

## 実験教材としてのFSK復調用RFフロントエンドの検討

辻 佑斗\* 成枝 秀介\*\*

### Development of RF Frontend in FSK Receiver as Education Material

Yuto TSUJI, Shusuke NARIEDA

#### ABSTRACT

This paper reports the development of an RF frontend in FSK receiver with a UHF band as educational material. The RF frontend consists of a power divider, mixer and LPF circuits, and these circuits can be developed easily using a copper sheet and single-sided board. Experimental analyses are shown to validate the developed RF frontend, and the results show that the developed RF frontend can be adopted as educational material in KOSEN. Moreover, this paper also discusses the possibility of software defined radio using the developed RF frontend and microcomputer (or FPGA) as being another educational material.

**KEY WORDS:** digital communication systems, RF frontend, software defined radio,

#### 1. はじめに

近年、極超短波 (Ultra High Frequency : UHF, 300MHz ~ 3GHz) 帯を利用した無線通信アプリケーションが増加しており、これらシステムを支えるデジタル無線通信技術の学生への効果的な教授が望まれる。明石高専電気情報工学科では、電気・電子・情報・通信の四分野の習得を目的としており、通信については、実験科目や座学などを中心とした学生への教授が行われている。その中でも、デジタル無線通信技術については、座学での通信工学 I および II (5 年次開講) での教授が行われており、実験科目での電気電子工学実験 II (5 年次開講, 平成 25 年度) での教授が試験的に行われた<sup>1)</sup>。これら科目では、通信のための変復調技術を中心とした教授がなされており、科目担当者が専攻科科目と併せて現在国家資格である陸上特殊無線技術士取得のための科目認定校登録を検討中であり、このような取り組みが一定の成果を挙げているといえる。

一方で、UHF 帯を用いる無線通信システムでは、無線周波数 (Radio Frequency : RF) 帯を使用することから、RF 帯で動作する高周波回路が必須である。この分野に関しても効果的な教授がなされるべきではあるが、高い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ことから、学生への教授が難しいだけでなく、これを理解させるためのカリキュラム設計さえも困難と考えられる。しかしながら、その中の一部分、いわゆる Passive 回路と呼ばれる個所については、その基本的な内容が電気電子計測 II (4 年次開講) で教授されていることから、高周波回路技術教授の導入といった意味合いでは、実験科目への導入を検討する価値があるように思われる。本論文では、デジタル無線通信機内の高周波回路の一部の Passive 回路技術教授について、実験科目での実現を検討する。具体的には、これらの回路を電気情報系の素養をもつ学生であれば実施できる程度の簡易な手法で実現し、回路の測定・評価を行ったので、これを報告する。

\*明石高専電気情報工学科卒業生, \*\*電気情報工学科

## 2. RF帯回路を含めたデジタル無線通信技術の学生実験への導入検討

東京高専専攻科電気電子専攻では、 $\pi/4$  シフト Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) を用いたデジタル変復調系の実験が行われており、主にベースバンド部におけるフィルタリングや変復調、ビット誤り率評価技術が専攻科学生に教授されている<sup>2)</sup>。また、呉高専電気情報工学科のように、高周波回路技術を座学で提供している例(超高周波工学, 5年次開講科目)も見受けられる<sup>3)</sup>。

一方で、明石高専電気情報工学科では、提供科目である電気電子工学実験Ⅱ(5年次開講)では、ソフトウェア無線機を用いたデジタル無線通信技術の教授が試験的に行われている(平成25年度)。また、デジタル無線通信技術の中の変復調技術については、通信工学ⅠおよびⅡでその教授が行われている。高周波回路技術については、電気電子計測Ⅱ(4年次開講)でその基礎が教授されているが、デジタル無線通信機を意識したものではないことから、実験科目内での教授が必要となるであろう。そのため、実際に学生実験への導入を検討するときには、二回以上といった複数回の教授時間を踏まえた導入が必要であると予想される。また、実験時の実際の回路設計・試作(実装)については、RF回路の多くが分布定数回路で実現されることが多い。高専における電気情報系高学年(5年)や専攻科の学生であっても、まず試作したことがない回路であると思われるが、回路の試作自体は簡易であるため(後述)、特に問題にならないと推測できる。

