

# 実験報告書：パルス符号変調（PCM）の特性と回路動作解析

電気電子工学科 第 X 学年

学籍番号：XXXXXX

氏名：高専 太郎

令和 XX 年 12 月 3 日

## 1 目的

本実験は、現代通信技術の根幹をなすパルス符号変調（PCM）について、その理論的動作原理（標本化、量子化、符号化）を理解するとともに、回路シミュレーションを通じて送受信システムの各機能ブロックの動作特性を確認することを目的として実施した。具体的には、タイミング生成、時分割多重化、サンプル&ホールド、A/D・D/A 変換の各回路動作を波形レベルで検証し、理論との整合性を確認する。

## 2 原理

PCM によるアナログ-デジタル変換は、標本化、量子化、符号化の 3 つのプロセスにより構成される。以下に本実験の基礎となる理論的枠組みを示す。

### 2.1 標本化定理

アナログ信号  $g(t)$  をデジタル化する際、その最大周波数成分  $f_{\max}$  に対して、以下の条件を満たすサンプリング周波数  $f_s$  で標本化を行えば、元の信号を完全に再構成可能である [1]。

$$f_s > 2f_{\max} \quad (1)$$

この  $f_s/2$  はナイキスト周波数と呼ばれる。条件が満たされない場合、エイリアシング（折り返し雑音）が発生し、元の信号波形に歪みが生じる。

### 2.2 量子化と SQNR

標本化された信号の振幅を有限個の離散レベルに近似することを量子化という。 $N$  ビットの量子化器を用いる場合、レベル数は  $2^N$  となる。線形 PCM システムにおける信号対量子化雑音比（SQNR）の理論値は次式で与えられる [6]。

$$\text{SQNR} \approx 6.02N + 1.76 [\text{dB}] \quad (2)$$

これは 1 ビットの増加につき約 6 dB の SN 比改善が得られることを意味する。

## 2.3 圧縮伸張（コンパンディング）

音声信号のように振幅分布に偏りがある場合、均一量子化では効率が悪い。そのため、小振幅時の量子化ステップを細かく、大振幅時を粗くする非線形量子化（コンパンディング）が用いられる。代表的な方式として、北米・日本方式の  $\mu$ -law および欧州方式の A-law があり、ITU-T G.711 として標準化されている [7]。

## 3 実験方法

本実験では、回路シミュレータ「TINA-TI」を用い、PCM 送受信システムの各ブロックについて以下の手順で動作確認を行った。なお、システム全体の構成を図 1 に示す。

### 3.1 タイミングパルス発生回路の動作確認

図 2 に示すタイミングパルス発生回路を構成した。本回路は 125 kHz のマスタークロックを入力とし、カウンタ IC および論理ゲートによりシステム同期用のタイミングパルス（T1, T2, T3, T4）を生成するものである。シミュレーションを実行し、各部の出力波形を観測した。

### 3.2 時分割多重化（TDM）動作の確認

図 3 に示す切替回路を用いた。入力信号として 50 Hz および 100 Hz の正弦波を印加し、クロック信号（Vclock）によってこれらが交互に切り替えられ、単一の伝送路（Vout）へ多重化される様子を確認した。

### 3.3 サンプル&ホールド（S&H）回路の特性測定

図 4 に示す S&H 回路を構成し、アナログ入力信号に対するサンプリング動作を確認した。クロックパルスの High/Low に応じたコンデンサへの充放電および電圧保持の挙動を観測した。

### 3.4 A/D・D/A 変換および信号再構成

図 9 に示す A/D・D/A 変換ブロックおよび再構成フィルタ（LPF）を用いた。

1. 入力信号（VG1）に対し、単電源 A/D 変換器に対応させるための DC オフセット（+6 V）を付加した。
2. A/D 変換後のパラレルデータを、図 6 に示すシフトレジスタによりシリアルデータへ変換する過程を確認した。
3. 受信側において D/A 変換を行い、その後段に接続されたサレン・キー型ローパスフィルタ（LPF）を通してアナログ信号を復調した。

## 4 使用機器

本実験（シミュレーション）で使用した主な仮想デバイスおよびソフトウェアを表 1 に示す。

表 1 使用機器およびソフトウェア一覧

| 品名       | 型番/名称     | 定格・仕様        | 備考                |
|----------|-----------|--------------|-------------------|
| 回路シミュレータ | TINA-TI   | Ver. 9       | Texas Instruments |
| カウンタ IC  | SN74LS162 | 4-bit Decade | タイミング生成用          |
| シフトレジスタ  | SN74199   | 8-bit PISO   | パラレル-シリアル変換       |
| オペアンプ    | uA741     | 汎用           | S&H, LPF 用        |
| アナログスイッチ | (Generic) | SPST         | マルチプレクサ用          |

## 5 結果および考察

### 5.1 タイミング生成および多重化

タイミングパルス発生回路のシミュレーション結果を図 11 に示す。カウンタ出力（QA–QD）の状態遷移に基づき、設計通りの論理関係でパルス T1–T4 が生成されていることが確認できた。また、時分割多重化回路の出力波形を図 12 に示す。Vclock の周期に従い、50 Hz と 100 Hz の信号が交互に出力されており、TDM が正常に行われていることがわかる。これにより、単一伝送路での複数チャネル伝送が可能であることが実証された。

