって一部のパケットが連続的に衝突する問題がある．パケット衝突により，端末の送信した情報が失われてしまうため，LPWAN においてはパケット衝突回避技術の研究が急務である．そこで著者らは文献 [9] にて，UL の周期性を考慮した動的な無線リソース割当て法を提案した．文献 [9] で提案した手法では，各端末のパケットの送信周期および送信タイミングを基に，パケット衝突発生を予測し，予測されたパケット衝突を回避するための送信オフセット量および周波数チャネルの割当てを行う．しかし，文献 [9] の検討では後述するクロックドリフトの影響がない環境での検討となっている．文献 [8] においても周期的な UL 通信を行う LoRaWAN における MAC 層スケジューラが提案されているものの，文献 [8] の検討では，直交する無線リソースが潤沢かつクロックドリフトによる影響が緩和された環境での検討となっている．

一般に廉価な LPWAN 端末のクロックは高精度ではないため，LPWAN 端末において時間経過とともに時刻ズレ（クロックドリフト）が蓄積していく [10]．クロックドリフトにより GW と端末との間で時刻ズレが発生するため，パケット衝突を回避するために時分割多元接続（TDMA: Time Division Multiple Access）など，端末間の厳密な時刻同期が必要な無線リソース割当て方式の適用は困難である．またパケット送信可能な時間比率を決定するデューティーサイクル（DC: Duty Cycle）による送信制約や LPWAN 端末の下リンク（DL: Down Link）受信タイミングの制約があるため，全端末に同期信号を定期的に送信することは困難である．

以上の背景より，本研究では周期的な UL 通信環境におけるクロックドリフトを活かした集中制御型の無線リソース割当て法を提案する．文献 [9] のような UL の周期性を活かしたスケジューリングベースのパケット衝突回避を行う場合，端末-GW 間での準同期が必要不可欠である．そこで，本研究では逐次的なクロックドリフト補償による端末-GW 間の準同期を行う．端末が周期的に UL パケットを送信する環境では，GW は端末の送信周期を基に 1 送信周期あたりに発生するクロックドリフト値を推定することが可能である．推定したクロックドリフト値を基に，各端末のクロックドリフトを補償するクロックドリフト補償値を無線リソース制御情報と共に DL パケットを用いて各端末に割当てる．また，文献 [9] のリソース割当てアルゴリズムを基にクロックドリフトを考慮したリソース割当てアルゴリズムを提案する．提案アルゴリズムでは送信オフセットの計算時にクロックドリフトによるスケジュールリング誤差を緩和するためのマージンを導入する．また，効率的なスケジュールリングおよび GW の制御情報送信回数削減のため，スケジューリングを行う端末に制約を設ける．提案手法の有効性を示すため，LPWAN 規格の一つである LoRaWAN（Long Range Wide Area Network）に準拠したパラメータを用いた計算機シミュレーションを行う．計算機シミュレーション結果より，本提案手法が ALOHA 手法と SMAC 手法と比較して，パケット配信率（PDR: Packet Delivery Rate）を最大で約 20%，約 16% 向上可能であることを示す．

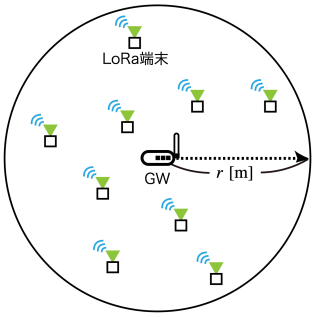


図 1　システムモデルの概要

本稿は以下の構成になっている．第 2 節で本稿で想定した LoRaWAN のシステムモデルについて説明し，第 3 節で提案手法である逐次的なクロックドリフト補償およびクロックドリフトを活かしたリソース割り当て法について説明する．第 4 節で計算機シミュレーション結果に基づいた評価を行う．第 5 節はまとめである．

## 2. システムモデル

本研究では，図 1 に示すように 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 LoRa 端末（$\mathcal{I} = \{1, ..., i, ..., I\}$）が一様ランダムに配置された LoRaWAN システムを想定する．端末および GW で生起する全てのパケットは，送信先からの肯定応答（ACK: Acknowledgement）を要求しない Unconfirmed メッセージとして送信を行うため，再送を行わないものとする．各 LoRa 端末は，$K$ 個の直交する周波数チャネル（$\mathcal{K} = \{1, ..., k, ..., K\}$）およびデータレートを決定する拡散率（SF: Spreading Factor）を選択し，上り通信（UL: Up Link）および下り通信（DL: Down Link）を行う．SF は 1 シンボルあたりの送信ビット数を表す．SF を増加させた場合，雑音に対する耐性が向上するため長距離通信が可能となるが，1 シンボルあたりの時間長が送信ビット数に対して指数関数的に長くなるためデータレートは低下する．

