

6Y-06

非同期方式 Backscatter MAC プロトコルのスループットに関する一評価

田平 宙[†] 小泉 亮介[‡] 小西 陽平[‡] 木崎 一廣[‡] 藤橋 卓也[‡] 猿渡 俊介[‡] 渡辺 尚[‡]
[†]大阪大学工学部 [‡]大阪大学大学院情報科学研究科

1 はじめに

Internet of Things デバイスが無線を用いてパケットを送信する際の消費電力を削減する手法として backscatter 通信が注目を集めている [1]. 近年, 受信回路を持たない backscatter tag 向けに非同期方式 backscatter Medium Access Control (MAC) プロトコルが提案されている [2]. 非同期方式 backscatter MAC プロトコルの有効性を議論するために, backscatter tag による通信成功率に着目して文献 [2] はシミュレーション, 文献 [3] は数値解析による評価結果を示している. 本稿では, 非同期方式 MAC プロトコルの有効性を測る一指標としてスループットを用いて, シミュレーションと数値解析からその有効性を評価する.

2 非同期型 backscatter MAC プロトコル

図 1 に, 本稿で対象とする backscatter 通信の構成を示す. backscatter 通信は単一の搬送波送信機, 複数の backscatter tag, 単一の backscatter 受信機から構成される. 搬送波送信機は backscatter tag に対して搬送波となる電波を供給する. Backscatter tag は搬送波送信機から供給された搬送波をアンテナで反射もしくは吸収することで backscatter 受信機に対してパケットを送信する. パケット送信元, すなわち, backscatter tag が電波を放射しない backscatter 通信では, 同スループットの無線チップと比較して消費電力を約 1000 分の 1 まで低減できることが確認されている [4].

Backscatter 通信に関する基礎理論は確立されつつある一方で, backscatter 通信におけるアクセス制御方式はいまだ信頼性の観点から 2 つの課題を抱えている. 1 つ目は搬送波の送信タイミングに関する課題である. Backscatter tag は搬送波送信機から供給された電波を搬送波として利用することで backscatter 受信機にパケットを送信する. このとき, backscatter tag が起動するタイミングと搬送波送信機による搬送波供給のタイミングを揃える必要がある. 2 つ目は複数の backscatter tag が単一の backscatter 受信機に対して同時にパケットを送信した場合における衝突に関する問題である. それぞれの backscatter tag が送信したパケットが衝突すると, backscatter 受信機は正しくデータを受信できないため通信信頼性が低下する. 2 つ

の課題に対する解決策として, すべての backscatter tag と搬送波送信機があらかじめ時刻同期を行う方法や, それぞれの backscatter tag がパケット送信前にキャリアセンスを用いる方法が考えられる. それぞれの backscatter tag がキャリアセンスや時刻同期用パケットを受信するためには高周波帯の電波をダウンコンバートする受信回路を backscatter tag に備え付ける必要がある. しかしながら, backscatter tag がパケット送信に要する消費電力と比較して受信回路は多大な電力を消費するため, 消費電力削減の観点から受信回路を持たない backscatter tag の設計が望ましい.

上記の課題に対して, 文献 [2] は受信回路を持たない backscatter tag を想定した非同期方式 backscatter MAC プロトコルを提案している. 図 2 に文献 [2] の非同期方式 backscatter MAC プロトコルの概要を示す. 搬送波送信機は一定の周期 T で backscatter tag に対して搬送波を供給する. Backscatter tag はそれぞれ T を N 等分するようにタイムスロットを割り当て, 周期 T ごとに異なるタイムスロットを使用して N 回パケットを送信する. 各 backscatter タグが使用するタイムスロットは擬似乱数系列にしたがって決定する. また, backscatter 受信機がパケットの一部を検知した場合, backscatter 受信機が搬送波送信機にフィードバックを送信する. フィードバックに基づいて搬送波送信機による搬送波供給のタイミングと backscatter tag の起動タイミングを揃える擬似同期を行う. 文献 [2] において非同期方式 backscatter MAC プロトコルが通信性能向上に貢献できることをシミュレーション評価で確認している一方, 本プロトコルが 2 課題の解決に貢献していることを明らかにしていない. 本稿では, 搬送波の送信タイミングに関する backscatter 通信の課題に対する文献 [2] のプロトコルの貢献を解析的に評価する.

