

# USRP2 を用いた OFDM の実装と特性評価

2013SE248 山本憲太郎 2014SC032 木戸隆博 2014SC038 工藤和己

指導教員：奥村康行

## 1 はじめに

近年、利用者からの要求が多様化するにつれて、無線通信技術は日々進化し、新しい無線通信サービスが次々と導入されている。しかし、利用者にとって新しいサービスを利用できる端末を常に用意するのは金銭的な負担を考えると困難であるといえる。また、開発者の視点から見ても新しい機器を開発する場合、材料費よりも労働費の割合が高くなっていることから、人的コストが大きくなっている。以上の理由から、1つの無線機で様々な機能の追加やシステムの変更、そして更新に対応できる無線端末の開発が期待されている [1][2]。

それを実現するための手段として、ソフトウェア無線の概念が挙げられている。そこで、本研究ではソフトウェア無線通信プラットフォームとして USRP と LabVIEW の二つを用いて、OFDM の実装と特性評価をするとともに、USRP2 の通信精度を明らかにする。

## 2 研究対象の技術

本研究で用いる技術について説明する。

### 2.1 ソフトウェア無線 [2][6]

ソフトウェア無線とは、今までハードウェアが担っていた信号処理の大半をソフトウェア上で行う無線通信のことである。この技術によって、無線通信端末上で動作するソフトウェアを変更することにより使用する通信方式や変調方式の変更や利用するシステムの切り替えを可能にする。また、ソフトウェアの変更や更新によって新しい通信規格に対応することができる。その一つとして汎用性の高い USRP というハードウェア、動作制御に LabVIEW というソフトウェアを使用する。

### 2.2 USRP の概要

USRP(Universal Software Radio Peripheral) とは、汎用信号処理ハードウェアである。今回使用する USRP2920(USRP2) もその一つであり、利用可能な周波数は 50MHz ~ 2.2GHz である。PC との接続にはギガビットイーサネットを用いる。USRP2 の構成図を図 1 に示す。図 1 のように USRP2 はマザーボード (Mother board) とドーターボード (Daughter board) から構成されている。USRP2 のマザーボードでは、ドーターボードから入ってきたアナログ信号をデジタル信号に変換し、設定した条件に従って標本化を行う。ドーターボードではアンテナから入ってきた電波によって中間周波数に落としたり、マザーボードから送られてきた信号を中心周波数に上げたり

する。PC では LabVIEW によって作成されたプログラムによって信号の変調や復調の処理を行う。本研究では 2 機の USRP2 を用いて実測を行い、送信機側を USRP2-Tx、受信機側を USRP2-Rx と記述する。

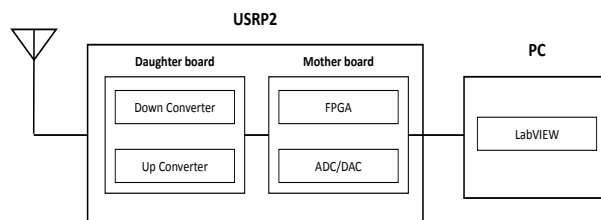


図 1 USRP2 の構成 [2][3]

### 2.3 LabVIEW [2][6]

LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) とは、NATIONAL INSTRUMENTS 社が 1986 年に開発したバーチャル計測用かつグラフィカルなプログラミング言語である。アイコンとワイヤーを用いたブロックダイアグラムという直感的なインターフェースでプログラムを行う。また、LabVIEW で作成したプログラムは VI(Virtual Instrument) と呼ばれ、作成されたプログラムファイルの拡張子は vi である。作成された VI は単独で実行させることも、サブ VI として他の VI 上で動かすことも可能である。LabVIEW は通信をはじめ、電子機器や半導体、自動車などの非常に多岐に渡る分野で、システムの大きさととらわれず、設計からテストまで、あらゆる開発に対応できるシステムを開発、実現するために使用されている。