### 2.1 伝搬路モデル

都市部における見通し外（NLoS: Non-Line-of-Sight）環境を想定した伝搬路モデルを使用する．端末 $i$ と GW におけるパスロス $P_{\mathrm{Loss}}(d_i)$ [dB] は次式で計算される [11]．

$$P_{\mathrm{Loss}}(d_i) = 10\alpha \log_{10} d_i + \beta + 10\gamma \log_{10} f_c \quad (1)$$

ここで，$d_i$ [km] は端末 $i$ と GW の距離，$f_c$ [MHz] は搬送波周

波数，$\alpha$，$\beta$，$\gamma$ はそれぞれ伝搬係数，伝搬損失オフセット，周波数係数を表す．よって，GW における端末 $i$ から送信された信号の受信電力 $P_i^{\mathrm{r}}$ [dBm] は次式で与えられる．

$$P_i^{\mathrm{r}} = P_{\mathrm{t}} - P_{\mathrm{Loss}}(d_i) \tag{2}$$

ここで，$P_{\mathrm{t}}$ [dBm] は全端末と GW で共通の送信電力を表す．

### 2.2 パケット

端末および GW は LoRa 変調を用いてパケットを送信する．LoRa 変調では使用する SF によってデータレートが変化する．LoRa 変調における 1 シンボルの時間長 $T_i^{\mathrm{s}}(S_i)$ [sec] は SF $S_i$ より次式で与えられる．

$$T_i^{\mathrm{s}}(S_i) = 2^{S_i}/W \tag{3}$$

ここで，$W$ [Hz] は帯域幅を表す．パケットあたりに必要なシンボル数 $N_i^{\mathrm{s}}(S_i)$ は次式で与えられる．

$$N_i^{\mathrm{s}}(S_i) = O_{\mathrm{sym}} + \left\lceil \frac{B_{\mathrm{data}}/R}{S_i} \right\rceil \tag{4}$$

ここで，$O_{\mathrm{sym}}$ はオーバーヘッドシンボル数，$B_{\mathrm{data}}$ [bit] はパケットデータサイズ，$R$ は符号化率を表す．また $\lceil x \rceil$ は天井関数を表す．これらより，端末 $i$ のパケットあたりの ToA（Time on Air）$T_i^{\mathrm{ToA}}$ [sec] は次式で表される．

$$T_i^{\mathrm{ToA}} = T_i^{\mathrm{s}}(S_i) \times N_i^{\mathrm{s}}(S_i) \tag{5}$$

LoRaWAN では，パケット送信時に DC を遵守する必要がある．そこで本稿では，厳密な DC 遵守を想定するため，GW は同一周波数チャネルで連続して DL パケットを送信できないものとする．周波数チャネル $k_i$ を用いて端末 $i$ に DL パケットを送信した場合，必要な DC 待機時間 $T_{k_i}^{\mathrm{DC}}$ [sec] は次式で与えられる．

$$T_{k_i}^{\mathrm{DC}} = \left(\frac{1 - D_{\mathrm{c}}}{D_{\mathrm{c}}}\right) T_i^{\mathrm{ToA}} \tag{6}$$

ここで，$D_{\mathrm{c}} \in (0, 1]$ は Duty 比を表す．GW において DC 待機時間中に生起した DL パケットは破棄するものとする．端末は複雑な処理が困難なため，周波数チャネル全体でシステム稼働時間に対して $D_{\mathrm{c}}$ を満たすように UL パケットの送信を行うものとする．

