

IEEE 802.15.4 Backscatter の実装実験

木崎 一廣¹ 川崎 慈英¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要： IoT (Internet of Things)の展開には、微小な消費電力で、無線電力給電や小型ボタン電池の交換無しで製品の寿命まで動作するデバイスが必要である。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。Backscatter 方式の送信回路は、SPDT スイッチ素子 1 個と抵抗、コンデンサで構成されていて、数十 μ W の消費電力で動作する。本稿では、文献[1]を参考に IEEE 802.15.4 規格の Backscatter 方式の送信回路を設計・製作して実験を行った結果、距離 3.5m 以上まで通信可能なことが確認できた。

1. はじめに

2016 年に発表された文献[1]では、Backscatter 方式で IEEE802.11b 規格の DBPSK 及び DQPSK 変調を実装したデバイス用いて既存の Wi-Fi チップである Atheros's AR6003 や AR9462 で受信可能なパケットを生成する手法が提案されている。文献[1]では、30 dBm の RF 信号を放出する機器を設置することで、45 フィート(13.7m)の距離まで通信できることが確認されている。

Wi-Fi チップの技術情報を入手するには、チップメーカーと契約を結び開示費用を支払わなければならないが、一般的な研究者が入手することは困難である (例：Qualcomm Atheros 社公式認定開発パートナー、日本国内では 1 社のみ)。文献[1]の著者には Atheros 社のメンバーが含まれており技術情報は問題なく入手出来ていると考える。

我々は、全ての技術情報が公開されていると共に Backscatter の用途に適しているセンサーネットワークの規格である IEEE802.15.4 を実装して今後行う種々の実験に必要な装置を製作することにした。ここで製作した実験装置は、ハードウェア及びソフトウェアに関する情報や電波法に基づく技術基準適合証明の取得方法まで公開して、他の研究者が使える様にする予定である。

2. Backscatter について

文献[2]に示す IEEE802.15.4 対応のトランシーバ IC である CC2420 の送信部分の構成を図 1 に示す。CC2420 は、Digital Modulator, DA 変換器、ローパスフィルタ 2 個、局部信号を発生する Frequency Synthesizer, 90° 位相発生回路、ミキサ 2 個、合成器、パワーアンプから構成される。3.3V の電源電圧で -25 dBm 出力時の消費電流は 8.5mA (28.05mW), 0 dBm 出力時の消費電力が 17.4mA (57.42mW) である。

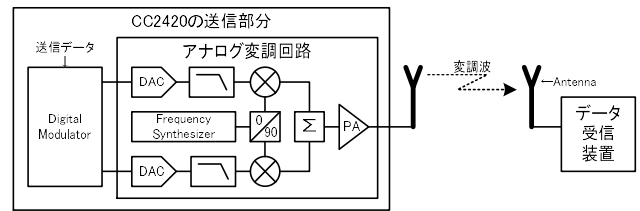


図 1 : CC2420 の送信部分構成

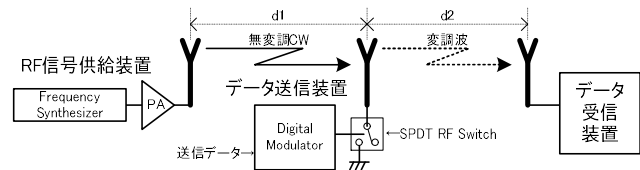


図 2 : Backscatter 方式の無線通信装置の構成

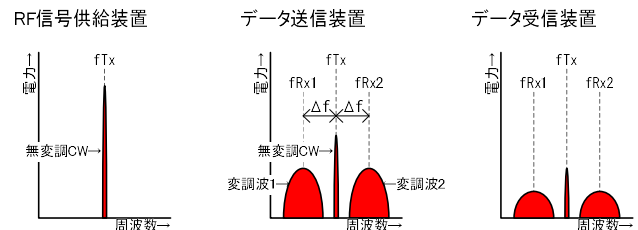


図 3 : Backscatter 通信に於ける周波数スペクトラム

図 2 に Backscatter 方式の無線装置の構成を示す。Backscatter 方式では RF 信号供給装置からアンテナを介して無変調の連続波(CW)を送信する。

