

# NOMA を用いた Backscatter 通信型 センサネットワークの検討

川崎 慈英<sup>1</sup> 小林 真<sup>2</sup> 猿渡 俊介<sup>1</sup> 渡辺 尚<sup>1</sup>

**概要:** ありとあらゆるモノをネットワークにつなぐためには, 無線センサネットワークにおける電源問題の解決が必須である. 筆者らは微小な電力で通信を行う Backscatter 通信と恒常的に小さい電力をセンサに供給出来る電波発電を組み合わせて電源問題の解決を目指している. しかしながら, Backscatter 通信には通信範囲が狭いという問題と衝突回避の問題が存在する. これらの問題を解決するために, 複数のアクセスポイントでアップリンク NOMA (Non-orthogonal Multiple Access) を利用することで広範囲でもパケットエラー率が低く, スループットが高い Backscatter 通信型センサネットワークを提案する. 具体的には, 複数のアクセスポイントを分散させて設置することで Backscatter 通信の通信範囲の問題を解決して, 複数のアクセスポイントがデータを共有しながらアップリンク NOMA を行うことで衝突回避の問題を解決する. 計算機シミュレーションの結果, NOMA を適用していない単一のアクセスポイントのシステムと比較して約 4 倍のスループットを達成することを確認した.

**キーワード:** 無線センサネットワーク, Backscatter 通信, NOMA (Non-orthogonal Multiple Access)

## 1. はじめに

時計, 歯ブラシ, テニスラケット, コーヒーメーカーなど様々な IoT (Internet of Things) デバイスがインターネットに繋がれている. その根幹を支える技術に無線センサネットワーク技術がある. 無線センサネットワーク技術により, センサデバイスを柔軟に設置することが可能となり, あらゆるモノをインターネットに接続することが可能となる.

無線センサネットワーク技術が抱える大きな課題の 1 つに電源問題がある. 電源供給に有線を用いた場合, センサネットワークの利点である設置場所の柔軟性を阻害する可能性がある. また, 設置環境によって有線による電源供給ができない場合も多い. 現在の無線センサデバイスは主に電池や環境発電を用いて駆動している. しがしながら, これらの電源供給手法には課題が存在している.

無線センサデバイスを電池で駆動させた場合, メンテナンスコストや Denial of Sleep Attack [1] への脆弱性が問題となる. 1 次電池を用いた場合でも 2 次電池を用いた場合でも, 電池交換のために定期的なメンテナンスが必要となる. センサデバイスの設置数が少なければ問題とならないが, センサデバイスが数百個設置されているアプリケーションではメンテナンスコストは大きくなる. Denial of Sleep

Attack はセンサデバイスの MAC プロトコルの脆弱性を利用してスリープ時間を無くすことでセンサデバイスの電池を消耗させる攻撃である. 大規模なセンサネットワークに対して Denial of Sleep Attack が行われた場合, 各センサ端末の電池をすべて交換する必要があるため復旧に時間がかかる.

無線センサデバイスを太陽発電や電波発電などの環境発電によって駆動させた場合, 環境による供給電力の変化や供給電力の小ささが問題となる. 太陽光発電は現状のセンサデバイスに対して十分な電力を供給できるが, 季節や時間によって供給電力が異なるという特徴がある. この性質から恒常的なセンシングが必要なアプリケーションには適用できない. 電波発電を用いた場合, 恒常的な電力供給は可能であるが発電量の小ささが問題となる. 電波発電は外部からの電波をレクテナによって受信することで発電を行う方法である. 電波による供給電力は数  $\mu W$  から数十  $\mu W$  である. 一方で現状使われている ZigBee の消費電力は数十 mW であるため, 電波発電では駆動させることが出来ない.

我々は超低消費電力通信技術である Backscatter 通信に着目して, 電波発電による供給電力でも駆動するセンサデバイスを用いることで, 電源問題を完全に解決した無線センサネットワークを実現しようと考えている. Backscatter 通信は外部の電波を搬送波として利用すること同スループットの Wi-Fi と比べて  $\frac{1}{10000}$  から  $\frac{1}{1000}$  の消費電力で無線通

<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科

<sup>2</sup> 広島市立大学大学院情報科学研究科

信を行う技術である。文献 [2] で設計されている Backscatter デバイスは  $88\mu W$  の消費電力で IEEE 802.11b 規格の通信を行う。このため、Backscatter 通信であれば電波発電の供給電力でも十分に駆動出来ると考える。