### 2.3 LoRa 端末

端末 $i \in \mathcal{I}$ はあらかじめランダムに設定された UL パケット生成周期 $G_i^{\mathrm{p}} \sim \mathcal{U}(1, G_{\max}^{\mathrm{p}})$ [min] に従い UL パケットを生起するものとする．ここで，$\mathcal{U}(1, G_{\max}^{\mathrm{p}})$ は $[1, G_{\max}^{\mathrm{p}}]$ の整数値を生起する一様乱数を表す．なお，最初の UL パケットの生起時刻はシステム開始時刻から $G_i^{\mathrm{p}}$ 内でランダムに決定されるものとする．GW における信号対雑音比（SNR: Signal-to-Noise Ratio）を基に，端末 $i$ は通信可能な最低の SF $S_i \in \mathcal{S}$ を選択するものとする [12]．ここで，$\mathcal{S}$ は選択可能な SF の集合を表す．端末は UL パケットを送信後，受信窓を必ず開き，GW からの DL パケットを受信可能な状態となる [13]．本研究では，受信窓の間に GW から送信された DL パケットは理想的に受信可能と仮定する．

### 2.4 GW

GW における UL パケットの受信成功判定は SNR および信号対干渉比（SIR: Signal-to-Interference Ratio）を基に行う．

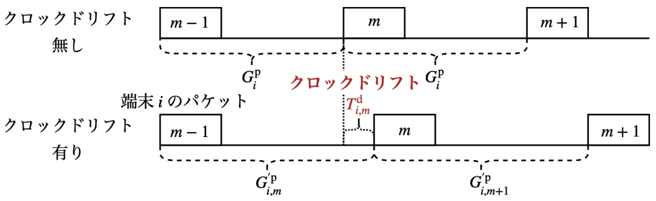


図 2 クロックドリフトの概要

表 1 SNR 閾値及び SIR 閾値 [12], [16].

| SF | SNR 閾値 $\Gamma_{\mathrm{SNR},S_i}$ dB | SIR 閾値 $\Gamma_{\mathrm{SIR},S_i}$ dB |
|---|---|---|
| 7 | -7.5 | -11 |
| 8 | -10 | -13 |
| 9 | -12.5 | -16 |
| 10 | -15 | -19 |

GW にて単一の UL パケットが受信され，SNR 閾値 $\Gamma_{\mathrm{SNR},S_i}$ を上回った場合，受信に成功するものとする．また GW にて複数パケットが受信された場合においては，最初に受信処理（同期処理）を開始したパケットの SNR および SIR が，それぞれ $\Gamma_{\mathrm{SNR},S_i}$ と SIR 閾値 $\Gamma_{\mathrm{SIR},S_i}$ を上回った場合，キャプチャ効果により最初に受信を開始したパケットのみ受信に成功するものとする [14]．表 1 に SF 毎の閾値 $\Gamma_{\mathrm{SNR},S_i}$ と $\Gamma_{\mathrm{SIR},S_i}$ を示す．GW において端末 $i$ への DL パケットを生起した場合，GW は周波数チャネル $k_i$，SF$S_i$ を用いて DL パケットの送信を行う．GW が端末 $i$ への DL パケットを生起した場合，GW は端末 $i$ と同じ SF $S_i$ および周波数チャネル $k_i$ を用いて DL パケットの送信を行う．

### 2.5 GW-端末間のクロックドリフト

一般に安価な回路を使用している LPWAN 機器のクロック精度は高くないため，機器間でクロックの精度に起因する時刻ズレが生じる．そこで本研究では，GW-端末間で発生する相対的な時刻ズレをクロックドリフトと定義する．端末 $i$ において $m-1$ 番目から $m$ 番目パケットの UL パケット生成周期期間に GW との間に生じるクロックドリフト $T_{i,m}^{\mathrm{d}}$ [sec] は次式で与えられる．

$$T_{i,m}^{\mathrm{d}} = \int_{(m-1)\times G_i^{\mathrm{p}}}^{m \times G_i^{\mathrm{p}}} \Delta T_i^{\mathrm{d}}(t) dt \tag{7}$$

ここで，$\Delta T_i^{\mathrm{d}}$ は単位時間で正規化した端末 $i$ の正規化クロックドリフトを表す．正規化クロックドリフト $\Delta T_i^{\mathrm{d}}$ は単位時間毎に確率的に変化すると仮定し，$\Delta T_i^{\mathrm{d}} \sim \mathcal{N}\left(\mu_i, {\sigma_i}^2\right)$ でモデル化されるものとする [15]．ここで，$\mathcal{N}\left(\mu_i, {\sigma_i}^2\right)$ は平均 $\mu_i$，分散 ${\sigma_i}^2$ となるガウス分布を表す．また図 2 に示すように，クロックドリフトにより端末 $i$ の UL パケット生成周期は $G_i^{\mathrm{p}}$ から変化する．よって，クロックドリフトを考慮した場合の端末 $i$ の $m$ 番目 UL パケット生成周期 $G_{i,m}^{\prime\mathrm{p}}$ は次式で与えられる．

$$G_{i,m}^{\prime\mathrm{p}} = G_i^{\mathrm{p}} + T_{i,m}^{\mathrm{d}} \tag{8}$$

## 3. 提案手法

著者らが文献 [9] にて提案した無線リソース割当てアルゴリズムを基に，UL の周期性およびクロックドリフトを活かした無線リソース割当て法を提案する．文献 [9] では，端末-GW 間

