

5W-09 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

上田 貴之[†] 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

Backscatter 技術を用いることで、無線センサネットワークや Internet of Things (IoT) において課題であった無線送信時の電力消費を数 μW まで削減することができる。しかしながら、Backscatter 通信では、搬送波のフェージングが問題となる [1]。本稿では、Backscatter 技術に対して搬送波の周波数ホッピング (Frequency Hopping Spread Spectrum: FHSS) を組み合わせた通信信頼性向上の実現可能性について実験を通じて評価する。

2 センサネットワークにおける電力消費・通信信頼性問題

無線通信では信号送信時に信号増幅のために多大な電力を要する。電力消費はとりわけセンサネットワークにおいてはセンサ端末の低寿命化につながる。センサの電池交換の時のコスト面から低消費電力であることが望ましい。センサネットワークでは省電力の無線通信規格である IEEE 802.15.4 が利用されている。しかしながら、信号送信に要する電力消費量は未だに高い。無線通信の電力問題に対処する方法として、トランジスタのサイズを小さくすることで必要な電圧を小さくするスケールアップや、無線端末に発信回路や増幅回路を含まないパッシブ方式などの観点から消費電力を抑える手法が検討されている。パッシブ方式の一技術として Backscatter が提案されている。その一例として Passive Wi-Fi [2] が提案されている。文献 [2] においては、Backscatter を備えたデバイス (以下、データ送信装置) が他の無線通信端末が発信した RF (Radio Frequency) 信号を反射、吸収することで差分位相移変調 (Differential Phase-Shift Keying: DPSK) を行う。変調した信号は市販の Wi-Fi チップを備えた受信機が受信して復調する。データ送信装置は信号送信時に信号増幅を利用する必要がないため、同じ通信速度の Wi-Fi 通信と比較して 1000 分の 1 から 10000 分の 1 の消費電力で通信することができる。筆者らはこれまでパッシブ方式の観点から IEEE 802.15.4 パケットを Backscatter で送信することによって無線センサネットワークにおける低消費電力化の実現を進めている [3]。

一方で、Backscatter を用いて IEEE 802.15.4 パケットを送信する場合、受信機上で生じるフェージングが一要因となって通信信頼性、すなわち受信可能パケット数が低下する問題がある。フェージングとは、送信機が発信した電波が空間内で多重伝搬して受信機上で合成するときに各電波の位相差が要因となって特定の周波数で電波受信強度が大きく低下する現象である。単一周波数の RF 信号から Backscatter を用いて IEEE 802.15.4 パケットを送信する場合、フェージングの影響によって受信機上での信号強度が低下して受信可能なパケット数が低下する。フェージングによる通信信頼性低下を抑制する代表的な手法としてスペクトル拡散技術が検討されている。代表的なスペクトル拡散技術として直接スペクトラム拡散 (Direct Sequence Spread Spectrum: DSSS) や周波数ホッピングが存在する。周波数ホッピングとは、送信機が発信する電波の周波数を一定間隔で切り替えて通信する技術である。通信に使用する周波数を素早く切り替えるため、フェージングによって生じる特定周波数での電波受信強度低下の影響を受けにくくなるという性質を持つ。本稿では、周波数ホッピングと Backscatter を利用して IEEE 802.15.4 パケットを送信することでフェージングによる通信信頼性低下を抑制した低消費電力化の実現を目指す。

3 周波数ホッピング対応 IEEE 802.15.4 互換 Backscatter

3.1 全体像

低消費電力かつ高い通信信頼性を持つ無線センサネットワーク実現のために、本稿では周波数ホッピングを用いた IEEE 802.15.4 に互換性を持つ Backscatter を提案する。図 1 に提案する Backscatter 無線通信装置の構成を示す。無線通信装置は、RF 信号供給装置、データ送信装置、データ受信装置で構成されている。RF 信号供給装置は複数周波数の無変調の連続波を送信する。データ送信装置は RF 信号供給装置で発生させた無変調の連続波を変調することで IEEE 802.15.4 パケットを

送信する。データ受信装置は IEEE 802.15.4 パケットを受信する。各装置にはコンピュータと接続されていて、コンピュータから各装置を制御する。従来の IEEE 802.15.4 規格を実現する送信回路は、D/A 変換器、局部発信器、直交変換器、パワーアンプで構成されていて、消費電力は数十 mW であった。一方で、本提案で示す IEEE 802.15.4 互換 Backscatter 方式の送信回路は、SPDT スイッチ素子 1 個とマイクロコンピュータで構成されていて、数十 μW の消費電力で動作する。