## 3. 導入しようとする技術・回路の検討

### 3・1 導入検討

高周波回路技術は、先に示した Passive 回路と発振回路のような Active 回路の二つに大別できる。この二つを比較したとき、Active 回路の設計では、Passive 回路設計で要する技術が必要であることに加えて、異常発振などの高周波回路特有の事象が生ずることから、特にある種の職人芸が必要である分野として知られている。そのため、導入の困難な Active 回路設計技術の教授よりも Passive 回路設計技術の教授を検討すべきと考えられる。

図1(a)に今回導入を検討するRF帯の高周波回路のシステムブロックを示す。図1(a)は高周波回路で構成される一般的なデジタル無線通信機のための回路であり、RFフロントエンドと呼ばれている回路である。図1(a)の回路は、RF帯から中間周波数(Intermediate

Frequency: IF)帯へ周波数を変換するための周波数変換ミキサ回路と、これで生じる余分な高周波成分を除去するための低域通過フィルタ(Low Pass Filter: LPF)より構成される。周波数変換ミキサ回路は、周波数変換の結果であるIF信号の周波数に応じた局所発振器からの信号(LO信号)が必要であるが、この設計は行わず、信号発生器を用いる。信号発生器を用いることで、回路設計技術の教授および修得がより現実的なものになると考えられる。また図1(b)に、同システムブロックを実現するために必要な高周波回路構成を示す<sup>4)</sup>。図1(b)に示す回路は、先に示した周波数変換回路を実現するための1)電力合成器、と2)ミキサ回路、およびLPFで構成される。先にも示したが、これら回路の試作そのものは簡易であることから、本論文では、これら三つの回路の導入を検討する。

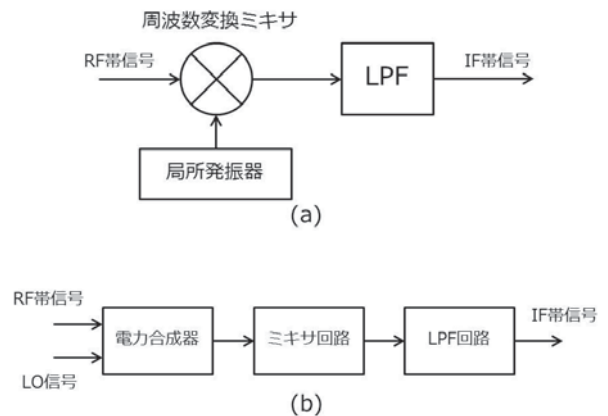


図1 (a)導入を検討しているRF回路のシステムブロック, (b)その高周波回路による実現図

### 3・2 周波数変換ミキサ回路

周波数変換ミキサ回路では、アンテナで受信した無線信号と受信機内部にもつ局所発振器からの出力を数学的に乗ずることでIF帯の信号成分をもつ信号を生成する。数学的な乗算を行うために、1)無線信号と局所発振器からの信号を一度加算する、2)加算された信号を半導体素子の非線形性を利用して乗算と同じ効果を得る、といった二つの段階を経る。1)を実現する回路が電力合成器であり、2)を実現する回路がミキサ回路である。図2に電力合成器の回路図を示す<sup>5)</sup>。図2では、端子1・2を入力とし、それらの数学的な和が端子3より出力される。図2において、端子1から入力された信号が通るルートでは、1)100Ωの抵抗の物理長が0であるとき、ルート1を通過した信号の位相は変化しない、2)一つの伝送線路長を無線信号のもつ波長の四分の一と定めると、ルート2を通過する信号はそ

の線路を二回通過することになるため、信号の位相が反転することがわかる。また、伝送線路の特性インピーダンスを  $70.7\Omega$  とすることで、端子3から左を見たときのインピーダンスを整合している。よって、端子2にて両信号は合流し、打ち消し合う。また、端子2から入力された信号のみについて考えた場合も同様である。これを分布定数回路で実現する場合には、基本的にマイクロストリップ線路で実現することになる。ただし、図中の  $100\Omega$  抵抗については、チップ抵抗を用いる。

次に、ミキサ回路<sup>9)</sup>について述べる。ミキサ回路は、pn接合のI-V特性が非線形であることを利用し、複数の周波数成分をもつ信号を生成する回路である。 $I_S$ をpn接合ダイオードの飽和電流とすると、pn接合ダイオードのI-V特性は次式で与えられる。

