

# BPSK 同期検波方式に関する教育用伝送実験系の構築

鈴木 博, 須山 聡, 寒河江 佑太

東京工業大学 大学院 理工学研究科 集積システム専攻

〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

e-mail : suzuki@radio.ss.titech.ac.jp

## 1 はじめに

大学の講義では、デジタル通信、信号処理、フーリエ変換、計算機アーキテクチャ等が教えられているが、それらの内容を総合的に理解し、体験してもらうための実験を企画した。これらの講義は学部3年生の前期にあるので、実験は後期に行う [1]。

本実験では、デジタル化された情報を伝送するための基礎として、デジタル変復調技術を学習する。送信デジタル情報を正弦搬送波に変調して、変調された信号を送信路に送出し、受信側ではそれを復調してデジタル情報を再生する。このようなデジタル変復調に使用する変調器や復調器は、従来、個別部品を用いてハードウェア的に製作されてきたが、近年では、デジタル信号処理プロセッサ (DSP) によりソフトウェア的に製作されることが多い。そのため、本実験ではデジタル変復調技術と DSP ソフトウェア技術の両方の基礎が習得できるように配慮している。

具体的には以下の4テーマに関する実験を行い、それらの基礎を習得する。

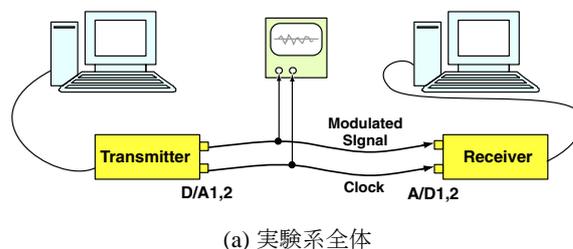
- DSP プログラミングの基礎
- デジタル変調技術の基礎
- デジタル復調技術の基礎
- 伝送品質の評価の基礎

## 2 構成

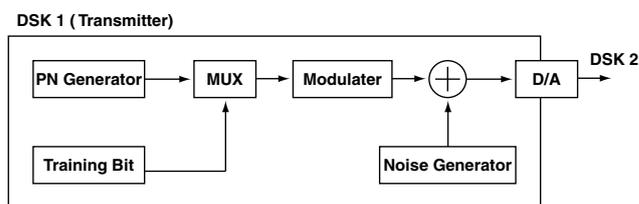
図1 (a) に実験系の全体を示す。ハードウェアおよびソフトウェア開発環境としては以下のものを用意する。

- TMS320C6711 を実装した DSP Starter Kit ボード (TMS320C6711 DSK) を2枚
- DSK にはドータ・カード (PCM3003) を接続
- 波形観測用のシンクロスコープ (2ch 入力)
- ソフトウェア開発用パソコン
- プログラム開発環境 (Code Composer Studio)

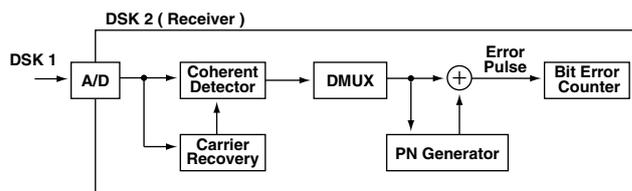
実験を効率よく行うためにテキストが用意されている。テキストには DSK の概略と DSK 制御のために最低限必



(a) 実験系全体



(b) 送信系ボードの機能



(c) 受信系ボードの機能

図1 実験系のイメージ

要なプログラムに関する知識が述べられている。また、伝送系のプログラムを短い実験期間中に作成するのは難しいので、サンプル・プログラムを提示している。テキストは常時ダウンロード可能である [2]。

