

LPWA ネットワークにおける基地局負荷の分散を考慮した 自律分散型送信スケジュール手法

小南 大智[†] 合原 一究^{††} 村田 正幸^{†††}

[†] 大阪大学 大学院経済学研究科 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-7

^{††} 筑波大学システム情報工学研究科 〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

^{†††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: [†]d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp, ^{††}aihara@cs.tsukuba.ac.jp, ^{†††}murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 低消費電力かつ広域通信を実現する Low Power Wide Area (LPWA) 技術が急速に普及している。代表的な規格である LoRa や SIGFOX では、MAC 層プロトコルとして ALOHA を採用しており、将来的に予想される端末数の増加とともに、データパケットの衝突増加が懸念される。そこで本稿では時間分割をベースとした送信スケジュール手法を提案する。提案手法では、端末の通信タイミングを位相振動子モデルを用いて制御する。LPWA ネットワークでは帯域が非常に限られているため、基地局から端末への制御用通信はできる限り避ける必要がある。また、端末は省電力化を達成するために、基地局とのみ通信を行うことを前提としており、端末間の通信もできる限り避ける必要がある。本提案手法では、各端末が自律分散的に自身の位相を更新し、全端末の位相が等間隔にずれた逆相同期状態を実現する。この際、端末間の通信は行わずに、基地局がデータの受信確認応答として端末へ送信する ACK パケットに、位相更新に必要な情報を含めて送る。基地局ごとに逆相同期状態が実現されると、位相の間隔の小ささが基地局の負荷の大きさを表す。新たにネットワークに参加する端末が適切な基地局を選択して通信を行うことで負荷の分散が実現できる。計算機シミュレーションにより、逆相同期状態の実現および本提案手法の有効性を示した。
キーワード 逆相同期、TDMA、位相振動子

Self-organized transmission scheduling for LPWA networks considering gateway load balancing

Daichi KOMINAMI[†], Ikkyu AIHARA^{††}, and Masayuki MURATA^{†††}

[†] Graduate School of Economics, Osaka University

^{††} Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

^{†††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

E-mail: [†]d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp, ^{††}aihara@cs.tsukuba.ac.jp, ^{†††}murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Low power wide area (LPWA) technology that realizes low power consumption and wide area communication is rapidly spreading. LoRa and SIGFOX are patented standards. They use the ALOHA protocol as the MAC layer protocol, and therefore, as the number of nodes increases, more data packets collide with each other. In this report, we propose a transmission scheduling method based on the time-division method. In the proposed method, the communication timing of a node is controlled using a phase oscillator model. Since the bandwidth of the LPWA network is very limited, it is necessary to avoid an increase in control overhead. Also, in order to achieve power saving, nodes are assumed to communicate only with the base station, and it is necessary to avoid communication between them. In our proposed method, each nodes updates its own phase oscillator autonomously and achieves an anti-phase synchronization where the phases of all nodes are placed at regular intervals. In this manner, when the anti-phase synchronization state is realized for each base station, the phase interval indicates the load of the base station, which can be used for load balancing. Computer simulation showed that our method can realize the anti-phase synchronization.

Key words Anti-phase synchronization, TDMA, phase oscillator

1. はじめに

低消費電力かつ広域通信を実現する Low Power Wide Area (LPWA) 技術が急速に普及している。LPWA が普及する背景には、近年の IoT サービスに着目した産業界の存在があり、代表的な規格の一つである SIGFOX は 2018 年 3 月までに 60 カ国へ展開予定、もう一つの代表規格 LoRa (long range) については、2015 年に LoRa アライアンスが立ち上げられ、49 カ国 400 社以上が加盟している [1]。

LPWA 技術を用いることで、無線モジュールのみの消費電力を考慮するのであれば、通信機器が市販の電池で数年以上稼働することが可能となる。通信距離に関しては、屋外で 1 km ~ 10 km 程度離れた場所からデータを基地局に届けることができる。LPWA に対応した通信モジュールをさまざまなモノと組み合わせることで、モノから得られる情報を容易に収集すること可能となる。低消費電力かつ広域通信を実現する個々の技術自体は、既存の技術をうまく組み合わせたものであるが、その応用性は非常に高く、LPWA は IoT を邁進する技術として期待されている [2]。