データ送信装置は Digital Modulator と SPDT RF Switch のみで構成され、図 1 の CC2420 送信部分のアナログ変調回路が SPDT RF Switch 1 個に置き換わった構成である。SPDT RF Switch の消費電流は今回採用した文献[5]に示す CEL CG2409X3 において 3V の制御電圧で 7μ A (21μ W) であるため超低消費電力である。Digital Modulator の消費電力は文献[1]で専用 IC を製作することにより IEEE802.15.4 とほぼ同程度の複雑さの処理が必要な IEEE802.11b の DQPSK

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

変調を $59.2 \mu W$ の消費電力で実現できている(但し、PLL用の基準周波数の発生を除く)ので、データ送信装置を基準周波数の発生を除き消費電力、約 $80 \mu W$ の消費電力で実現できる見込みである。

データ送信装置はアンテナに接続された SPDT RF Switch を GND にショート・オープンを切り替えることにより、RF 信号供給装置から送信している無変調の連続波を空間で変調する。SPDT RF Switch のショート・オープンのタイミングにより BPSK や QPSK、O-QPSK など種々の変調方式に対応することが出来る。データ受信装置は文献[3]に示す IEEE802.15.4 対応のシステム・オン・チップ(SOC)である Texas Instruments CC2531 を使用する。

図 3 : に Backscatter 通信に於ける周波数スペクトラムを示す。RF 信号供給装置から送信された無変調の連続波である f_{Tx} は図 2 の距離 d_1 に応じて距離減衰した後、データ送信装置のアンテナに到達する。 f_{Tx} はデータ送信装置の SPDT RF Switch のショート、オープンのスピードで決まる変調周波数 Δf で変調されて f_{Rx1} と f_{Rx2} の 2 つの変調波が発生する。 f_{Tx} 、 f_{Rx1} 、 f_{Rx2} はデータ受信装置のアンテナに図 2 の距離 d_2 に応じて距離減衰して到達する。データ受信装置は、 f_{Rx1} 又は f_{Rx2} のいずれかを受信する。

3. RF 信号供給装置の実装

図 4 に RF 信号供給装置の構成を示す。USB インターフェイスとして USB2.0 ハイスピード対応の FTDI FT232HL を搭載した秋月電子通商製の AE-FT232HL モジュールを採用して、他の装置と統一している。この USB インターフェイスをパソコンに接続することで TeraTerm などのハイパーターミナルソフトを用いてデバイスの動的な操作が可能となる。図 6 に実装した操作コマンドの一覧画面を示す。

RF 信号供給装置はマイクロコンピュータに STMicroelectronics Nucleo-F446RE ボード、周波数シンセサイザーに Analog Devices ADF4360-0、パワーアンプに Texas Instruments TRF37D73、アッテネータに Analog Devices HMC624A を用いて構成した。マイクロコンピュータから GPIO 経由で USB インターフェイス、SPI 経由で周波数シンセサイザーとアッテネータを制御している。実装した RF 信号供給装置は周波数 2400~2500MHz を 0.01MHz ステップ、出力電力-22.5~10 dBm を 0.5db ステップで電波を放出可能である。

図 3 に示した f_{Tx} はデータ受信装置の f_{Rx1} 又は f_{Rx2} の受信周波数に対して Δf ずれ、kHz 単位の分解能で周波数を調整する必要がある。使用数周波数帯域での ADF4360-0 の最小分解能は 9.6kHz であるため、分解能を決める R カウンタの値を 1000~1032 で変化させて目的周波数に対する B カウンタと A カウンタの求める様にして目的周波数に対して kHz 単位の分解能の周波数が出る様になっている。

目的周波数=(10MHz/Rカウンタ)×(Bカウンタ×32+Aカウンタ)

この装置のソフトウェア開発には無償で利用可能なクラウド型の開発環境である mbed を使用した。

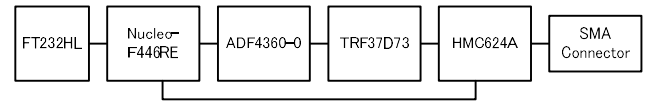


図 4 : RF 信号供給装置の構成

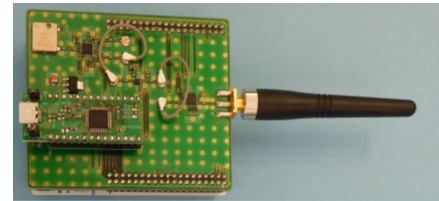


図 5 : RF 信号供給装置の外観

```

Bacscatter Tx Commands
frq XXXX.XX Set Frequency (MHz)
fca XX      Inc Frequency Calibration (XX=0_31)
fci         Inc Frequency Calibration
fcd         Dec Frequency Calibration
att XX.X   Set Attenuator (db) (XX.X=0_31.5)
ati         Inc Attenuator (0.5db Step)
atd         Inc Attenuator (0.5db Step)
.           Repeat Execute

Frequency   2442.75MHz
FrqCal      30
Att[63]    0.0db
OutPut      10.0dbm
    
```

