

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 (大阪大学)
合原一究 (筑波大学)
村田正幸 (大阪大学)

1

発表の概要

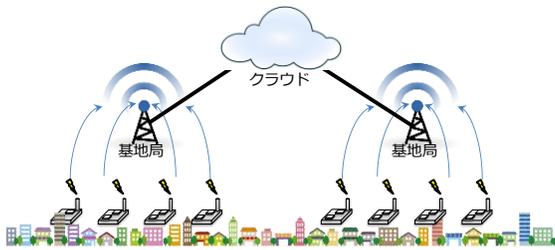
2

- 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
 - 基地局が N 個のタイムスロット (1スロット1s程度) を準備する。個々の端末は自身がデータの送信に用いるタイムスロットを自律分散的に決定する。利用されるタイムスロットが等間隔になるようにすることで、隣り合う二つの利用スロットが分かれれば、基地局にデータの届く頻度が推定できるため、この情報を元に負荷分散を行う手法を提案した
- 要素技術
 - LPWA
 - 位相振動子モデル
 - DESYNC

研究背景

3

- Low Power Wide Area (LPWA)
 - 少ない送信電力で (送信電力 20 mW)
 - 広い範囲に (1 km~100 km) データを送る技術
 - 多端末→基地局のスター型であり、**上り方向通信**が中心

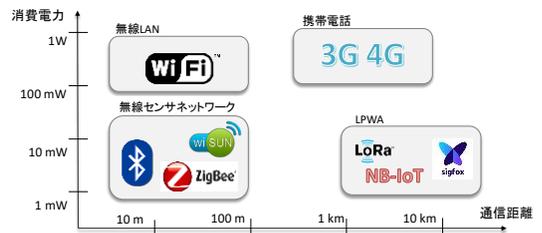


従来の無線ネットワーク技術と LPWA

4

- 消費電力と通信距離からの比較
 - 省電力化による端末の長寿命化
 - 通信範囲の拡大によるカバレッジ設計の容易さ

IoT サービス普及に向けて重要な技術として着目されている



LPWA を実現する技術要素

5

■ 低消費電力かつ長距離通信を実現する技術要素

低消費電力の実現

- 単純なメディアアクセス方式: ALOHA
- 間欠通信: 非通信時には無線機器をスリープさせる
- 基地局との直接通信: 中継の必要がなく、長時間スリープ可能

長距離通信 (数 km~数 10 km) の実現

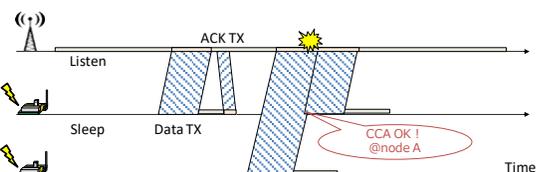
- 低い伝送速度 (100 bps~数 kbps): 速度が遅いほど単位 bit あたりのエネルギーが大きくなる
- 低い周波数帯 (920 MHz 帯): 信号減衰が少ない
- 冗長化 (拡散符号・誤り訂正など)
- 高いアンテナ受信感度

MAC 方式における問題点

6

■ ALOHA プロトコル

- 端末はデータ発生直後に基地局に向けてデータを送信
 - もし CCA を用いた場合も、基地局受信感度が非常に高いため、衝突が発生する可能性がある
- 基地局はデータ受信成功後に確認応答 (ACK) を送信
 - ACK が届かなければ再送を試行



端末数の増加や同一周波数帯を用いる他のシステムが増加すると、通信衝突の増加が問題となる

目標とアプローチ

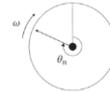
7

- 本発表での目標
 - データ衝突の回避によるデータ受信成功率の向上
- アプローチ
 - 端末による自律分散的な衝突回避
 - a. 位相振動子モデルを用いたバックオフ制御
 - 各端末が位相振動子を持ち、データ発生後は振動子の位相が 0 になるまで待つてからデータを送信する
 - 端末ごとの位相がずれていれば衝突が回避できる
 - ただし、端末間の直接通信は困難
 - b. 負荷分散を実現する基地局の選択
 - 前述の位相のずれを用いることで基地局へデータが届く頻度を推定
 - ただし、LPWA では（まだあまり）下り方向の制御用通信は考慮されていない

位相振動子モデルを用いたバックオフ制御

8

■ 位相振動子モデル



- 長さ 2π の円環上において端末 n の位相 θ_n を定義
 - 円環上の任意の一点を原点 $\theta_n = 0$
 - 任意の整数 k に対して、 $\theta_n = \theta_n + 2k\pi$
 - 各端末の位相は、他の端末との相互作用がない限り、 $d\theta_n/dt = \omega$ に従い変化 (ω は正の定数)
- 位相振動子による送信時刻制御
 - 各端末は位相振動子を所持
 - データ発生後に自身の位相が 0 になるまで待機し、0 になった際に、基地局にデータを送信する

位相の逆同期化

9

- DESYNC [1]
 - 位相振動子モデルにおいて**逆同期状態**を実現する
 - 各端末の位相が等間隔になるようにずれた状態
 - 端末 n が他の端末から受ける作用を以下で定義
 - $\theta_n(t+1) = \alpha\theta_n(t) + (1-\alpha)\theta_{mid}(t)$
 - ただし、 $\theta_{mid}(t) = \frac{\theta_{n^+} + \theta_{n^-}}{2}$, α は 0~1 の定数
 - n^+, n^- は端末 n の直前・直後に位相が 0 になる端末
 - 前提：全ての端末が互いに通信可能な範囲に存在する

[1] J. Degeys, I. Rose, A. Patel, and R. Nagpal, YDESYNC: 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.