図1 (b) に送信系ボードの機能ブロック・ダイアグラム、(c) に受信系ボードの機能ブロック・ダイアグラムを示す。デジタル変調方式には最も基礎的で観測が容易な2相位相シフト・キーイング (binary phase shift keying: BPSK) を用いる。通信路は加法的白色ガウス雑音 (additive white Gaussian noise: AWGN) 通信路である。伝送系はいくつかのソフトウェア・モジュールでインプリメントされている。モジュールには、PN 系列生成、ロール・オフ波形整形、アイ・パターン測定、ガウス雑音発生、Costas ループによる同期検波、タイミング再生、自己同期形誤

り率測定などが含まれている。これらは、デジタル通信およびデジタル信号処理における基本的な要素である [3, 4]。インプリメンテーションは第 2 世代携帯電話方式 (Personal Digital Cellular: PDC) の基礎研究で用いられた技術・ノウハウをベースにしている [5]-[7]。より高度で実用的なデジタル変調方式である QPSK への拡張およびフェージング電波伝搬路への拡張も容易であるが、本実験には含まれていない [8]。

### 3 実験内容

#### Step 1: ボード機能とプログラミング環境の習得

まず、ボードの基本機能および構造を理解し、プログラム開発環境に習熟する。そのため、最も簡単な正弦波を発生させるプログラムを以下の手順で作成し、その波形を観測する。

##### 1. 開発環境の使い方の習得 (Prog-2.1)

- プロジェクトの生成
- 波形生成用ソース・プログラム、および DSK のメモリ空間の情報を収めたリンカ・コマンド・ファイル (linker.cmd) の登録
- ビルド、ロード、デバッグの手順の習得
- グラフ表示機能による開発環境上での波形観測方法の習得

##### 2. アナログ出力のためのプログラム修正および追加

- DAC 出力用にプログラム修正 (Prog-2.2)
- アナログ回路 (DAC, ADC) からの割り込み処理ルーチンの作成 (interrupt.c)
- DSK, DAC, ADC の初期化プログラム (DSK.c), およびアナログ回路からの割り込みベクタテーブル (vectors.asm) の作成 [9]

##### 3. 正弦波アナログ波形の観測

正弦波をアナログ出力するための「波形生成プロジェクト」パネルを図 2 に示す。

#### Step 2: BPSK 変調技術

送信系ボード用の BPSK 変調プログラムを作成し、それを送信ボード上で動作させ、波形を観測する。

##### PN 系列の生成

2 値送信データの系列である送信符号系列を連続的に生成するために、擬似雑音 (pseud noise: PN) 系列を用いる。PN 系列には  $m$ -系列を用いる。  $K$  段の線形帰還シフトレジスタ (linear feedback shift register: LFSR) を用い、周期が最大 ( $2^K - 1$ ) となるように帰還する。0 以外の初期値を与えることにより PN 系列が生成される。

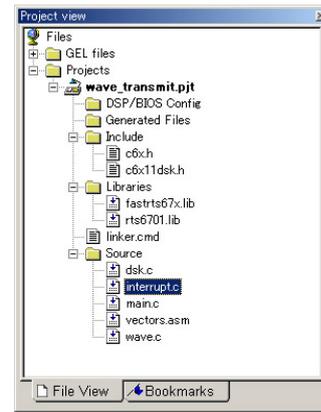


図 2 波形生成プロジェクト

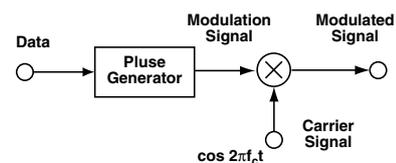


図 3 BPSK 変調器の構成

##### 送信符号系列のフレーム化

データ用 32 段 PN 系列 (64 ビット) およびプリアンブル用 16 段 PN 系列の一部 (16 ビット) を生成し、多重化によりフレーム化する (frame.c)。プリアンブルはフレーム同期用である。

##### BPSK 変調

図 3 に BPSK 変調器の構成を示す。フレーム化された  $\pm 1$  の送信符号系列をもとに、矩形パルス列またはガウス・パルス列を生成する (filter.c)。後者は帯域制限された波形と符号間干渉を観測するためのものである。ガウス・パルスは正規化されたパルス幅  $t_w$  で特徴付けられている (transmitter.c)。