図 6 : RF 信号供給装置の操作コマンド一覧画面

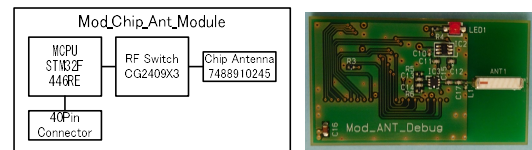


図 7 : チップアンテナモジュール

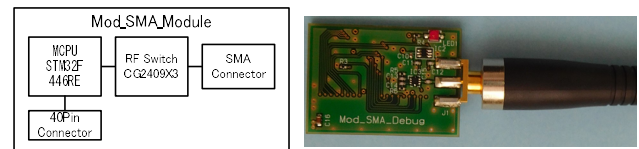


図 8 : SMA モジュール

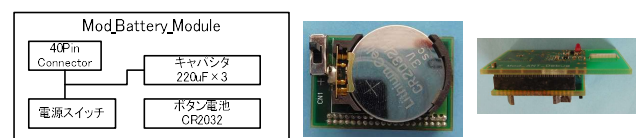


図 9 : バッテリーモジュール

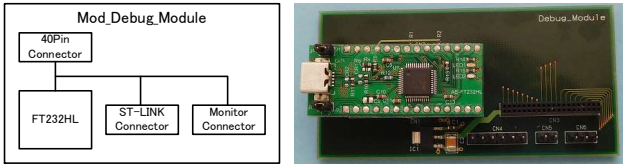


図 10 : デバッグモジュール

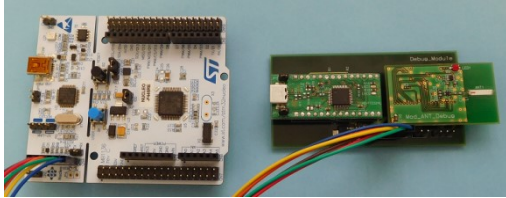


図 11: デバッグモジュールと Nucleo-F446RE ボードの接続

4. データ送信装置の実装

データ送信装置として、チップアンテナモジュール(寸法: 25×44mm)と、SMA コネクタを搭載して任意のアンテナを接続可能である SMA モジュール(寸法: 25×35mm)を製作した。チップアンテナモジュールと SMA モジュールをそれぞれ図 7, 図 8 に示す。マイクロコンピュータに STMicroelectronics STM32F446RE, SPDT RF Switch に CEL CG2409X3, チップアンテナに 2×9.5mm の小型のチップアンテナ Wurth Electronics Inc. 7488910245 を用いた。センサー装置として動作させる場合、バッテリーモジュールから電源を供給して使用する。図 9 に実装したバッテリーモジュールを示す。

図 10 にデバッグモジュールを示す。デバッグモジュールをデータ送信装置に接続して USB インターフェイスから種々の操作を行うことで様々な実験データの取得が可能となる。ソフトウェアの開発時は RF 信号供給装置に使用した Nucleo-F446RE ボードとデバッグモジュールを ST-LINK で接続して STM32F446RE のフラッシュメモリーにプログラムを書き込む。Nucleo-F446RE ボードとデバッグモジュールの接続を図 11 に示す。

この装置のソフトウェア開発には無償で利用可能なクラウド型の開発環境である mbed を使用した。

4.1 IEEE802.15.4 Digital 変調信号の発生

Digital 変調信号発生の流れを図 12 に示す。Bit to Symbol から Pluse Shape までは文献[4] IEEE Std 802.15.4 と同一である。Backscatter では、これに Backscatter Modulator が加わる。

Bit to Symbol: 送信するデータを 4 ビット毎に区切る。各 4 ビットが Symbol である。「Symbol to Chip」Symbol はバイナリーで 0~15 の値である。Symbol の値に応じて表 1 に示す Symbol to Chip 変換テーブルに従い 32 個の Chip C0~C31 に変換する。

O-QPSK Modulator: Chip C0~C31 を図 13 O-QPSK Modulation に示す I-Phase と Q-Phase 位置に配置する。図 14 に Symbol 0 を配置した例を示す。