### 2.4 先行研究との差異

USRP に OFDM を実装する先行研究 [4] では、用いるソフトウェアが GNU Radio であったが、本研究では、LabVIEW を使用する。また、USRP と LabVIEW を用いた先行研究 [2][3] ではチャンネル推定と等化の実装、フレーム検出と周波数オフセット補正の実装などが研究され、それぞれのシステムの測定と特性評価が行われた。フレーム検出と周波数オフセットの実装に関する研究においては、同時に USRP の通信精度に対する評価もなされていた。また、通信方式や変調方式を変更して USRP の精度をさらに研究していく必要があることが課題とされていた。

そこで本研究では新たな通信機能として、LabVIEW を用いた先行研究では用いられなかったマルチキャリア方式である OFDM 変復調を実装、特性の評価を行うと同時に

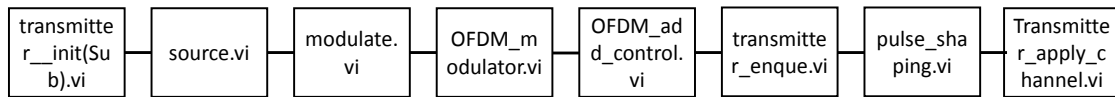


図 2 OFDM\_transmitter.vi のブロック図 [3]

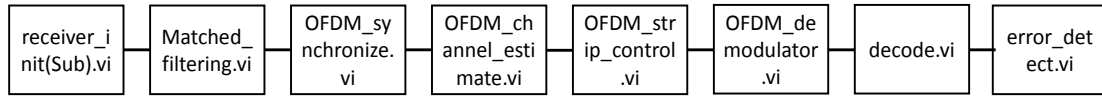


図 3 OFDM\_reciever.vi のブロック図 [3]

OFDM を用いて通信したときの USRP の通信精度の評価を行う。

### 3 実装する通信機能

本研究で用いる技術について以下に述べる。

#### 3.1 OFDM

OFDM とは Orthogonal Frequency Division Multiplexing の略であり、日本語では直交周波数分割多重方式と訳される。また、マルチキャリア伝送方式と呼ばれる通信方式で、複数の搬送波を用いて伝送を行うことで多くのデータを送ることができる。その搬送波は、一般的にはサブキャリアと呼ばれ、それぞれの周波数がシンボルレートと等しい周波数だけ異なっている。そのためサブキャリア同士が周波数軸上で重なり合ってしまうことから干渉してしまうように見えるが、お互いが直交しているため、干渉を与えることなく、きちんと復調することを可能にしている。

OFDM を使用するメリットとして、データの変調器に関しては PSK 方式や QAM 方式など様々な変調方式を導入しやすく、周波数選択性フェージングの影響を軽減することができる。さらに高速フーリエ変換 (FFT) を用いることにより、ローパスフィルタが不要となる。

またデメリットとしては、サブキャリアの直交性を保つ必要があり、雑音状の波形から正確に同期を取る必要があるため送信機・受信機が複雑となることが挙げられる [7]。

#### 3.2 OFDM\_transmitter.vi の実装

まず、送信機能を果たす LabVIEW プログラム (OFDM\_transmitter.vi) のブロック構成を図 2 に示し、左から順に主な機能を説明する。初めに transmitter\_init(Sub).vi で変調機能の初期化を行う。次に source.vi で、0 と 1 のビットデータを生成し、modulate.vi で一次変調を行う。この modulate.vi では主に QAM, PSK 変調を行う。その後、OFDM\_modulator.vi で二次変調つまり、IFFT を行い、次の OFDM\_add\_control.vi では

擬似雑音、すなわちガウス雑音を加える。 transmitter\_enqueue.vi ではメモリに雑音データを書き込む。また pulse\_shaping.vi ではパルス整形を行い、 transmitter\_apply\_channel.vi では遅延プロファイルを適用する [3][6]。