送信符号系列を  $\{b_i\}$ 、ビットレートを  $1/T_b$ 、パルス波形を  $p(t)$ 、変調信号を  $e(t)$  とすると、BPSK 信号  $s(t)$  は

$$s(t) = e(t) \cos 2\pi f_c t, \quad e(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} b_i p(t - iT_b)$$

で与えられる。ただし、 $f_c$  は搬送波周波数である。BPSK 信号の諸元を表 1 に示す。

観測される変調信号波形のアイ・パターンを図 4、BPSK 信号波形を図 5 に示す。

#### Step 3: BPSK 復調技術

Costas ループによる BPSK 同期検波器を作成する。搬送波同期のためにラグ・リード・フィルタによる位相同期ループ (phase locked loop: PLL) を作成する。検波器を

表 1 BPSK の仕様

搬送波周波数 $f_c$	2 kHz
ビットレート $1/T_b$	1 kbit/s
変調パルス波形 $p(t)$	
・ 矩形パルス	パルス幅 $T_b$
・ ガウス・パルス	$t_w = 0.75, 1.0, 1.25$

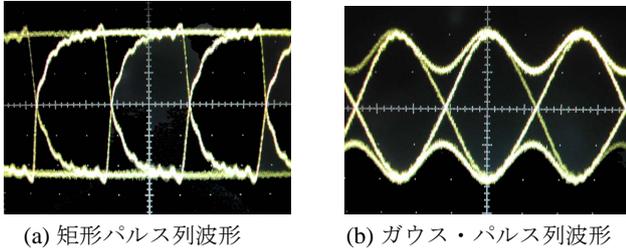


図 4 観測される変調信号波形

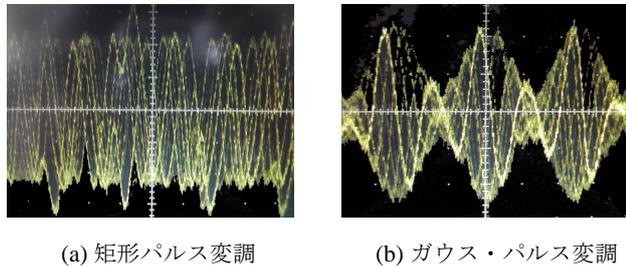


図 5 観測される BPSK 信号波形

受信系ボード上で動作させ、検波波形を確認する。

### BPSK 復調器の構成

BPSK 復調器の基本構成を図 6 に示す。復調器の前段に帯域通過フィルタ (band-pass filter: BPF) があり雑音成分を除去している。BPF 出力の信号対雑音比 (signal to noise ratio: SNR) を最大化するために BPF には整合フィルタを用いる。矩形パルスやガウス・パルスのように波形が時間的に偶対称なものは整合フィルタのインパルス応答は送信パルスと同じ波形である。

実験では、BPF 出力に対して同期検波 (coherent detection: CD) を行い送信符号系列を抽出する。同期検波器には搬送波再生、低域通過フィルタ (low-pass filter: LPF)、クロック再生および判定の機能がある。同期検波器は次のように動作する。

まず、BPSK 信号と雑音とが重畳された受信信号  $r(t)$  から、基準搬送波信号が抽出される。次に、受信信号と基準搬送波信号の積が計算され、搬送波周波数  $f_c$  の 2 倍高調波成分が LPF で取り除かれる。LPF の出力信号の正負を判定して送信符号系列  $\{\hat{b}_i\}$  が得られる。当然、 $\hat{b}_i$  には雑音による誤りが発生する。これは信号伝送品質の