Pulse Shape: 文献[4] IEEE802.15.4 で、図 15 に示すように Phase の値が 1 では正の正弦波の 1/4 サイクル、0 では負の正弦波の 1/4 サイクルに変換する。この信号が図 1 CC2420 の送信部の構成に示す DAC の出力である。Backscatter では、アナログ変調回路を使わず SPDT RF Switch 1 個で変調するため、図 16 に示す位相角を表すデータとする。

Backscatter Modulator: Backscatter Modulator の処理を図 17 に示す。まず、位相を 90 度づつずらした 4 相のクロック(0 度, 90 度, 180 度, 270 度)を作成しておく。この 4 相クロックは基準となる Fclock が 8 クロックで 1 サイクルを構成する。次に、「Pulse Shape」で作成した位相角と一致する位相角の 4 相クロックを選択して Mod で示すクロック数毎に選択を切り替える。Mod の値により通信性能が変化する可能性を考慮して、表 2 に示す Mod=9~13 の 5 種類を準備している。Mod の値×(1/Fclock)=0.5 μS であり表 2 に示す様に Δf が変化する。

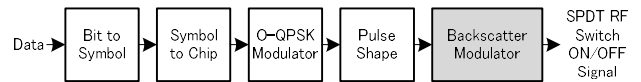


図 12 : 変調信号発生の流れ

表 1 : Symbol to Chip 変換テーブル

Symbol	Chip (C0~C31)
0	11011001110000110101001000101110
1	11101101100111000011010100100010
2	00101110110110011100001101010010
3	00100010111011011001110000110101
4	01010010001011101101100111000011
5	00110101001000101110110110011100
6	11000011010100100010111011011001
7	10011100001101010010001011101101
8	100011001001011100000011101111011
9	10111000110010010110000001110111
10	01111011100011001001011000000111
11	01110111101110001100100101100000
12	00000111011101110011000110010110
13	01100000011101111011100011001001
14	10010110000001110111101110001100
15	11001001011000000111011110111000

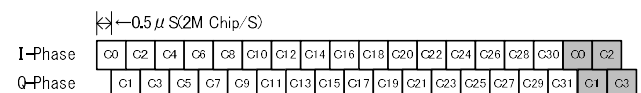
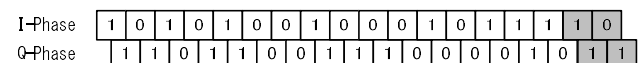


図 13 : O-QPSK Modulation



ON/OFF Signal が生成されデータ送信装置からデータが送信される。

データ送信装置に実装した機能：実験用のデータ取得のために、データ送信装置にいくつかの機能を実装した。実装した Backscatter 装置はデバッグモジュールを用いてパソコンと USB インターフェイスで接続して TeraTerm などのハイパーターミナルソフトを用いて使用する。

操作コマンド一覧画面を図 19 に示す。

- 「ptx」はキーボードから入力された文字列を Payload としてのパケットを生成して送信する。
- 「mtx」は「ptx」で生成したパケットを NNNN で指定した個数を 20m 秒毎に送信する。
- 「sta」は電源電圧と STM32F446RE の内部温度を測定して 320m 秒毎に送信する。
- 「cw」は Symbol 0～15 の変調を連続で送信する。
- 「sto」は「sta」と「cw」の動作を停止させる。
- 「mod」は表 2 に示す Mod 値と Fclock を設定する。バッテリーモジュールを用いて電源を供給して動作させた場合は「mod」の値は 11 に固定で、「sta」の機能のみ動作させている。

5. データ受信装置の実装

実装したデータ受信装置を図 20 に示す。データ受信装置は AE-FT232HL モジュールと CC2531 を搭載している。パソコンと USB インターフェイスで接続して、TeraTerm などのハイパーターミナルソフトを用いて使用する。

この装置のソフトウェア開発には、IAR Embedded Workbench 8051 を使用した。

図 21 に操作コマンド一覧画面と操作例を示す。

- 「sta」で受信を開始し、パケットを受信すると FCS のチェック結果：GO/NG, 受信 RSSI[dbm], 受信データの 16 進ダンプを表示する。
- 「sto」で受信を停止し、受信パケット数, FCS チェック結果 GO のパケット数, NG のパケット数を表示する。
- 「frq」で受信周波数 2405～2480MHz を 5MHz ステップで設定する。1MHz ステップで設定できるが IEEE802.15.4 の 5MHz ステップ 16 チャンネルで設定する。
- 「cw」で指定した周波数の無変調連続波を発生させる。スペクトラムアナライザを用いた正確な受信周波数の確認に使用する。

