

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月23日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00985

研究課題名(和文) ソフトウェア無線環境を用いた基礎的概念の理解に重点をおいた教育実践の推進

研究課題名(英文) Promotion of education to improve understanding of the basic concepts of radio signal processing using software-defined radio

研究代表者

山田 洋士 (YAMADA, Yoji)

石川工業高等専門学校・電子情報工学科・教授

研究者番号：10230492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ソフトウェア無線装置(PC-SDR)を活用して927MHz帯で無線伝送路特性の実測を行い、その結果の検証を実施した。PC-SDR固有の処理遅延の変動を克服する対策を実施することで、振幅誤差1[dB]の測定精度が得られることを明らかにした。この精度は、無線伝送路特性の評価を行う上では十分ではあるが、測定の安定性については課題が残った。高性能なPC-SDRを大学における教育研究に導入するモデルケースとして東北大学電気通信研究所の専任教員にご助言を仰ぎ、PC-SDRに初めて触れる学生を対象として導入講習会を実施した。その結果、PC-SDRを教育・研究へ利用するための障壁を取り除くことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

対象としたソフトウェア無線装置(PC-SDR)は、 Ettus Research社のUSRP N200やUSRP X300である。また、ソフトウェア環境としては、GNU RadioおよびLabVIEWを使用した。海外の研究機関や日本国内の公的研究機関では、試験研究用の環境として利用が進んでいる。しかし、大学・高専などの研究室でこれらの使用を初めて開始する際には、高い障壁があるのが現状である。また、PC-SDR固有の処理遅延の変動の克服は、大きな課題となっている。本研究課題では、関連に基づく手法により遅延変動への対処が可能であることを示すとともに、導入教育教材の開発とそれに基づく講習を実施した。

研究成果の概要(英文)：The author measured the radio channel characteristics in the 927 MHz band by utilizing the software radio equipment (PC-SDR), and verified the results. It was clarified that the measurement accuracy of amplitude error 1 [dB] could be obtained by carrying out the countermeasure which overcomes the fluctuation of processing delay peculiar to PC-SDR equipment. This accuracy is sufficient for evaluating radio transmission path characteristics, but there remains a problem with the stability of measurement.

As a model case for introducing a high-performance PC-SDR device into education and research at universities, we received advice from a professor at the Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University. We conducted an introductory workshop for students who have never experienced an PC-SDR device before. Conducting workshops has reduced barriers to the use of PC-SDR equipment in university education and research.

研究分野：デジタル信号処理, 科学教育

キーワード：信号計測 インパルス応答測定 同期 M系列 TSP信号 相関 処理遅延 近似逆システム推定

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19, CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ソフトウェア無線 (SDR: software defined radio) 装置の中で, パソコン(PC)と A/D・D/A 変換器を組み合わせる無線信号処理を実現する装置(PC-SDR)は, その柔軟性から無線信号処理のプロトタイピング環境として優れている. PC-SDR の利用により, 数式で記述された変調処理を実装し, オシロスコープ(時間領域表現)やスペクトラムアナライザ(周波数領域表現)で観測することで, 学んだことをより理解できる. 加えて, PC-SDR の機能により, 時間領域での信号の観測や, 周波数領域での信号の観測をも実装することが可能であり, 受講者は PC-SDR をプロトタイピング環境のみならず, 測定環境としても利用可能である. しかし, PC-SDR における処理遅延の存在が, 測定環境としての PC-SDR の応用範囲を大きく限定しているという問題がある.

2. 研究の目的

無線通信システムを実現するには, 電波伝搬, 信号処理, 通信方式などの要素が大きな役割を果たしている. 近年活用が進む MIMO (multiple input multiple output) 方式[1]では, 複数の送受信アンテナを設けて反射波の影響が異なる複数の伝送路を利用して伝送速度を向上させており, 伝送路の特性はシステムの性能を規定する重要なパラメタとなっている. また, IoT (internet of things) 実現のため, 工場内等に設置された多数のセンサからの信号を無線により取得する際には, 生産ライン上を移動する製造物(たとえば, 自動車)などの影響により伝送路特性が変動する[2].

