

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11923

研究課題名(和文) バックスキャッタ通信と無線電力伝送を融合するための研究ツールの開発

研究課題名(英文) Development of research tools for integrating backscatter communication and wireless power transmission

研究代表者

木崎 一廣 (Kizaki, Kazuhiro)

大阪大学・情報科学研究科・特任研究員

研究者番号：00838766

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：アンテナに接続したRFスイッチをオン/オフすることで空間に発射された電波を変調するバックスキャッター送信で、スペクトラム拡散方式のIEEE802.15.4規格の packets を発生する変調装置を、自由にプログラミング可能なマイクロコンピュータを用いた装置と、プログラマブルなロジックデバイスであるCPLDを用いて超低消費電力で動作する装置を製作した。変調装置以外に、電波供給装置と受信装置が必要であるが、これには市販で安価なIEEE802.15.4規格の無線通信用モジュールを活用可能な構成にした。1台又は複数台の変調装置へ複数の電波供給装置が効率良く電力を供給するための方式の検討と実証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無電源で動作するバッテリーレスIoTデバイスと、バッテリーレスIoTデバイスに対して電波を介した通信機能と電源機能を実現する装置を無償の回路設計ツール、プリント基板設計ツール、マイクロコンピュータ用ソフトウェア開発環境などを用いて設計・製作した。この設計データを公開して他の研究者が安価で容易に再検証やカスタマイズが出来るようにして研究の発展に貢献する。さらに、安価な市販の通信用モジュールに無償の開発環境を用いて開発したソフトウェアを搭載して検証に必要な測定器などの機能を実現した。これを公開して安価に検証環境が構築出来る様にした。

研究成果の概要(英文)：It is possible to freely program a modulator that generates a spectrum spread type IEEE 802.15.4 standard packet by backscatter transmission that modulates radio waves emitted in space by turning on / off the RF switch connected to the antenna. We made a device using a microcomputer and a device that operates with ultra-low power consumption using a programmable logic device CPLD. In addition to the modulator, a radio wave supply device and a receiver are required, but for this, a commercially available and inexpensive IEEE 802.15.4 standard wireless communication module can be used. We examined and demonstrated a method for efficiently supplying power to one or more modulation devices by multiple radio wave supply devices.

研究分野：通信工学関連

キーワード：バックスキャッター Backscatter IEEE802.15.4

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2000 年前後に生まれたワイヤレスセンサネットワークの本質的な課題である電力問題が IoT ブームが終盤に差し掛かった現在においても解決されていないことである。ありとあらゆるモノをネットワークに接続するためには「ワイヤレス」が不可欠な要素である。これまでのセンサーノードや IoT デバイスはワイヤレスを実現するためにバッテリーの呪縛に縛られてきた。モノに計算機能や通信機能を与えるためには電力が必要となるからである。しかしながら、バッテリーには寿命があり、電源容量は物理的なサイズに制限される。無線通信技術が 10 年で 10 倍の通信容量のスピードで進化しているのに対し、バッテリー技術はエネルギー密度が 10 年で 2 倍程度しか増えていない。これまでのように単に「使っていない機能をスリープさせる」工夫だけでは限界にきている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、無電源で動作するバッテリーレス IoT デバイスと、バッテリーレス IoT デバイスに対して電波を介して通信機能と電源機能を提供する周辺技術を実現することである。そして本研究の学術的独自性・創造性は「ボックスキャット通信と無線電力伝送を同時に検証可能な実証環境を構築し、他の研究者が再検証しやすい環境を提供すること」である。