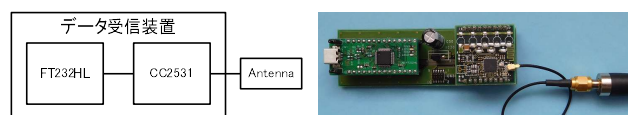


図 20：データ受信装置

```

-----
sta      Receive Start
sto      Receive Stop & CW Stop
frq XXXX Mhz  RF Freq
cw XXXX Mhz  No Modulation CW
-----
Freq = 2440 Mhz
-----
Start
1 GO [-77] 41 88 70 FF FF FF FF C1 BA 01 BA 33 2E 32 37 5F 32 30 2E 32 FC E2
2 GO [-76] 41 88 71 FF FF FF FF C1 BA 01 BA 33 2E 32 37 5F 32 30 2E 32 FD E5
:
:
53 NG [-74] 41 88 B2 FF FF FF FF C1 BA 01 BA 33 2E 32 36 5F 31 38 21 37 FF 67
:
:
85 GO [-77] 41 88 D5 FF FF FF FF C1 BA 01 BA 33 2E 32 36 5F 31 39 2E 33 FC E6
86 GO [-77] 41 88 D6 FF FF FF FF C1 BA 01 BA 33 2E 32 37 5F 31 39 2E 33 FC D2
Stop
Rcv=86 Go=84 Ng=2
-----

```

図 21：データ受信装置の操作コマンド一覧画面と操作例

6. Mod 値と通信性能の変化

Mod の値と通信性能の関係を調べるために、Mod の値を変えながら FCS チェック Good のパケット数を観測する実験を行った。実験環境を図 22 に示す。シールドテント内の (A) の位置に RF 信号供給装置, (B) の位置にデータ受信装置を設置した。D1 の距離を 1,000 mm に固定して、RF 信号供給装置から 10 dBm の無変調連続波を放出する。表 2 の Mod 値を 9～13 まで変化させながら、ターンテーブルを 0～300 度まで 5 度ステップ毎に回転させて、各ステップ毎にデータ送信装置から 1,000 個のパケットを放出させた。

データ受信装置で受信した FCS チェック Good のパケット数を図 23(a)～(e) に示す。実験の結果、Mod = 11 が最も通信性能が高いということが分かった。

Mod = 11 が最も良い理由の考察：図 24 に示す IEEE802.15.4 のトランシーバ IC である CC2420 受信部の構成で考察する。データシートからミキサ～ADC の間の Intermediate Frequency (IF) の帯域は 2MHz である。

BPF で Δf を除去しますが、 Δf が小さいとこの周波数の成分がノイズとして残るために受信出来なくなることが考えられる。例として図 25 に Backscatter の BPSK 変調を汎用の直交復調器で受信して 9 次のスイッチドキャパシタフィルタを通した時に残留した Δf を示す。IF の帯域が 2MHz であることから、2MHz より Δf が大きいとミキサ～BPF の間の IQ 信号のレベルが下がり受信感度が下がることが考えられる。このことから中間である Mod = 11 が最も良い性能であったと考える。