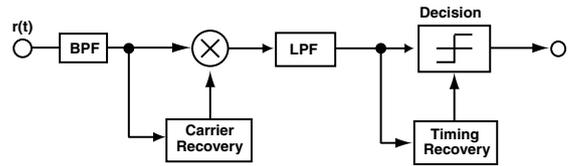


図 6 BPSK 復調器の基本構成

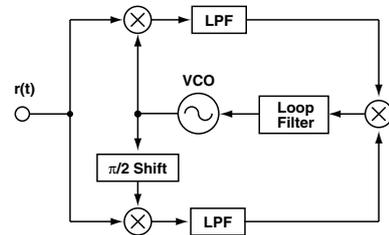


図 7 Costas ループ

劣化として扱われる。判定を行うタイミングはシンボルの真中  $t = iT_s + T_s/2$  である。

### Costas ループによる搬送波同期

上述したように同期検波では、受信信号から基準搬送波を再生する必要がある。ここでは搬送波再生に Costas ループを用いる。これも PLL の一種である。Costas ループの構成を図 7 に示す。ループ・フィルタには位相の変動に対する追従性がよいラグ・リード・フィルタを用いる (receiver.c)。

### クロック再生

クロック再生器はタイミング検出とデジタル PLL から構成される。タイミング信号を抽出するために、検波された波形の極性が変化する時点を検出する。この時点は雑音等で変動するので、PLL でタイミングを平均化する (timing.c)。

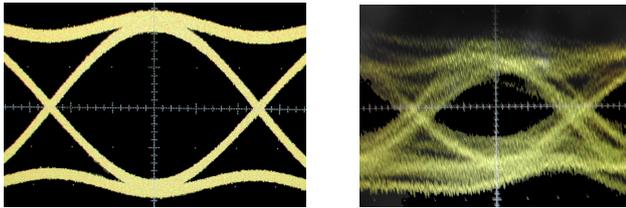
## Step 4: 伝送路の特徴と伝送特性評価

検波器の性能を測定するため、誤り率測定用プログラムを作成する。送信系ボードに AWGN モジュール、受信系ボードに誤りパルス発生モジュールを実装し、ビット誤り率 (bit error rate: BER) 特性を測定する。

### AWGN の生成

実際の送受信系では、伝送路あるいは受信増幅器においてスペクトルが一定の雑音が信号に重畳される。しかしながら、一般に微小な雑音を扱うのは難しいので、実験では AWGN を生成して送信信号に加算する AWGN モジュールを送信系ボードに実装する。ガウス雑音は、Box-Muller 法によりサンプリング時刻ごとに発生させる (noise.c)。

受信された信号の検波波形には、フィルタ等による歪



(a) 雑音がない場合 (b) 雑音を含む場合

図 8 アイ・パターン

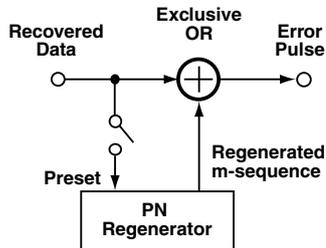


図 9 誤りカウント・パルス発生回路

およびガウス雑音が含まれている。そのようすをアイ・パターンで観測する。アイ・パターンは、観測したい波形を DAC から出力してオシロスコープの ch. 1 に入力し、観測したい波形に同期したクロック・パルスを ch. 2 に入力し、オシロスコープを ch. 2 に同期させることにより得られる。図 8 にアイ・パターンを示す。

#### フレーム同期とデータ系列の分離

相関法によってフレーム・タイミングを抽出し、 $\{\hat{b}_i\}$  からデータ系列  $\{\hat{d}_i\}$  とプリアンブル系列を分離する。

