

デジタル無線通信技術の理解のための学生実験用教材の開発

成枝 秀介*

A Development of Teaching Materials in Student Experiments for Understanding Digital Radio Communication Systems

Shusuke NARIEDA

ABSTRACT

This paper reports the development of teaching materials in student experiments for understanding digital radio communication systems. The material is developed based on USRP / GNU Radio which is one of software defined radio systems. Moreover, the overview of experiment program is shown in this paper. The program is for understanding digital communication systems, especially, digital modulation schemes such as quadrature phase shift keying.

KEY WORDS: digital radio communication systems, USRP / GNU Radio,

1. はじめに

昨今の無線通信機器の普及はすさまじく、我々の身の回りには必ずと言っていいほど液晶テレビ、ノートPCや携帯電話などの無線通信機器が存在する。これらを支えている技術がデジタル無線通信技術であり、近年特に注目されている技術の一つである。

明石高専電気情報工学科では、電気・電子・通信・情報の4つの分野を習得させることを目的としており、その中の通信については、実験科目や座学などを中心に学生への通信技術の教授を行っている。座学では、通信工学IおよびII(5年次開講)でデジタル無線通信技術の教授を行っている。実験科目では、電気電子工学実験I(4年次開講)およびII(5年次開講、電気電子工学コース対象)の中で、ラジオ放送などに用いられている振幅変調(Amplitude Modulation :AM)や周波数変調(Frequency Modulation :FM)といったアナログ変復調技術に関する実験を通じて学生への技術の教

授が行われている。また、プロトコルアナライザによる有線通信解析や光通信技術の習得といった、無線ではない有線でのデジタル通信技術に関する実験も行われている。

これらからわかるように、平成24年度までの明石高専電気情報工学科におけるデジタル無線通信技術の学生への教授が座学でのみ行われている状況である。通信工学とは、電気系学科で教授すべき通信技術のための基礎科目であり、また国内外で出版されている教科書などを見てもわかるように、通信のための変復調方式を指すことが非常に多い。またこのような技術の修得は、近年の社会構造の一端を担い、かつ学生の身の回りに数多く存在する情報通信システムの理解の導入と成り得ることからも、デジタル無線通信技術を学生へ効率よく教授するための実験教材が望まれる。

本論文では、これらの背景を踏まえ、デジタル無線通信技術教授のための学生実験用教材の開発を行ったのでこれを報告する。開発する教材は、明石高専電気情報工学科5年次の実験科目である電気電子工学実

*電気情報工学科

験Ⅱでの実施を目的としたものであり、平成25年度前期から実施予定である。

2. 学生実験のためのデジタル無線通信技術教材に関する国内動向

これまでに実験の提供がほとんど成されていなかった背景としては、実験用デジタル無線通信機開発の困難さにあると考えられる。一般的にデジタル無線通信機は、1). 高い周波数 (300MHz–3GHz) を扱うためのRF (Radio Frequency) 回路, 2). 中間周波数 (約10MHz–100kHz) およびベースバンド信号を扱うデジタル回路, 3). 通信制御のためのソフトウェア, より構成される。これらある特定の目的のために一から開発するためには、極めて高い専門性が必要であることが知られており、これら全てを専門とする技術者・研究者は極めて稀であり、特に1). のRF回路については、専門性のみならずある種の職人芸が求められる分野である。当然、これらは専門の業者に発注することも可能であるが、デジタル無線機種類あたりの開発コストが数百万円、納期3~4か月となり (著者調べ)、学生実験への導入がさらに困難なものとなる。

一方で近年、米国 Ettus Research 社¹⁾ が実験用のソフトウェア無線機である USRP (Universal Software defined Radio Peripheral) の提供を開始した。USRP は初めから daughter board と呼ばれる RF 回路や FPGA (Field Programmable Gate Array) により実現されるデジタル回路, GNU Radio と呼ばれる通信制御用ソフトウェアを備える (図1)。受信機における復調処理などは標準では PC 上の通信制御用ソフトウェアである GNU Radio で行うが、USRP 内の FPGA で復調処理を行い、その結果を PC へ出力させることも可能である。USRP を用いることの最大のメリットは、教員がデジタル無線通信機を一から全て設計する必要がない。かつ、2). デジタル回路および3). 制御用ソフトウェアについては、それぞれユーザが VHDL, Verilog HDL といったハードウェア記述言語や python, C++などのプログラミング言語を用いてカスタマイズ可能な仕様となっているため、学生実験用の教材としては最適と考えられる。実際、USRP/GNU Radio を用いた学生実験が東京大学および静岡大学などで開講されており^{2), 3)}、通信制御用ソフトウェアである GNU Radio に関するワークショップなども開催されている。しかしながら、これら実験は通信プロトコルや制御ソフトウェアに特化したものであり、変復調などのベースバンド信号の評価を目的とした実験ではない。先に述べたように、いわゆる物理層でのデジタル無線通信技術とは一般的

