

# USRP2 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

2013SE137 名古屋 己 2013SE149 尾高公輔

指導教員：藤井勝之

## 1 はじめに

現在、無線通信業界において、その技術は日々新しく生み出されており、それに伴って新しい無線通信システムが次々と導入されている。しかし、ユーザにとって新しいシステムを利用できる端末を随時用意するのは困難であり、また経済的負担にもなると考えられる。一方、開発者の視点から見ても新規装置を開発する場合のコストは材料費よりも人件費の割合が高くなっていることから、開発には人的負担が大きい。このような理由から、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 [1]。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、ある通信方式の実装と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

ソフトウェア無線とは、従来の無線通信端末においてハードウェアで行われていた信号処理のほとんどをソフトウェア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えることで使用する変復調方式の方式や利用するサービスを切り替えたり、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 [1][4][7]。

### 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) の利用可能な周波数は 50MHz~2.2GHz であり、PC との接続に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準化を行う。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

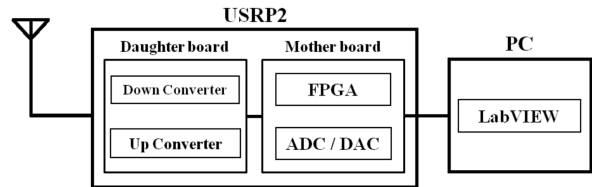


図 1 USRP2 の構成

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 [2]。本研究では 2 台の USRP2 を用いて実測を行い、送信機側を USRP2-S、受信機側を USRP2-R と記述する。

### 2.3 LabVIEW

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算用プログラミング言語である。通信をはじめ、電子機器や半導体、自動車などの非常に多種多様な分野で設計からテストまで、また小規模システムから大規模システムまで、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。また LabVIEW で作成したプログラムは VI(Virtual Instrument) と呼ばれ、このファイルの拡張子は vi である [2][7]。

### 2.4 先行研究との差異

USRP と LabVIEW を用いた先行研究では FM ラジオの受信や sin 波の送信、QAM 変復調とシンボル同期の実装、USRP を用いたチャンネル推定と等化の実装などが行われており、それぞれのシステムの測定と評価を行った [2]。

本研究では新たな通信機能として、フレーム検出と周波数オフセット補正を実装する。

## 3 実装する通信機能

USRP2 に実装する通信機能を本章で説明する。

### 3.1 フレーム検出の実装

フレームとは通信工学で使われるデータの集まりである。OSI 参照モデルでのデータリンク層でのデータの単位がフレームとなる [7]。このフレームを正しく検出して正しいデータを取り出すことがフレーム検出の目的である。

### 3.2 トレーニング信号

フレーム検出にはバイナリの符号列である Barker 符号を用いる。この符号は  $k=0$  のとき、つまり遅延が 0 のと

きの相関が最大になり、 $k \neq 0$  のときは  $\pm 1$  以下になる性質を持っている。このような性質を持っている符号の1つが Barker 符号と呼ばれ、長さ 13 までの Barker 符号が知られている。知られている Barker 符号を表 1 に示す。+ と - のバランスから 11bit の符号長の Barker 符号が拡散符号として用いられる [3]。

この Barker 符号を 4 回連続で出力し残りをデータとする信号を、トレーニング信号と呼ぶことにする。トレーニング信号のイメージ図を図 2 に示す。

表 1 Barker 符号

符号長	Barker 符号
2	$[-+], [--]$
3	$[- - +]$
4	$[- + - -], [- + + +]$
5	$[- - - + -]$
7	$[- - - + + - +]$
11	$[- - - + + + - + + - +]$
13	$[- - - - - + + - - + - + -]$

Barker符号	Barker符号	Barker符号	Barker符号	送信データ

図 2 トレーニング信号のイメージ図

遅延によるフレームのずれであるフレームオフセット量  $d$  は、式 (1) が最大になる  $d$  を推定することにより明らかになる。これは Barker 符号の相関特性を利用してフレームを検出し、フレームオフセット量を推定している。

$$R[n] \approx |h|^2 \left| \sum_{k=0}^{N_t-1} t^*[k]s[n-d] \right|^2 \quad (1)$$