#### 判定誤りパルスの生成

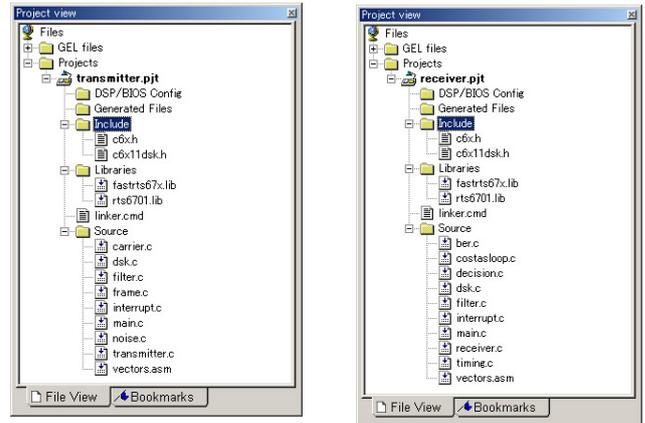
送信データ  $d_i$  と受信側再生データ  $\hat{d}_i$  から、誤りパルス  $\epsilon_i$  を次式により生成する。

$$\epsilon_i = \hat{d}_i \oplus d_i$$

$\epsilon_i$  の発生率を測定して BER を求める。ただし、 $\oplus$  は排他的論理和である。しかしながら、受信側で  $\{d_i\}$  は未知であるから、受信側で  $d_i$  のレプリカ  $\delta_i$  を生成する。そのために送信側と同じ LFSR を用意し、受信された任意の時刻の  $K$  ビット系列をその LFSR にプリセットし、それ以降は LFSR を自走させて PN 符号系列レプリカ  $\{\delta_i\}$  を得る。上式において  $d_i = \delta_i$  として誤りパルスを生成する。 $K$  ビットのプリセット信号に誤りが含まれていると誤り率は 0.5 になるので、プリセットをやり直す (ber.c)。

#### 総合

以上説明したすべてのプログラムをプロジェクトに登録したようすを図 10 に示す。



(a) 送信側プロジェクト (b) 受信側プロジェクト

図 10 BER を測定できる総合プロジェクト

## 4 むすび

本実験は 4 回で終了する。レポートから見て学生はほぼ内容を理解していると思われる。

ADC/DAC には、チャンネル数の都合上 DSK のものではなく ADC/DAC ドータ・カードのものを使用しているが、新しい DSK ボード (TMS320C6713 DSP Starter Kit) を用いれば DSK 上のものが使用可能となる。ドータ・カード・コネクタが開放されるので、ネットワーク制御ボード (NDK) を新たに搭載し、Ethernet を介してモデム伝送実験ができるように改造する予定である。

## 参考文献

- [1] 東京工業大学 工学部 情報工学科：  
<http://www.cs.titech.ac.jp/U/csu-home-j.html>
- [2] <http://www.radio.ss.titech.ac.jp/Lectures/main.htm>
- [3] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th ed., Prentice-Hall ; 鈴木 博, 府川和彦, 大鐘武雄, 高田潤一, 村田英一, 真田幸俊 (共訳), 適応フィルタ理論, 科学技術出版, 2000.
- [4] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed., McGraw-Hill ; 坂庭好一, 鈴木 博, 荒木純道, 酒井善則, 渋谷智治 (共訳), デジタルコミュニケーション, 3rd ed., 科学技術出版, 1999.
- [5] H. Suzuki, Y. Yamao and H. Kikuchi, "A single-chip MSK coherent demodulator for mobile radio transmission," *IEEE Trans. on Vehic. Technol.*, vol. VT-34, No. 4, pp. 157-168, Nov. 1985.
- [6] S. Saito and H. Suzuki, "Fast Carrier-Tracking Coherent Detection with Dual-Mode Carrier Recovery Circuit for Digital Land Mobile Radio Transmission," *IEEE Journal on Commun.*, vol. 7, no. 1, pp. 130-139, Jan. 1989.
- [7] 関 清三, デジタル変復調の基礎, オーム社, 2001 年.
- [8] <http://www.radio.ss.titech.ac.jp/labInfo.html> 「ベンチャービジネスラボ関連」
- [9] 瀬谷 啓介, DSP C プログラミング入門 — 組み込みシステムコーディングの基礎 —, 技術評論社, 2000 年.