

後期実験 9

学籍番号: 03240470

氏名: 井手陸大

December 7, 2024

1 課題 1

1.1 観測場所

観測は 2 号館 12 階の教室で実施した。

1.2 受信パラメータ

FM ラジオ (Tokyo FM 80.0MHz) および地上デジタル (26ch, NHK-E, 548MHz-554MHz) の信号を以下の設定で受信した。

FM ラジオ (Tokyo FM 80.0MHz)

- デバイス名: 192.168.10.3 または 192.168.10.11
- IQ レート: 400kHz
- キャリア周波数: 80MHz
- アクティブアンテナ: RX2
- サンプル数: 100,000

地上デジタル (26ch, NHK-E, 548MHz-554MHz)

- デバイス名: 192.168.10.3 または 192.168.10.11
- IQ レート: 10MHz
- キャリア周波数: 551MHz
- アクティブアンテナ: RX2
- サンプル数: 200,000

1.3 観測結果

観測されたスペクトラムのスクリーンキャプチャを以下に示す。

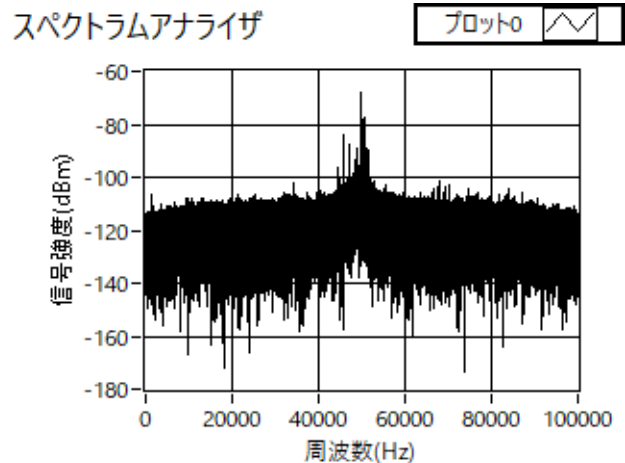


Figure 1: FM ラジオのスペクトラム

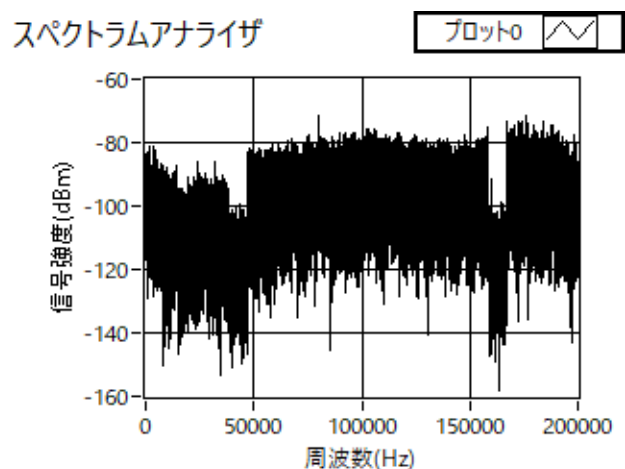


Figure 2: 地上デジタル (NHK) のスペクトラム

1.4 考察

FM ラジオの観測結果について、Figure 1 に示されるスペクトラムは、受信した IQ 信号を FFT 処理した結果である。観測周波数帯の中心周波数は 80MHz であるが、スペクトラムアナライザ上ではキャリア周波数が USRP によって除去され、ベースバンド表示 (中心周波数が 0Hz) の形になっている。従って、図の中心を基準として、スペクトル全体を 80MHz に平行移動すると実際の受信信号のスペクトルに対応する。ナイキスト周波数と標本化定理に基づき、400kHz の IQ レートでは片側 200kHz までの情報を正確に記録できる。この設定は FM ラジオの帯域幅 (約 200kHz) を十分にカバーしている。

一方、地上デジタル(NHK)の観測結果について、Figure 2 に示されるスペクトラムは 548MHz から 554MHz までの信号をキャリア周波数 551MHz を中心として受信したものである。地上デジタル放送は 6MHz の帯域幅を持つ OFDM 方式であり、Figure 2 に見られるように全体的に平坦なスペクトル形状を示している。IQ レート 10MHz は、地上デジタル放送の帯域幅 6MHz をカバーするために必要な最低限のレート(ナイキスト周波数: 6MHz)を十分に満たしており、受信データが損失なく取得できている。