しかしながら、Backscatter 通信でセンサネットワークを構築するためには2つの課題がある。1つ目は Backscatter 通信は Wi-Fi に比べて通信可能距離が狭いことである。Backscatter は外部の電波を反射して通信するので、電波の距離減衰が2回発生する。文献 [2] のような Backscatter を用いた Wi-Fi では安定して通信できるのは最大 15 m 程度であり、アプリケーションによっては適用出来ない可能性が高い。2つ目は、Backscatter 通信はハードウェアの制約によってパケットエラー率が高く、スループットが低いことである。Backscatter デバイスはハードウェアの制約によってキャリアセンスを行うことができないため、通常の CSMA/CA 方式を適用することが出来ない。単純なアロハ式 MAC プロトコルを実装する場合、衝突によりデータの再送要求が多くなって無駄な電力消費が発生するという問題がある。

本稿では複数のアクセスポイントを用いてアップリンク NOMA を適用することで、Backscatter 通信によるセンサネットワークにおける通信範囲の問題とパケットエラー率の問題を解決する方法を提案して評価する。具体的には、複数のアクセスポイントを設置して各アクセスポイントが RF 送信機、受信機の役割を持つことで Backscatter の通信範囲の問題を解決する。また、同時に受信した Backscatter 反射波に対してアップリンク NOMA を適用することで、複数の Backscatter デバイスの反射波を分離してパケットエラー率を改善する。

計算機シミュレーションによってシステムの総スループットを評価した。評価の結果、単一のアクセスポイントを用いるシステムと比べて約4倍、複数のアクセスポイントを設置して NOMA を適用しないシステムと比べて約1.3倍のスループットを改善することを確認した。

以下に本稿の構成を示す。2節では Backscatter 通信型センサネットワークの概要と提案システムにおける課題を説明する。3節では Backscatter 通信型センサネットワークに対してアップリンク NOMA を適用することで通信範囲とパケットエラー率の問題を解決する手法を提案する。4節では提案手法を計算機シミュレーションを用いて評価する。5節で関連研究についてまとめた後、6節でまとめとする。

## 2. Backscatter 通信型センサネットワーク

本節では Backscatter 通信型センサネットワークのシステムモデルとメディアアクセス手法について説明した後、Backscatter 通信がたセンサネットワークの課題を示す。Backscatter 通信型センサネットワークでは複数のアクセ

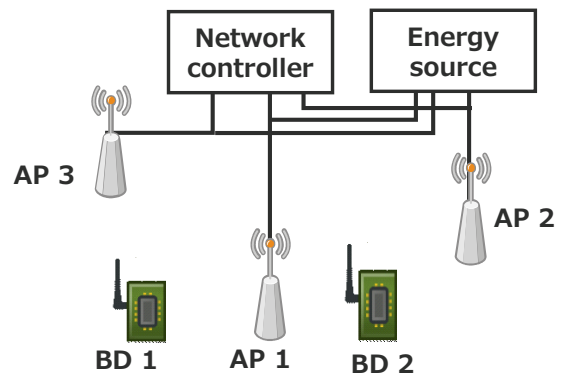


図 1: Backscatter 通信型センサネットワークのシステムモデル

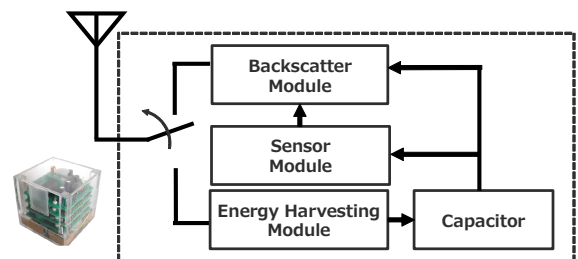


図 2: Backscatter デバイスの構成

スポイントを設置することで Backscatter 通信における通信範囲の問題を解決する。

### 2.1 システムモデル

図 1 に本稿で提案する Backscatter 通信型センサネットワークのシステムモデルを示す。ネットワーク内には複数の Backscatter デバイス (BD) と複数のアクセスポイント (AP) が設置されていて、アクセスポイントの位置は固定されている。各アクセスポイントはバックホールで電源とネットワークコントローラと相互接続されていて、互いに情報を交換できる。ネットワークコントローラは各アクセスポイントからのデータを用いて各アクセスポイントを制御する。

アクセスポイントは1つのアンテナを具備しており、Backscatter における RF 送信機とデータ受信機の役割を切り替えて実行する。

アクセスポイントは RF 送信機として無変調波を放出する。データ受信機として Backscatter デバイスからのデータを受信した場合、アクセスポイントは受信したデータを他のアクセスポイントとネットワークコントローラと共有する。

図 2 に Backscatter デバイスの構成を示す。Backscatter デバイスは Backscatter モジュールとエネルギーハーベストモジュールを具備する。Backscatter デバイスは Backscatter 通信モードとエネルギーハーベスティングモードの2つの状態を切り替えながら駆動する。通常時はエネルギーハーベスティングモードであり、アクセスポイントが送信した