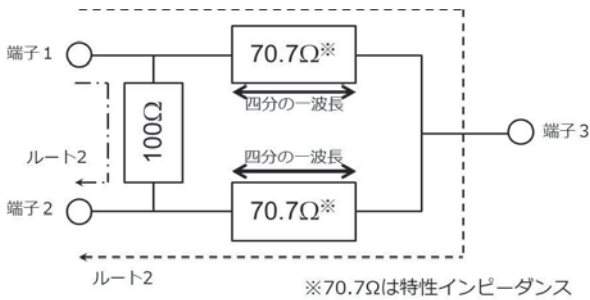


図2 ウィルキンソン型電力合成器

$$I(V) = I_S \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

ここで、pn接合に印加される電圧 $V$ が、直流バイアス電圧 $V_0$ と微小な交流電圧 $\delta V$ との和であるとして、式(1)をTaylor展開すると、

$$\begin{aligned} I(V) &= I(V + \delta V) \\ &= I(V_0) + \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V_0} \delta V + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2I}{dV^2} \right|_{V_0} (\delta V)^2 + \dots \\ &= I_0 + \delta I \end{aligned} \quad (2)$$

を得る。ただし  $I_0$  および  $\delta I$  はそれぞれ直流バイアス電流、微小な交流電流。これらについて、 $\delta V \rightarrow v, \delta I \rightarrow i, dI/dV|_{V_0} \rightarrow a_1, \dots$ と書き改めると、

$$i = a_1 v + a_2 v^2 + \dots \quad (3)$$

を得る。上式中の $v$ は電力合成器からの出力であり、

RF信号と局所発振器からの信号を電力合成器で合成した信号  $v = V_{RF} \sin \omega_{RF} t + V_{RF} \sin \omega_{LO} t$  であることから、これを代入すると、

$$\begin{aligned} i &= a_1 (V_{RF} \sin \omega_{RF} t + V_{RF} \sin \omega_{LO} t) \\ &+ a_2 \left[ \frac{1}{2} V_{RF}^2 (1 - \cos 2\omega_{RF} t) \right. \\ &+ V_{RF} V_{LO} \{ \cos(\omega_{RF} - \omega_{LO}) t \} \\ &+ V_{RF} V_{LO} \{ \cos(\omega_{RF} + \omega_{LO}) t \} \\ &\left. + \frac{1}{2} V_{RF}^2 (1 - \cos 2\omega_{LO} t) \right] + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

となる。式(4)より、ミキサ回路により複数の周波数成分をもつ信号が得られることがわかる。これの中から第三項の成分を抽出することでIF帯信号が得られることがわかる。ミキサ回路を実現するための半導体としては、電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor: FET) を用いる。FETに適切な直流バイアス電圧を加えるための回路をマイクロストリップ線路で実現する。

### 3・3 LPF 回路

本論文では、図3(a)のようなインダクタ $L$ とコンデンサ $C$ で構成される簡単なLPFを用いる。図(a)の回路を1セルとし、これを二つ並べた2セルの回路を用いる。これを分布定数回路で実現するために、図3(b)のような回路を用いる。回路両端の線でインダクタを、回路中心でコンデンサをそれぞれ実現する。図3(a)において、LPFの振幅特性は次式で与えられる。

$$\left| \frac{v_1}{v_2} \right| = \left| \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \right| \quad (5)$$

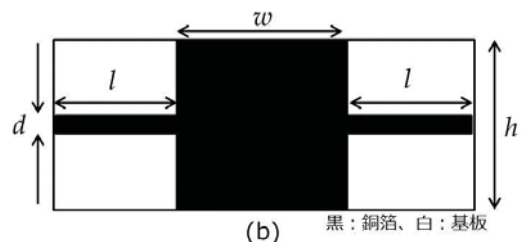
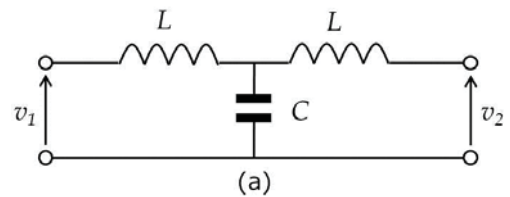