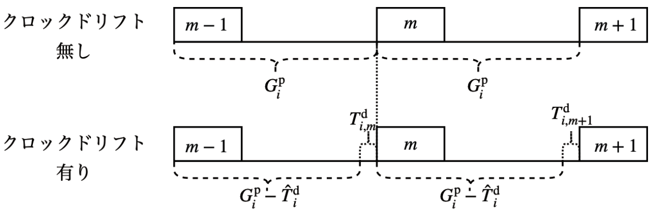


図 3　クロックドリフト補償

が理想的に同期しておりクロックドリフトが発生しないものと仮定していた．そのため，UL パケット生成周期が一致かつ最初のパケットの送信タイミングがオーバーラップした場合，それらの端末の送信パケットは常に衝突してしまう．常にパケット衝突している端末に対して GW は無線リソースの再割当てが困難なため，PDR が 0 となる端末が発生してしまう．一方，より現実的な環境，すなわち GW-端末間が非同期でクロックドリフトが存在している場合，クロックドリフトにより送信タイミングが変化し続けるため，端末の PDR が 0 となることを抑制することができる．しかし，GW-端末間に時刻ズレがあるため GW でのスケジュールリングは困難となる．そこで，本研究では逐次的にクロックドリフト補償を行うことで，端末の PDR が 0 となることを抑制しつつパケット衝突回避可能な送信オフセット $T_i^{\mathrm{off}}$ および周波数チャネル $k_i$ の割当てを行う．

### 3.1　GW での UL パケット生成周期の取得

LoRa 端末においてクロックドリフトは単位時間あたり $10^{-4}\sim 10^{-3}$ [sec] オーダーで発生する [15]．そのため，一般にクロックドリフトによるズレに対して UL パケット生成周期は非常に大きいものとなる．端末 $i$ の UL パケットにはフレームカウンタ $n_i$ が含まれている [17]．よって，GW はフレームカウンタ $n_i$ および端末 $i$ のパケット受信時刻から $G_i^{\mathrm{p}}$ を容易に推定可能である．本研究ではパケットの受信に 2 回以上成功した端末の UL パケット生成周期 $G_i^{\mathrm{p}}$ を GW が把握可能と仮定する．

### 3.2　クロックドリフトの推定および補償

GW は端末 $i$ の $m-1$ と $m$ 番目パケットの受信時刻と $G_i^{\mathrm{p}}$ を比較することで，端末 $i$ の $G_i^{\mathrm{p}}$ 期間に発生するクロックドリフト値 $T_{i,m}^{\mathrm{d}}$ をサンプリング可能である．GW でサンプリングされた端末 $i$ のクロックドリフト値の平均値を，端末 $i$ の推定正規化クロックドリフト $\Delta\hat{T}_i^{\mathrm{d}}$ とする．端末のクロックドリフトを補償する場合，$G_{i,m}^{\prime\mathrm{p}}=G_i^{\mathrm{p}}$ が成立することが望ましい．そこで，端末 $i$ に次式で与えられるクロックドリフト補償値 $\hat{T}_i^{\mathrm{d}}$ を割当てる．

$$\hat{T}_i^{\mathrm{d}}=\frac{G_i^{\mathrm{p}}\Delta\hat{T}_i^{\mathrm{d}}}{1+\Delta\hat{T}_i^{\mathrm{d}}} \tag{9}$$

図 3 に示すように，$\hat{T}_i^{\mathrm{d}}$ を割当てられた端末 $i$ は UL パケット生成周期を $G_i^{\mathrm{p}}-\hat{T}_i^{\mathrm{d}}$ に変更する．これにより次式で表されるように，本来の UL パケット生成周期へと近づけることが可能となる．

$$G_i^{\mathrm{p}}\simeq G_i^{\mathrm{p}}-\hat{T}_i^{\mathrm{d}}+\int_0^{\left(G_i^{\mathrm{p}}-\hat{T}_i^{\mathrm{d}}\right)}\Delta T_i^{\mathrm{d}}(t)dt \tag{10}$$