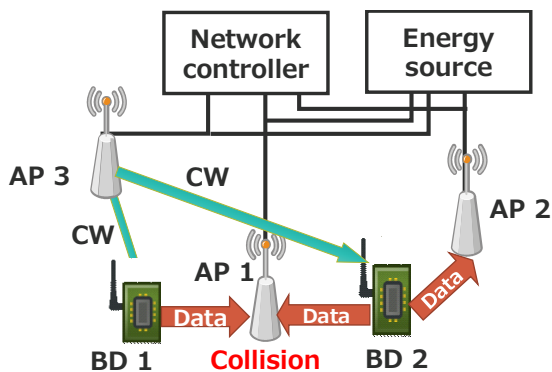


図 3: Backscatter 通信の衝突の例

電波から電力を得てキャパシタに蓄電する。エネルギーハーベスティングモジュールは内部にオン・オフキーイングでデコード可能なアナログ受信回路を具備しており、簡単な信号をデコードすることが出来る。エネルギーハーベスティング中にデータ送信要求を受信した場合、Backscatter 通信モードに切り替えて、センサデータの送信を行う。キャパシタに蓄電した電力を用いて、センサの駆動を行って得られたセンサデータを Backscatter を用いてアクセスポイントに対して送信する。

提案するシステムでは各 Backscatter デバイスはアロハ式メディアアクセス手法を用いて衝突回避を行う。Backscatter デバイスはハードウェアの制約によりキャリアセンスを行うことは出来ない。アクセスポイントはセンサデータが欲しい場合、Backscatter デバイスに対してデータ送信要求を行う。その後、一定時間無変調波を放出する。アクセスポイントからデータ送信要求を受けた Backscatter デバイスはランダム時間待機した後、センシングを行って得たデータをアクセスポイントに対して送信する。アクセスポイントが放出する無変調波を反射することで Backscatter 通信を行う。アクセスポイントは Backscatter デバイスから受信したデータバックグラウンドで共有する。もし要求したセンサデータが得られていないならば、再度 Backscatter デバイスに対してデータ送信要求を送信する。

## 2.2 Backscatter 通信の衝突問題

2.1 節で提案したシステムモデルでは、アクセスポイントの周囲に Backscatter デバイスが複数存在する場合、センサデータの送信時に衝突が起こり、データの再送信要求によって電力を消費してしまうという問題がある。Backscatter デバイスは電源に大きな制約が存在するため、データの再送信によって電力が消費されてしまうと、新しいデータ送信が出来なくなる可能性がある。新しいデータ送信が出来なくなるとその分パケットエラー率が高くなり、アプリケーションが必要なデータを得られない。

図 3 に Backscatter 通信の衝突の例を示す。図 3 では AP3 が BD1 と BD2 に対して無変調波 (CW: Continuous

Wave) を送信している。BD1 と BD2 は CW を反射することで周囲の AP1 と AP2 に対してセンサデータを送信している。BD1 と BD2 の両方の通信範囲に入っている AP1 上では、BD1 と BD2 のセンサデータが衝突するため、AP1 はデータを受信することができない。BD2 のデータは AP2 が受信することが出来るが BD1 のデータは受信されないため、BD1 はセンサデータの再送を行う。AP1 の周囲に多くの Backscatter デバイスが設置されていた場合、再送が多発する可能性がある。

## 3. アップリンク NOMA を用いた衝突回避手法

2 節での議論を基に、Backscatter 通信型センサネットワークにおいて複数のアクセスポイントが受信したデータを用いてアップリンク NOMA を実行することで衝突を回避する手法を提案する。アップリンク NOMA は Backscatter デバイスからアクセスポイントへの通信において同じ時間に同じ周波数で受信した複数の信号を分離する技術である。2 つの信号の RSS (Received Signal Strength) の差が十分にある場合に適用可能である。受信した 2 つの信号  $S_1$ ,  $S_2$  の RSS をそれぞれ  $R_1$ ,  $R_2$  として  $R_1 \ll R_2$  であるとする。アップリンク NOMA では、まず受信した信号をそのままデコードする。この時、 $S_1$  は  $S_2$  にとってノイズとしてみなせる。 $S_2$  の信号送受信における通信路容量は、シャノン=ハートレーの定理から

$$B \log_2 \left( 1 + \frac{R_2}{N + R_1} \right)$$

である。ただし、 $B$  は帯域幅、 $N$  はノイズである。

次に、 $S_2$  のデコード結果を用いて  $S_1$  をデコードする。デコードした  $S_2$  のデジタル信号を用いることで  $S_2$  のアナログ信号を推定することができる。最初に受信した  $S_1$  と  $S_2$  の混在したアナログ信号から  $S_2$  のアナログ信号を減算することで、 $S_2$  をキャンセリングして  $S_1$  をデコードすることが出来る。この時、 $S_1$  の信号送受信における通信路容量は、シャノン=ハートレーの定理から

