

USRP2への物理層通信機能の実装に関する研究

2006MI072 木村一也 2009SE045 早井智穂 2009SE104 加藤万貴

指導教員：奥村康行

1 はじめに

近年、無線通信においてその普及とともにユーザからの要求が多様化し、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、ユーザにとって全ての無線通信システムを利用できる端末を用意するのは困難である。また、新しい機能や使用可能な無線通信システムが増えるたびに新規の無線機を交換または増設する必要があることも大きな負担になりかねない。一方、開発者の観点で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一つの無線機で様々な機能追加やシステム変更に対応できる無線端末の開発が期待されている。それを実現する為の手段として、ソフトウェア無線の概念が提唱されている [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 USRP2 と LabVIEW を用いて様々な通信方式の実装方法を研究するとともに、それぞれの通信方式の伝送特性について明らかにする。具体的には、3 節で USRP2 と LabVIEW の動作確認を行い、4 節と 5 節で USRP2 の測定器としての利用可能性を検証する。また、6 節で USRP2 の通信実験装置としての利用可能性を検証する。

2 研究対象の技術

本研究で用いる技術について以下に述べる。

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切り替えるだけで使用する変復調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 [1][2]。

2.2 USRP の概要

USRP とは Universal Software Radio Peripheral の略称であり、汎用信号処理ハードウェアである。USRP2 は、USRP1 より性能が高く、PC との接続にはギガビットイーサネットを用いる。また、USRP2 の利用可能周波数は 50M

～2.2GHz である。USRP2 の構成図を図 1 に示す。図 1 のように、USRP2 は Mother board と Daughter board から構成されている。USRP2 の Mother board では、Daughter board 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。Daughter board では、アンテナから入ってきた電波を Down Converter によって中間周波数に落とし、Mother board から送られてきた信号を Up Converter によって中心周波数にあげたりする。PC では、ソフトウェアによって変調や復調の処理を行う [3][4]。また、ソフトウェア無線機には他にも PXI プラットフォームなどがあるが、本研究では比較的安価な USRP2 を用いる [5]。

2.3 LabVIEW

LabVIEW とは Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench の略称であり、NATIONAL INSTRUMENTS 社が 1986 年に開発したバーチャル計測用プログラミング言語である。また、LabVIEW で作成したプログラムは VI (Virtual Instrument) と呼ばれ、作成したプログラムファイルの拡張子は vi である [5][6]。また、他にもソフトウェアとして GNU Radio [3] などがあるが本研究では視覚的な操作が可能な LabVIEW を用いる。

3 FM ラジオの実装と評価

USRP2 に LabVIEW の Find FM Signals.vi と呼ばれるプログラム [5] を用いて FM ラジオ電波の受信機を実装し、FM ラジオ電波を受信した。また、受信アンテナとしてディスコーンアンテナ [7] を作製し、作製したアンテナの反射係数の測定結果から FM ラジオ電波の受信に使用できると確認できた。このアンテナを用いて中心周波数 80MHz で FM ラジオ電波を受信した結果、4 つの FM ラジオ局の電波を受信することができ、帯域幅は 200kHz であることがわかった。

4 スペクトラムアナライザの実装と評価

2 機の USRP2 に LabVIEW の Wideband Spectrum (Averaged).vi と呼ばれるプログラム [5] を用いてスペクトラムアナライザの機能を実装し、専用の測定器 (スペクトラムアナライザ) と比較することで、USRP2 の測定精度を明らかにした。その結果、USRP2 の受信信号の中心周波数はシグナルジェネレータの送信信号の中心周波数と一致するが、USRP2 の受信信号電力はシグナルジェネレータの送信信号電力と異なり、USRP2 の受信信号電力の表示は正しくないと確認できた。

5 sin 波の送信機および受信機の実装と評価

USRP2 に sin 波を送信する送信機の機能と sin 波を受信する受信機の機能を実装し、USRP2 と PC を用いて送受信を行う。この実験では受信用の USRP2 に実装され