ここで，右辺第 3 項は期間 $G_i^{\mathrm{p}}-\hat{T}_i^{\mathrm{d}}$ で発生するクロックドリフトを表す．なおクロックドリフトは確率的に発生するため，

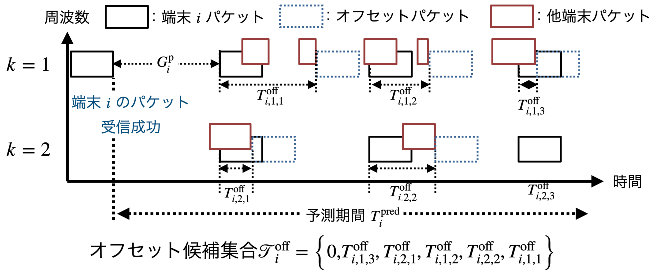


図 4　送信オフセット候補計算の概要 [9]

全端末のクロックドリフト完全に補償することは困難であり，補償前のクロックドリフト値 $T_{i,m}^{\mathrm{d}}$ と比較して小さいクロックドリフト補償誤差が発生する．

### 3.3　送信オフセットおよび周波数チャネルの割当て

ここでは，文献 [9] の送信オフセットおよび周波数チャネル割当てアルゴリズムを基に，クロックドリフトを考慮した送信オフセット探索および制御端末制約を提案する．GW は端末 $i$ のパケット生成周期 $G_i^{\mathrm{p}}$ および $n_i$ 番目のパケット受信時刻 $T_{n_i}$ から $n_i+1$ 番目以降のパケット送信予定時刻を推定可能である．そのため，GW は各端末のパケット送信予定時刻から，パケット衝突の発生を予測可能である．文献 [9] では予測したパケット衝突を回避するため，図 4 に示すように $T_i^{\mathrm{ToA}}$ 以上の空き時間がある箇所への送信オフセット候補 $T_{i,m,k}^{\mathrm{off}}$ の探索を行う．しかし，他端末とのパケットの時間間隔に余裕がない場合，クロックドリフト補償誤差によりスケジューリング誤差が発生し，パケットが衝突してしまう．そこで，本研究ではクロックドリフトによるスケジューリング誤差を緩和するため，$T_i^{\mathrm{ToA}}$ の $u$ 倍の空き時間がある箇所のみで送信オフセット候補 $T_{i,m,k}^{\mathrm{off}}$ の探索を行う．パケット衝突回避を目的とした効率的なスケジューリングを行うため，パケット衝突が発生した端末およびクロックドリフト補償誤差が発生している端末のみ送信オフセット $T_i^{\mathrm{off}}$ および周波数チャネル $k_i$ の割当てを行う．なお送信オフセット $T_i^{\mathrm{off}}$ も端末のクロックドリフトによるズレを考慮した値を割当てる．

## 4.　計算機シミュレーション

表 2 にシミュレーション諸元を示す．本研究では，SF10 において伝搬路モデルより与えられる最大通信可能距離 $r=895$ [m] を半径とする通信エリア内に，$I=1000$ 台の端末を配置した．LoRaWAN の通信パラメータは日本での LoRaWAN の規定 AS923 に準拠したものを用いた [17]．UL パケット生成最大周期 $G_{\max}^{\mathrm{p}}$ を 10 分間とした．また端末 $i$ の正規化クロックドリフト平均値 $\mu_i$ および分散値 $\sigma_i{}^2$ はそれぞれ $[\mu_{\min},\mu_{\max}]$，$[\sigma_{\min},\sigma_{\max}]$ の範囲をとる一様乱数より決定した．ここで $\mu_{\min},\sigma_{\min}^2$ および $\mu_{\max},\sigma_{\max}^2$ は，それぞれ文献 [15] の実機実験より得られた平均値および分散値の最小値，最大値である．

### 4.1　評価指標

#### 4.1.1　PDR

本研究では周期的な UL 環境を想定している．そこで，経過時間に対する通信品質の変化を評価するため，UL パケット生成最大周期 $G_{\max}^{\mathrm{p}}$ 毎の PDR を評価する．$G_{\max}^{\mathrm{p}}$ 毎の PDR は，$G_{\max}^{\mathrm{p}}$ 毎に，GW で受信に成功した UL パケット数を全端末が