現在のボックスキャット通信や無線電力伝送の研究は、L0 (ハードウェア) や L1 (物理層) を対象として、資金力が豊富な組織による概念実証と、資金の必要のない理論研究が主流であった。それに対して、本提案は「少ない研究費でもボックスキャット通信と無線電力伝送を実機で L2 (MAC プロトコル) ~ L7 (アプリケーション) までをも試行錯誤できる環境を提供する」点に独創性がある。センサネットワークにおける MICA Mote、IoT における Arduino や Raspberry Pi、ワイヤレスネットワークにおける GNU Radio・USRP と同様に、ボックスキャット通信・無線電力伝送における標準研究開発ツールを実現する。ここで本研究のポイントであるボックスキャット通信について詳細に説明したい。ボックスキャット通信とは、送信側で搬送波を作り出すことなく、アンテナのインピーダンスをスイッチで高速に切り替えるだけでデータを送信する技術である。自ら電波を発射するのではなく、環境に存在する TV や Wi-Fi などの電波をアンテナで反射/吸収することで電波を ON/OFF するように変調をかけてデータを伝送する。図 1、図 2 に既存の無線送信機とボックスキャット送信機の比較を示す。図 1 の既存の無線送信機では搬送波とデータ信号を乗算した後に増幅器で信号を増幅して電波を放出する。そしてこの増幅器が電力を大きく消費するため、これまでのスリープを主体とした手法では低消費電力化に限界があった。それに対して図 2 のボックスキャット通信では、搬送波の送信とデータ信号の送信が分離される。搬送波送信機が増幅した搬送波信号を放出し、ボックスキャット送信機がインピーダンスを変化させて電波を反射する・しないを切り替えることで空間上で搬送波とデータ信号を重畳する。ボックスキャット通信では、送信側での増幅器が不要であり、スイッチの切り替え自体には電力をほとんど消費しないため、通常は数 mW を要するところを数十  $\mu$ W の消費電力

でデータを送信することができる。主にパッシブ RFID で用いられてきた技術であるが、ここ数年の研究でバックスキャッタ通信の変調を工夫することで Wi-Fi 互換や LoRa 互換のフレームの生成を行うことに成功している。

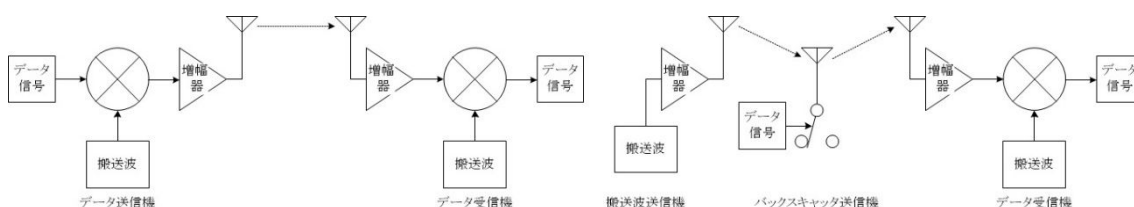


図 1: 既存の無線通信

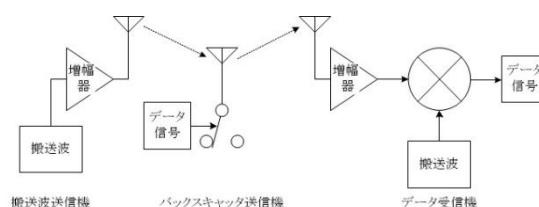


図 2: バックスキャッタ通信

### 3 . 研究の方法

(1)バックスキャッタ送信と無線電力受信を具備した IoT デバイスの研究: 現在のところ、研究者が手軽に入手可能なバックスキャッタ通信デバイスが存在しない。本研究項目では、バックスキャッタ送信機能と無線電力受信機能を具備したセンサノードを実現する。

(2)搬送波送信・バックスキャッタ受信・無線電力送信を具備した協調型アクセスポイントの研究:GNU Radio や LabView などのソフトウェア無線技術を用いることで物理層の技術を簡単に試せるようになった。しかしながら、複数のアクセスポイントから送信する信号を協調させたり送信のタイミングを制御したりするためには GNU Radio や LabView などの PC ベースのソフトウェア無線技術は  $\mu$  秒レベルのリアルタイム性が欠如しているので適していない。それに対して本研究では、連続波の送信が可能な IEEE 802.15.4 のモジュールをマイコンボード上のベアメタルのソフトウェアから直接制御可能なアクセスポイントを実現する。