3.2 RF 信号供給装置

RF 信号供給装置は USB インタフェース (秋月電子通商製 AE-FT232HL モジュール)、マイクロコンピュータ (STMicroelectronics 製 Nucleo-F446RE ボード)、周波数シンセサイザ (Analog Devices 製 ADF4360-0)、パワーアンプ (Texas Instruments 製 TRF37D73)、アッテネータ (Analog Dvices 製 HMC624A) で構成されている。RF 信号供給装置は USB インタフェースを用いてコンピュータから制御する。RF 信号供給装置は 254 ms ごとに放出する電波の周波数を変更して周波数ホッピングを実現する。より具体的には、放出する RF 信号の周波数を 2400 MHz-2500 MHz の範囲で 0.01 MHz 間隔、出力電力を -22.5 dBm-10 dBm の範囲で 0.5 dB 間隔で設定して送信することができる。

3.3 データ送信装置

データ送信装置はマイクロコンピュータ (STMicroelectronics 製 STM32F446RE)、SPDT RF Switch で構成されている。アンテナに接続された SPDT RF Switch を GND にショートまたはオープンに連続的に切り替えることで受信した無変調の信号波を O-QPSK 変調する。このとき、変調信号の周波数 Δf は SPDT RF Switch でショートおよびオープンを切り替えるスピードで決定される。より具体的には、RF 信号供給装置から周波数 f の RF 信号を受信したとき、データ送信装置で周波数 Δf に対応するスピードで RF 信号を変調する。このとき、発生する変調信号の周波数は $f - \Delta f$ および $f + \Delta f$ となる。図 2 に変調信号発生の流れを示す。送信データを元にして SPDT RF Switch に対する ON/OFF Signal を生成する。生成した ON/OFF Signal に応じてデータ送信装置は自身のアンテナをオン/オフする。送信データに対応するアンテナのオン/オフによってデータ送信装置は RF 信号供給装置から受信した RF 信号を IEEE 802.15.4 パケットとして送信する。

図 2 に示す Bit to Symbol 部から O-QPSK Modulator 部までの流れは IEEE 802.15.4 の標準 [4] に従う。Bit to Symbol 部では送信データを 4 ビットごとに区切って 1 Symbol とする。Symbol to Chip 部では Symbol の値と用意した変換テーブルにしたがって 32 個の Chip に変換する。O-QPSK Modulator 部では 32 個の Chip である C0~C31 を O-QPSK Modulation にしたがって I-Phase と Q-Phase に配置する。Pulse Shape 部では I-Phase と Q-Phase における Chip の値が 1 のときは「+」、0 のときは「-」に変換する。また、「+」「-」の間には「0」を挿入する。間に「0」を挿入することでクロック信号の位相を 90 度ずつ変化させることができる。データ送信装置では、アナログ変調回路を使わず SPDT RF Switch 1 個のみで変調するため、I-Phase Shape と Q-Phase Shape の組み合わせで位相角を表現する。Backscatter Modulator 部では、位相を 90 度ずつずらした 4 相のクロック信号 (0 度, 90 度, 180 度, 270 度) を作成する。各クロック信号は 8 クロックで 1 サイクルを構成する。その後、12 クロックごとに Pulse Shape 部で作成した位相 (0 度, 90 度, 180 度, 270 度) と一致する位相のクロック信号を選択する。選択したクロック信号をもとにしてデータ送信装置のアンテナをオン/オフする。

3.4 データ受信装置

データ受信装置は IEEE802.15.4 対応のシステムオンチップ (Texas Instruments 製 CC2531) で構成されている。データ受信装置はデータ送信装置から生成された IEEE 802.15.4 パケットを受信する。このとき、IEEE 802.15.4 パケットを受信するための周波数はコンピュータが制御して RF 信号供給装置と同タイミングで決定する。受信した IEEE 802.15.4 パケットに対しては FCS (Frame Check Sequence) チェックにかけて問題がなかったパケットは正しく受信できたものとみなす。

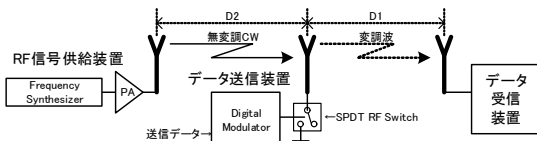


図 1: Backscatter 方式の無線通信装置の構成

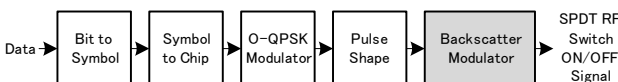


図 2: 変調信号発生の流れ

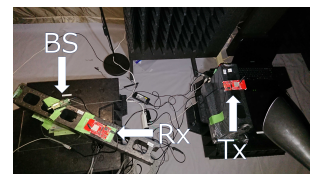
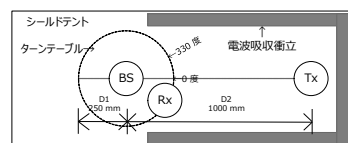
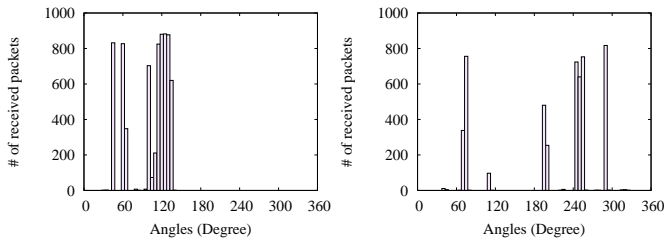