#### 3.3 OFDM\_reciever.vi の実装

次に、受信機能を持つ LabVIEW プログラム (receiver.vi) のブロック構成を図 3 に示し、左から順に主な機能を説明する。はじめに receiver\_init(Sub).vi で変調機能の初期化を行う。次に、Matched\_filtering.vi で整合フィルタ処理を行い、OFDM\_synchronize.vi で位相同期及び、シンボル同期処理をする。また、OFDM\_synchronize.vi のサブ VI に Moose.vi が含まれており、そこで周波数オフセット補正も行っている。そして OFDM\_channel\_estimate.vi では遅延プロファイルの推定を行い、OFDM\_strip\_control.vi で疑似雑音を取除く。OFDM\_demodulator.vi では、FFT を行い、最後に decode.vi で復調する。この decode.vi で主に復調する。error\_detect.vi でシンボル誤り率を計算する [3][6]。

#### 3.4 Moose アルゴリズム [2][6]

周波数オフセット補正には Moose アルゴリズムを用いる。Moose アルゴリズムではトレーニングシンボル間における送信信号の特徴を利用し、送信シンボルと伝送路の周波数応答の情報なしに、オフセット量の推定を行うアルゴリズムである。受信信号回転量は式 (1) の複素数を極座標に変換し、位相を得ることで明らかになる。

$$E = \sum_{l=L}^{N_t-1} y[l + N_t] - y^*[l] / 2\pi T N_t \quad (1)$$

$N_t$  はトレーニング信号のビット数で、 $T$  はシンボルレートである。また  $f_0$  を補正できる範囲には式 (2) のような制限がある。

$$|f_e| = 1/2TN_t \quad (2)$$

## 4 測定条件と実験構成

本研究で行った測定条件, 実験の構成を示す.

### 4.1 シミュレーション

LabVIEW 上で, シミュレーション専用 VI である OFDM\_simulator.vi を用いてシミュレーションを行う. シミュレーションで用いた条件を表 1 に示す.

表 1 測定条件

modulation type	QPSK
packet length[bit]	500
SNR[dB]	0~10
雑音の種類	AWGN
sample rate	10
oversample factor	10
FFT size	64
Length of CP	8
carrier frequency[MHz]	915
frequency offset[ppm]	0~7

### 4.2 実験の構成

実験の構成を図 4 に示す. PC と送信機側の USRP2-Tx との接続には Ethernet ケーブルを用い, USRP2-S の TX 端子と受信機側の USRP2-Rx の RX 端子を同軸ケーブルで接続する. また MIMO ケーブルを用いることで受信機側の USRP2-Rx と PC との接続は不要になる. 実験で用いた条件は基本的にシミュレーションと同じである.

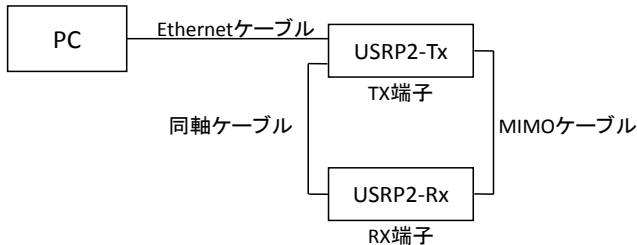


図 4 実験の構成図

## 5 評価

コンスタレーション, BER(Bit Error Rate) グラフから評価を行う.

### 5.1 OFDM の評価

SNR を 0~10dB の範囲で 2dB ずつ変化させシミュレーションと実測を行った. その結果を図 5 に示す. シミュレーション, 実測ともに SNR が 10dB になると BER は限りなく小さくなった. SNR が 0~4dB の範囲では実測結果の BER はシミュレーション結果とほぼ同等の値をとっていたが, SNR が 6dB 以上の値になると実測の方が悪い値

となった. これは USRP2 自身のノイズが影響しているものだと考えられる.

また SNR が 10dB のときのシミュレーションのコンスタレーションを図 6 の (a) に, 実測のコンスタレーションを (b) に示す. シミュレーション結果と実測結果に大きな差はなく, QPSK のコンスタレーションをしっかりと確認することができる.