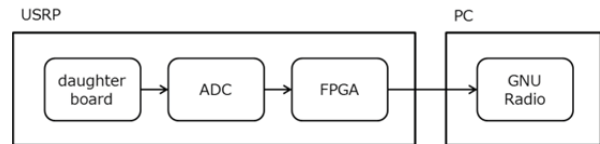


図1: USRP 構成の概要

にデジタル変復調技術を指し、電気系学科で教授すべき内容と考える。現状では、これを効果的に教授できる教材が存在しない。

3. 学生実験に向けたデジタル変復調技術と評価項目の選定

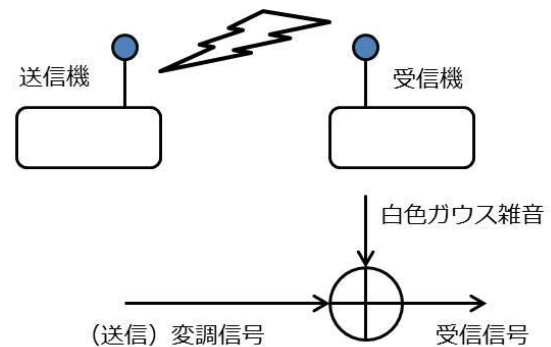


図2: AWGN 伝送路とその概略

3.1 システムモデル

今回実験科目に導入する実験では、デジタル無線通信における最も基本的なモデルである AWGN (Additive White Gaussian Noise: 加法的白色ガウス雑音) 伝送路を採用する。ここでは AWGN 伝送路の説明のために、図2に示すような一組の無線送受信機を考える。受信機は送信機から送られてきた無線信号を受信するときに、受信機のRF回路で生じる白色ガウス雑音も併せて受信する。RF回路で生じる白色ガウス雑音は回路中を流れる電流により生じる熱雑音を基にする雑音であるため、不可避である。デジタル無線通信では、白色ガウス雑音の影響を考慮に入れて特性を検証しなければならない。これらの数学的モデルを同様に図2に示す。

3.2 デジタル変復調技術の選定

デジタル変復調とは、搬送波と呼ばれる高い周波数 (RF 帯域) の正弦波に“1”や“0”といったデジタル情報を載せたり (変調)、それらからデジタル情報を取り出したり (復調) するための技術である。これらを達成するために、デジタル変復調技術の中でも、最も基本的かつ重要である変復調技術がデジタル情報を搬送波の位相に載せる PSK (Phase Shift Keying) 方式

であり、PSK 変調信号 $s(t)$ は次式で与えられる。

$$s(t) = \cos\{2\pi f_c t + \pi x(t)\} \quad (1)$$

ただし f_c および $x(t)$ は、それぞれ搬送波周波数および搬送波に載せるデジタル情報を持ちシンボル時間 T_S の間一定値である ± 1 の値をとる矩形パルス、またシンボル時間 T_S は情報の伝送速度を決定付けるパラメータ。本報告では、デジタル無線通信技術の導入として、 $x(t)$ が4値をとるようなQPSK (Quadrature PSK) 方式を採用する。これを理解することで、今後更に複雑な無線通信技術の習得の助けとなると考えられる。

3・2 評価項目の選定

受信機側の評価として、次式で定義されるビット誤り率 (Bit Error Rate : BER) を採用する。

$$\text{BER} = \frac{\text{誤りビット数}}{\text{判定した総ビット数}} \quad (2)$$

BERはその定義の容易さ、わかりやすさから、デジタル無線通信の初学者にも容易に導入可能と考えられ、かつ重要な評価項目の一つであることから、学生実験への導入が最適な項目の一つと考えられる。実験では、異なる伝送レートの変調信号に対してBERを実際に測定する。

また、変調信号に白色ガウス雑音を与える影響を視覚的に確認させるために、受信信号の信号点配置の観測を行う。変調信号がQPSK方式である場合、式(1)の変調信号は次式のように書き改められる。

$$\begin{aligned} s(t) &= \cos\{2\pi f_c t + \pi x(t)\} \\ &= \cos(2\pi f_c t) \cos\{\pi x(t)\} - \sin(2\pi f_c t) \sin\{\pi x(t)\} \quad (3) \end{aligned}$$