現在の LPWA ネットワークでは、基地局と端末子機からなるスター型ネットワークが構築される。すなわち端末と基地局による多対一の通信形態をとっており、特に、端末から基地局への上り通信（および付随する ACK 応答）が、トラフィックの大半を占めることとなる。端末はデータの中継を行う必要がないため、自身が通信を行いたいタイミングでのみ、無線モジュールを起動すればよく、それ以外の時間は無線モジュールをスリープさせておける。このような間欠型の通信によって、無線モジュールで発生する電力消費を大幅に削減できている。

また、LPWA では、アンライセンスバンドの中でも比較的低い周波数帯（日本国内では 920MHz 帯等）を利用するため、長い通信距離が実現できている。また、冗長符号や、干渉・ノイズに強い変調方式を用いることでも通信距離を長くしている。さらに長距離通信の実現のために、データレートは比較的低く設計されており、数 100 bps ~ 数 kbps 程度である。

LPWA ではデータレートが低いため、端末がデータを送信している時間が長くなる。LoRa や SIGFOX では、MAC 層に ALOHA プロトコルを採用しており、端末数の増加とともにデータパケットの衝突増加が懸念される。また、CSMA (Carrier Sense Multiple Access) を採用したとしても、CCA (Clear Channel Assessment) では検出されないような非常に微弱な電力でも、基地局で受信できてしまう場合があるために、結果的に ALOHA と同様の状況になってしまうことも想定される。このような問題を回避する方法として、LPWA で複数の無線チャンネルが利用可能であること、複数の基地局を利用可能であることを利用する方法がある。しかしながら、端末数が非常に多くなると、端末から情報を収集し、それぞれの端末に対して最適な無線チャンネルを割り当て、最適な基地局を選定して割り当てることは非常に困難となる。計算量が膨大になることだけでなく、通信帯域が非常に限られている LPWA ネット

ワークにおいて、端末からの情報収集および端末への制御に要する通信自体が、帯域を圧迫する原因になるためである。

以上より我々は、LPWA ネットワークにおける自律分散型の制御手法を検討している。本稿ではその取り組みの一つとして、端末の自律分散的な送信スケジュール制御により、基地局におけるデータ受信時の衝突を回避する方法、および、複数の基地局が存在する際にそれらの負荷を分散する方法を提案する。提案手法では、(1) 端末の送信タイミングを位相振動子モデルで表現し、送信するデータが発生した際には、自身の位相が 0 になるまで待機してから送信を行う。全端末の位相が互いに等間隔となる逆相同期状態を実現することで、衝突を回避することが可能である。この際、位相振動子の周期を長くするほど衝突を回避できる可能性が増加するが、遅延も増加することとなる。そのため、(2) 端末は自身がデータを発生させる周期や、アプリケーションに要求される遅延よりも、位相振動子の周期が長くなる場合には、複数の振動子を持つこととする。 p 個の振動子を持つことで、平均的に $1/p$ 周期ごとに送信機会を得ることができると考えられる。そして、(3) 新たにネットワークに参加する端末については、負荷の小さな基地局を選択することで、負荷分散を実現する。上述の逆相同期状態が達成された状態においては、位相が隣り合う端末間の位相差が負荷の大きさに比例する。そのため、一定時間基地局からの通信を傍受することで、基地局の負荷を各端末が推定することが可能となる。