表 2　シミュレーション諸元

| | |
|---|---|
| シミュレーションエリア半径 $r$ | 895 [m] |
| シミュレーション時間 $T$ | 2000 [min] |
| 端末数 $I$ | 1000 |
| 送信電力 $P_\mathrm{t}$ | 13 [dBm] |
| 搬送波周波数 $f_\mathrm{c}$ | 0.923 [GHz] |
| 帯域幅 $W$ | 125 [kHz] |
| 周波数チャネル数 $K$ | $\{1, 2, 4\}$ |
| SF $\mathcal{S}$ | $\{7, 8, 9, 10\}$ |
| 符号化率 $R$ | 4/7 |
| Duty 比 $D_\mathrm{c}$ | 0.01 |
| パスロス指数 $\alpha$ | 4.0 |
| 伝搬損失オフセット $\beta$ | 9.5 |
| 伝搬周波数係数 $\gamma$ | 4.5 |
| オーバヘッドシンボル数 $O_\mathrm{sym}$ | 20.25 |
| パケットデータサイズ $B_\mathrm{data}$ | 160 [bits] |
| UL パケット生成最大周期 $G^\mathrm{p}_\mathrm{max}$ | 10 [min] |
| 探索空き時間パラメータ $u$ | 3 |
| 正規化クロックドリフト最小平均値 $\mu_\mathrm{min}$ | $-1.91 \times 10^{-3}$ |
| 正規化クロックドリフト最大平均値 $\mu_\mathrm{max}$ | $0.28 \times 10^{-3}$ |
| 正規化クロックドリフト最小分散値 $\sigma^2_\mathrm{min}$ | $9.59 \times 10^{-11}$ |
| 正規化クロックドリフト最大分散値 $\sigma^2_\mathrm{max}$ | $3.19 \times 10^{-10}$ |

送信した UL パケット数で割ったものと定義する．また，端末毎の通信品質を評価するため，端末毎の PDR の累積分布関数（CDF: Cumulative Distribution Function）特性を評価する．なお端末 $i$ の PDR は端末 $i$ の総送信成功パケット数を端末 $i$ の総送信パケット数で割ったものと定義する．

#### 4.1.2　正規化パケット受信周期

連続的なパケット衝突の影響を評価するため，正規化パケット受信周期 PRC（Packet Reception Cycle）を評価する．端末 $i$ における正規化 PRC を次式で定義する．

$$\mathrm{PRC}_i \triangleq \frac{1}{J_i - 1} \sum_{j=1}^{J_i} \left( \frac{T^\mathrm{R}_{i,j} - T^\mathrm{R}_{i,j-1}}{G^\mathrm{p}_i} \right) \qquad (11)$$

ここで，$J_i$ は GW で受信に成功した端末 $i$ のパケット数，$T^\mathrm{R}_{i,j}$ [sec] は $j$ 個目パケットの GW での受信時刻を表す．$\mathrm{PRC}_i$ より全端末の正規化 PRC の CDF 特性を評価する．

### 4.2　比 較 手 法

本提案の有効性を示すため，以下の手法と特性比較を行う．

#### 4.2.1　ALOHA プロトコル

現在，LoRaWAN で用いられている ALOHA プロトコルを使用した場合の特性を評価する．各端末 UL パケット生起後すぐにランダムに選択した周波数チャネルを用いて UL パケットの送信を行う．

#### 4.2.2　SMAC-Based プロトコル [8]

文献 [8] で提案されている，周期的トラフィックにおけるスケジューリング法（SMAC）を基にした周波数チャネル割当ての特性を評価する．文献 [8] では異なる SF 間の直交性を仮定している．しかし文献 [16], [18] より異なる SF 間での干渉が確認されているため，本稿の SMAC では SF 間は非直交としスケジューリングを行う．また，端末と GW はブロードキャストビーコンにより理想的に同期しているものとする．

