

Backscatter 通信に向けた非同期方式 MAC プロトコルに関する一検討

小泉 亮介<sup>†</sup> 小西 陽平<sup>‡</sup> 木崎 一廣<sup>‡</sup> 藤橋 卓也<sup>‡</sup> 猿渡 俊介<sup>‡</sup> 渡辺 尚<sup>‡</sup>  
<sup>†</sup>大阪大学工学部 <sup>‡</sup>大阪大学大学院情報科学研究科

1 はじめに

Internet of Things (IoT) デバイスの送信電力を削減する方法として、無線送信に信号増幅を必要としない backscatter 通信が注目されている。文献 [1] では、従来の IEEE 802.15.4 送信機と比較して消費電力を約 1/1000 に低減できる IEEE 802.15.4 compatible backscatter が提案されている。しかしながら、backscatter 通信向けの Medium Access Control (MAC) プロトコルは未だ確立されていない。本稿では、backscatter 技術の IoT ネットワークへの導入を見据えた新しい MAC プロトコルを提案する。

2 Backscatter 通信とその課題

図 1 に想定する backscatter 通信の構成を示す。搬送波送信機は backscatter tag に対して搬送波を供給する。Backscatter tag は各種センサを具備し、供給された搬送波を空間で変調することでセンサ情報を送信する。Backscatter 受信機は、backscatter tag から送信されたパケットを受信する。上述の通信構成を基に、既存の無線システムと互換性を持つ backscatter 通信や従来の無線通信と共存する仕組みが研究されてきた。一方で、同一周波数帯において複数の backscatter 通信を多重化する MAC プロトコルは未だ確立されていない。

これまで研究されてきた backscatter 通信向けの MAC プロトコルは、同期方式と非同期方式に大別される。同期方式 MAC プロトコルとしては、Time Division Multiple Access (TDMA) や Carrier Sensing Multiple Access (CSMA) が挙げられる。搬送波送信機と backscatter tag が時刻同期するため、backscatter tag は搬送波の供給に合わせてデータを送信する。また、backscatter tag 同士も同期を行うため、CSMA において衝突の検知や回避が可能となる。しかしながら、同期方式 MAC プロトコルの研究の多くは時刻同期やキャリアセンスに伴う backscatter tag の消費電力の増大について言及していない。Backscatter tag は超低電力なデータ送信を実現する一方、ダウンコンバートを必要とするデータ受信や受信待ち時には多大な電力を要するため問題となる [2]。

非同期方式 MAC プロトコルとしては、Code Division Multiple Access (CDMA) や ALOHA に基づく接続方式が挙げられる。同期に伴うパケットの受信を必要としないため低電力での運用が可能である。例えば、文献 [3] は CDMA に基づいた集中制御を必要としない多元接続方式を提案している。しかしながら、先行研究では backscatter tag に搬送波が絶えず供給される理想的な環境を想定している。実環境では、他の無線デバイスとの周波数資源共有の観点から、backscatter tag に搬送波を供給し続けることは難しい。非同期の場合、backscatter tag は搬送波の供給の有無をキャリアセンスによって判別することができない。Backscatter 通信向けの非同期方式 MAC プロトコルは、通信を多重化する仕組みの他に搬送波の供給にも工夫が必要である。

3 提案手法

2 節の議論を基に、本稿では backscatter 通信の多重化と搬送波の送信時刻の調節を両立する非同期方式 MAC プロトコルを提案する。提案する MAC プロトコルは、搬送波と backscatter tag のパケット送信間隔の工夫と疑似同期システムから構成される。

3.1 搬送波と backscatter tag のパケット送信間隔の工夫

提案する MAC プロトコルでは、搬送波送信機は一定の送信間隔  $T$  で搬送波の送信を行う。Backscatter tag は、 $T$  に基づいて設定された間隔で同一の情報を繰り返し  $n$  回送信する。図 2 に、搬送波の送信間隔  $T$  に基づいた backscatter tag のパケット再送信間隔の設定方法を概要を示す。Backscatter tag のパケットの送信から次のパケットの送信までを 1 つのタイムスロットとする。タイムスロットの幅は、搬送波の送信周期  $T$  を  $n$  等分するように設定する。これにより起動時刻に関わらず、backscatter tag の