2. 位相振動子モデル

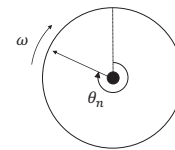


図 1 位相振動子

端末 n の通信タイミングを位相モデル [3] によって記述する。このモデルでは、長さ 2π の円環を想定し、円環上において位相 θ_n を定義する (図 1)。ここで、円環上の任意の一点を原点 $\theta_n = 0$ とし、任意の整数 k に対して、 θ_n と $\theta_n + 2k\pi$ を同じ状態と定義する。各端末の位相は、他の端末との相互作用がない限り、式 (1) に従い変化する。ただし、 ω は正の定数である。

$$\frac{d\theta_n}{dt} = \omega \quad (1)$$

端末 n は、 $\theta_n = 0$ のタイミングで通信を行う。複数の端末が存在する際に、それぞれの端末の位相が等しい状態を同相同期状態、それぞれの端末の位相が円環上に等間隔に存在する状態を逆相同期状態と呼ぶこととする。文献 [4,5] では、無線センサーネットワークにおいて、端末による自律分散的な位相制御により、逆相同期状態を達成する方法を提案しており、本研究はこれらの手法に着想を得た衝突回避手法を提案する。

3. LPWA ネットワークにおける送信スケジュール手法

本稿で提案する手法では、端末が自律分散的に通信タイミングの決定を行う。自律分散的な位相の逆同期化による衝突回避、遅延時間要求を考慮した位相振動子数決定の二点を以降では説明する。また、端末が新たにネットワークに参加した際には、端末側が通信先の基地局を選択することとし、その際の基地局の負荷を推定する方法と、負荷分散を考慮した接続先基地局の決定方法を説明する。本稿では各端末による自律分散的な位相制御および通信先基地局の決定方法を検討しており、基地局側での集中的な制御を用いていないのは、LPWA ネットワークにおいては通信資源が非常に限られており、LPWA 端末一台一台から制御情報を収集することに要するコストが非常に大きいためである。本提案手法では、端末から基地局に届いたアプリケーションデータに対する確認応答の ACK に、少量の情報のみを追加することで、データ衝突の回避および基地局負荷の分散を自律分散的に実現する。

3.1 提案手法の概要

前述の位相振動子を各端末が所持する。送信するデータが発生した際には、自身の位相が 0 になるまで待機してから送信を行う。この際、各端末の位相が互いに等間隔にずれる逆同期状態を実現することで、衝突の回避を行うことができる。文献 [4,5] では、端末同士の相互作用によって、各端末が自律的に振動子の位相を更新することで、逆同期状態を実現する方法が提案されている。しかしながら、既存の LPWA システムでは端末同士の通信がほとんど考慮されておらず、これらの手法を LPWA システムに直接適用することはできない。そこで本稿では、基地局からの ACK を介した解決を行う。LPWA では通常は上り方向の通信のみが行われる。下り方向に通信を行うためには、端末が一定周期で受信待機状態となる必要があるが、これは消費電力の増加を招くことになる。本稿では上り方向の通信のみが発生するアプリケーションを想定して、基地局は過去に他の端末が通信を行った際の位相を記憶しておき、必要に応じてその情報を ACK に載せて送る。これにより、端末は逆同期に必要な情報を獲得できる。

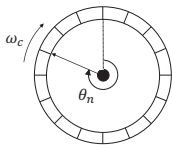


図 2 離散化した位相振動子

通信タイミングの決定については前述の通り位相振動子モデルを用いることとする。ただし、二つの端末の位相がずれていても、位相差が小さいと、基地局においてデータが衝突する可能性がある。そこで、図 2 のように、振動子の 1 周期を複数の同サイズのスロットに分割して離散化し、一つ一つのスロットサイズを十分大きくすることで衝突の発生確率を減らすこととする。位相は Δ だけ時間が経過するごとに更新されることと