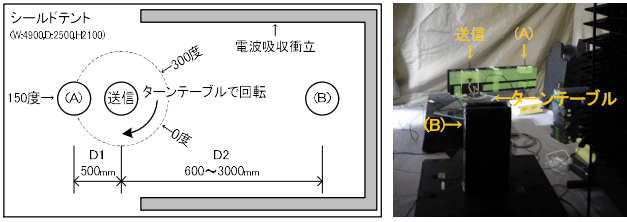


図 22 : シールドテント内の実験環境

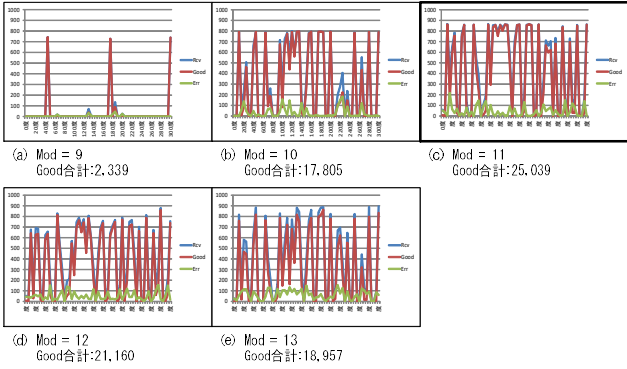


図 23 : Mod 値と受信 Good パケット数

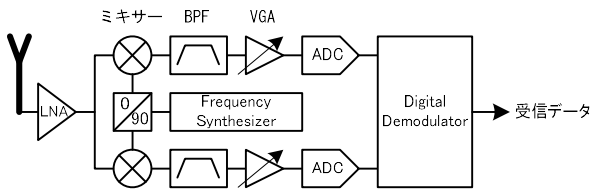


図 24 : CC2420 の受信部分の構成

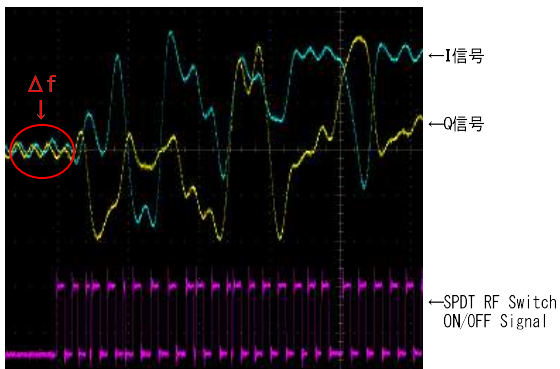


図 25 : IQ 信号と Δf の周波数成分

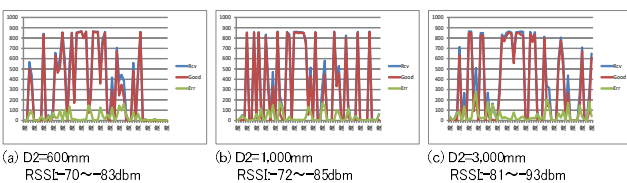


図 26 : 通信距離と受信パケット数

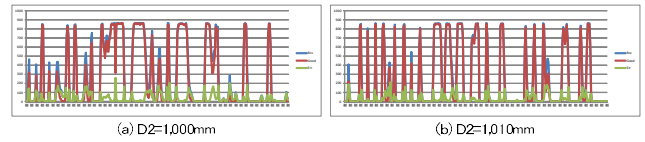


図 27 : ターンテーブルを 1 度ステップで回転させた時の受信パケット数

7. 通信距離の実験(Mod = 11)

実装した Backscatter 装置の通信可能距離を調べるために、図 22 において(A)の位置にデータ受信装置、(B)の位置に RF 信号供給装置を設置して実験を行った。RF 信号供給装置は 10 dBm の無変調連続波を放出する。D2 を 600 mm から 3000 mm まで変化させながら、ターンテーブルを 0~300 度まで 5 度ステップ毎に回転させて各ステップ毎にデータ送信装置から 1,000 個のパケットを送信させた。

データ受信装置で受信した FCS チェック Good のパケット数のグラフを図 26 に示す。図 26 から、保有のシールドテントでの実験可能距離の限界である $D1+D2=3,500$ mm までの通信を確認できた。D2=3000 mm では受信出来たパケットの RSSI が -81~-93dbm であった。RSSI が -81dbm の位置では、この倍の距離まで受信できる可能性がある。

8. 位置による通信特性の変化

6~7 項の実験でターンテーブルの角度が 5 度違うと通信出来なくなる減少が確認できた。6 項と同じ条件で、ターンテーブルの回転を 1 度ステップ、D2 を 1,000 と 1,010mm にして測定を行った。

結果を図 27 に示す。ターンテーブルの角度が 1 度(距離にすると約 9 mm)違う又は、D2 が 10 mm 違うと、受信出来る位置が大幅に変化することが判った。これはフェージングによる影響と思われる。

9. スペクトラムアナライザによる波形の観測

シールドテントの中で、図 28(a)の配置で、RF 信号供給装置から周波数 2442.75 MHz、出力 10 dBm の無変調 CW を発生させた時のスペクトラム波形を図 29 に示す。スペクトラムアナライザの読み値は約 -13.8 dBm であるが、スペクトラムアナライザとアンテナを接続した 10 m の同軸ケーブルのロスが 4 dB あるため実際は約 -9.8 dBm。RF 信号供給装置から約 19.8db 減衰して受信していると考えられる。