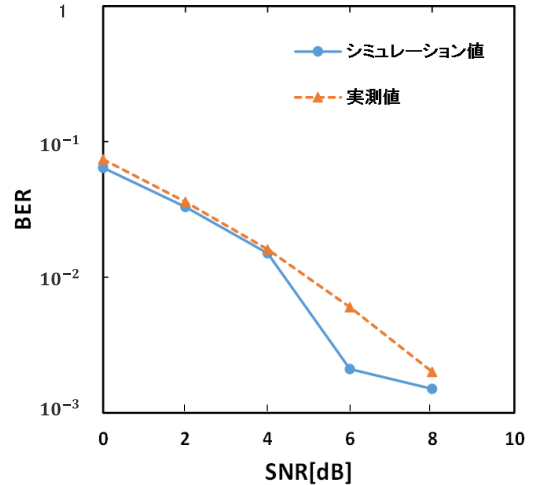
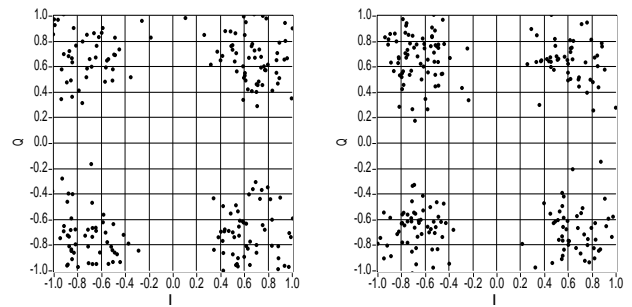


図 5 BER の測定結果



(a) シミュレーション結果 (b) 実測結果

図 6 SNR が 10dB の時のコンスタレーション

### 5.2 周波数オフセット補正の評価

SNR を 0~10dB の間で 2dB ずつ増加させていき, 各 SNR 値の時に周波数オフセットを 0~7ppm の間で 1ppm ずつ変化させ, 補正を行った.

SNR が 0~8dB までの時の BER グラフを図 7 に示す. SNR が 10dB の時は BER は限りなく 0 に近い値となった. また周波数オフセット量が 7ppm 以上になるとコンスタレーションがばらつき, 正常に送受信は行えなかった. 図 7, 周波数オフセット量を増やしても, BER が増加していかないことがわかる. しかし, 周波数オフセット量が 0ppm の時に比べて 2ppm 以上の時の BER は少し悪化してしまっている.

SNR を 10dB とし, 周波数オフセットを 1ppm 加えた時のコンスタレーションを図 8 に, それを補正した時のコ

ンスタレーションを図9に示す。図8ではコンスタレーションが回転してしまっていてQPSKのコンスタレーションは確認できず、BERの値もシミュレーション値では $4.36 \times 10^{-1}$ 、実測では $4.48 \times 10^{-1}$ と共に $10^{-1}$ 以上の値となった。図9においては、図8のようなばらつきはなくQPSKのシンボルを確認することができる。

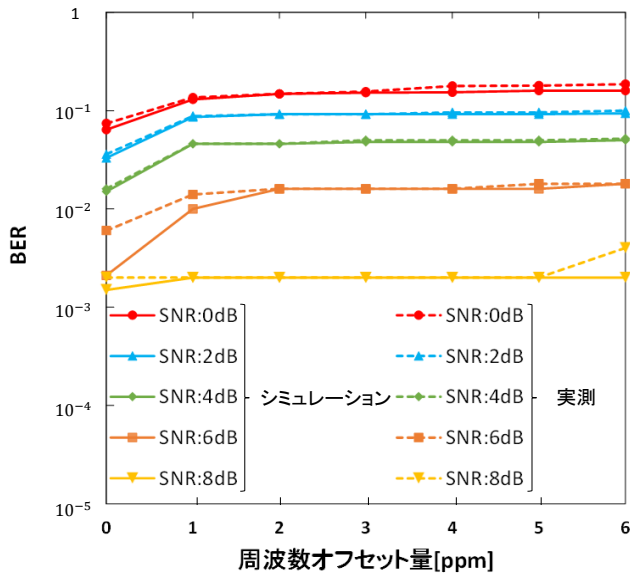
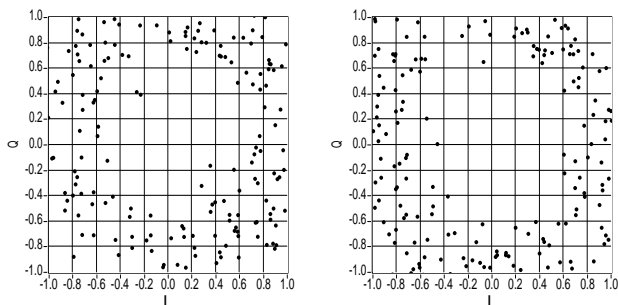
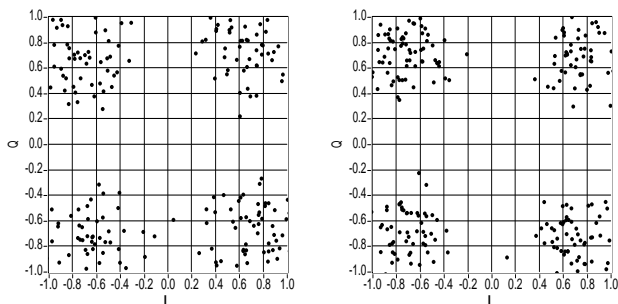