すると、 θ_n の更新は以下の式 (2) となる。

$$\theta_n(t + \Delta) = \omega_c + \theta_n(t) \quad (2)$$

ここで、 ω_c は正の定数であり、全スロット数 N に対して、 $\omega_c = 2\pi/N$ と定義する。 N は任意の値であるが、その値が小さいほど、送信データの発生から送信完了までの時間は短くなる。一方、基地局が収容できる端末数は最大で N となるため、 N が小さい場合には収容できる端末数も小さくなる。 Δ については、端末からのデータ送信開始から、そのデータに対する基地局の ACK 送信が完了するまでの時間よりも長く設定する必要がある。これらの振動子については、MAC 層より上位の層で準備しておくことで、既存の通信手順に対する変更は ACK に対して逆同期に必要な情報を含める点のみとなる。ここで、端末が位相振動子を用いて通信タイミングを決定する場合、他の端末との衝突を回避するためには、端末間で時刻同期が行えていることが必要となる。この点については、逆同期の実現方法の説明とともに詳細を述べる。

スロットの数 N が大きくなると、データが発生してから送信を行うまでの待ち時間が増加することになる。端末によっては、データの発生からデータを届け終わるまでの遅延時間を一定時間以内に抑える必要がある場合が考えられる。本提案手法では、一つの端末が複数の位相振動子を持つことで、通信機会を増やすことが可能であり、これにより待ち時間の短縮が可能となる。提案手法においては、要求遅延時間以下になるように各端末は自身の振動子を決定する。ただし、ある端末が複数の位相振動子を持つ場合にも、それらの振動子の位相が近いと、通信機会は増えるものの、最大遅延はほとんど改善されない。そのため、複数の振動子を持つ端末は、自身の位相振動子について逆同期に近い状態を実現する必要がある。

ここまでは単一の基地局が存在する状況を想定しているが、LPWA ネットワークにおいては、複数の基地局を設置することが可能である。本稿では各端末の位相を逆同期状態とする手法を提案しており、一度ある基地局において逆同期状態が実現されていれば、その基地局に接続する互いの位相が最も近い二端末の位相差の逆数は、単位時間あたりに基地局へ到着するデータ量に比例することとなる。そこで、新たな端末がネットワークに参加する際には、この値を元に基地局の負荷を推定し、負荷の小さい基地局を通信先として選択することで、負荷の分散を実現する。

3.2 自律分散的な位相の逆同期化による衝突回避

位相の更新方法については、DESYNC [4] が用いている相互作用関数を応用する。DESYNC はセンサーネットワークにおける逆同期の実現を行う手法である。DESYNC では、全ての端末が互いに通信範囲内に存在することを仮定しており、位相が 0 となった際にビーコンを送信することで、自身の位相を他の端末に伝える。各端末は自身の位相を以下の式 (3) により更新する。

$$\theta_n(t + 1) = \alpha\theta_n(t) + \beta\theta_{mid}(t) \quad (3)$$

ただし、 $\theta_{mid}(t) = (\theta_{n^+}(t) + \theta_{n^-}(t))/2$ 、 n^+ および n^- は、端末 n の位相が 0 になる直前および直後に位相が 0 になる端末を表す。すなわち、端末 n は自身の位相を、端末 n^+ および n^- の位相の平均値に近づけるように更新する。 α 、 β は 1 を最大値とする正の定数であり、 $\alpha + \beta = 1$ を満たす。

DESYNC では、各端末は他の端末のピーコンを受信することで、それらの位相情報を取得できるが、本提案手法の想定する LPWA 環境では、同様の方法で他の端末の位相情報を得ることが困難である。そのため本稿では、基地局からの ACK に、DESYNC の θ_{n^+} 、 θ_{n^-} に相当する位相情報を追加して送信することとする。各端末は ACK に載せられた位相情報を元に、自身の位相を更新する。

基地局はある端末からデータが届いた際に、その直前に位相が 0 となる端末と直後に位相が 0 となる端末の、現在の位相を知っている必要がある。本提案手法では、基地局自身も位相振動子を所持し、さらに位相表を維持することでこの点を解決する。システムの稼働時に基地局は N を決定し、自身の位相振動子および位相 $0 \sim \omega_c(N-1)$ の利用状況を表す、要素数 N の位相表を作成する。基地局の位相振動子は、端末からの相互作用を受けず、常に式 (2) によって更新される。また、位相表の各要素の初期値は 0 とし、基地局の位相が $\omega_c i$ であるときに、ある端末の位相が 0 となることを基地局が把握した際に、位相表の i 番目の要素を 1 とする。基地局は位相が式 (2) によって更新されてから $\Delta - \delta$ 経過した直後に ACK を送信する ($0 < \delta < \Delta$)。本手法では全端末が Δ および δ を共有していることとしており、各端末は基地局から ACK が到着した時刻から δ 経過した時点を離散化した位相スロットの開始時刻とすることで、全端末において位相が変化するタイミングを同期する。