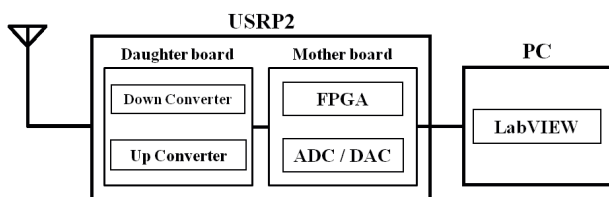


図 1 USRP2 の構成

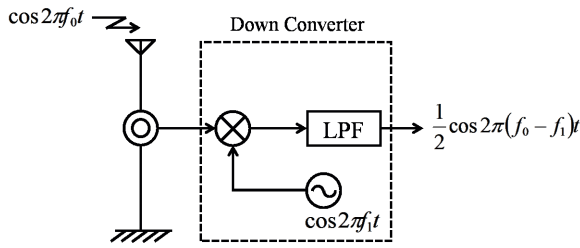


図 2 Down Converter の構成

た Down Converter を用いて送受信間の周波数偏差を測定する．この原理と sin 波の送受信プログラム [8]，接続構成，測定結果を以下に述べる．

5.1 Down Converter の構成

USR2 内のドータボードに実装されている Down Converter の構成を図 2 に示す．このとき，送信機側の Carrier frequency を f_0 ，受信機の Carrier frequency を f_1 とする．図 2 の乗算の部分を書式で表すと (1) 式ようになる．

$$\begin{aligned} & \cos 2\pi f_0 t \times \cos 2\pi f_1 t \\ &= \frac{1}{2} [\cos 2\pi (f_0 + f_1) t + \cos 2\pi (f_0 - f_1) t] \quad (1) \end{aligned}$$

(1) 式の第 1 項は高周波なので LPF (Low-Pass-Filter) によって除去される．よって，Down Converter の出力は， $\frac{1}{2} \cos 2\pi (f_0 - f_1) t$ となる．これより，USR2 の出力信号の周波数は $|f_0 - f_1|$ となる．

5.2 sin 波を送信するプログラム

sin 波を送信するプログラムのブロック構成を図 3 に示す．このプログラムは，niUSRP Open Tx Session.vi でセッションが開始され，niUSRP Configure Signal.vi でパラメータを設定する．次に，niUSRP Write Tx Data (poly).vi で停止ボタンが押されるまで信号生成を繰り返し，停止ボタンが押されると niUSRP Close Session.vi でセッションが終了する．このプログラムを用いて USRP2 で sin 波を送信した結果，受信側（オシロスコープ）で sin 波を受信していることが確認できた．