上式第一項 (同相成分) を横軸、第二項 (直交成分) を縦軸にとり、受信信号を平面上にプロットしたものが信号点配置である。雑音がないときには、図2のように平面上の決まった4つの点に受信信号が描かれる。また図中の4つの点はQPSK変調信号のもつ情報を示す。図2の例だと第1象限にある信号が多象限に移ることがなく、その結果他の信号点と混ざることが無い。そのため、送られた信号を正しく得ることが出来るが、雑音が付加されると4つの点を中心に信号点がばらつき、多象限に移ることがままある。信号点配置の観測を行うことで、白色ガウス雑音の影響を視覚的に確認

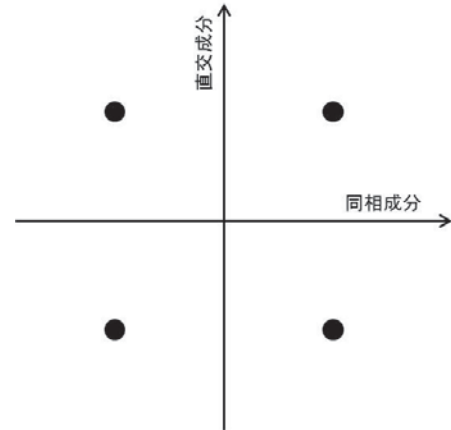


図2：QPSK 変調信号の信号点配置例

できる

4. 実験系と実験手順

図3に、今回導入するデジタル無線通信技術教授

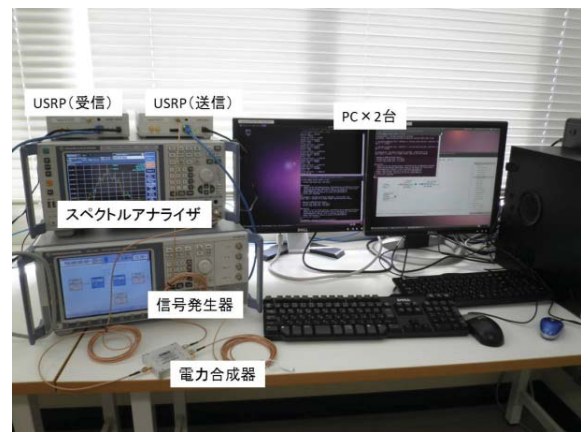


図3：学生実験のための測定系外観

のための実験系外観を示す。実験系はUSRP/GNU Radioを用いた一組の無線機とそれらを制御するための二台のPC、無線通信信号のスペクトルおよび信号点配置観測のためのスペクトルアナライザ、白色ガウス雑音を付加するための信号発生器、無線機の信号と白色ガウス雑音を数学的に加えるための電力合成器からなる。これらを用いて、図4および図5に示すような測定系を構築し、ビット誤り率測定および受信信号の信号点配置観測を行う。また本実験では、USRP Network seriesとして知られるUSRP_N210を用い、RF回路であるdaughter boardにはWBX (送受信可、50~2200 [MHz])を用いた。これら無線機を用いて、搬送波周波数が900 [MHz]であるQPSK信号の送受信を行った。



図4：誤り率測定のための測定系

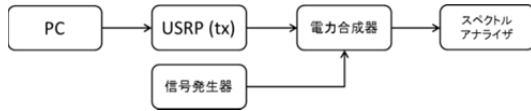


図5：信号点配置観測のための測定系

送信機からはある決まったビットパターンをもつ信号を送信する。これを受ける受信機では、受信信号を復調後、今回開発したシンボル同期補足器およびBER測定器を用いてBERを測定する。これら手順を加法的白色ガウス雑音の電力値を順次変更し、それぞれのBERを測定する。

5. 実験結果

本論文では、送信信号電力値を-10 [dBm]として実験を行った。図6に異なる伝送レートの変調信号に対するBER特性を示す。図6より伝送レートが増加するにつれてBER特性が劣化していることがわかる。伝送レートの増加は、変調信号の占有周波数帯域の増加につながることから、雑音の影響を受けやすくなり、結果としてBER特性の劣化につながる。実際の学生実験では、変調信号のスペクトルを観測させた後、BER測定を行わせることから、本実験では、変調信号の占有周波数帯域の違いによる基本的なデジタル無線通信の特性を評価できることがわかる。また、図7, 8および9に伝送レート250 [kbps], 雑音電力を-7.1, -10.1および-13.1 [dBm]のときの受信信号の信号点配置をそれぞれ示す。これらより、雑音電力が減少するにつれて信