(3)バックスキャッタ通信・無線電力伝送・既存の無線通信が共存可能な MAC プロトコルの研究:現在のところ、ISM 帯においてバックスキャッタ通信・無線電力伝送・既存の無線通信が共存可能な MAC プロトコルは存在しない。本研究では、複数のセンサノードで受信する電力を公平化かつ最大化しつつ、効率的にバックスキャッタ送信を行う仕組みを協調型アクセスポイントを用いて実現する。

### 4 . 研究成果

無償の回路及びプリント基板設計 CAD を用いた回路の設計、無償の開発環境を用いたソフトウェア開発を行い、必要に応じてプリント基板製造メーカに基板製造・組立を依頼して、搬送波送信機、バックスキャッタ送信機、データ受信機や協調型アクセスポイントの製作を行い、各種検証を行った。製作した装置と成果を以下に紹介する。

(1) 第一世代バックスキャッタ送信機(図 3)

IEEE802.15.4 規格のパケットを送信するバックスキャッタ送信機で、マイクロコンピュータ STM32F446RE と RF スイッチ IC を搭載している。シールドテント内で 3.5m 以上の距離で通信可能なことを確認した。設置位置による通信エラーの変化を解消するために搬送波の周波数を変化させた周波数ダイバシティを行い通信エラーが解消することを確認した。

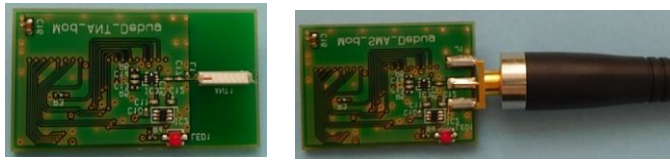


図 3: 第一世代バックスキャッタ送信機(チップアンテナ搭載型と SMA コネクタ搭載型)

(2) 第一世代搬送波送信機(図 4、図 5)

マイクロコンピュータ STM32F446RE と周波数シンセサイザ IC、RF アッテネータ IC、RF パワーアンプ IC を搭載した搬送波送信機でパソコンと USB で接続して使用する。図 5 に示す様にケースに入れて技適を取得し、情報処理学会 D1COM02020 のデモセッションで使用した。

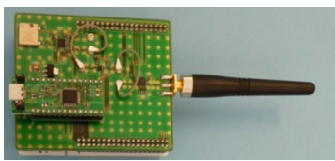


図 4: 第一世代搬送波送信機

図 5: ケースに入れて技適を取得した搬送波送信機

(3) 第一世代データ受信機(図 6)

IEEE802.15.4 対応のシステムオンチップである TI CC2531 を搭載したデータ受信機でパソコンと USB で接続して使用する。バックスキャッタ送信機が発生したパケットを市販の IEEE802.15.4 対応デバイスで受信できることを確認するとともに、各種実験に使用した。

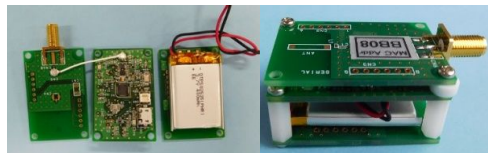


図 6: 第一世代データ受信機

図 7: 第二世代バックスキャッタ送信機

(4) 第二世代バックスキャッタ送信機(図 7)

マイクロコンピュータ STM32F446RE、RF スイッチ IC、IEEE802.15.4 レシーバ IC、温度、湿度、気圧センサー IC、リチウムイオン電池を搭載したバックスキャッタ送信機で、IEEE802.15.4 パケットの送信はバックスキャッタ変調、受信は IEEE802.15.4 レシーバで行う。複数のバックスキャッタ送信機が同時に動作すると混変調が発生して通信できなくなる場合がある、これを避けるために複数のバックスキャッタ送信機が時刻同期して、効率よく混変調による競合を避けるプロトコルの検証を行った。この設計データは「<https://github.com/watalabo/backscatter-15.4>」に公開した。