ここで  $h$  は伝達関数、 $N_t$  はトレーニング信号の長さ、 $t[n]$  はトレーニング信号、 $s[n]$  は受信信号である。

### 3.3 周波数オフセット補正の実装

無線通信では各無線機器に発振器が内蔵されているが、個々で生成される周波数にわずかな誤差がある。また移動体との通信ではドップラシフトと呼ばれる受信機側と送信機側で周波数に差異ができることがある。これらの受信機側と送信機側で搬送波周波数のずれが出来ることを周波数オフセットと呼ぶ。送信機側の搬送波周波数を  $f_c$ 、受信機側の搬送波周波数を  $f'_c$  とすると  $f_o = f_c - f'_c$  が周波数オフセットとなる。 $f_o$  が存在すると、受信したシンボルが  $\exp(j2\pi f_o t)$  だけ回転してしまいシンボルエラーが起りやすくなる。そこで正確な復調を行えるよう、 $f_o$  を補正をする必要がある。

### 3.4 周波数オフセット補正に用いるアルゴリズム [7]

$f_o$  の補正には 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区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、 $f_o$  の推定を行うアルゴリズムである。式 (2) の複素数から極座標に変換し位相を得ることで、 $f_o$  による受信信号の回転量が明らかになる。また Moose アルゴリズムでは線形最小二乗法を用いており、雑音のある伝送路では推定量にばらつきがでる。

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

$T$  はシンボルレートである。 $f_o$  を補正できる範囲には制限があり、

$$|f_e| \leq \frac{1}{2TN_t} \quad (3)$$

のように与えられている。

## 4 測定条件と実験構成

この研究ではフレーム検出と  $f_o$  を推定し補正を行う。フレーム検出はプログラムの構造上、シミュレーションだけの評価になる。

### 4.1 シミュレーション

シミュレーション専用 VI である 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 2 に示す。

表 2 シミュレーションの測定条件

software	LabVIEW
変調方式	QPSK
送信ビット数	500
試行回数 [回]	$10^4$
Barker 符号長 [bit]	11
sample rate [MHz]	10
oversample factor	10
雑音の種類	AWGN
noise power [dBm]	0 ~ -30
シンボルレート [symbol/second]	1.0M
carrier frequency [MHz]	915

### 4.2 実験の構成

実験の構成を図 3 に示す。PC と送信機側の USRP2-S 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-R 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-R 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。

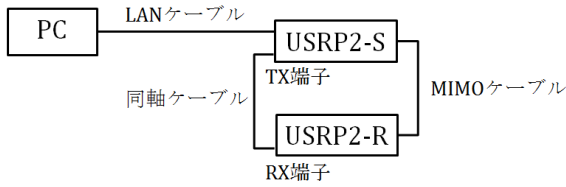


図3 実験の構成

## 5 評価方法と評価

### 5.1 フレーム検出の評価

フレーム検出の評価では、まず無線通信で起こりうる遅延を送信側に意図的に与える。そして送信側と受信側のプログラムを同時に動かし、算出された遅延の量から評価をする。実測では送信側と受信側のVIを同時に実行することが出来ないでシミュレーションのみで評価した。

noise power を  $0 \sim -30$  dB の間で変化させ、遅延を  $0.1 \sim 0.0001$  秒の間で変化させて推定された遅延を計測した。計測結果は、与えた遅延と推定された遅延が一致し、正確に推定されていた。

### 5.2 BER と $f_o$ 推定誤差の評価方法

$f_o$  が  $0$  Hz,  $5$  kHz,  $10$  kHz,  $11$  kHz における BER をシミュレーションと USRP2 で測定し、グラフ化した。また、意図的に加えた  $f_o$  と推定された  $f_o$  の差を  $f_o$  推定誤差とし、式のように定義する。縦軸を  $f_o$  推定誤差 [Hz]、横軸を noise power [dBm] としグラフを作成し、Moose アルゴリズムの周波数オフセット推定の精度を評価する。

$$f_o \text{推定誤差} = \frac{\sum | \text{意図的に与えた } f_o - \text{推定された } f_o |}{\text{試行回数}} [\text{Hz}] \quad (4)$$