図3 (a)LPF回路 (1セル), (b)その分布定数回路での実現図





り式(4)に示すような出力信号が得られる。

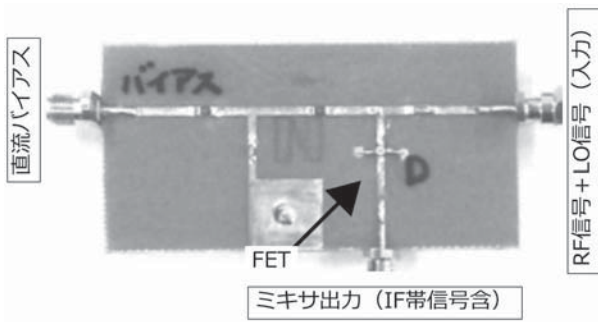


図5 設計したミキサ回路

### 5・3 LPF 回路

先に与えられた基板のパラメータを元に、先の図3(b)に示すような LPF 回路を設計した。設計した回路では、分布定数回路のパラメータをそれぞれ  $w=40\text{mm}$ ,  $d=0.5\text{mm}$ ,  $l=10\text{mm}$  とした。パラメータの中の  $h$  については、その値を 10, 20, 30, 40mm としたものを複数設計、試作し、それぞれの特性を検証する (後述)。

### 5・4 回路の全体像

これら全ての回路を接続した全体像を図6に示す。それぞれの回路は全て SMA レセプタクルを備えており、図のように簡単に接続することが可能である。併せて、各回路の特性も容易に測定でき、なおかつ回路を容易に追加できる (例えば LPF など)。

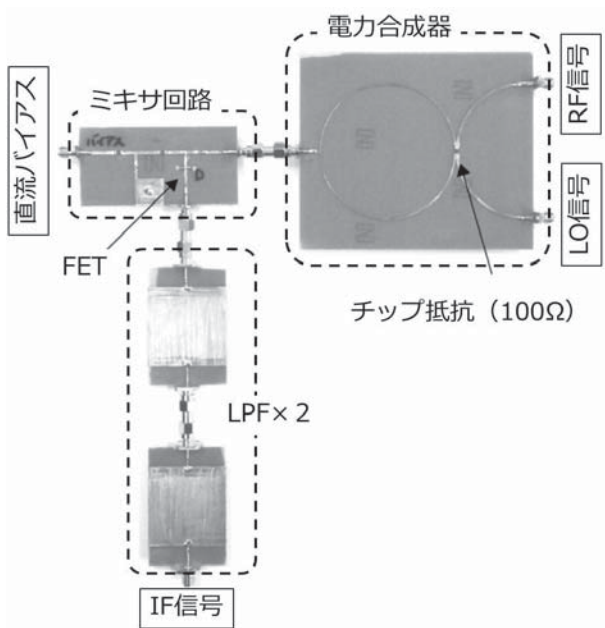


図6 設計・試作したRFフロントエンド全体像

## 6. 測定結果

### 6・1 電力合成器

初めに電力合成器の測定結果を示す。電力合成器の測定では、図7のように、信号発生器 (Signal Generator : SG, Rohde & Schwarz, SMJ100A) とスペクトルアナライザ (Spectrum Analyzer : SA, Rohde & Schwarz, FSV30) を測定しようとする端子に接続し、残りの端子に  $50\Omega$  終端を接続した上で測定を行った。測定した特性は  $|S_{12}|$ ,  $|S_{21}|$ ,  $|S_{13}|$  および  $|S_{23}|$  である。ただし  $|S_{xy}|$  は  $y$  端子から  $x$  端子への通過特性。図8に設計・試作した電力合成器の通過特性を示す。図8中の  $|S_{12}|$  および  $|S_{21}|$  より、440MHz での  $|S_{12}|$  および  $|S_{21}|$  特性はそれぞれ  $-43\text{dB}$  および  $-42\text{dB}$  であり、さらに  $420\sim 470\text{MHz}$  では  $-30\text{dB}$  減衰していることがわかる。同様に  $|S_{31}|$  および  $|S_{32}|$  を見ると、 $420\sim 470\text{MHz}$  では、それぞれ  $-5\text{dB}$  程度の減衰が生じていることがわかる。これらより、 $420\sim 470\text{MHz}$  では、先に示した電力合成器の動作が行えていることがわかる。