無線伝送路特性を把握することは, 無線通信システムの検討を進める上で, 欠かすことができない状況にある. チャンネルサウンダと呼ばれる無線伝送路の特性測定装置は高価であり, 高専や大学などの一研究室で, 種々の周波数帯でチャンネルサウンダを準備することは容易ではない. ソフトウェア無線 (SDR: software defined radio) 装置の中で, パソコン(PC)と A/D・D/A 変換器を組み合わせる無線信号処理を実現する装置(PC-SDR)は, その柔軟性から無線信号処理のプロトタイピング環境として優れている. 普及が進む PC-SDR 環境を用いて無線伝送路の特性を測定できれば有用である.

PC-SDR 環境では, PC 上でのソフトウェアによる信号処理及び PC と SDR 装置間でのデータ伝送に伴う処理遅延がそれぞれ存在[3]し, 遅延時間が変動することも多い. 処理遅延の影響を考慮せずに測定を行った場合には, 測定結果には信頼性がない. この問題は PC-SDR を計測に使用する際の妨げとなっている.

文献[4,5]で報告されている同期手法は, PC-SDR による伝送路特性測定を実現するための有効な方法の一つと考えられる. しかし, 多地点に受信装置を設置し, 単一の送信信号を同時に受信して送信点から多地点への伝送路特性測定を行う応用には, 適用が難しい. 文献[6]は, IEEE 802.11b 方式に組み込む形でチャンネルインパルス応答を PC-SDR で推定する手法を提案しており, 汎用的なインパルス応答測定を目的としていない. 文献[7]は, PC-SDR における処理遅延の不確実性がレーダシステムに与える影響について論じている.

本研究では, M 系列[8]を用いて送信用ベースバンド信号と復調信号の相互相関値のピークに基づき送受信信号間で時間的な同期を確立する手法の利用を提案する. 音響系のインパルス応答測定で実績のある TSP(time stretched pulse)信号を用いて 927MHz 帯で測定対象のインパルス応答算出を行い, その結果の検証を行う. 測定にあたっては, 近似逆システム推定法[12]を用いて測定系の特性が測定結果に与える影響の除去を行う. 測定には, オープンソースのソフトウェア無線ツールキット GNU Radio[13]と直交変復調器並びに A/D・D/A 変換器を備えた汎用無線信号用インタフェース USRP (universal software radio peripheral) X シリーズ[14]を用いて構築した PC-SDR 環境を利用する.

3. 研究の方法

図 1 に示す構成図により, 測定対象(DUT)のインパルス測定を行う. 変調に用いるベースバンド信号は, SSD (solid state drive) 内に記憶されており, GNU Radio 上で File Source モジュールを用いてサンプリング周波数 F_{sb} の信号として読み込む. 10 ギガビットイーサネット (10GigE) を介して USRPX300 へ転送されたベースバンド信号により DSB-SC(double-sideband suppressed-carrier)変調を実行し, レート変換および D/A 変換を経て, ドータボード SBX-120 により利用者が指定したキャリア周波数 F_C (400-4400MHz)の無線信号に周波数変換され, 送信される. 送信信号は, USRP 保護と整合補助の目的で付加したアッテネータ(ATT)を介して DUT (device under test)に加えられ, DUT からの応答信号を USRP の全二重動作により受信する. 受信信号はドータボード SBX-120 で周波数変換されたのち, USRP 内部で復調・レート変換され, 10GigE によりサンプリング周波数 F_{sb} の復調ベースバンド信号として PC に転送される. 復調ベースバンド信号は, GNU Radio 上でバイナリファイルとして SSD に書き込みされ, インパルス応答算出に使用する.