#### 5.2.1 BER による評価

与えた  $f_o$  が  $0 \sim 11$  kHz における BER 曲線を図 4(a)～(d) に示す。

図 4(a) の  $f_o$  が  $0$  Hz のときのシミュレーションと実測と共に noise power が  $-20$  dBm より小さくなると BER が  $0$  になったが、noise power が  $-20$  dBm のとき実測のほうが BER が小さかった。また図 4(b) でも  $f_o$  が  $0$  Hz のときと同じように noise power が  $-20$  dBm より小さくなると BER が  $0$  になった。図の中に納まっていないが、noise power が  $-20$  dBm における実測の BER は  $4.56 \times 10^{-6}$  となり、シミュレーションでは  $4.65 \times 10^{-4}$  が下限となった。

図 4(c) より  $f_o$  の補正範囲の限界である  $10$  kHz になると、実測とシミュレーションで BER が収束しなくなった。また図 4(d) でも BER が収束しないことが明らかになった。

また図 4(a)～(d) では全体的に、実測のほうがシミュレーションより良い BER となった。

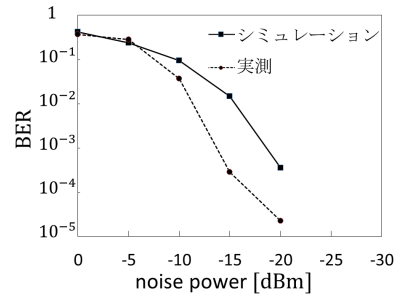


図4 (a)  $f_o$  が  $0$  Hz における BER 曲線

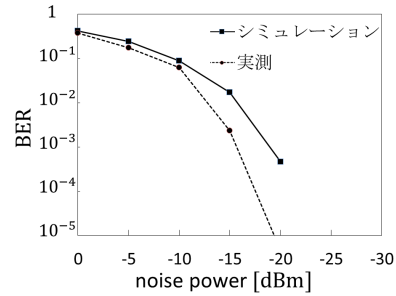


図4 (b)  $f_o$  が  $5$  kHz における BER 曲線

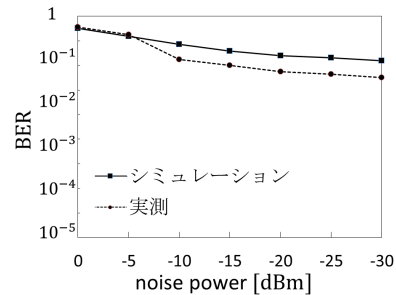


図4 (c)  $f_o$  が  $10$  kHz における BER 曲線

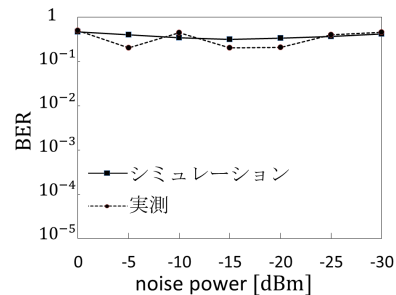


図4 (d)  $f_o$  が  $11$  kHz における BER 曲線

#### 5.2.2 $f_o$ 推定誤差による評価

与えた  $f_o$  が  $0 \sim 11$  kHz における  $f_o$  推定誤差を図 5(a)～(d) に示す。

$f_o$  を推定する Moose アルゴリズムでは線形最小二乗法を用いているため、推定される  $f_o$  にばらつきが見られた。しかし  $f_o$  推定誤差は noise power が小さくなるにつれ、ばらつきが小さくなり図 5 のように誤差が小さくなった。図 5(a) と図 5(b) では実測のほうが  $f_o$  推定誤差が小さかつ

た。ただ noise power が $-20\text{dBm}$ を下回るとシミュレーションと実測の  $f_o$  推定誤差が近い値になった。USRP2 自身が発する noise や同軸ケーブルを用いることによる noise によりシミュレーションより実測が悪い値になると予想したが、予想と反する結果となった。図 5(c) のシミュレーションでは  $f_o$  推定誤差が  $156.9\text{Hz}$  が下限となり  $f_o$  が残留している。これは図 5(d) のシミュレーションと実測でも同じことが言え、図 4(d) の BER が収束しない原因となっていると考えられる。