どちらの観測結果も、キャリア周波数が取り除かれているため、スペクトラムアナライザ上ではベースバンド信号として表示されている。また、Figure 1 では中心付近にピークが見られるが、これは受信信号の低周波成分が大きく寄与していることを示している。FM ラジオの音声信号や地上デジタルの信号がキャリア周波数を中心に構成されることを考慮すると、スペクトラムアナライザ上の表示形状は妥当であると考えられる。

1.5 フーリエ変換の特性を用いた考察

実際に観測されている波形は、USRP によってキャリア周波数 f_c が取り除かれた後の信号である。このため、スペクトルアナライザで表示される信号は、ベースバンド信号のスペクトルであり、その中心周波数は 0Hz として描かれている。フーリエ変換の周波数シフト性に基づくと、観測スペクトルをキャリア周波数 f_c だけ平行移動することで、実際に受信した信号 $x(t)$ のスペクトルを正確に再現できる。フーリエ変換における周波数シフト性は次式で表される:

$$\mathcal{F}\{x(t)e^{-j2\pi f_c t}\}(f) = X(f + f_c)$$

これにより、受信信号の特性を正確に分析可能である。

課題 2: FM 送受信機の実装

考察事項

FM 変復調器の原理を数式とブロックダイアグラムを用いて説明する。

FM 変調の原理

FM 変調は、音声信号 $m(t)$ を用いて搬送波の周波数を変化させる方式である。送信信号は以下で表される:

$$s(t) = A \cos \left(2\pi f_c t + 2\pi k \int m(t) dt \right)$$

ここで、

- f_c : 搬送波の中心周波数
- k : 周波数変調指数
- $\int m(t) dt$: 音声信号の積分

USRP では、複素 IQ 信号として搬送されるため、以下の形に変換される:

$$s_{IQ}(t) = e^{j(2\pi f_c t + 2\pi k \int m(t) dt)}$$

FM 復調の原理

FM 復調では、受信信号 $s(t)$ から瞬間周波数を抽出する。理論上は以下の操作を行う:

$$f_{\text{inst}}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \arg(s_{IQ}(t))$$

これにより、音声信号 $m(t)$ を復元する。

ブロックダイアグラムとの対応

以下に、FM 送受信機のブロックダイアグラムを示す。

受信についての考察

- IQ rate の限界: 理論上、標本化定理より帯域幅の 2 倍まで下げられる。ただし、ノイズやフィルタリングの影響を考慮する必要がある。
- 音質と IQ rate の関係: IQ rate が低いと、帯域幅が狭くなり高周波成分が失われるため、音質が劣化する。

送信についての考察

- 適切な k の値: 実験では $k \approx 10^{-6}$ 程度が適切だった。この値は音声信号の振幅と FM 変調器の設計による。
- リサンプリングと積分の順序: リサンプリングを積分前に行うことで、高精度な積分が可能になる。

FM の音質が良い理由

FM では振幅成分が一定で、ノイズが加わっても信号の周波数変化に影響を与えにくい。また、FM は広い帯域幅を利用できるため、高周波成分を含む信号を忠実に再現できる。

課題 3: FSK 変復調器の実装

考察

FSK 変復調器の原理を数式とブロックダイアグラムを用いて説明する。

FSK 変調の原理

FSK 変調は、デジタルデータを用いて搬送波の周波数を変化させる方式である。送信信号は以下で表される:

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & \text{デジタルデータが 1 の場合} \\ A \cos(2\pi f_0 t) & \text{デジタルデータが 0 の場合} \end{cases}$$

ここで、

- f_1 : デジタルデータが 1 の場合の周波数
- f_0 : デジタルデータが 0 の場合の周波数

FSK 復調の原理

FSK 復調では、受信信号 $s(t)$ から瞬時周波数を抽出し、デジタルデータを復元する。理論上は以下の操作を行う：

$$d(t) = \begin{cases} 1 & \text{瞬時周波数が } f_1 \text{ に近い場合} \\ 0 & \text{瞬時周波数が } f_0 \text{ に近い場合} \end{cases}$$

ブロックダイアグラムとの対応

以下に、FSK 送受信機のブロックダイアグラムを示す。

送信機

- For ループ内の配列の i 番目の要素をそれぞれ複製する回数、 n を決める：symbol rate は 1000
- 生成されたデータを周波数変調する：デジタルデータを用いて搬送波の周波数を変化させる。

受信機

- 周波数変調されたデータを復調して、波形グラフに表示する：デジタルデータなので、波形グラフの y 軸を「0 or 1」になるようにする。
- 「1」を表すものは 6.28 とかではなく 1.0 になるように：コンパレータで判定するのがベター。