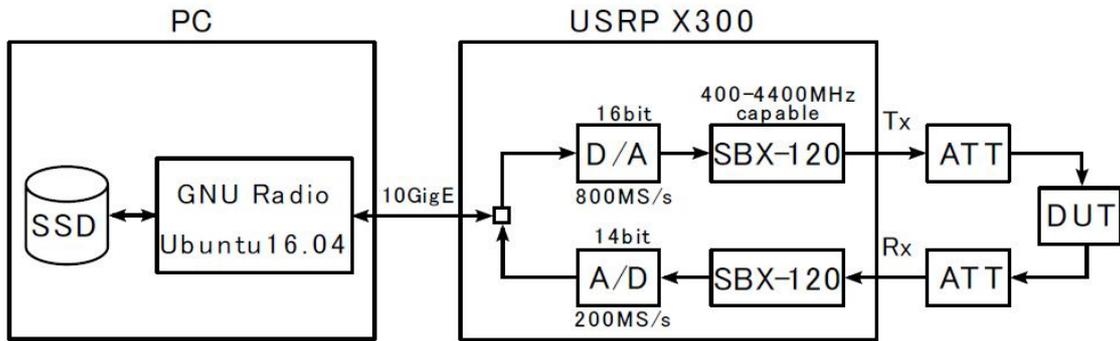


図1 インパルス応答測定ブロック図

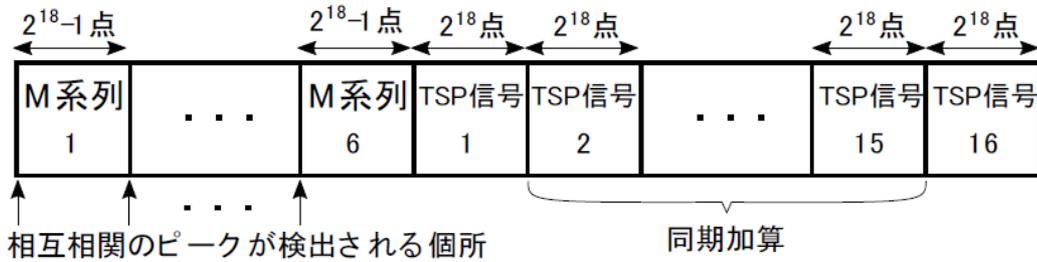


図2 測定に使用するベースバンド信号

送信に使用するベースバンド信号は、図2に示すように複数のM系列[8]と複数のTSP信号[9]を連結した構成としている。本稿で提案するPC-SDRでのインパルス応答測定では、M系列がラグ0の位置で自己相関に明確なピーク値を有する性質を用いることで、以下の手順により1サンプル単位での信号開始位置を特定する

- 図2の送信用ベースバンド信号と、図1のSSDに記録された復調ベースバンド信号の相互相関を計算する
- 相互相関のピーク位置・個数から、復調ベースバンド信号内のM系列の開始位置を取得する。
- 復調信号内のM系列の開始位置から信号点数分移動し、復調ベースバンド信号からTSP信号の応答部分を切り出し、インパルス応答推定を行う。

なお、インパルス応答測定にあたっては、DUTを取り外して直結した状態で測定系のインパルス応答をあらかじめ測定しておき、その近似逆システム推定を算出しておくことで、上述の手順で推定したDUTのインパルス応答から測定系のインパルス応答成分を除去する処理を実施している。

4. 研究成果

表1に示す測定条件により、特性が既知のDUTのインパルス応答を測定した。

表1 インパルス応答の測定条件

キャリア周波数 F_c	927MHz
サンプリング周波数 F_{sb}	20MHz
M系列	$2^{18} - 1$ 点
TSP信号点数	2^{18} 点
DUT	T型コネクタに同軸 20m open stub を付加

インパルス応答の主応答の大きさを0[dB]と正規化表示した際のDUTのインパルス応答の測定結果を図3に示す。図3より、測定結果がベクトルネットワークアナライザ(VNA)で測定したDUTを構成する同軸ケーブルからなるopen stubの損失値[dB]と群遅延によく一致していることがわかる。報告者の実験室に設備されているVNAではインパルス応答測定ができないため、損失値と群遅延値での比較としている。

図4は、表1の条件で測定したDUTのインパルス応答から算出した振幅特性と、DUTの振幅特性をVNAで測定した結果の比較を示している。両者は、振幅誤差約1[dB]で一致していることがわかる。以上のように、最良の条件の下では、提案法によりDUTのインパルス応答を振幅誤差1[dB]程度で測定できることが明らかとなった。