$f_o$  推定誤差の総合評価として noise power が $-15\text{dBm}$ を下回れば  $f_o$  推定誤差が安定するようになり、Moose アルゴリズムは雑音に弱いことが明らかになった。 $f_o$  が  $10\text{kHz}$  以上になると推定し切れなかった  $f_o$  が残留するようになり、BER が悪化したことから一定範囲内の  $f_o$  しか補正できないことがシミュレーションと実測から分かった。またシミュレーションと実測の比較から USRP2 は雑音に強く、高い通信精度があることが今回の測定から明らかになった。

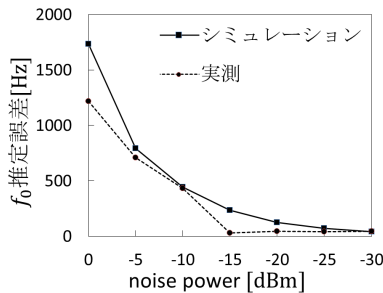


図 5 (a)  $f_o$  が  $0\text{Hz}$  における  $f_o$  推定誤差

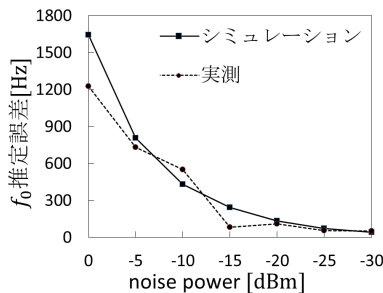


図 5 (b)  $f_o$  が  $5\text{kHz}$  における  $f_o$  推定誤差

## 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 USRP2 を用いたソフトウェア無線を行い、USRP の通信精度を明らかにした。Barker 符号を用いたトレーニング信号で、フレーム検出と Moose アルゴリズムで搬送波周波数オフセット補正を行った。 $f_o$  推定誤差の評価では実測のほうがシミュレーションより良い結果となり、USRP2 の通信精度が良いことが明らかになった。

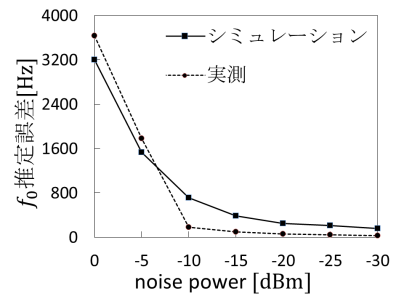


図 5 (c)  $f_o$  が  $10\text{kHz}$  における  $f_o$  推定誤差

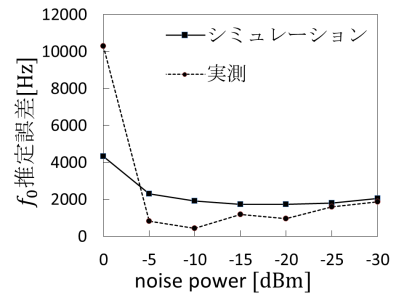


図 5 (d)  $f_o$  が  $11\text{kHz}$  における  $f_o$  推定誤差

今後はその他の通信方式や変調方式を用いて、USRP2 の精度をさらに研究していく必要があると考える。

## 参考文献

- [1] 鈴木康夫, 荒木純道, “ソフトウェア無線機とその国内における開発の現状,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J84-B, no.7, pp.1120-1131, July 2001.
- [2] 藤田光紀, 河村裕介, “USRP 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.
- [3] 藤田昇, “無線 LAN で使われる変復調方式,” 無線 LAN の仕組みとシステム構築法, pp.44-53, (社)CQ 出版株式会社, 東京, April 2013.
- [4] 猿渡俊介, 菅沼久浩, “GNU Radio に関する調査,” 東京大学先端科学技術研究センター森川研究室, 技術報告書, no2011001, pp.1-7, June 2011.
- [5] 堀部智史, 石橋功至, 和田忠浩, 椋下介士, “GNU Radio/USRP2 を用いたネットワーク誤り訂正符号の実装に関する一検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2011-71, pp.209-214, June 2011.
- [6] 谷口功, “図解入門よくわかる最新通信の基本と仕組み [第 2 版],” 株式会社秀和システム, 東京, April 2007.
- [7] Robert W.Heath Jr. , “Digital Wireless Communication, Student Lab Manual,” pp.1-98, NATIONAL TECHNOLOGY&SCIENCE, 2012.
- [8] 瀬川弘司, “基礎から身につくネットワーク技術シリーズ 3 IEEE802.11 無線 LAN,” 日系 BP 社, 東京, 2004.