提案手法は位相を離散化したため、DESYNC を応用した更新則を新たに定義する必要がある。以下に、本提案手法における位相更新のための、基地局および端末の動作を示す。

a) 基地局

ここで、端末 n からデータが到着した際に、基地局の位相が $\omega_c i$ であったとする。基地局は位相表を確認し、 i から増加する方向および減少する方向に探索する。それぞれの方向で要素が 1 である箇所を最初に見つけた際、要素が位相表の何番目の要素であるかを i^+ 、 i^- として出力する。この際、要素が 1 である項目が一つも存在しない場合は i^+ と i^- の両方に N を設定する。一つだけ存在する場合は見つかった番号を i^+ に、 i^- には N を設定する。二つ以上存在する場合は、それぞれの探索結果を i^+ 、 i^- に設定する。データを送信してきた端末への ACK に i^+ 、 i^- を含めて送信することで、端末は ACK に含まれる i^+ 、 i^- を元に位相を更新することができる。ここで、後述する端末の位相更新則を、基地局も共有していることとする。すなわち、基地局は $\theta_n(t + \Delta)$ を計算することが可能であり、ACK 送信後に、位相表の $\theta_n(t)/\omega_c$ 番目を 0 に、 $\theta_n(t + \Delta)/\omega_c$ 番目の要素を 1 に更新する。ここで、端末のネットワークからの離脱を考慮して、位相表の各要素には TTL を定める。各要素について、最後に更新があったから T_{TTL} だけ経過した際にその

要素を 0 とする。

b) 端末

端末 n は基地局から届いた ACK に含まれた i^+ 、 i^- の値を確認し、式 (4) に従って位相を更新する。

$$\theta_n(t + \Delta) = \begin{cases} \theta_n(t) & (i^+ = N, i^- = N) \\ \omega_c(i^+ + N/2) & (i^+ \neq N, i^- = N) \\ \alpha\theta_n(t) + \frac{\beta}{2}(\omega_c i^+ + \omega_c i^-) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

ただし、データ送信後から一定時間経過しても、基地局からの ACK が届かない場合は、他の端末と位相が同期しているものと考え、 $[0, N-1]$ の範囲からランダムに整数 j を選び、位相を $\omega_c j$ に更新することとする。

以上の各端末による自律分散的な位相の更新により、逆相同期状態を実現する。

3.3 端末の遅延時間要求を考慮した位相振動子数制御

ここまでは、各端末の持つ位相振動子の数が単一であることを前提としていた。しかしながら、この前提は必ずしも必要ではなく、各端末が複数の位相振動子を持つことも可能である。特に前述の通り、スロットの数 N が大きくなると、データが発生してから送信を行うまでの遅延時間が増加することになり、アプリケーションに要求される遅延時間を満たすことが困難になる状況が考えられる。データの発生から基地局にデータが届くまでの要求遅延時間を T_{req} とするとき、端末 n は自身の所持する位相振動子の数 p_n を以下の式 (5) によって決定する。