3 解析評価

搬送波の長さを L_{Tx} とすると, それぞれの backscatter tag における通信成功率 p は以下のように表される [3].

$$p = \frac{N}{T} L_{Tx}. \tag{1}$$

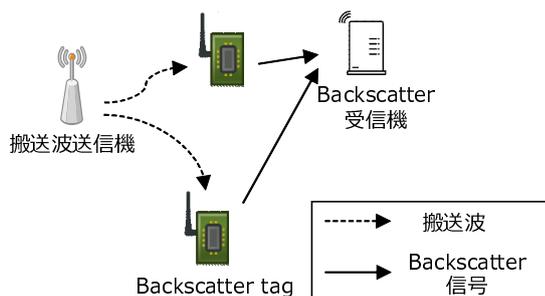


図 1: Backscatter 通信の構成

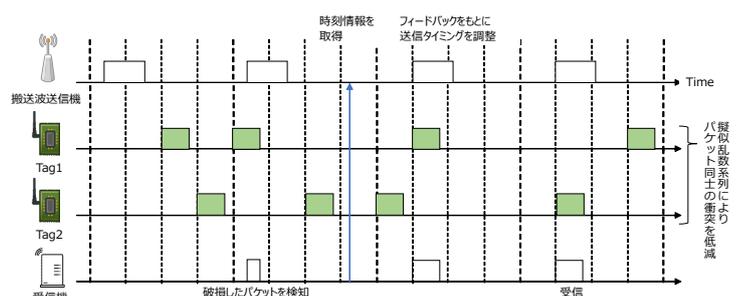
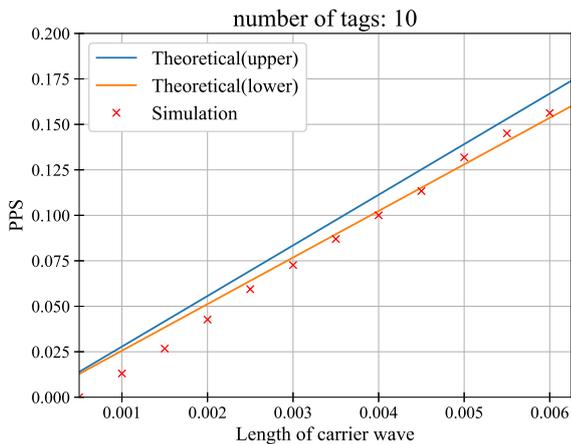
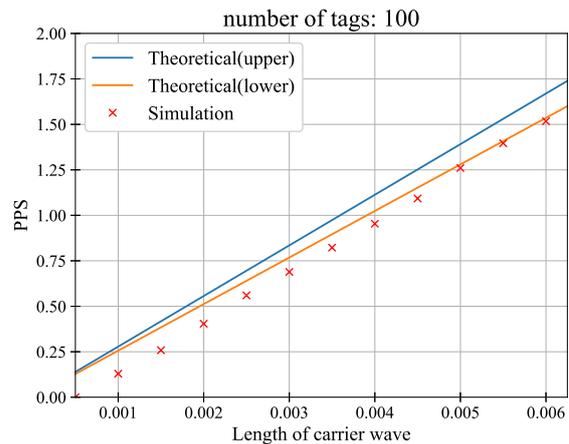


図 2: 非同期方式 backscatter MAC プロトコル


 図 3: $n_{\text{tag}} = 10$ における搬送波の長さに対する PPS の変化

 図 4: $n_{\text{tag}} = 100$ における搬送波の長さに対する PPS の変化

簡単化のため、パケットサイズが 1 bit であると仮定するとスループットは 1 秒間あたりに受け取ったパケット数 Packet Per Second (PPS) と等価となる。backscatter tag 数を n_{tag} 、backscatter tag の起動間隔を T_{int} とすると、パケット同士の衝突がない場合における PPS の期待値は以下のように計算される。

$$\begin{aligned}
 E[\text{PPS}] &= \frac{E[\text{Number of packets to be received}]}{T_{\text{int}}} \\
 &= \frac{n_{\text{tag}} \cdot p}{T_{\text{int}}} = \frac{n_{\text{tag}} \cdot \frac{N}{T} L_{\text{Tx}}}{T_{\text{int}}} \\
 &= \frac{n_{\text{tag}} \cdot N}{T_{\text{int}} \cdot T} L_{\text{Tx}}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで、帯域使用率 $\beta = \frac{L_{\text{Tx}}}{T}$ を導入すると、式 (2) は以下のように変形できる。

$$E[\text{PPS}] = \frac{n_{\text{tag}} \cdot N}{T_{\text{int}}} \cdot \beta. \quad (3)$$