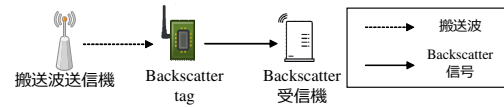


図 1: Backscatter 通信の構成

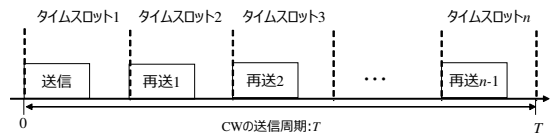


図 2: タイムスロットによるパケットの再送信間隔の設定

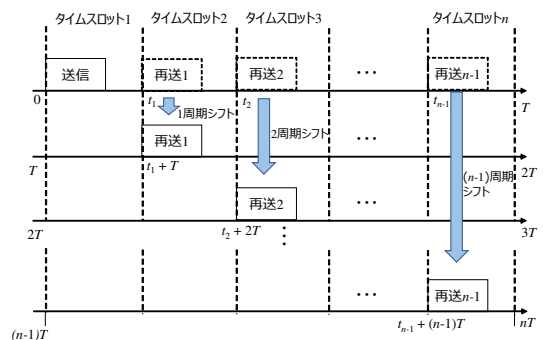


図 3: 周期倍シフトを用いたパケットの再送信間隔の設定の例

1 度の動作中に搬送波が 1 度供給される。また、タイムスロットの幅が等しいため、パケットを検知した場合に次のパケットの再送信時刻を予測できる。しかしながら、すべての backscatter tag に対して同様に再送信間隔を等間隔とすると、複数の tag が同時に起動した場合にすべての再送信パケットが衝突する。この問題を解決するために、提案手法では搬送波の送信間隔が一定であることを利用してパケットの再送信間隔を周期的にシフトする。図 3 に、周期の整数倍シフトさせたパケットの再送信間隔の設定の例を示す。例においては、1 目目の再送信パケットを 1 周期分、2 目目の再送信パケットを 2 周期分、 $\dots$ 、 $n-1$  目目の再送信パケットを  $n-1$  周期分と周期の整数倍シフトさせている。Backscatter tag ごとにシフトの倍率を変化させることで、backscatter tag が同時に起動してもパケットが衝突する可能性を低減できる。また、再送信パケットの送信時刻を周期の整数倍シフトさせたとしても受信確率に影響を与えない。ある再送信パケットの送信時に搬送波が供給されている場合、その再送信パケットの送信を 1 周期分である  $T$  遅らせたとしても、1 周期後の搬送波が供給される。加えて、1 つのタイムスロットに対して 1 つの再送信パケットしか存在しえないため、同一情報を持った再送信パケットを複数受信することはない。

Backscatter tag ごとにそれぞれの再送信パケットを周期の整数倍シフトさせる際の倍率の決定方法として、One Coincidence Code (OCC) 系列を用いる手法を提案する。OCC 系列とは、スペクトラム拡散を用いた通信方式の周波数ホッピング方式で用いられる Pseudorandom Noise 系列の 1 つである。系列数 6 の OCC 系列の例を以下に示す。

$$\begin{matrix} \text{tag1} \\ \text{tag2} \\ \text{tag3} \\ \text{tag4} \\ \text{tag5} \\ \text{tag6} \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 5 & 3 & 1 & 6 & 4 & 2 \\ 4 & 1 & 5 & 2 & 6 & 3 \\ 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 6 & 1 & 3 & 5 \\ 3 & 6 & 2 & 5 & 1 & 4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

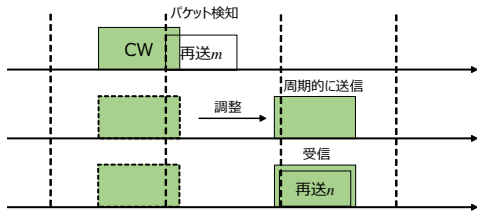


図 4: 搬送波制御方式 I

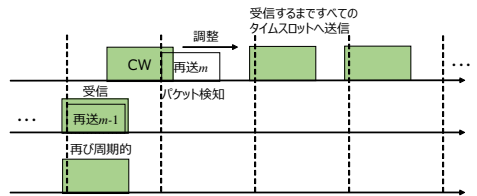


図 5: 搬送波制御方式 II

提案手法において、OCC 系列の列がタイムスロットに、行が backscatter tag にそれぞれ割り振られる。要素の値は、backscatter tag が起動した時刻を 0 s とすると、0 s から  $T$  までが 1,  $T$  から  $2T$  までが 2, のように順次に周期に対応する。系列数 6 の例においては、backscatter tag3 のタイムスロット 4 に対応するパケットは 2 周期目にシフトさせて送信する。どの列においても全ての要素の値が異なるため、全ての backscatter tag が同時に起動したとしてもそれぞれのパケットは衝突しない。また、任意の 2 つの backscatter tag 間において、起動時刻にかかわらず衝突する再送パケットは最大で 1 つとなる。

### 3.2 疑似同期

提案手法では、搬送波と backscatter tag のパケット送信間隔の工夫に加えて疑似同期方式のフィードバック制御を行う。疑似同期方式では、非同期方式と同様に搬送波送信機、backscatter tag 間での同期を行わない一方、backscatter 受信機から搬送波送信機に向けて時刻情報などのフィードバックを行う。具体的には、backscatter tag のパケット送信中に搬送波が完全に供給されなかった場合に破損したパケットが生じる。受信機は破損したパケットを検知すると搬送波送信機に受信時刻をフィードバックする。フィードバックされた情報を基に、搬送波送信機が backscatter tag からのパケット送信に合わせて搬送波を供給するように調節することで、通信の成功率を向上させる。本稿では、具体的な搬送波の制御手法を 2 つ提案する。