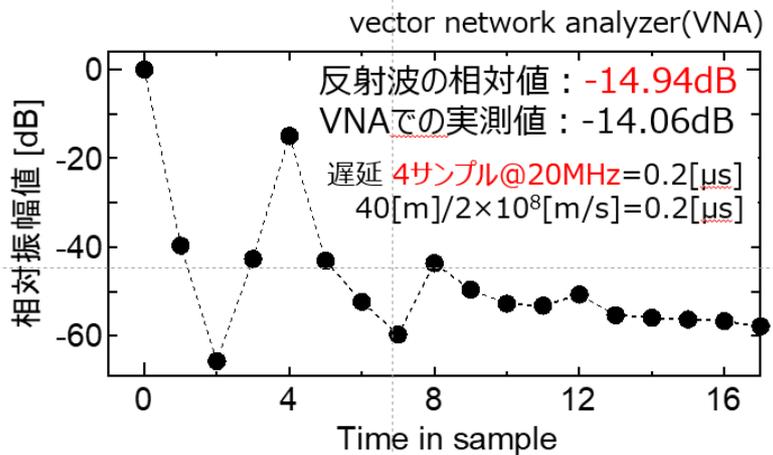


図3 DUTのインパルス応答の大きさの特徴の検証

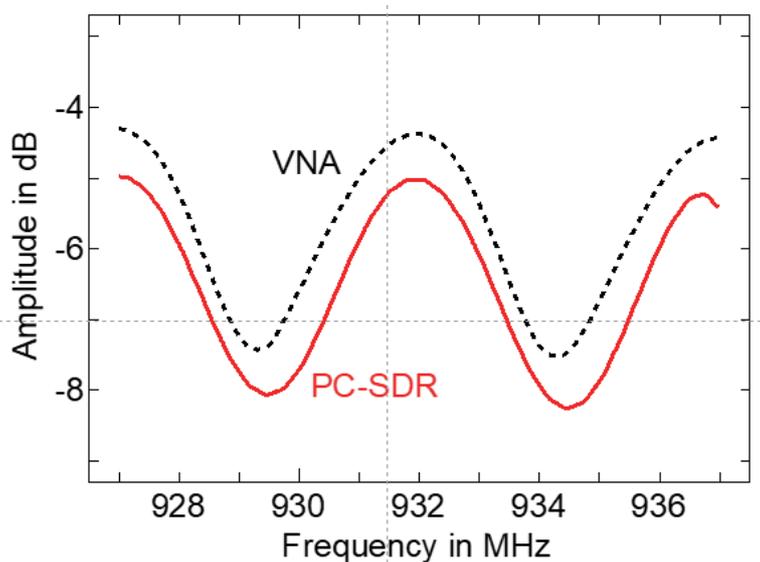


図4 提案法とVNAによる振幅特性の測定結果の比較

ただし、提案法による測定結果は、現状では不安定である。複数回の試行を行い、復調信号の大きさが最も大きい場合の結果が期待する測定結果になっていることが多い。この現象は、キャリア周波数同期が取れてはいるが、サンプリングを開始するタイミングまでは送受信側で一致していないことが要因であると考えており、今後の課題である。

また、ソフトウェア無線実験装置を大学・高専等における教育研究に導入するモデルケースとして東北大学電気通信研究所の専任教員にご助言を仰ぎ、USRP に初めて触れる大学院生を対象として導入講習会を試行的に実施した。この講習会では、USRP の利用開始に必要なLinux 上でのソースコードからのGNU Radio のビルド方法、Windows 上でのUSRP 利用のためのLabVIEW のセットアップ方法およびUSRP のセットアップ方法を説明し、ソフトウェア無線実験装置を動作可能とする状態を実現した。初めて利用される方が直面されることの多い留意点についても説明を行った。加えて、1 台のUSRP をGNU Radio およびLabVIEW からそれぞれ利用可能であることを受講者に実演した。

将来的には、この講習内容を各種の研究会等の機会を通じて大学・高専等の教員および学生に紹介することで、ソフトウェア無線実験装置を高等教育機関における教育・研究に導入する際の一助にしたいと考えている。使用できる機材の不足は、講習を実現する際の支障となっており、今後も改善の努力を継続したい。