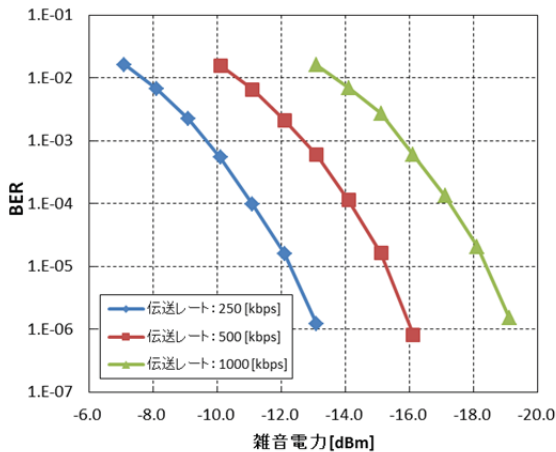


図6：誤り率特性

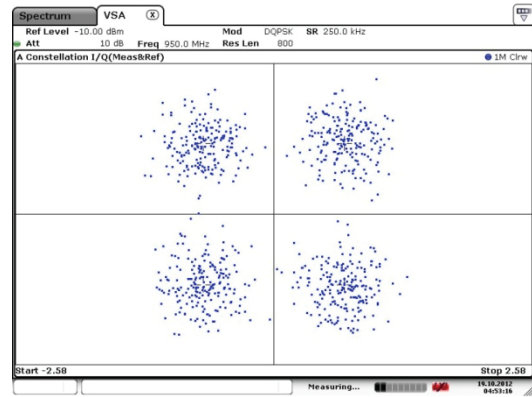


図7：信号点配置. 雑音電力=-7.1 [dBm]

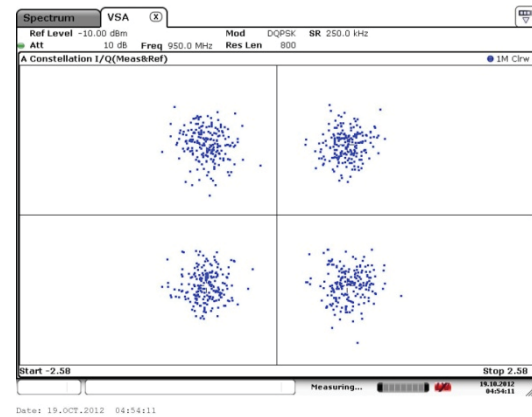


図8：信号点配置. 雑音電力=-10.1 [dBm]

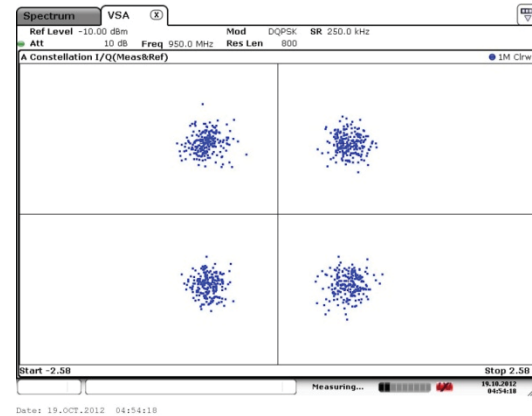


図9：信号点配置. 雑音電力=-13.1 [dBm]

号点のばらつきが小さくなることがわかる。受信信号に加わる雑音電力が増加することによる判定誤りの増加を視覚的に観察できることが確認できる。

6. おわりに

本論文では、デジタル無線通信技術教授のための教材開発を行った。また、学生実験で実際に採用する評価項目についてもいくつか検討を行った。今後の予

定としては、平成 25 年度の前期に開講される電気電子工学実験Ⅱでの本実験の実施、学生からの意見の実験へのフィードバック、などが挙げられる。

参考文献

1) 米国 Ettus Research 社 HP, <http://www.ettus.com>

- 2) 川原圭博, 西本寛, “学生実験教材としての GNU Radio”, 第一回 GNU Radio ワークショップ.
- 3) 渡辺尚, “USRP / GNU Radio による基本通信プロトコルの実装と実験 ～電波を送信する～”, 第一回 GNU Radio ワークショップ