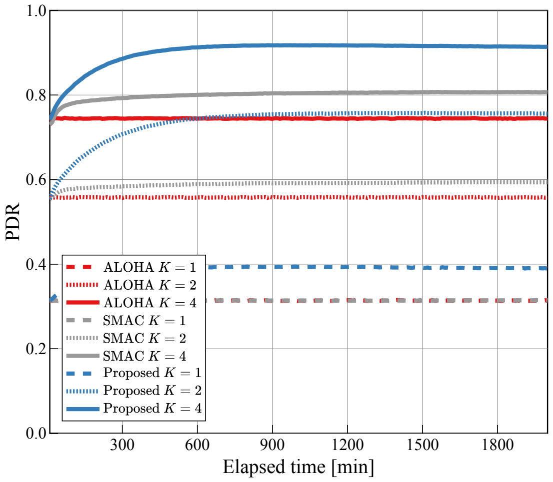


図 5　経過時間毎の平均 PDR 特性

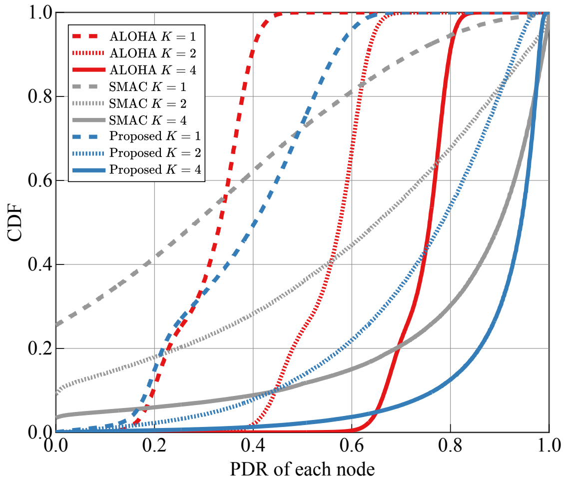


図 6　端末毎の PDR 特性の CDF

### 4.3　シミュレーション結果

#### 4.3.1　PDR 特性

図 5 にシステムの開始時刻から UL パケット生成最大周期 $G^\mathrm{p}_\mathrm{max}$ 毎の平均 PDR 特性，図 6 に各端末毎の PDR の CDF 特性を示す．図 5 より，提案手法は約 1000 分付近まで PDR が時間経過とともに改善していくことがわかる．また $K = 2$ において提案手法は ALOHA および SMAC と比較してそれぞれ最大約 20%，16%PDR を改善している．これは，提案アルゴリズムにより各端末にパケット衝突を回避する無線リソースが割当てられるためである．一方 $K = 1$ の時，約 1000 分以降提案手法の PDR が低下していることがわかる．これは，クロックドリフトを完全に補償できなかった端末が連続的なパケット衝突を引き起こしてしまうためである．また図 6 より，提案手法は全ての周波数チャネル数において ALOHA と比較して，高い PDR の端末数が増加していることがわかる．提案手法は SMAC と比較して，低い PDR の端末数が減少していることがわかる．これは，SMAC ではブロードキャストビーコンにより端末-GW が同期しているため，初期パケットの送信タイミング，周波数チャネル，UL 生成周期が一致する端末同士は常に

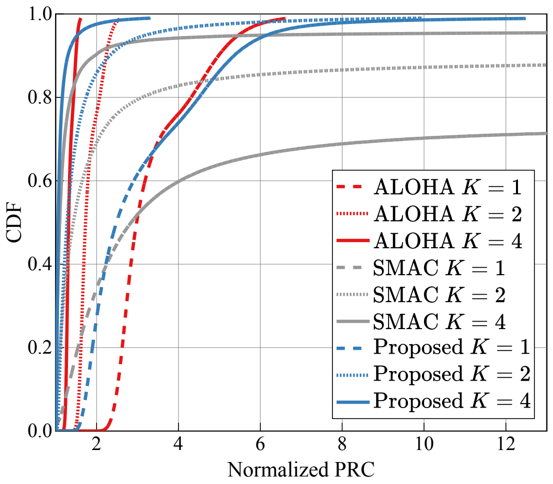


図 7　$K = 1$ における UL パケット生成周期毎の平均 PDR 特性

パケット衝突を引き起こしてしまうためである．提案手法は，リソースの再割り当てが必要な端末のみクロックドリフト補償を行うため，連続パケット衝突が発生している端末は端末間のクロックドリフトにより送信タイミングのオーバラップが解消される．よって，PDR が 0 となる端末は発生しない．しかし，提案手法ではクロックドリフトの完全補償を行なっていないため，不完全なクロックドリフト補償に起因する連続的なパケット衝突が発生する．そのため，提案手法は ALOHA と比較して，システム全体の PDR は改善しているものの端末毎の PDR では低 PDR の端末が存在している．