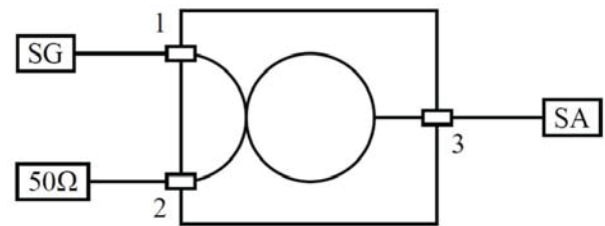


図7 電力合成器の測定系概観

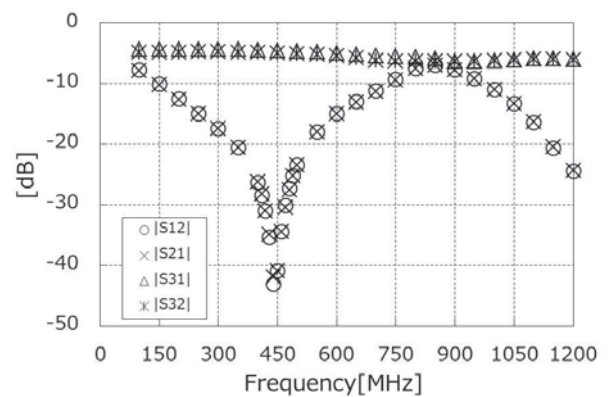


図8 電力合成器の通過特性

### 6・2 LPF 回路

次に設計・試作した LPF 回路特性の測定結果を示す。LPF 回路の測定では、前述の電力合成器と同様、LPF 回路の両端に、SG と SA を接続し、回路の周波数特性を測定した。また、LPF 回路の特性を検証するために、図3(b)における  $h$  mm を変化させたときの特性を測定した。図9(a)および(b)に 1, 2 セルの LPF 回路の周波

数特性をそれぞれ示す。図 9(a)および(b)より、1)h の値を増やすことで LPF 回路としての減衰力が増加する、2)セル数を増やすことで高周波帯での減衰力が増加する、ことがわかる。具体的には、1 セルと 2 セルでは、試作した LPF 回路のカットオフ周波数からのデシベル値の傾きが倍になることがわかる。これらより、C の値を大きく (h を大きく)、セル数を多くする方が、LPF 回路の減衰量を増加できる。

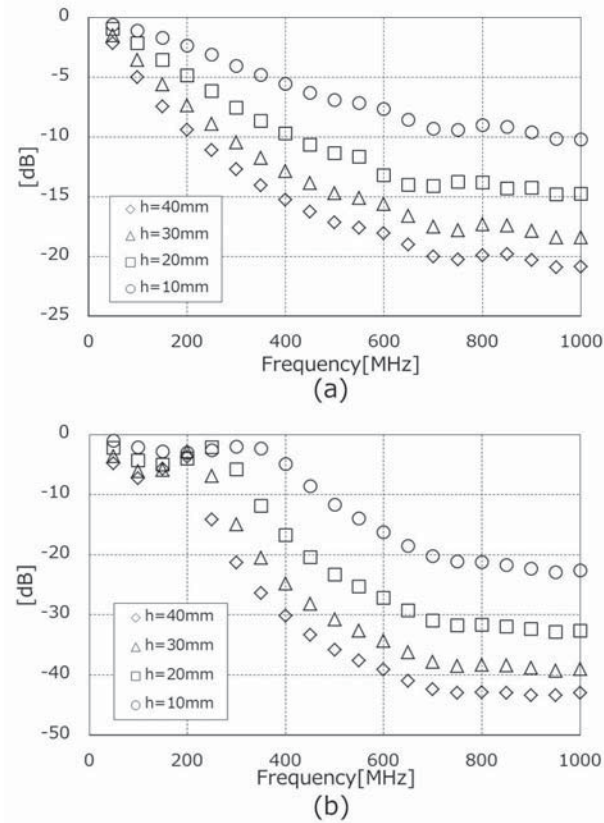


図 9 LPF 回路特性. (a), (b)はそれぞれ 1, 2 セル時の特性

### 6・3 RF-IF 変換

本節では、これまで個別に評価した回路を全て用いて RF 信号から IF 信号への周波数変換特性を測定・評価したので、これを示す。本節では、図 10 に示すように、電力合成器とミキサ回路出力の双方を観測することで、周波数変換の様子を測定する。本節での測定・評価では、LO 信号源として SG (Agilent E4432) を用いた。また波形観測では、オシロスコープ (Rohde & Schwarz, RTO1044) を用い、測定時のスパンを 1GHz とした。初めに、ミキサ回路通過後の信号の時間波形とスペクトルを図 11 に示す。図 11 より、ミキサ回路を通過することで新たな周波数成分が生成されていることがわかる。この信号を LPF 回路に通して得られた信号を図 12 に示す。図 12 より、430MHz 付近の信号成分