$$B \log_2 \left( 1 + \frac{R_1}{N} \right)$$

である。

複数のアクセスポイントでデータを共有しながらアップリンク NOMA を行うことで、より効率良く信号の分離が可能となる。他のアクセスポイントがデコードしたデータから推定したアナログ信号で受信信号のキャンセリングを行うことで 1 つのアクセスポイントでは分離出来ない信号が分離出来る。例として、図 3 に示した通信においてアップリンク NOMA を適用した場合について述べる。図 3 では AP1 上で BD1 と BD2 からのデータが衝突している。BD1 からのセンサデータと BD2 からのセンサデータの RSS に十分な差がない場合、アップリンク NOMA を

### Algorithm 1 信号分離処理のアルゴリズム

```
1:  $\mathbb{D} = \phi$ 
2: receive( $\mathbb{S}$ )
3: for  $i=1$  to  $m$  do
4:    $\mathbb{D}+ = \text{decode}(S_i)$ 
5:   for  $d$  in  $\mathbb{D}$  do
6:     if cancelable( $S_i, d$ ) then
7:        $\mathbb{D}+ = \text{cancel}(S_i, d)$ 
8:     end if
9:   end for
10: end for
```

適用して2つの信号を分離することはできない。ここで、AP1とAP2がデータを共有した場合、AP2はBD2からのデータをデコード出来ているのでAP1はBD2のデジタル信号を知ることができる。AP1はBD2のデジタル信号からBD2のアナログ信号を推定することで、BD2の信号をキャンセリングしてBD1のデータを受信することができる。

**Algorithm1**にアップリンクNOAMを用いた信号分離処理のアルゴリズムを示す。アクセスポイントはBackscatterデバイスからデータを受信するたびに**Algorithm1**を実行してNOMAを用いた受信信号の分離処理を行う。 $\mathbb{S}$ はアクセスポイントが受信したアナログ信号の集合、 $m$ は設置されているアクセスポイントの数、 $\mathbb{D}$ はデコード済みのデジタル信号の集合である。

receive( $\mathbb{S}$ )関数はすべてのアクセスポイントが受信を行って受信したアナログ信号を $\mathbb{S}$ に格納する関数、decode( $S_i$ )はアナログ信号 $S_i$ をデコードしてデジタル信号を返す関数であり、なにも受信できない場合は空集合を返す。cancelable( $S_i, d$ )はアナログ信号 $S_i$ をデジタル信号 $d$ から推定したアナログ波でキャンセリング出来るならば真、出来ないならば偽となる関数、cancel( $S_i, d$ )はcancelable( $S_i, d$ )はアナログ信号 $S_i$ をデジタル信号 $d$ から推定したアナログ波でキャンセルした後デコードする関数であり、なにも受信できない場合は空集合を返す。

**Algorithm1**では、まずデコード済みのデジタル信号を表す $\mathbb{D}$ を空集合で初期化して、各アクセスポイントはセンサデータ $\mathbb{S}$ を受信する。受信したデータすべてに対してforループで処理を行う。受信した各データをまずはデコードしてみて、デコードできたならば結果を集合 $\mathbb{D}$ に格納する。次に、現在デコードされているデータで各 $S_i$ がデコードできないかどうかcancelable( $S_i, d$ )関数を用いて確認する。もし現在デコードされているデータで各 $S_i$ がデコードできるならば、 $S_i$ をキャンセリングしてデコード結果をデコード済集合 $\mathbb{D}$ に加える。すべての受信信号に対してこれ以上キャンセリング出来ないならば、処理を修了する。

表 1: シミュレーションパラメータ

パラメータ名	値
シミュレーション時間	3600 秒
AP 数	5
データ到着率	$\lambda = 2$ のポアソン分布
Backscatter 通信レート	250 Kbps
センサデータサイズ	24 byte
使用周波数	2.44 GHz
Backscatter 消費電力	$70\mu W$
アクセスポイント出力	20 dBm

## 4. 評価

提案したBackscatter通信型センサネットワークの性能を評価するために、計算機シミュレーションを用いて総スループットを評価した。総スループットはBackscatter通信において衝突が発生した場合や、Backscatterの通信範囲内にアクセスポイントが存在しない場合に低下する。