5.3 sin 波を受信するプログラム

sin 波を受信するプログラムのブロック構成を図 4 に示す．このプログラムは，niUSRP Open Rx Session.vi で

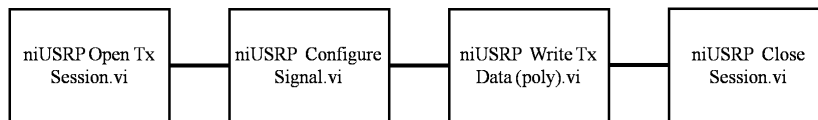


図 3 sin 波を送信する機能のブロック図

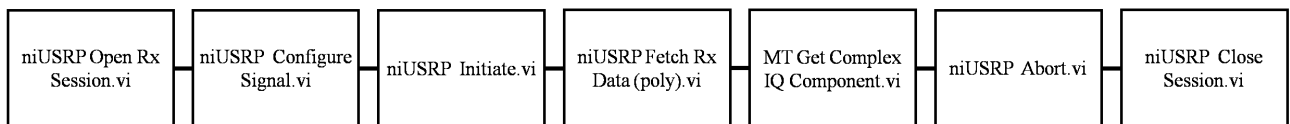


図 4 sin 波を受信する機能のブロック図

セッションが開始され，niUSRP Configure Signal.vi でパラメータを設定し，次の niUSRP Initiate.vi でプログラムを実行する．次に，niUSRP Fetch Rx Data (poly).vi でデータを取得し，MT Get Complex IQ Component.vi でデータから同相成分および直交成分を取り出し，グラフに表示を行う．niUSRP Fetch Rx Data (poly).vi と MT Get Complex IQ Component.vi は，停止ボタンが押されるまで繰り返される．最後に，niUSRP Close session.vi でセッションが終了する．

5.4 実験の接続構成

USR2 と PC の接続図を図 5 に示す．また USRP2 の設定条件を表 1 に示す．ただし，送受信には USRP2-2 のみを使用するものとする．



図 5 sin 波送受信の実験構成

表 1 送受信のパラメータ

Carrier frequency [MHz]	600,700,800
IQ rate [ksamples/sec]	800
Waveform size	1×10^4

5.5 測定結果

5.1 節より，USR2 の出力信号の周波数は $|f_0 - f_1|$ となるため， f_0 を f_1 より 1~5kHz ずらして送信した．その結果の同相成分を図 6 に示す．図 6 より， $|f_0 - f_1|$ と USRP2 の出力信号の周波数はほぼ一致していることがわかった．直交成分も同様の結果が得られた．また， f_0 と f_1 を同じ設定にして送受信を行った場合，受信側ではなめらかな sin 波をみる事ができなかった．これは， $|f_0 - f_1|$ がゼロに近くなるため，USR2 の出力が小さくなったことが原因だと考えられる．

6 変復調機能の実装と評価

5 章では sin 波の送受信を行ったが，ここでは USRP2 に BPSK 変調と BPSK 変調の機能を実装し，USR2 と

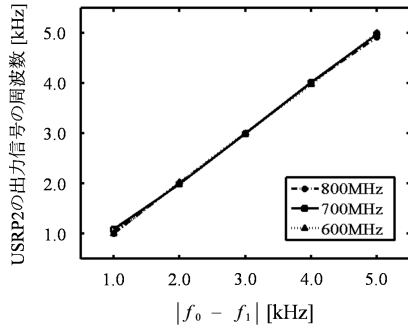


図 6 $|f_0 - f_1|$ と USRP2 の出力信号周波数の関係

PC を用いて送受信を行う．実際に測定を行う場合は，top_tx.vi と top_rx.vi を動かす．6.1 節では，top_tx.vi のサブ VI である transmitter.vi について述べ，6.2 節では，top_rx.vi のサブ VI である receiver.vi について述べる．次に，シミュレーションや測定方法，測定結果についてのべる [8][9]．

6.1 transmitter.vi

BPSK 変調と QPSK 変調の機能を実装するためのプログラム (transmitter.vi) のブロック構成を図 7 に示す．このプログラムは，初めに TX_init.vi で初期化を行う．次に source.vi で信号を生成し，modulation.vi で BPSK 変調および QPSK 変調を行う．次の add_control.vi では位相同期や遅延プロファイルの推定に用いる擬似雑音系列を追加し，TX_enqueue.vi ではメモリにデータを書き込む．また pulse_shaping.vi ではパルス整形を行い，TX_apply_channel.vi では遅延プロファイルを適用する．今回 transmitter.vi の source.vi と modulation.vi は自作のサブ VI であるが，そのほかのサブ VI は既存のものを用いている．

6.2 receiver.vi

BPSK 復調と QPSK 復調の機能を実装するためのプログラム (receiver.vi) のブロック構成を図 8 に示す．このプログラムは，初めに receiver_init.vi で初期化を行う．次に，matched_filtering.vi で整合フィルタ処理を行い，synchronize.vi で位相同期をする．そして channel_estimate.vi では遅延プロファイルの推定を行い，strip_control.vi で擬