(5) 第二世代搬送波送信機及び第二世代データ受信機(図 8)

TI から安価な LaunchPad CC1352P が販売され調査結果、搬送波送信機及びデータ受信機として使用可能なことが判った。無償のソフトウェア開発環境である TI CCS を用いて「簡易シグナルジェネレータ(搬送波送信機)」、「簡易スペクトラムアナライザー」、「IEEE802.15.4 パケット送信」、「IEEE802.15.4 パケット受信(データ受信機)」

「Backscatter TAG 用 IEEE802.15.4 パケット受信」、「Backscatter TAG 用 簡易シグナルジェネレータ」、「Backscatter TAG 用 IEEE802.15.4 パケット送信」のソフトウェアを開発して種々の検証に使える様にした。

この開発データは「<https://github.com/watalabo/backscatter-tools>」に公開した。

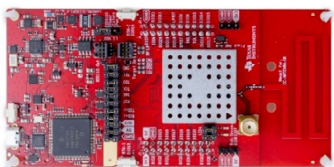


図 8 : LaunchPad CC1352P

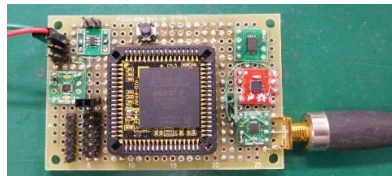


図 9 : 第三世代バックスキャッタ送信機

#### (6) 第三世代バックスキャッタ送信機(図 9)

マイクロコンピュータを用いたバックスキャッタに比較して圧倒的な低消費電力化が期待できる CPLD (Complex Programmable Logic Device) を用いて、加速度センサーによりウェイクアップするデバイスを試作した。Intel 社の無償の設計ツールである Quartus を用いて IEEE802.15.4 モデム及び加速度センサーの制御を論理回路で記述して設計した。半導体不足の影響で希望する CPLD チップが入手出来ないため、倍の規模の論理回路を収納可能なチップを実装したモジュールを入手して、加速度センサー、MEMS 発振器などをブレッドボードに手はんだで実装した。電源電圧 2.5V に於ける静止時の消費電力は 85.6  $\mu$ W であり、1 秒間に 1 回動作し 1 パケット送信すると 2.45  $\mu$ W/秒、1 秒間に 10 回動作すると 24.5  $\mu$ W/秒が静止時の消費電力に加算される。微小な消費電力で動作することが確認できた。

#### (7) 集合型協調型アクセスポイント(図 10)

同一周波数で 8 チャンネルの出力の位相を自在に可変可能な装置を製作した。位相の組み合わせにより複数の IoT デバイスに公平かつ最大化しつつ電力を供給するアルゴリズムの検証に使用した。



図 10 : 集合型協調型アクセスポイント



図 11 : 分散型協調型アクセスポイント

#### (8) 分散型協調型アクセスポイント(図 11)

集合型協調型アクセスポイントは局部発振信号の分配とアクセスポイントとアンテナの接続で多くの同軸ケーブルを使用している。アンテナの数が増加すると同軸ケーブルの本数が増えてアンテナの固定と配線作業が大変であるとともに同軸ケーブルは高価であるためコストが増加する。これを解決するために、無線による周波数同期と制御機能を備えた分散型協調型アクセスポイントの試作を行った。装置間の位相差を  $\pm 10$  度以下にすることが出来、協調型アクセスポイントとして使用可能な性能であることを確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名	Yohei Konishi, Shinsuke Ibi, Kazuhiro Kizaki, Takuya Fujihashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe
2. 発表標題	Harmonics-Controlled Frequency Division Multiple Access without Harmonics and Sidebands Interference in Backscatter Communications
3. 学会等名	IEEE International Conference on Communications (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Kazuki Aiura, Kentaro Hayashi, Yuki Tanaka, Kazuhiro Kizaki, Takuya Fujihashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe
2. 発表標題	Implementation of Distributed Microwave Power Transfer with Backscatter Feedback and LM-Based Phase Optimization
3. 学会等名	The 40th IEEE International Conference on Consumer Electronics (IEEE ICCE'22) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	小西 陽平, 衣斐 信介, 木崎 一廣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題	Backscatter通信における帯域外輻射を抑圧する高調波制御FDMAに関する一検討
3. 学会等名	情報処理学会モバイルコンピューティングとパーベイスブシステム(MBL)研究会
4. 発表年	2021年～2022年