4 シミュレーション評価

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 台、backscatter tag が 10 台、100 台とした 2 環境を想定した。搬送波送信機が送信する搬送波の送信周期は $T = 100\text{ms}$ と定め、長さ L_{Tx} は 0.5ms から 6.0ms までと定めた。それぞれの Backscatter tag は 57.5s-62.5s の間隔で一様に起動するものと定め、起動するたびに同一パケットを 16 回 ($N = 16$) 送信するとした。パケット長は $L_{\text{Bs}} = 0.5\text{ms}$ とした。backscatter tag が送信したパケットが backscatter 受信機上で衝突した際は通信が失敗するものとした。また、距離減衰による通信失敗ならびに伝送路損失は考慮しないものとした。

図 3 に $n_{\text{tag}} = 10$ 、図 4 に $n_{\text{tag}} = 100$ における搬送波の長さに対する PPS を示す。ここで、Theoretical (upper) はすべての backscatter tag が 57.5s の間隔で起動したときの PPS、Theoretical (lower) はすべての backscatter tag が 62.5s の間隔で起動したときの PPS を示している。

5 考察

シミュレーション評価結果から、 $n_{\text{tag}} = 100$ における PPS が $n_{\text{tag}} = 10$ における PPS と比較して Theoretical (upper) との差が大きいことがわかる。これは backscatter tag 数の増加によって頻繁にパケットが衝突して通

信成功確率が減少するためであると考えられる。また、backscatter tag 数に関係なく、搬送波の長さが小さくなればなるほど Theoretical (upper) との差が大きくなることかわかる。これは擬同期を利用しない場合の通信成功確率が $d = L_{\text{Tx}} - L_{\text{Bs}}$ によること、搬送波の長さが短くなればなるほど破損したパケットを検知する確率が低下して擬同期の成功確率が低下することが原因であると考えられる。

一方で、通信成功確率を高めるために非常に長い搬送波を送信することはできない。より具体的には、搬送波の長さの上限は 1 タイムスロットに相当する $\frac{T}{N}$ までとなる。また、搬送波の長さが長ければ長いほど帯域を使用する時間が増加することから同一空間に存在する他の通信を妨げてしまう可能性もある。ここで、帯域使用率は $L_{\text{Tx}} = \frac{T}{N}$ の時に、最大値 $\beta_{\text{max}} = \frac{1}{N}$ をとることがわかっている。

6 おわりに

本稿では、非同期方式 backscatter MAC プロトコルのスループットをシミュレーションと数値解析を用いて評価した。評価結果から、搬送波の長さに対して帯域使用率とスループットが線形的に向上することを明らかにした。また、搬送波の長さが短ければ短いほど解析結果の上限に対する PPS の割合が小さくなることも明らかにした。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP19H01101, JP22K12010)、JST さきがけ (課題番号:JPMJPR2032) の支援の下で行った。

参考文献

- [1] Y. Konishi, et al. Harmonics-Controlled Frequency Division Multiple Access without Harmonics and Sidebands Interference in Backscatter Communications. In *2022 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, May 2022.
- [2] 小泉亮介ほか. 信頼性を向上させる非同期方式 Backscatter MAC プロトコルの一検討. マルチメディア、分散、協調とモバイルシンポジウム, pp. 1070–1076, July 2022.
- [3] 田平宙ほか. 非同期方式 Backscatter MAC プロトコルの解析評価. 2022 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp. 1–1, Sep. 2022.
- [4] B. Kellogg, et al. Passive Wi-Fi: Bringing Low Power to Wi-Fi Transmissions. *13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, pp. 151–164, Mar. 2016.