$$p_n = \lceil \frac{N \cdot \Delta}{T_{req}} - 1 \rceil \quad (5)$$

ただし、ある端末が複数の位相振動子を持つ場合に、各振動子の位相が近い場合には、平均遅延は改善するものの、最悪遅延はほとんど改善されない。そのため、複数の振動子を持つ端末は、自身の位相振動子の初期値を、互いに等間隔に設定することとする。また、ACK が届かない際には位相をランダムに更新すると前述したが、複数の振動子を持つ際に乱数の範囲を $[0, N-1]$ とすると、初期値を等間隔に設定した意味が失われる。そこで、 k 個の振動子を持つ端末 n について、その振動子を昇順にならべた $\theta_n^0 \sim \theta_n^{k-1}$ について、 m 番目の振動子 ($0 \leq m \leq N-1$) が 0 になった際に送信したデータに対して ACK が返ってこない場合は、前述の乱数の範囲を $[(\theta_n^{m-1} + \theta_n^m)/(2\omega_c), (\theta_n^{m+1} + \theta_n^m)/(2\omega_c)]$ とする。

3.4 負荷分散を考慮した接続先基地局の決定

前節までは、単一の基地局が存在する状況において、逆相同期状態を実現する方法を示してきた。LPWA ネットワークにおいては、複数の基地局を設置することが可能であり、本稿では各端末が自律的に接続する基地局を選択する状況を想定する。このとき、ある基地局において逆相同期状態が実現されていれば、その基地局の負荷は、基地局の持つ位相表において、要素が 1 となる項目の間隔に反比例する。また、逆相同期状態が実現されていれば、式 (4) で用いた、基地局からある端末への

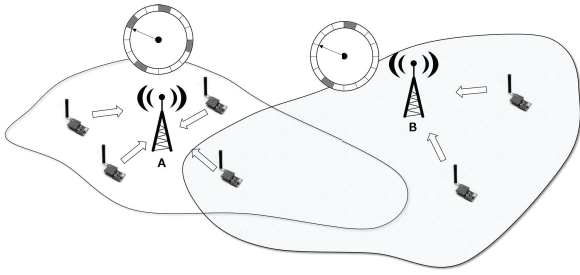


図3 端末による基地局負荷の推定

ACKに含まれる、 i^+ , i^- の差は、要素が1となる項目の間隔に一致する。

以上より、ACKに含まれる位相情報から、端末が基地局の負荷を推定することが可能である。新たな端末がネットワークに参加する際には、通信可能な範囲に存在する基地局が送信するACKを傍受する。 i^+ , i^- の差が大きければ基地局への通信量が少なく、差が小さければ基地局への通信量が多いことが分かるため、 i^+ , i^- の差がより小さい基地局を通信先として選択することで、基地局間の負荷分散が実現できる。図3は、基地局AおよびBにそれぞれ4台、2台の機器が接続している様子を示している。円環上の空白のスロットは位相表が0、塗り潰したスロットは位相表が1であることを表している。AおよびBの両方の通信エリアに新たに端末が追加されると、 i^+ と i^- の差は、基地局Aでは3あるいは4であり、基地局Bでは7あるいは9であるため、基地局Aを通信先として選択することとなる。

4. シミュレーション評価

本稿では計算機シミュレーションによって、提案手法の動作検証および性能を評価する。

4.1 逆相同期による衝突回避

50台の端末が、単一の基地局に対して通信を行う状況を想定する。各端末は30分ごとに一つ、周期的にデータを生成し基地局に送信する。ここではLPWAネットワークを想定し、データサイズを60 byte、ACKサイズを20 byte、通信速度を1 kbpsとする。各端末はALOHAプロトコルによってデータおよびACKを送信する。1スロットの時間に相当する Δ は1sに、 N を100に設定した。ここで、1sは、データの送受信およびACKの送受信を成功して終わるまでの時間よりも十分に大きい値として用いている。また、 $\alpha = 0$, $\beta = 1$, $T_{TTL} = 300$ sとし、各端末の初期位相は0とした。10,000s間のシミュレーション結果を図4、図5、図6に示す。

図4は、シミュレーション開始から終了までの各ノードの位相の変化を示したものである。横軸は時刻、縦軸は各端末の位相である。定性的には、時間の経過とともに逆相同期に近づいていることが確認できる。また、10,000s経過時点でも各端末の位相が変化を続けており、完全な逆相同期状態に至っていないことが分かる。逆相同期状態を定量的に確認するために、図5ではオーダーパラメータの時間変化を示している。ここで用いたオーダーパラメータ r は式(6)であり、1に近いほど同