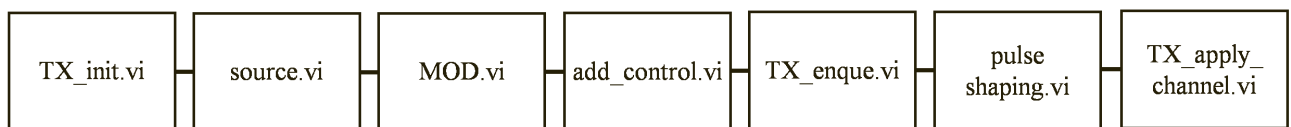


図 7 transmitter.vi のブロック図

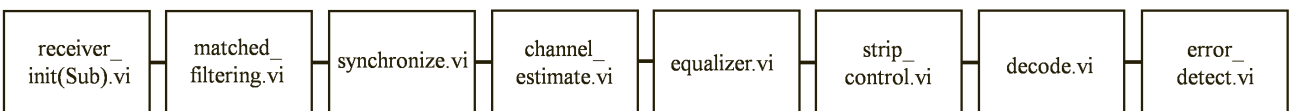


図 8 receiver.vi のブロック図

似雑音系列を取り除き，equalizer.vi で等化を行う．最後に decode.vi で復調し，error_detect.vi でビット誤り率を計算する．今回 receiver.vi の decode.vi と error_detect.vi は自作のサブ VI であるが，そのほかのサブ VI は既存のものを用いている．

6.3 シミュレーション

simulator.vi を用いてシミュレーションを行う．この時，USR2 は使用しない．シミュレーション条件は表 2 に示す．

表 2 シミュレーション条件

ソフトウェア	LabVIEW
データビット変調方式	BPSK, QPSK
データビット数	1×10^6
Carrier frequency [MHz]	915
伝送路への雑音	AWGN
pulse shaping filter	Root Raised cosine (full cosine)

6.4 実験の接続構成

USR2 と PC の接続図を図 9 に示す．また，USR2 の設定条件はシミュレーションの場合と同じとする．

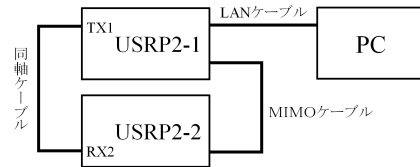


図 9 変復調機能の実験構成

6.5 測定結果

実際に BER の測定を行った結果，図 10，図 11 のようになった．図 10，図 11 より，測定値はシミュレーション値とはほぼ一致しているが，理論値とは 10^{-3} の場合 BPSK 変調では約 1.1dB，QPSK 変調では約 1.3dB 劣化した．この原因は，理論値で以下の 3 点が考慮されていないためだと考えられる．まず 1 つ目は transmitter.vi のサブ

VIである pulse_shaping.vi でパルス整形を行うが、符号間干渉が残ってしまうことである。2つ目は receiver.vi のサブVIである synchronize.vi で位相同期を行うが誤差が出てしまうということである。3つ目は receiver.vi のサブVIである equalizer.vi で等化を行うがパルスの歪みが残ってしまうことである。このことより、理論値と測定値に誤差が出てしまったのだと考えられる。また、 E_b/N_0 が 10dB の時のコンスタレーションを図 12、図 13 に示す。図 12、図 13 より、シミュレーションと実際に測定した時のコンスタレーションはほぼ一致している。

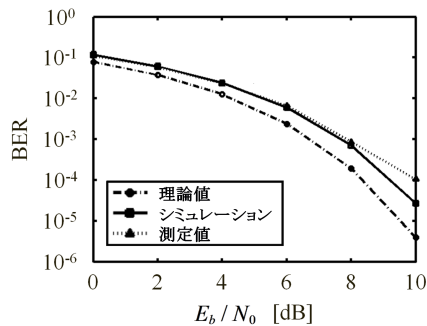


図 10 BER 特性 (BPSK 変調)