図7 オフセット補正した時のBER



(a) シミュレーション結果 (b) 実測結果

図8 オフセット補正なしの時のコンスタレーション



(a) シミュレーション結果 (b) 実測結果

図9 オフセット補正ありの時のコンスタレーション

## 6 おわりに

本研究では、ソフトウェアにLabVIEW、ハードウェアにUSR2P2を用いて、OFDMの実装、周波数オフセットを意図的に加え、後にMooseアルゴリズムを用いたVIであるMoose.viにより周波数オフセット補正を行った。

OFDMの実装ではSNRの値が10dB以上ではBERが限りなく0に近い値となり、SNRの値が6~8dBの範囲ではシミュレーション結果に比べて実測結果の方が通信精度が劣ってしまっていた。SNRの値が4dB以下だとシミュレーションとほぼ同等のBERであった。周波数オフセット補正ではSNRに関係なくオフセット量が7ppmを越えると通信が行えなかった。またシミュレーション結果と実測結果ではBERグラフ、コンスタレーション共に大きな差は見られなかった。これらのことからUSR2P2はノイズに対する強度に関してはシミュレーションに若干劣るがオフセットに対する強度においてはシミュレーションとほぼ同等の通信精度を保つことが可能であるとわかった。これは雑音に強い同軸ケーブルを用いて送受信を行った影響があると考えられる。

今後は周波数オフセット量を7ppm以上にしても補正が可能なプログラムをつくること、また、本研究や先行研究でなされなかったその他の通信方式、変調方式を用いて、USR2P2の通信精度を研究していく必要があると考える。

## 参考文献

- [1] 藤井義巳, “ソフトウェア無線 (SDR) 技術の最新動向と将来展望,” ITU ジャーナル, vol.47, no.11, pp.17-21, November 2017.
- [2] 名古屋己, 尾高公輔, “USR2P2を用いたフレーム検出と周波数オフセット補正の実装と評価,” 南山大学情報理工学部システム創成工学科 2016 年度卒業論文, January 2017.
- [3] 藤田光紀, 河村裕介, “USR2P2を用いたチャネル推定と等化に関する研究,” 南山大学情報理工学部システム創成工学科 2015 年度卒業論文, January 2016.
- [4] 中尾諭史, 梅原大祐, 村田英一, 田野哲, “USR2P2を用いた 5GHz 帯 OFDM パケット伝送特性,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.114, no.462, February 2015.
- [5] 中尾諭史, 梅原大祐, 若杉耕一郎, “OFDMにおける送信・受信 IQ インバランスの影響評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.114, no.119, June 2014.
- [6] Robert W.Heath Jr., Digital Wireless Communication, Student Lab Manual, pp.1-114, NATIONAL TECHNOLOGY&SCIENCE, 2012.
- [7] 神谷幸宏, “MATLAB によるデジタル無線通信技術,” コロナ社, 東京, 2008.