[本節までの参考文献]

- [1] 西森健太郎, マルチユーザ MIMO の基礎, コロナ社, 2014 .
- [2] 製造現場における無線ユースケースと通信要件(2017年3月公開), 情報通信研究機構ワイヤレスネットワーク総合研究センターFlexible Factory Project, <http://www2.nict.go.jp/wireless/ffpj.html>
- [3] 菅沼久浩, 長縄潤一, 鈴木誠, 猿渡俊介ほか, “ソフトウェア無線機開発支援プロファイルの設計とバッファリングによる最大遅延時間の測定,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会,B-17-15, Sept. 2011.
- [4] T. Min, M. Kim and J. Takada, Development of Channel Sounder using GNU Radio / USRP : Timing Synchronization and Phase Alignment, ” 信学技報 SR2014-131, Vol.114, No.491, pp.121-126, 2015.

- [5] T. Min, K. Saito and J. Takada, "Development of Directional Channel Sounder using USRP and GNU Radio," ASEAN Engineering Journal Part A, Vol 7, No 1, pp.74-83, Jan. 2017.
- [6] D. Maas, M. H. Firooz, J. Zhang et al., "Channel Sounding for Masses: Low Complexity GNU 802.11b Channel Impulse Response Estimation," IEEE Trans. Wireless Comm. Vol.11, No.1, pp.1-8, 2012.
- [7] A. B. Suksmono, "A Simple Solution To The Uncertain Delay Problem in USRP Based SDR-Radar Systems," Proc. IEEE International Conference on Multimedia, Information Technology and its Applications, Bali, Indonesia, Jul. 2013.
- [8] 柏木潤, M 系列とその応用, 昭晃堂, 1996 .
- [9] 鈴木陽一ほか, "時間引き伸ばしパルスの設計法に関する考察," 信学技報, Vol.EA92-86, pp.17-24, 1992.
- [10] H. Takahashi and Y. Kaneda, "Study of acoustical impulse response measurement with small error caused by harmonic distortion," Acoust. Sci. & Tech. Vol.32, No.1, pp.37-39, 2011.
- [11] 金田 豊, インパルス応答計測の基礎, 日本音響学会技術講習会資料, Aug. 2016.
<http://www.asp.c.dendai.ac.jp/>
- [12] 大賀寿郎, 山崎芳男, 金田 豊, 音響システムとデジタル処理, 電子情報通信学会, 1995.
- [13] GNU Radio, <http://gnuradio.org/>
- [14] Ettus Research, <http://www.ettus.com/>

5 . 主な発表論文等

〔技術研究報告〕(計 1 件)

福嶋開人 神島実佳 山田洋士, "USRP/GNU Radio 環境におけるチャネルインパルス応答測定の実現," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 117, no. 457, SR2017-113, pp. 9-16, 2018 年 2 月.

〔学会発表〕(計 3 件)

神島実佳 山田洋士, "USRP / GNU Radio を用いたチャネルインパルス応答の測定結果の検証," 2018 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会(通信講演論文集 1) B-17-6, pp.408 2018 年 9 月 13 日.

神島実佳 山田洋士, "ソフトウェア無線環境を利用した BER 測定の実現," 平成 29 年度電気関係学会 北陸支部連合大会 講演論文集 C-7, 2017 年 9 月 11 日.

福嶋開人 山田洋士, "GNU Radio / USRP を用いた無線伝送路インパルス応答測定の検討," 平成 28 年度電気関係学会 北陸支部連合大会 講演論文集 C-4, 2016 年 9 月 13 日.

〔その他〕

PC-SDR 研修資料(石川高専 山田洋士研究室)

http://dsp.jpn.org/?page_id=153

(講習会受講者に公開)

6 . 研究組織

(1)研究協力者(卒業研究に従事した学生)

研究協力者氏名: 福嶋 開人

ローマ字氏名: Kaito Fukushima

研究協力者氏名: 神島 実佳

ローマ字氏名: Mika Kamishima