### 4.1 評価環境

表2に計算機シミュレーションにおけるパラメータの設定を示す。計算機シミュレーションでは、屋内のセンサネットワークを想定して $20 \times 20 \text{ m}^2$ または $10 \times 10 \text{ m}^2$ の空間に300個のBackscatter端末と5個のアクセスポイントをランダムに配置した。Backscatter端末とアクセスポイントの配置はランダムに100通りでシミュレーションを行い、平均値を結果とした。アクセスポイント同士は有線によって理想的に相互に接続されているものとする。アクセスポイントは $\lambda = 2$ のポアソン分布に従ってBackscatterデバイスに対してセンサデータリクエストを送信する。Backscatter端末の送信ビットレートは、IEEE802.15.4 [3]に基づいて250 kbpsとした。センサデータサイズはIEEE802.15.4のデータフレームを参考に24byteのパケットと定めた。センサ端末の消費電力は文献 [2] を元に $70\mu W$ とした。使用周波数の中心周波数は2.44 GHzとしてアクセスポイントは20 dBmの無変調波を放出する。パケットエラーはセンサデータの衝突が発生した場合、通信可能範囲にアクセスポイントがない場合、Backscatterデバイスが電力不足である場合に発生する。

単一のアクセスポイントからの電波伝播モデルについては距離の2乗に反比例して減衰するとして以下の電波伝搬モデルを用いた。

$$P_r = \frac{P_t}{D^2}$$

ただし、 $P_r$ は観測地点における受信電力、 $P_t$ はアクセスポイントの送信電力、 $D$ は観測地点とアクセスポイント間の距離である。また、複数のアクセスポイントからの電波伝搬モデルについては複数波源からの合成波の公式を用いて以下の用に定めた。

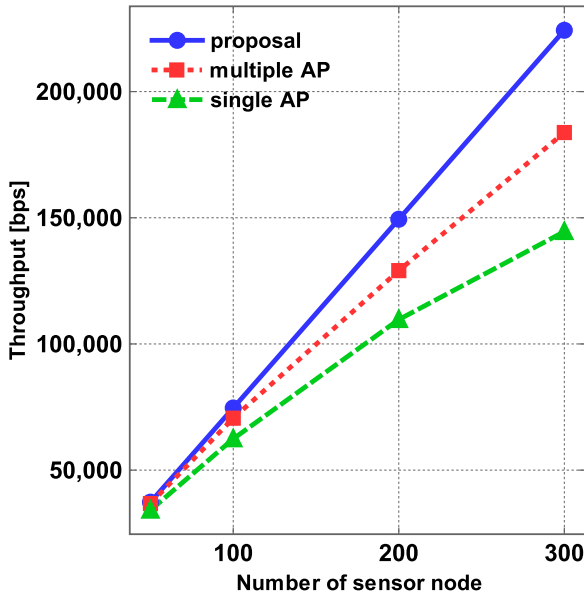


図 4: 10 m 四方のシミュレーション空間での総スループット

$$P_r = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \frac{P_i P_j}{D_i D_j} \cos(-kD_i + kD_j)$$

ただし、 $m$  はアクセスポイントの数、 $P_i$  はアクセスポイント  $i$  の送信電力、 $D_i$  は観測地点とアクセスポイント  $i$  間の距離、 $k$  は波数であり、 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 、 $\lambda$  は波長である。

提案手法による効果を相対的に評価するために、単一のアクセスポイントだけで受信を行う単一 AP 受信方式と、複数のアクセスポイントを用いて NOMA を適用しない複数 AP 受信方式の 2 つの手法を計算機シミュレーション上に実装して評価した。

単一 AP 受信手法はシミュレーション空間の中心に RF 送信機と受信機となるアクセスポイントを 1 つ設置する手法である。NOMA は適用しないので複数の Backscatter デバイスからのデータを同時に受信することは出来ない。

複数 AP 受信手法は複数のアクセスポイントを設置して各アクセスポイントがそれぞれ Backscatter 端末からのデータを受信するという手法である。各アクセスポイントは独立してセンサデータを受信する。NOMA は適用しないので複数の Backscatter デバイスからのデータを同時に受信することは出来ない。

## 4.2 評価

図 4 に 10 m 四方のシミュレーション空間での総スループットを示す。横軸は設置したセンサ端末数、縦軸は総スループットである。図 4 より 2 つの事が分かる。

1 つ目に、提案手法 (proposal) が単一 AP 受信手法 (single AP) や複数 AP 受信手法 (multiple AP) よりも高いスループットを達成しているということである。提案手法は単一 AP 受信手法と比べて約 1.5 倍、複数 AP 受信手法と比べて約 1.3 倍のスループットを達成している。これは複数のア