LPWA への位相振動子モデルと DESYNC の適用

10

■ 検討点と解決方法

- (位相差/ ω) がデータ・ACK の送受信時間に対して十分大きい値であることが必要 (数100ms~数sのオーダー)
 - ▶ 位相を離散化して、(単位位相/ ω) がデータと ACK の送受信完了時間よりも長くなるように設計する
- 端末間の同期が必要
 - ▶ 基地局も位相振動子を所持・更新し、離散化した位相が切り替わる一定時間前に現在の位相 k を ACK に載せて送信する。各端末は ACK の受信完了時刻を位相 $k+1$ の開始時刻とする
- 端末同士の通信が困難
 - ▶ 基地局が ACK に位相更新用の情報を追加して送信

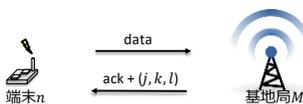
位相の更新手順

11

- 基地局側
 - データに対する ACK に、現在の位相、直前・直後に利用される位相情報載せて返す
 - 返信後に位相表を更新
 - 一定期間 (TTL) 使用されていない箇所をクリア
 - 端末が次回利用する位相を登録
 - 端末側の更新則は既知としている
- 端末側
 - ACK に含まれる情報を元に位相を更新

$$\theta_n(t+1) = \alpha\theta_n(t) + \omega_c(1-\alpha)(j+k)/2$$
 - ACK が届かない場合はランダムな位相に更新

slot	used	lasttime
0	1	500
1	0	-
⋮		
j	1	505
\vdots	0	-
k	1	508
\vdots	0	-
l	1	513
\vdots		
N-1	0	-



負荷分散を考慮した接続先基地局の選択と接続手順

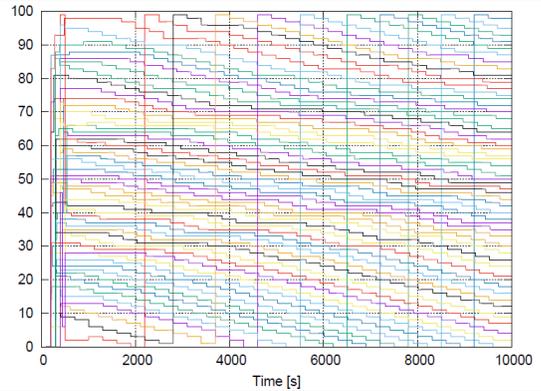
12

1. 端末側
 - 基地局が送信する ACK を傍受して、利用されているスロットの間隔が最も長い基地局を選択して attach 要求を送信
2. 基地局側
 - 端末からの attach 要求に対する承認応答に、基地局の持つ位相振動子の情報を含めて送信
3. 端末側
 - 承認応答の受信終了時刻を位相 $k+1$ の開始時刻に設定し、離散化した位相振動子を作成



■ シミュレーション設定

- ネットワークモデル
 - 端末数：50 台、基地局数：1 台のスター型ネットワーク
- 通信モデル
 - データ発生：各端末から5分ごとに1個周期的に発生
 - パケットサイズ：データ 60 byte、ACK 20 byte
 - 伝送速度：上り下りともに 1 kbps
 - パケット損失：衝突時には必ず損失する
 - 再送：なし
- 提案手法内のパラメータ
 - 離散化後の総スロット数：100
 - 角速度 $\omega_c = 1$ [unit phase/s]
 - DESYNCパラメータ $\alpha = 0$
 - 初期位相：全ノードで同期
 - TTL：10 分

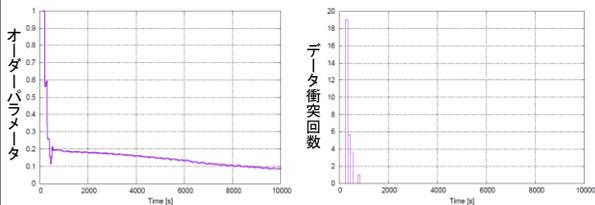


■ オーダーパラメータ

- $\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M e^{i\theta_n}$ ：全端末の位相が同期していると1、逆相同期していると0になる

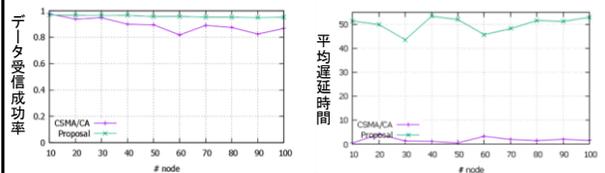
■ データ衝突回数

- 基地局での衝突発生時に、同一位相を利用して送信した端末数



■ 受信成功率と平均遅延時間で CSMA/CA と比較

- CSMA/CA モデル
 - CCA：他端末が通信中であれば必ず検出
 - パケット損失：パケット衝突時は必ず損失
 - 再送回数：1 回
- 受信成功率：端末が生成したデータのうち、基地局が受信に成功したものの割合
- 平均遅延時間：データが発生してから到着するまでの平均時間



■ まとめ

- LPWA における端末による自律的なデータ衝突回避方法を提案
 - 位相振動子モデルを用いて送信タイミングを制御した
 - 端末同士の通信がない状況でも、基地局によるACKを用いることで逆相同期を実現ことを示した
 - 逆相同期が実現されることで、利用されている位相の情報を元に基地局の負荷を推定でき、その情報をもとに負荷分散の実現が可能
 - CSMA/CA と比較して高いデータの受信成功率を実現できるが、一方で、遅延時間は増加することを示した
 - (発表では割愛) 端末が複数の位相振動子を所持し、いずれかの振動子の位相が0になった際に送信可能とした。それぞれが提案手法に従って動作することで、遅延時間の削減が可能であることを示した

■ 現状の取り組み

- 端末が所持する振動子数の動的な更新による遅延保証方法
- 通信品質を考慮した自律的な通信チャネル・送信先基地局の選択