図 3: シールドテナ内の実験環境



(a) 2405 MHz, チャンネル 1 (b) 2475 MHz, チャンネル 15

図 4: RF 信号に設定した周波数に対する受信パケット数

4 実験評価

4.1 実験環境

実装した Backscatter 装置による通信信頼性を調べるために、シールドテント内に RF 信号供給装置、データ送信装置、データ受信装置を設置して実験を行った。図 3 における Rx はデータ受信装置、BS はデータ送信装置、Tx は RF 信号供給装置の位置を表す。データ送信装置はターンテーブルの中心に、データ受信装置はターンテーブルの端に設置した。D1 はデータ送信装置とデータ受信装置との通信距離、D2 はデータ送信装置と RF 信号供給装置との通信距離を表す。本実験では、D1 を 250 mm、D2 を 1000 mm に固定してターンテーブルを 30 度-330 度まで 5 度ずつ回転させて各角度ごとにデータ送信装置から 1000 個のパケットを送信した。RF 信号供給装置は 10 dBm の無変調波を送信する。ビットレートは 250 kbps である。

4.2 利用周波数による通信信頼性への影響

Backscatter を利用した IEEE 802.15.4 互換の通信における各周波数特性を調べることを目的として、Backscatter に利用する RF 信号の周波数を変更したときの受信パケット数を測定した。ここで、RF 信号供給装置が発信する RF 信号の周波数は 2405 MHz および 2475 MHz に設定した。また、ターンテーブルを 30 度から 330 度まで回転してデータ受信装置の位置を変更したときの受信パケット数を測定した。

図 4 にターンテーブルの各角度においてデータ受信装置が正しく受信した IEEE 802.15.4 パケット数を示す。横軸はターンテーブルの角度、縦軸はデータ受信装置で正しく受信したパケット数を表す。ここで、図 4 (a) は 2405 MHz の RF 信号を、図 4 (b) は 2475 MHz の RF 信号を RF 信号供給装置から発信している。実験結果から、RF 信号供給装置が発信する RF 信号の周波数によって IEEE 802.15.4 パケットが届きやすいターンテーブルの角度が異なっていることがわかる。例えば、RF 信号の周波数として 2405 MHz を設定したとき、ターンテーブルの角度が 30 度-120 度のときに多くのパケットが正しく受信できていることが分かった。一方で、RF 信号の周波数として 2475 MHz を設定したとき、ターンテーブルの角度が 190 度-290 度のときに多くのパケットが正しく受信できていることが分かった。ターンテーブルの角度が変わったとき、データ受信装置上で生じるフェージングによって電波受信強度が低下する周波数も変わるため、設定した RF 信号の周波数ごとに受信パケット数が変化しと考えられる。

ターンテーブルの角度を固定したとき、利用する RF 信号の周波数によって受信パケット数がどのように変化するか評価した。ここで、ターンテーブルの角度は 200 度に固定する。図 5 に RF 信号供給装置が発信した RF 信号の周波数に対するデータ受信装置で正しく受信できたパケット数を示す。横軸は RF 信号供給装置が発信した RF 信号の周波数、縦軸はデータ受信装置が正しく受信したパケット数を表す。ここで、RF 信号の周波数は 2405 MHz-2480 MHz の範囲、5 MHz 間隔で変更している。実験結果から、RF 信号の周波数に応じて受信パケット数が大きく変化することが分かった。例えば、RF 信号の周波数として 2415 MHz、2430 MHz、2460 MHz、2480 MHz を設定した場合、データ受信装置は多くのパケットを正しく受信できる。一方で、2405 MHz、2410 MHz