同様に図 28(b)の配置でのスペクトラム波形を図 30 に示します。この時、RF 信号供給装置から 27.9db 減衰して受信出来ている。

図 28(c)の配置で、RF 信号供給装置から周波数 2442.75 MHz、出力 10 dBm の無変調 CW を発生させておき、デー

タ送信装置が連続で変調が発生した時のスペクトラム波形を図 31 に示す. 2442.75 MHz を中心に上下 $\Delta f = 2.75$ MHz ずれた位置に変調が発生していることが分かる. 図 31 にスペクトラムアナライザのスペンを 10MHz に拡大した時の波形と, CC2531 から中心周波数 2440MHz の連続変調を発生させ, スペクトラムアナライザと同軸ケーブルで接続したときの波形を示す.

Backscatter で CC2531 と同等の効率の変調が出来た時の図 28(c)の配置でのロスの計算値を表 4 に示す. 表 4 から受信レベルは 10 dBm から 67 dB 減衰した -57 dBm であるが現状の受信レベルは -71 dBm なので 14dB の差がある. これは図 31 に示す様にスペン 100MHz にわたって拡散が発生していることや, 図 32 に示す様に CC2531 では発生しないスパイク状のスペリアスが出ているためと考える.

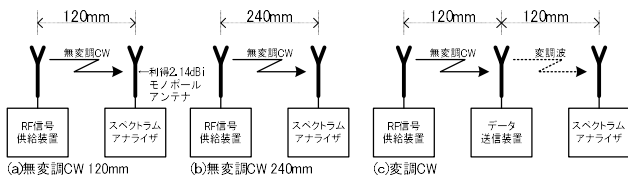


図 28 : 波形の観測時の配置

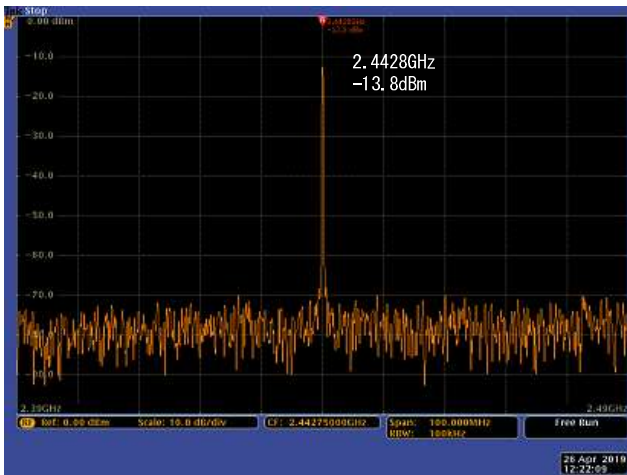


図 29 : (a)無変調 CW 120mm

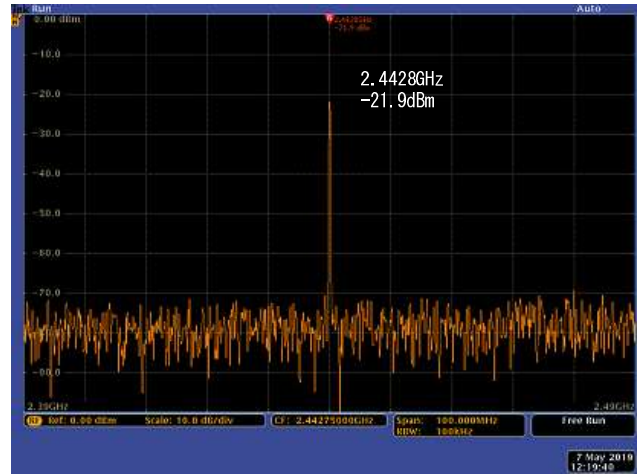


図 30 : (b)無変調 CW 240mm

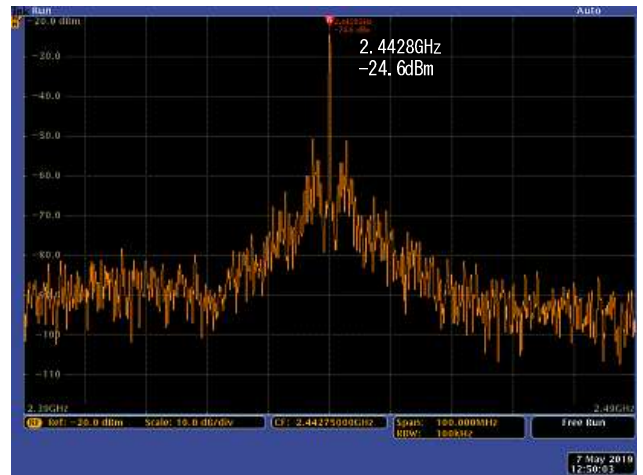


図 31 : データ送信装置から連続変調を発生した時の波形

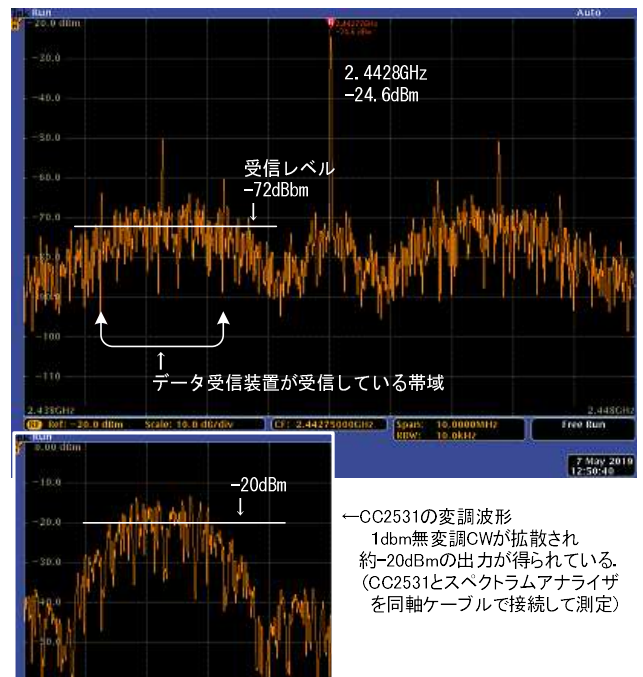


図 32 : 拡散波形の拡大

表 4 : CC2531 と同等の変調効率の Backscatter のロス

No	項目	ロス (dB)
1	RF信号供給装置からデータ送信装置の距離による減衰 (+10dBm - 図29:(-13.8dBm) - ケーブルロス:4db) \approx 20dB	20.0
2	データ送信装置 fRx1とfRx2の両方に変調	3.0
3	変調による拡散 (図32:+1dBm - 図32:(-20dBm)) = 21dBm	21.0
4	データ送信装置からスペクトラムアナライザの距離による減衰 (No1と同じ)	20.0
5	変調されなかった無変調CW (図30:(-21.9dBm) - 図31:(-24.6dBm)) \approx 3.0dB	3.0
	合計	67.0

10. おわりに