1. 発表者名	三浦 伸之介, 小泉 亮介, 小西 陽平, 木崎 一廣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題	Backscatter 通信における非同期MAC プロトコルにおける消費電力性能の検討
3. 学会等名	2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名 小泉 亮介, 小西 陽平, 木崎 一廣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第84回情報処理学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小泉 亮介, 小西 陽平, 木崎 一廣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 IEEE 802.15.4 Compatible Backscatter のMACプロトコルに関する初期検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Kentaro Hayashi , Hikaru Hamase , Jiei Kawasaki , Kazuhiro Kizaki , Yuki Tanaka , Takuya Fujihashi , Shunsuke Saruwatari , Takashi Watanabe
2. 発表標題 Experimental Evaluation on RSSI-based Phase Optimization in Microwave Power Transfe
3. 学会等名 IEEE Vehicular Technology Conference (IEEE VTC'21-Spring), pp.1-6, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yohei Konishi, Takayuki Ueda, Kazuhiro Kizaki, Takuya Fujihashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe
2. 発表標題 Experimental Evaluation on IEEE 802.15.4 Compatible Backscatter
3. 学会等名 IEEE International Conference on Communications (IEEE GLOBECOM '20), pp.1-6, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林 健太郎, 濱政 光, 川崎 慈英, 木崎 一廣, 田中 勇氣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 無線給電と位置推定同時実現のための分散協調電波電力伝送システムに関する一検討
3. 学会等名 第97回モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 健太郎, 濱政 光, 川崎 慈英, 木崎 一廣, 田中 勇氣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 電波電力伝送における RSSI フィードバックを用いた位相最適化手法の実装と評価
3. 学会等名 マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOM02020)シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木崎 一廣, 川崎 慈英, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 IEEE 802.15.4 Backscatter の実装実験
3. 学会等名 情報処理学会 Dicom2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小西 陽平, 木崎 一廣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 スペクトル拡散技術を用いた IEEE 802.15.4 互換 Backscatter に関する基礎的評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 林 健太郎, 濱政 光, 川崎 慈英, 木崎 一廣, 田中 勇気, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 電波を用いた位相制御協調電力伝送における位相最適化技術の初期的評価
3. 学会等名 情報処理学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田 貴之, 木崎 一廣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 周波数ホッピングを用いたIEEE 802.15.4互換Backscatterに関する基礎的検討
3. 学会等名 情報処理学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田 貴之, 木崎 一廣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 IEEE 802.15.4互換Backscatterに関する基礎的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

(1) 無線電力伝送 <a href="https://www-int.ist.osaka-u.ac.jp/research/0008/">https://www-int.ist.osaka-u.ac.jp/research/0008/</a> (2) Backscatter通信 <a href="https://www-int.ist.osaka-u.ac.jp/research/0005/">https://www-int.ist.osaka-u.ac.jp/research/0005/</a> (3) backscatter-15.4 <a href="https://github.com/watalabo/backscatter-15.4">https://github.com/watalabo/backscatter-15.4</a> (4) backscatter-tools <a href="https://github.com/watalabo/backscatter-tools">https://github.com/watalabo/backscatter-tools</a> 本研究で製作したハードウェアの設計データ及びソフトウェアを他の研究者が活用可能にするために(3)と(4)のGitHubに公開しています。
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------