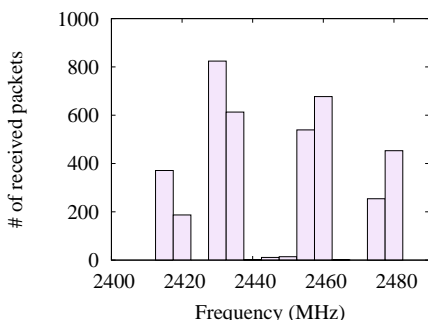


図 5: ターンテーブル角度 200 度時における RF 信号の周波数に対する受信パケット数

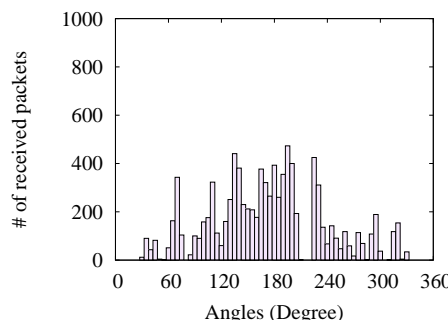


図 6: 16 チャンネル同時使用時の各ターンテーブル角度に対する受信パケット数

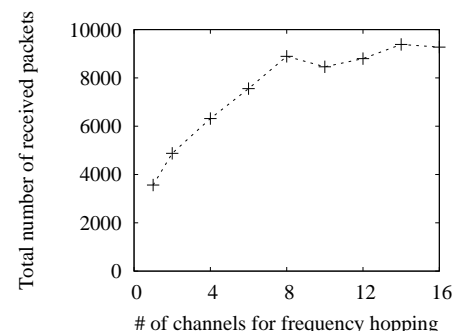


図 7: 全ターンテーブル角度にまたがった同時使用周波数に対する総受信パケット数

など、特定の周波数では IEEE 802.15.4 パケットをまったく受信できなかった。

4.3 周波数ホッピング利用時における通信信頼性への影響

周波数ホッピング利用時の Backscatter 無線通信装置の通信信頼性を調べることを目的として、RF 信号供給装置およびデータ受信装置で利用する周波数を一定間隔で切り替えたときの受信パケット数を測定した。RF 信号供給装置およびデータ受信装置が利用するチャンネル数は 2405 MHz-2480 MHz の範囲、5 MHz 間隔の 16 チャンネルとした。また、RF 信号の周波数は 254 ms ごとに異なるチャンネルへと変更するものとする。

図 6 に RF 信号が 16 チャンネルを切り替えながら使用したときにおけるデータ受信装置が正しく受信したパケット数を示す。横軸はターンテーブルの角度、縦軸はデータ受信装置で受信したパケット数を表す。実験結果から、単一の周波数を用いて通信をする場合より、複数周波数をホッピングして通信をする場合の方が広い角度で正しく受信できていることが分かる。

周波数ホッピングによる Backscatter 通信の信頼性に対する影響を詳しく検証するため、周波数ホッピングに利用するチャンネル数を変化させて受信パケット数を測定した。図 7 に、RF 信号供給装置とデータ受信装置とで周波数ホッピングに用いるチャンネルの個数を変化させたときの受信パケット数を示す。横軸は周波数ホッピングに利用するチャンネルの個数、縦軸はターンテーブル全角度にまたがってデータ受信装置が受信した総パケット数を表す。なお、周波数ホッピングに利用するチャンネル番号は上述の順番にしたがうものとする。実験結果から、ホッピングするチャンネル数が増加するとデータ受信装置で受信できるパケット数は増加していることがわかる。複数周波数を利用して Backscatter 通信を実現することで、単一周波数ではフェージングが影響して受信できなかったパケットが異なる周波数を利用することでフェージングの影響を緩和して受信できるようになったためだと考えられる。

5 おわりに

本稿では、周波数ホッピングに対応した IEEE 802.15.4 に互換性を持つ Backscatter を提案した。実験評価から周波数ホッピングに対応する Backscatter 方式の無線通信装置は消費電力の低減を達成するとともに、フェージングの影響を軽減することによる高信頼通信が実現可能なものであることを確認した。現在、通信可能距離延長のための方式や RF 信号供給装置の考察を進めている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP19H01101, JP17KT0042, JP17K12672) の支援の下で行った。

参考文献

- [1] 上田 貴之, 木崎 一廣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚 "IEEE 802.15.4 互換 Backscatter に関する基礎的検討" 電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp.1-1, 2019.
- [2] B. Kellogg, V. Talla, S. Gollakota, J. R. Smith, "Passive Wi-Fi: Bringing Low Power to Wi-Fi Transmissions," 13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, pp. 151-164, 2016.
- [3] Teruo Higashino, Akira Uchiyama, Shunsuke Saruwatari, Hirozumi Yamaguchi, and Takashi Watanabe, "Context Recognition of Humans and Objects by Distributed Zero-Energy IoT Devices" The 39th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (IEEE ICDCS 2019), pp.1-7, 2019.
- [4] LAN/MAN Standards Committee, "IEEE Standard for Information technology-Local and metropolitan area networks-Specific requirements- Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," IEEE Std 802.15.4, pp. 1-320, 2006.