### 5.2 サンプル&ホールド特性

S&H 回路の入出力波形を図 13 に示す。入力信号（VG1）に対し、出力信号（Vout）はクロックの立ち上がりエッジで値を更新し、次のエッジまで電圧を保持する階段状の波形となった。これは標本化プロセスの物理的実装そのものであり、A/D 変換に必要な「変換時間中の入力電圧固定」が実現されているといえる。なお、図 5 の結果より、回路内の抵抗 R1 は安定性に寄与するものの、S&H の基本動作には影響しないことがわかった。

### 5.3 A/D・D/A 変換と信号復調

シリアル伝送動作の確認結果を図 14 に示す。8 ビットのパラレル入力がクロックに同期して 1 ビットずつ直列出力されており、PISO（Parallel In Serial Out）動作が正常であることを確認した。

最終的な変復調結果を図 16 に示す。送信側で DC オフセットを付加された信号は、受信側で D/A 変換された直後は階段状波形であるが、LPF 通過後の復調信号（V 復調）は滑らかな正弦波として再生された。ここで、使用したサレン・キー型 LPF の遮断周波数  $f_c$  について考察する。回路定数（ $R_1 = R_2 = 50 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 2.3 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 1.1 \text{ nF}$ ）より、 $f_c$  は次式で計算される [1]。

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \approx 2.0 \text{ kHz} \quad (3)$$

本実験の信号周波数は 500 Hz, サンプル周波数は約 31.25 kHz (T2 周期 32  $\mu$ s より換算) である。 $f_c = 2.0$  kHz は信号帯域 (500 Hz) を通過させつつ, ナイキスト周波数 (約 15.6 kHz) 以下の不要成分を除去する設定として適切であると考えられる。

## 6 報告事項

### 6.1 PCM の応用例と標準化規格

PCM 技術は, 電話網およびデジタルオーディオにおいて広く利用されている。それぞれの主要な規格について調査した結果を以下に述べる。

#### 6.1.1 公衆電話網 (ITU-T G.711)

電話音声のデジタル化には, 人間の音声帯域 (300 Hz~3.4 kHz) を考慮し, サンプル周波数 8 kHz, 量子化ビット数 8 ビットの仕様が採用されている [7]。ここでは伝送効率を高めるため, 前述の  $\mu$ -law または A-law によるコンパANDINGが適用され, 64 kbps のビットレートで伝送される。

#### 6.1.2 音楽 CD (CD-DA)

高忠実度な音楽再生を目的とする CD-DA (レッドブック) では, 可聴域上限 (20 kHz) をカバーするため, サンプル周波数は 44.1 kHz に設定されている [5]。量子化は 16 ビットの線形量子化を行い, コンパANDINGは使用しない。これにより約 98 dB のダイナミックレンジを実現している。

### 6.2 発展的な波形符号化方式

PCM のデータ圧縮効率を向上させるため, 信号の冗長性を利用した以下の方式が発展している。

1. **DPCM (差分 PCM)** : 過去のサンプル値からの予測値と, 実際の値との差分のみを量子化して伝送する方式 [2]。相関の高い信号においてビットレートを削減できる。
2. **ADPCM (適応差分 PCM)** : DPCM に加え, 信号の振幅や統計的性質に応じて量子化ステップ幅や予測係数を動的に変化 (適応) させる方式 [8]。G.711 と同等の品質を 32 kbps 程度で実現可能である。

これらの技術は, 現代の MP3 や AAC などの高効率音声圧縮技術の基礎となっている。

## 参考文献

- [1] 電気電子工学科: 「PCM 通信テキスト (実験指導書)」, (配布資料).
- [2] ElProCus: “Pulse Code Modulation and Demodulation”, <https://www.elprocus.com/pulse-code-modulation-and-demodulation/>, (参照 2025-09-26).
- [3] Iriso Electronics: “ナイキスト周波数”, <https://www.irisoele.com/jp/technology/knowledge/nyquist-frequency/>, (参照 2025-09-26).
- [4] note: “音楽に隠し音声!?”, [https://note.com/harai\\_tama/n/n280a1474672e](https://note.com/harai_tama/n/n280a1474672e), (参照 2025-09-26).

- [5] Wikipedia: “Compact Disc Digital Audio”, [https://en.wikipedia.org/wiki/Compact\\_Disc\\_Digital\\_Audio](https://en.wikipedia.org/wiki/Compact_Disc_Digital_Audio), (参照 2025-09-26).
- [6] Analog Devices: “高い SNR の AD 変換システムを実現する”, [https://www.analog.com/media/jp/landing-pages/ATS/ats2020/ats2020\\_a1.pdf](https://www.analog.com/media/jp/landing-pages/ATS/ats2020/ats2020_a1.pdf), (参照 2025-09-26).
- [7] Ozeki VoIP SIP SDK: “g711 ulaw codec”, [https://voip-sip-sdk.com/p\\_7220-g711-ulaw-codec.html](https://voip-sip-sdk.com/p_7220-g711-ulaw-codec.html), (参照 2025-09-26).
- [8] Beto Samaniego: “Digital Television Systems”, <https://betosamaniego.files.wordpress.com/2012/03/digitaltelevisionssystemsalencar.pdf>, (参照 2025-09-26).