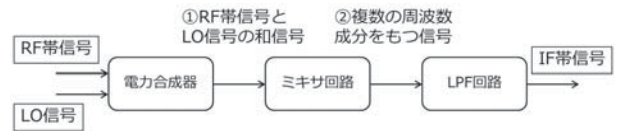


図 10 RF-IF 変換における測定回路

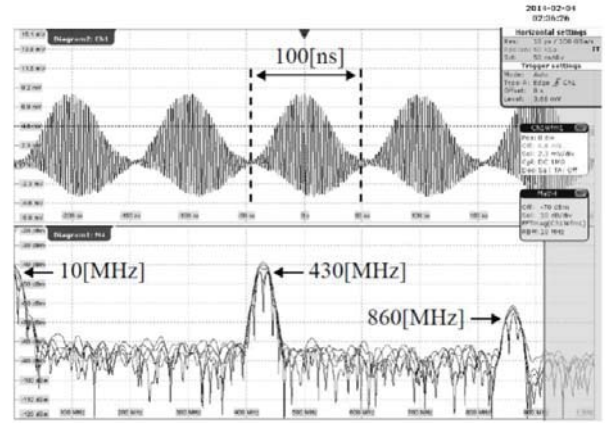


図 11 ミキサ回路通過信号の時間波形とスペクトル

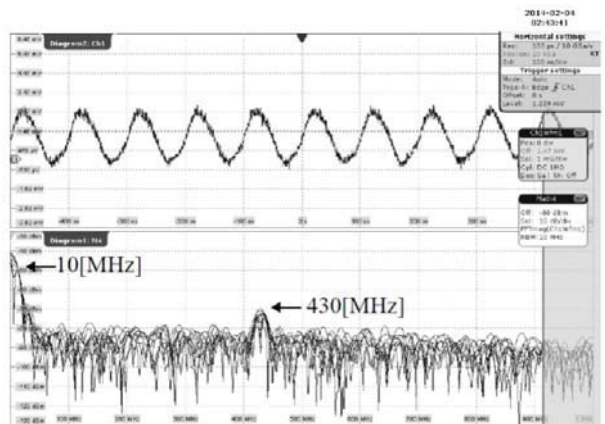


図 12 LPF 回路通過信号の時間波形とスペクトル

を減衰でき、このことで 10MHz の IF 信号が得られていることがわかる。これらより、RF 信号から IF 信号への周波数変換が実現できていることがわかる。

### 7. おわりに

本論文では、実験教材としての RF フロントエンド回路の検討に始まり、その回路構成、実装方法から設計・試作・評価を行った。これらより、簡易な方法で RF フロントエンドを実装でき、かつ回路の役割である RF-IF 変換が実現できることを示した。

今後は実験科目への導入を具体的に検討する予定である。しかしながら、今回示した回路は周波数変換を行うのみであり、いわゆる情報のやりとりを行うことはできない。情報のやりとりを行うためには、復調機

能の実装が必要である。Peripheral Interface Controller (PIC) などといったマイクロコンピュータや、Field Programmable Gate Array (FPGA) といったデジタルハードウェア回路を用いることで、復調機能の実装は可能である。このような書き換え可能なデバイスで実現される無線機は、ソフトウェア無線機<sup>7)</sup>と呼ばれる。明石高専電気情報工学科では、2年次でマイクロコンピュータなる科目を提供している。これらを踏まえ、本論文は、実験科目でのソフトウェア無線機的设计・試作の可能性を示唆するものであるともいえる。それ故に、この点も含めて実験科目への導入を検討する予定である。

### 参考文献

- 1) 成枝秀介：“デジタル無線通信技術理解のための学生実験用教材の開発”，明石高専研究紀要，第 55 号，13-17 項 (2013)。
- 2) トランジスタ技術編集部編，RF ワールド -手作りで学ぶ  $\pi/4$  シフト QPSK-，CQ 出版株式会社，no.23，(2013)。
- 3) <http://www.kure-nct.ac.jp/syllabus/index.html>
- 4) B. ラザヴィ (黒田忠広監訳)：「RF マイクロエレクトロニクス」，丸善 (2002)。
- 5) E. J. Wilkinson：“An *N*-Way Hybrid Power Divider”，IRE Trans. Microw. Theory. Techn., vol.8, pp.116-118 (1960)。
- 6) 森栄二：「マイクロウェーブ技術入門講座 基礎編」，CQ 出版株式会社 (2003)
- 7) 例えば，菅野秀明，小田切英昭，高呂賢治：“ソフトウェア無線 (Software Defined Radio) ”，沖テクニカルレビュー，第 204 号，vol.72, no.4 (2005)