本研究で、IEEE802.15.4規格の Backscatter を設計・製作して実験を行った結果、次の二つの課題が明確になった。

(1) 距離3.5m以上通信可能であるがフェージングの影響を受け、1cm位の位置の違いにより受信できなくなることがある。これを回避し通信可能距離範囲であれば何処でも通信可能にする方式が必要である。

(2) 通信可能距離が長い程利用範囲が広がる。電波法に基づく技術基準適合証明の取得で使用可能な2.4GHz帯10dBm以下の電力で3.5mまでの通信可能な距離を確認できているが、変調方式やRF信号供給方式の工夫による距離の延長が必要である。

この二つの課題を解決すべく研究を進める予定である。また、製作した実験装置の、ハードウェア及びソフトウェアに関する情報や電波法に基づく技術基準適合証明の取得方法の公開に向けて、無償のツールでソフトウェア開発が可能なIEEE802.15.4対応チップの採用の検討や回路やソフトウェアの整理を進める。

謝辞

本研究はJSPS科研費19K11923の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Kellogg, B., Talla, V., Gollakota, S., and Smith, J. R. "Passive Wi-Fi: Bringing low power to Wi-Fi transmissions" 13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'16). 2016
- [2] SWRS041c, Texas Instruments, CC2420
2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>
(参照:2019-05-10)
- [3] SWRS086A, Texas Instruments, CC2531F128, CC2531F256
A USB-Enabled System-On-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4 and ZigBee Applications
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2531.pdf>
(参照:2019-05-10)
- [4] IEEE Std 802.15.4™-2003
IEEE Standard for
Information technology Telecommunications and information exchange between systems 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 (LR-WPANs)

- [5] RF SWITCH CG2409X3
<http://www.cel.com/pdf/datasheets/CG2409X3.pdf>
(参照:2019-05-10)