図 4 に搬送波制御方式 I を示す。Backscatter tag の再送間隔には OCC 系列を用いる。Backscatter 受信機が破損したパケットを検知した場合、次の搬送波の送信時刻を隣のタイムスロットに合わせて調節するように搬送波送信機にフィードバックを行う。搬送波送信機は送信時刻を調節後、周期的な搬送波の送信を再開する。搬送波制御方式 I は搬送波の送信回数を増やすことなく通信の成功確率の向上が見込まれる一方、次のタイムスロットの再送パケットが検知したパケットの周期軸上より前に存在した場合には通信が失敗する。

図 5 に搬送波制御方式 II を示す。Backscatter tag の再送間隔は OCC 系列を用いる。Backscatter 受信機が破損したパケットを検知した場合、パケットを受信するまで繰り返し次のタイムスロットに合わせて搬送波の送信を行うように搬送波送信機に対してフィードバックを行う。搬送波制御方式 II は搬送波制御方式 I に比べて通信成功率向上の確実性が高い一方、搬送波の送信回数は増加する。

### 4 シミュレーション評価

提案する MAC プロトコルの有効性を示すためにシミュレーション評価を行った。シミュレーションは、搬送波送信機と backscatter 受信機がそれぞれ 1 つずつ、backscatter tag が最大 500 個存在する環境を想定した。搬送波送信機から送信される搬送波は基本的に長さ 5 ms、送信周期は 100 ms として、backscatter 受信機からのフィードバックを受け取った場合には電波法に違反しない範囲で送信間隔を変更できるものとした。Backscatter tag は 57.5–62.5 s のランダムな感覚で起動してセンサ情報を取得、起動

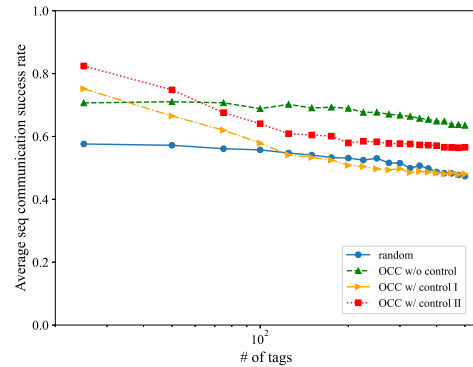


図 6: Backscatter tag 数に対する平均通信成功率

するものとした。1 度の起動に対して backscatter tag は同一のセンサ情報を持ったパケットを繰り返し 16 回送信するものとした。パケット長は 0.5 ms に設定した。Backscatter tag のパケット送信時に搬送波が供給されている場合、距離減衰による通信の失敗と伝送路損失は考慮せず backscatter 受信機は確実にパケットを受信できるものとした。一方で、複数の backscatter tag のパケットが衝突した場合は通信が失敗するものとした。Backscatter tag が送信するパケットにはセンサ情報の他、backscatter tag 固有の ID、何回目の起動かを示す sequence 番号 (seq 番号)、何回目の再送かを示す retransmit 番号 (ret 番号) が記載されるものとして、受信機がパケットを受信した場合のみこれらの情報を取得できるものとした。シミュレーションは、各 tag が 100 回起動する試行を 10 回繰り返した。

本稿では、提案手法を相対的に評価する比較手法として、Backscatter tag の再送間隔が平均 6.25 ms の一様乱数に基づき設定された手法を用いる。6.25 ms は図 2 において搬送波の送信周期が 100 ms としたときの backscatter tag のパケット間隔である。この比較手法と OCC 系列を用いて再送間隔を設定した手法、搬送波制御方式 I、搬送波制御方式 II の比較を行う。

図 6 に backscatter tag の数に対する平均通信成功率を示す。評価結果から、random と OCC 系列を用いた場合を比較すると backscatter tag の再送間隔を工夫することで通信の成功率の向上することが分かる。また、backscatter tag の数を増やすと、OCC 系列を用いた場合に通信成功率の減少がやや緩やかになることが確認できる。Backscatter tag 数が数十個の場合は搬送波制御を利用、backscatter tag 数がそれ以上の場合には OCC 系列のみを用いる手法が妥当だと考えられる。Backscatter tag の数を増やすと急激に通信成功率が低下する原因としては、破損したパケットの検知が頻繁に起こり搬送波の調整が増加すると、搬送波の送信が周期的ではなくなってしまうためだと考えられる。

### 5 おわりに

本稿では、backscatter 向けの非同期方式の MAC プロトコルを提案した。提案する MAC プロトコルは、提案手法を用いない場合に比べて平均通信成功率が向上することを確認した。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP19H01101, JP19K11923, JP20K20398) の支援の下で行った。

### 参考文献

- [1] Konishi, Y., Ueda, T., Kizaki, K., Fujihashi, T., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: Experimental Evaluation on IEEE 802.15.4 Compatible Backscatter, *2020 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6 (2020).
- [2] 小泉亮介, 小西陽平, 木崎一廣, 藤橋卓也, 猿渡俊介, 渡辺 尚 IEEE 802.15.4 Compatible Backscatter の MAC プロトコルに関する初期検討, 2021 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp. 1–1 (2021).
- [3] Mi, N., Zhang, X., He, X., Xiong, J., Xiao, M., Li, X.-Y. and Yang, P.: CBMA: Coded-Backscatter Multiple Access, *2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, pp. 799–809 (2019).