### 4.3.2　正規化パケット受信周期

図 7 に PRC の CDF 特性を示す．なお，図 7 は CDF = 0.99 までのプロットである．PRC は本来の UL パケット送信周期に対応する 1 を達成することが望ましい．図 7 より提案手法は ALOHA と比較して全ての周波数チャネル数において PRC が 1 に漸近する端末数が増加している．これは適切なリソース割り当てにより周期性に起因する連続的なパケット衝突が回避されるためである．また提案手法は SMAC と PRC 特性が悪い端末数が大幅に減少していることがわかる．これは，提案手法はクロックドリフトを活用することで常にパケット衝突を起こす端末が発生しなくなるためである．しかし，PRC = 1 付近では SMAC と比較して提案手法は PRC 特性が劣化している．これは，SMAC では送信オフセット無しおよび同期しているため，パケット衝突が発生しない端末は，送信オフセットによる遅延無しで連続的にパケット送信に成功するためである．

## 5.　ま　と　め

本研究では周期的な UL 通信環境におけるクロックドリフトを活かした集中制御型の無線リソース割当て法を提案した．本提案手法では，逐次的なクロックドリフト補償とパケット衝突回避を目的とした周波数チャネルおよび送信オフセット割当てを行った．計算機シミュレーションより，提案手法は ALOHA および SMAC と比較して PDR 特性をそれぞれ最大約 20%, 16% 改善可能であることを示した．またクロックドリフトを活用した無線リソース割当てを行うことで PDR が 0 となってしまう端末数を大幅に削減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 JP205004001) の委託によるものである．

## 文　　献

[1] M. Jouhari, E. M. Amhoud, N. Saeed, and M.-S. Alouini, “A survey on scalable lorawan for massive iot: Recent advances, potentials, and challenges,” *arXiv preprint arXiv:2202.11082*, 2022.

[2] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, “Internet of things for smart cities,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014.

[3] W. Guibene, J. Nowack, N. Chalikias, K. Fitzgibbon, M. Kelly, and D. Prendergast, “Evaluation of lpwan technologies for smart cities: River monitoring use-case,” *2017 IEEE Wireless Commu. Netw. Conf. Workshops (WCNCW)*, pp. 1–5, 2017.

[4] O. Georgiou, and U. Raza, “Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 162–165, 2017.

[5] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low Power Wide Area Networks: An Overview,” *IEEE Commun. Surveys & Tut.*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.

[6] R. K. Verma, S. Bharti, and K. K. Pattanaik, “Gda: Gravitational data aggregation mechanism for periodic wireless sensor networks,” *2018 IEEE SENSORS*, pp. 1–4, 2018.

[7] V. Gupta, S. K. Devar, N. H. Kumar, and K. P. Bagadi, “Modelling of IoT Traffic and Its Impact on LoRaWAN,” *in Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1–6, Dec. 2017.

[8] Z. Xu, J. Luo, Z. Yin, T. He, and F. Dong, “S-MAC: Achieving high scalability via adaptive scheduling in lpwan,” *in Proc. IEEE INFOCOM 2020*, pp. 506–515, 2020.

[9] 蕪木碧仁 安達宏一田久修 太田真衣 藤井威生, “LPWAN における周期トラフィックを考慮したリソース割り当て法の検討”, 信学技報, 2021, pp. 101–106.

[10] J. Haxhibeqiri, I. Moerman, and J. Hoebeke, “Low overhead scheduling of lora transmissions for improved scalability,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 3097–3109, 2019.

[11] 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/rec/R-REC-P.1411-11-202109-I/en, 2021.

[12] Semtech, “Semtech SX1272 Datasheets,” [online]. Available: https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1272.

[13] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, and O. Hersent, “Lorawan specification,” *LoRa alliance*, 2015.

[14] N. Aihara, K. Adachi, O. Takyu, M. Ohta, and T. Fujii, “Q-Learning Aided Resource Allocation and Environment Recognition in LoRaWAN with CSMA/CA,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 152 126–152 137, 2019.

[15] K. Tsurumi, A. Kaburaki, K. Adachi, O. Takyu, M. Ohta, and T. Fujii, “Simple clock drift estimation & compensation for packet-level index modulation and its implementation in lorawan,” *IEEE Internet Things J.*, 2022.

[16] 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.

[17] LoRa Alliance, “LoRaWAN Regional Parameters v1.1rB,” [online]Available:https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf, Dec. 2018.

[18] B. Reynders, and S. Pollin, “Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication,” in *2016 SCVT*, 2016, pp. 1–5.