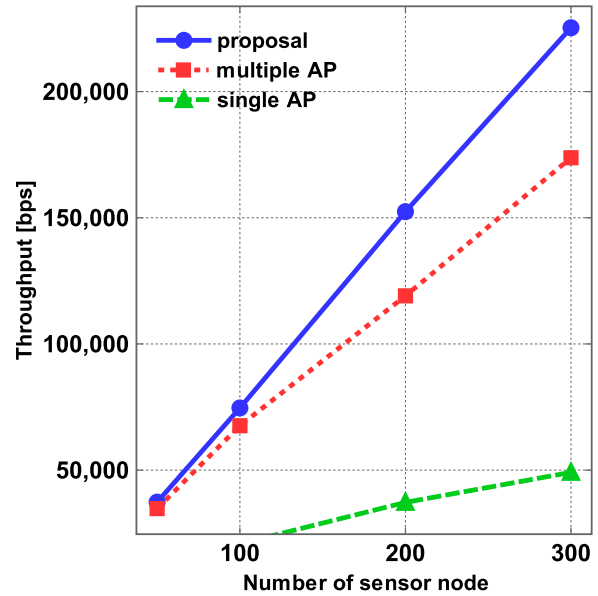


図 5: 20 m 四方の空間での総スループット

クセスポイントを設置した上で NOMA を適用した効果の表れであると考えている。複数 AP 受信手法と比べて 1.3 倍のスループットを達成していることから、NOMA を適用することで 30% スループットが改善したということが分かる。

2 つ目に、複数のアクセスポイントを設置することはスループット改善に効果があるということである。複数 AP 受信手法は単一 AP 受信手法にくらべて 1.2 倍スループットのスループットを達成している。これは複数のアクセスポイントで複数の Backscatter デバイスのセンサデータを同時に受信できたからだと考える。

図 5 に 20 m 四方のシミュレーション空間での総スループットを示す。横軸は設置したセンサ端末数、縦軸は総スループットである。図 5 より 2 つの事が分かる。1 つ目に、部屋の広さを変えても提案手法が最も良いスループットを示しているということである。提案手法は単一 AP 受信手法と比べて 1.3 倍、複数 AP 受信手法と比べて 4 倍のスループットを達成している。このことから、部屋の広さが変化しても提案手法の優位性は変わらないことが分かる。]

2 つ目に、10 m 四方でのシミュレーションと比べて単一 AP 受信手法のスループットが大きく減少していることである。単一 AP 受信手法のスループットは 10 m 四方でのシミュレーションと比べて  $\frac{1}{3}$  以下となっている。これは Backscatter デバイスの設置空間が広くなり 1 つのアクセスポイントではカバー出来ないからであると考えている。

3 つ目に、10 m 四方でのシミュレーションと比べて提案手法のスループットが改善していることである。これは、Backscatter デバイスの設置空間が広がったことで、Backscatter デバイス同士が離れて NOMA による信号分離が成功しやすくなったからであると考えている。

## 5. 関連研究

本稿の関連研究として、無線電力伝送技術、バッテリーレス無線センサネットワークが挙げられる。

### 5.1 無線電力伝送技術

無線電力伝送技術は、電磁誘導を用いたもの [4]、電磁界共鳴を用いたもの [5–9]、電波を用いたもの [10–22] とに分けられる。電磁誘導を用いたものでは、電動歯ブラシの充電器や Sony 社の Felica [4] など、既に多くの製品で利用されている。電磁誘導を用いた電力伝送は安定的に電力を伝送できるものの、離れた距離に有るデバイスに対しては電力を伝送することができないという欠点がある。

電力伝送距離を長距離化するために、電磁界共鳴を利用した電力伝送の研究が進められている [5–9]。コイルやコンデンサが共鳴・結合することを利用して 1[m] 程度離れた距離でも効率的に電力を無線伝送する手法が実現されている [5]。また、電磁界共鳴の数メートル程度離れていても数 kW の電力を伝送できるという特徴を利用して、電気自動車の無線充電に応用する研究もなされている [6–8]。さらに、無線電力伝送をマルチホップすることでさらなる長距離無線伝送を実現する手法が提案されている [9]。

さらなる長距離無線電力伝送を実現する手法として、電波を用いた無線電力伝送が検討されている [10–22]。電波を用いた電力伝送としては、受信した電力を利用して受動的に通信を行う RFID (Radio Frequency Identifier) が既に様々な場面で実用されている。文献 [18] では、RFID を拡張した WISP (Wireless Identification and Sensing Platform) が提案されている。WISP では、タグの ID だけではなく、タグに付属するセンサのデータも読み取る事ができる。さらに、既に展開している無線 LAN から送信される電波に相乗りする形で通信することで電力なしで 2.1 m の距離を 1 kbps で通信する WiFi Backscatter の研究も進められている [19,20]。一方、大型のシステムとして、宇宙に配置した太陽光発電パネルで発電した電気を電波電力伝送を用いて伝送する宇宙発電システムの研究も行われている [10,11]。