相同期状態に近く、0に近いほど逆相同期状態に近いことを表す[3]。全ノードの初期位相を0としているため、シミュレーション開始時はオーダーパラメータは1であり、時間の経過とともに0に近づいていることが分かる。シミュレーション開始してから400s経過した時点でオーダーパラメータは0.2まで減少しており、その後は徐々に減少を続けている。このように、逆相同期状態が実現されることで、3.4で述べた負荷分散は容易に実現可能となる。

$$r = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M e^{i\theta_n} \quad (6)$$

図6は、100sごとに計測した、平均衝突データ数を示している。ここで衝突データ数とは、基地局においてデータ衝突が起きた際に、何台の端末から同時にデータが送られたのかを表す値である。100sの間に衝突が起きたスロットの数で、衝突数を割った値を平均衝突データ数としている。時間経過とともに逆相同期が進むと同時に、平均衝突数が減少していることが確認できる。特に、800s以降では衝突が全く発生しておらず、本手法の有効性が確認できる。

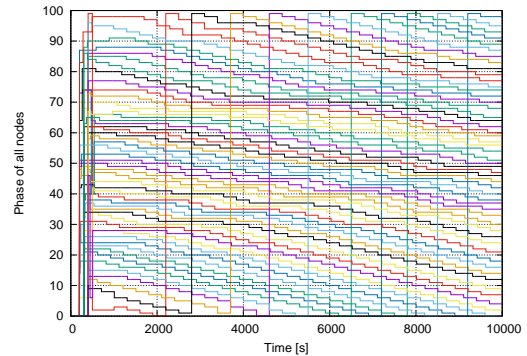


図4 各端末の位相の推移

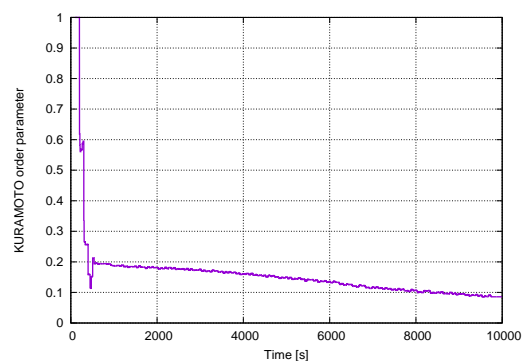


図5 オーダーパラメーター

4.2 複数の位相振動子所持による遅延削減

一部の端末について、遅延時間に関する制約がある状況を想定する。ここでは、データの発生から15s以内にデータを基地局に届ける必要がある端末を想定する。 $\Delta = 1$ s, $N = 100$ であるため、この端末における振動子の数は式(5)より5となる。ネットワーク内に存在する全振動子の数を前節の設定と

表 1 遅延時間

| | 平均遅延 [s] | 標準偏差 [s] | 最小遅延 [s] | 最大遅延 [s] | 成功率 [%] |
|--------|----------|----------|----------|----------|---------|
| 振動子数 1 | 54.52 | 32.54 | 0.12 | 99.95 | - |
| 振動子数 5 | 19.89 | 19.49 | 0.05 | 67.99 | 55 |

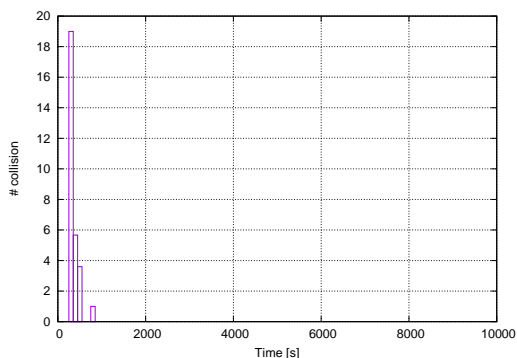


図 6 平均衝突データ数の推移

揃え、2 台の端末がデータの発生から到着までの遅延時間に上記の制約があり、40 台の端末には特に制約は存在しない状況を想定する。各端末のデータ発生は前節と同様で、30 分ごとに一つ、周期的にデータを生成し基地局に送信することとする。