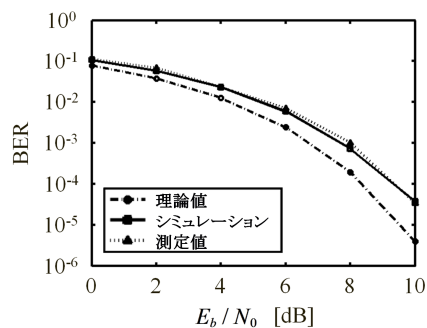


図 11 BER 特性 (QPSK 変調)

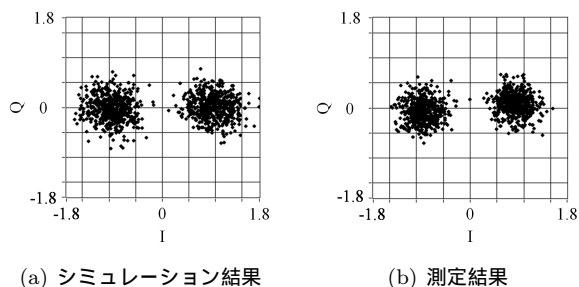


図 12 コンスタレーション (BPSK 変調)

7 おわりに

本研究では、LabVIEW を用いて複数の機能を一つの無線機 (USRP2) に実装し、測定を行った。スペクトラムアナライザの実装では USRP2 で得られた結果を専用の測定器で測定した結果と比較することで、USRP2 の測

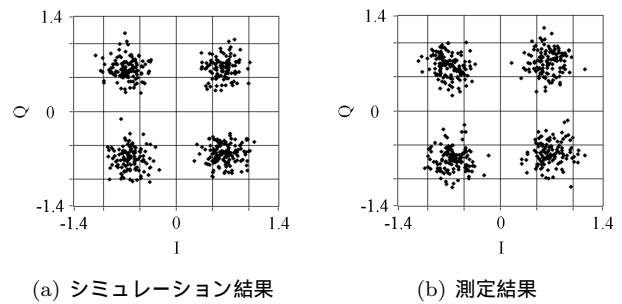


図 13 コンスタレーション (QPSK 変調)

定器としての測定精度を明らかにした。また、FM ラジオの実装では FM ラジオ電波を受信することができ、FM ラジオ電波の帯域幅が約 200kHz であることが確認できた。そして、sin 波の送受信では $|f_0 - f_1|$ と LPF 出力信号の周波数が一致することが確認できた。最後に変復調機能の実装では、BPSK 変復調と QPSK 変復調という 2 つの変復調機能を USRP2 に実装し送受信を行い、BPSK 変調と QPSK 変調の BER 特性を測定することができた。

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,” 信学論 B, vol J84-B, No.7, pp.1120-1131, July 2001.
- [2] 河野隆二, 春山真一郎, “ソフトウェア無線の現状と将来,” 信学論 B, vol J84-B, No.7, pp.1112-1119, July 2001.
- [3] 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, 技術研究報告書, No.2011001, pp.1-7, June 2011, http://www.mlab.t.u-tokyo.ac.jp/attachment/file/212/tech_saru_v07.pdf (accessed Jan.2013).
- [4] 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,” 信学技報, RCS2011-71, pp.209-214, June 2011.
- [5] National Instruments, <http://japan.ni.com/> (accessed Jan.2013).
- [6] 堀 恵太郎, 図解 LabVIEW 実習, 森北出版株式会社, 東京, 2009.
- [7] Constantine A. Balanis, Antenna Theory, Wiley-Interscience, 2005.
- [8] Robert W. Heath Jr., Digital Wireless Communication, Student Lab Manual, pp.1-34, NATIONAL TECHNOLOGY&SCIENCE PRESS, 2012.
- [9] 神谷幸宏, MATLAB によるデジタル無線通信技術, コロナ社, pp.39-45, 東京, 2008.