電波を用いた電力伝送に加えて、本稿では無線電力伝送とデータ通信を組み合わせた手法を検討している。電波を用いた電力伝送とデータ通信を組み合わせた手法として、文献 [12,13] では、ホーンアンテナによる電力伝送と、通常の IEEE 802.11 によるデータ通信を組み合わせた場合に生じる現象を実機を用いて検証している。これらの研究では、本稿とは異なりデータ伝送と電力伝送は時分割あるいは周波数分割でチャンネルを共有することを前提としている。それに対して、電力を同時に送信する SWIPT が提案されている [15–17,23,24]。文献 [15–17] では、複数アンテナからの電波を重ね合わせて指向性のある電波を作り

出すビームフォーミングを用いることで SWIPT の伝送電力量や伝送距離を増加できることが示されている。これらの SWIPT の研究が同一端末からの半二重伝送を想定していたのに対して、データ伝送と電力伝送の双方向通信を可能にする FD-SWIPT が検討されている [14,22]。文献 [14] では、無線電力伝送とデータ通信の双方向通信が無線全二重通信の機能を用いることで実現できることが示されている。それに対して、本稿では複数のアクセスポイントを用いて伝送電力量を増加させるとともに、無線電力伝送とデータ通信の双方向通信を実現している。

### 5.2 バッテリーレス無線センサネットワーク

無線センサネットワーク電源の制約を根本的に解決するために、バッテリーレス無線ネットワークの実現へ向けた研究が行われている [21,22,25–30]。バッテリーレス無線センサネットワークにはセンサ端末自体が周囲の環境からエネルギーを得る環境発電方式 [26–29] と、外部の機器からセンサ端末に電力を無線伝送する無線電力伝送方式 [21,22,30] の 2 つに分けられる。

環境発電方式のバッテリーレス無線センサネットワークでは、センサ端末はソーラーパネル、レクテナ、熱差発電機などを具備して電力を自給する。文献 [26] では、発電用のソーラーパネルと蓄電用のキャパシタから構成されるセンサ端末である Solar Biscuit が提案されている。また、文献 [27,28] では、環境中の電波からエネルギーを取得するエナジーハーベスト技術を実現している。実際に東京タワーから放出される電波で LED を点灯させることや [27]、電子レンジの漏れ電波を利用して温度計を動作させることに成功している [28]。

本稿では無線電力伝送方式のバッテリーレス無線センサネットワークを対象としている。文献 [21] では、外部機器から伝送した電力信号によりバッテリーなしで ZigBee 端末の駆動が可能であることが示されている。具体的には、2.4GHz 帯の電力信号を用いて、2.46GHz 帯で ZigBee 通信を行う。さらに文献 [30] では、基地局から無線電力伝送を行うことで 1km 先のモバイル端末を駆動する手法が検討されている。一方、本稿は機器内バッテリーレスセンサネットワークを対象として、同一周波数帯で電力信号とデータ通信を同時に行う。

## 6. おわりに

本稿では、NOMA を用いて Backscatter 通信型センサネットワークを構築する検討を行った。Backscatter 通信において複数 AP を設置することで通信範囲を広げ、NOMA を適用することでパケットエラー率とスループットを改善した。シミュレーションの結果、単一のアクセスポイントを用いる手法に比べて約 2 倍、複数のアクセスポイントを用いて NOMA を適用しない手法に比べて約 1.3 倍高いス