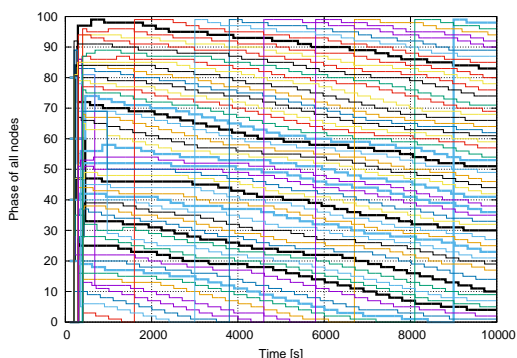


図 7 各端末の位相の推移 (複数振動子)

各端末の位相の変化を図 7 に示す。ここで、同一の端末が持つ複数の振動子については、位相の変化を同色の太線で表している。図から分かるように、同一の端末における振動子の間隔は等間隔とは遠い結果となっている。これは、ACK が届かない際の位相の更新において乱数を用いていることが原因であり、3.3 で説明した、乱数の生成範囲を限定した方法のみでは不十分であるといえる。

表 1 には、振動子数が 1 の端末と振動子数が 5 の端末のそれぞれについて、データ発生から基地局に到着するまでの遅延時間の平均値、標準偏差、最小値、最大値、要求遅延以内にデータを届けることのできる割合 (成功率) を示している。振動子数を増やすことで遅延時間を改善できていることが分かるが、アプリケーションの要求する遅延時間を、平均値が満たしていないことが分かる。これは、二つの位相の間隔が長くなるほど、その間に発生するデータ数が大きくなるためであり、式 (5) で想定している平均遅延時間よりも、実際の平均値が大きくなっている。ただし、半数以上のデータは遅延要求を満たして到着

しており、振動子の数を増加させる効果は確認できる。より適切に振動子の位相を更新すること、また、動的に振動子の数を制御することがこの問題の解決に有効であると考えられ、その方法については今後の課題と考えている。

5. おわりに

本稿では LPWA ネットワークにおける、データ衝突を回避するためのデータ送信スケジュール手法を提案した。提案手法では、端末のデータ送信タイミングを決定するために位相振動子モデルを用いており、各端末は、自律分散的に自身の位相を更新する。端末から基地局に送信したデータに対する ACK にネットワーク内の位相情報を含めることで、基地局に接続する全端末に関して、位相が互いに等間隔に離れた、逆相同期状態を実現することができることを示した。また、一つの端末が複数の位相振動子を持つことで、データ発生から送信までの遅延時間を短縮することが可能であることを示した。このように逆相同期状態が実現されると、位相の間隔の小ささが基地局の負荷の大きさを表すため、端末が通信先となる基地局を適切に選択することで負荷分散が実現できる。

今後の課題として振動子数の動的な更新方法の検討や、より端末数を増やした状況下での、ALOHA 方式・CSMA/CA 方式との比較による、手法の有効性の確認がある。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費 挑戦的萌芽研究 16K12396 によるものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] 鄭立, IoT ネットワーク LPWA の基礎, RIC Telecom, 2017.
- [2] R.S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," ICT Express, vol.3, no.1, pp.14–21, March 2017.
- [3] Y. Kuramoto, Chemical oscillations, waves, and turbulence, vol.19, Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] J. Degesys, I. Rose, A. Patel, and R. Nagpal, "DESYNC: self-organizing desynchronization and TDMA on wireless sensor networks," Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks, pp.11–20, April 2007.
- [5] A. Mutazono, M. Sugano, and M. Murata, "Energy efficient self-organizing control for wireless sensor networks inspired by calling behavior of frogs," Computer Communications, vol.35, no.6, pp.661–669, 2012.