ループットを達成することが分かった。

## 7. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19H01101, JP16K16044 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] J. Uher, R. G. Mennecke, and B. S. Farroha, "Denial of sleep attacks in bluetooth low energy wireless sensor networks," in *Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM) 2016*, pp. 1231–1236, IEEE, 2016.
- [2] B. Kellogg, V. Talla, S. Gollakota, and J. R. Smith, "Passive wi-fi: Bringing low power to wi-fi transmissions," in *Proceedings of 16th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'16)*, vol. 16, pp. 151–164, 2016.
- [3] IEEE, "IEEE standard for low-rate wireless networks," 2015. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2015.pdf> Access on 3 February 2017.
- [4] "Sony Global: FeliCa Web Site," 2010. <http://www.sony.net/felica/> Access on 28 February 2017.
- [5] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [6] C.-S. Wang, O. H. Stielau, and G. A. Covic, "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 5, pp. 1308–1314, 2005.
- [7] T. Imura, H. Okabe, and Y. Hori, "Basic experimental study on helical antennas of wireless power transfer for electric vehicles by using magnetic resonant couplings," in *Proceedings of Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. (VPPC'09)*, pp. 936–940, IEEE, 2009.
- [8] S. Li and C. C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4–17, 2015.
- [9] Y. Narusue, Y. Kawahara, and T. Asami, "Impedance matching method for any-hop straight wireless power transmission using magnetic resonance," in *Proceedings of Radio and Wireless Symposium (RWS'13)*, pp. 193–195, IEEE, 2013.
- [10] J. O. McSpadden and J. C. Mankins, "Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology," *IEEE microwave magazine*, vol. 3, no. 4, pp. 46–57, 2002.
- [11] S. Sasaki, K. Tanaka, and K.-i. Maki, "Microwave power transmission technologies for solar power satellites," in *Proceedings of the IEEE*, pp. 1438–1447, IEEE, 2013.
- [12] S. Yamashita, N. Imoto, T. Ichihara, K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, and N. Shinohara, "Implementation and feasibility study of co-channel operation system of microwave power transmissions to ieee 802.11-based batteryless sensor," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 97, no. 9, pp. 1843–1852, 2014.
- [13] N. Imoto, S. Yamashita, T. Ichihara, K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, and N. Shinohara, "Experimental investigation of co-channel and adjacent channel operations of microwave power and ieee 802.11 g data transmissions," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 97, no. 9, pp. 1835–1842, 2014.
- [14] K. Yamazaki, Y. Sugiyama, Y. Kawahara, S. Saruwatari, and T. Watanabe, "Preliminary evaluation of simultaneous data and power transmission in the same frequency channel," in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC'14)*, pp. 1237–1242, 2015.
- [15] M. R. Khandaker and K.-K. Wong, "SWIPT in MISO multicasting systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 277–280, 2014.
- [16] Z. Fang, X. Yuan, and X. Wang, "Distributed energy beamforming for simultaneous wireless information and power transfer in the two-way relay channel," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 6, pp. 656–660, 2015.
- [17] Q. Shi, C. Peng, W. Xu, M. Hong, and Y. Cai, "Energy efficiency optimization for MISO SWIPT systems with zero-forcing beamforming," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 4, pp. 842–854, 2016.
- [18] J. R. Smith, A. P. Sample, P. S. Powlledge, S. Roy, and A. Marnishev, "A wirelessly-powered platform for sensing and computation," in *Proceedings of International Conference on Ubiquitous Computing (IUCC'16)*, pp. 495–506, Springer, 2006.
- [19] D. Bharadia, K. R. Joshi, M. Kotaru, and S. Katti, "Backfi: High throughput wifi backscatter," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 45, no. 4, pp. 283–296, 2015.
- [20] B. Kellogg, A. Parks, S. Gollakota, J. R. Smith, and D. Wetherall, "Wi-Fi backscatter: Internet connectivity for RF-powered devices," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 44, no. 4, pp. 607–618, 2015.
- [21] N. Shinohara and T. Ichihara, "Coexistence of wireless power transfer via microwaves and wireless communication for battery-less ZigBee sensors," in *Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE EMC'14)*, pp. 445–448, 2014.
- [22] 猿渡俊介, 小寺志保, 成末義哲, 川原圭博, 渡辺尚, "無線全二重通信によるデータと電力同時伝送のためのメディアアクセス制御方式," *情報処理学会研究報告*, vol. 2015-CDS-14, no. 7, pp. 1–8, 2015.
- [23] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," in *Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (IEEE ISIT'08)*, pp. 1612–1616, IEEE, 2008.
- [24] P. Grover and A. Sahai, "Shannon meets tesla: Wireless information and power transfer," in *Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT'10)*, pp. 2363–2367, IEEE, 2010.
- [25] 猿渡俊介, 森川博之, "ユビキタスセンサネットワーク," *日本ロボット学会誌*, vol. 28, no. 3, pp. 284–287, 2010.
- [26] M. Minami, T. Morito, H. Morikawa, and T. Aoyama, "Solar biscuit: A battery-less wireless sensor network system for environmental monitoring applications," in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Networked Sensing Systems*, 2005.
- [27] H. Nishimoto, Y. Kawahara, and T. Asami, "Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks," in *Proceedings of Sensors 2010*, pp. 1282–1287, IEEE, 2010.
- [28] Y. Kawahara, X. Bian, R. Shigeta, R. Vyas, M. M. Tentzeris, and T. Asami, "Power harvesting from mi-

crowave oven electromagnetic leakage,” in *Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing (ACM Ubicomp’17)*, pp. 373–382, 2013.

- [29] M. Piñuela, P. D. Mitcheson, and S. Lucyszyn, “Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments,” vol. 61, no. 7, pp. 2715–2726, 2013.
- [30] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou, and H. D. Sherali, “Making sensor networks immortal: An energy-renewal approach with wireless power transfer,” *IEEE/ACM Transactions on networking*, vol. 20, no. 6, pp. 1748–1761, 2012.