

実習 B 通信システム設計演習

三軒家 佑將

1026-26-5817

1 目的

アナログ無線受信機の 3 方式、すなわち、ストレート受信機、スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機、同期検波受信機について、National Instruments 社のシミュレーションソフト LabVIEW を用いて受信回路を作成し、特性を解析する。

2 方法

2.1 LabVIEW の使い方

教科書の例に習い、OOK 信号を出力する回路を作成した。

2.2 用いる素子の特性解析

2.2.1 LPF

与えられたファイル (whistler.vi) とホイッスラー音声ファイル (whistler.wav) を用いて、LPF の動作を確認した。

また、与えられたファイル (chirp.vi) を用いて、LPF による劣化量 ϵ が最小になるようなカットオフ周波数を数値的に求めた。ここで、劣化量 ϵ は、

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_{org} - S_{rec})^2}{N \overline{S_{org}^2}}}$$

によって定めた。

2.2.2 Amp

Amp ブロックに Sin 波を入力し、出力波形を観察した。また、Dist ブロックにより歪み率を測定して、増幅度による波形劣化の様子を調べた。

2.3 アナログ信号受信時の特性解析

2.3.1 アナログ送信波の構成

異なる搬送波周波数の 3 つの AM 変調波と、適当な最大雑音振幅をもつガウス雑音を足し合わせ、アナログ送信波を構成した。3 つの AM 変調波のパラメーターは以下の通りとした。

所望波

搬送波周波数 1400kHz

変調周波数 1000Hz

変調度 40%

妨害波 1

搬送波周波数 1350kHz

変調周波数 1100Hz

変調度 40%

妨害波 2

搬送波周波数 1450kHz

変調周波数 900Hz

変調度 40%

また、この送信波回路と BPF、Amp を用いて、高周波増幅を行ない、BPF の Q 値によって、妨害波の抑圧度 α がどう変化するかを調べた。ここで、妨害度 α は、

$$\alpha = P_D - \max(P_{I1}, P_{I2}) \quad (1)$$

によって定めた。ただし、 P_D は所望波の出力 (dB) を、 P_{I1}, P_{I2} はそれぞれ妨害波 1,2 の出力 (dB) を表している。

2.3.2 受信機の作成

教科書を参考に、ストレート受信機、スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機、同期検波受信機の回路を作成した。

2.3.3 受信機の実験

ストレート受信機とスーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機にて、信号の受信を行い、さらに Dist ブロックを用いて各受信機のひずみ率を計算した。

ただし、受信時のパラメーターは以下のようである。

ストレート受信機

LPF のカットオフ周波数 1000Hz

BPF の Q 100

BPF の中心周波数 1400kHz

スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機

1 段目の BPF の Q 100

1 段目の BPF の中心周波数 1400kHz

2 段目の BPF の Q 100

2 段目の BPF の中心周波数 (中間周波数) 450kHz

LPF のカットオフ周波数 1500Hz

また、ストレート受信機の特性測定時のみ、誤って送信波に含まれるホワイトノイズの最大振幅を 1 とした (スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機の場合は最大振幅 0 とした)。

2.4 デジタル信号受信時の特性解析

2.4.1 デジタル送信波の構成

3 つの OOK 信号と雑音からなる送信機を構成した。このとき、3 つの OOK 信号の搬送波周波数はそれぞれ 1410kHz、1400kHz、1390kHz とし、矩形波の周波数はどれも 50kHz とした。

2.4.2 ストレート受信機の特性

2.4.3 スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機の特性

2.4.4 同期検波受信機の特性

3 結果

3.1 LabVIEW の使い方

図 1 のように回路を作成した。

3.2 用いる素子の特性解析

3.2.1 LPF

LPF を用いてホイッスラー音声ファイルを加工したときの、音声波形と周波数スペクトルをグラフにしたのが図 2 である。また、LPF を用いて雑音の入った疑似ホイッスラー音声ファイルを加工したときの、音声波形と周波数スペクトルをグラフにしたのが図 3 である。

これらの図において、左の 2 つの図が音声波形であり、右の 2 つの図が周波数スペクトルである。また、上の 2 つの図が LPF の加工の前の音声についてのグラフであり、下の 2 つの図が LPF による加工の後の音声についてのグラフである。

図 2 の周波数スペクトルを表す 2 つの図から、LPF によりカットオフ周波数 (6000Hz) より大きい周波数成分がカットされている事がわかる。

劣化量 ϵ が最小になるカットオフ周波数 f_c を探索したところ、図 3 のとおり、 $f_c = 9000(\text{Hz})$ 周辺にて劣化量が最小 ($\epsilon = 5.75$) となった。

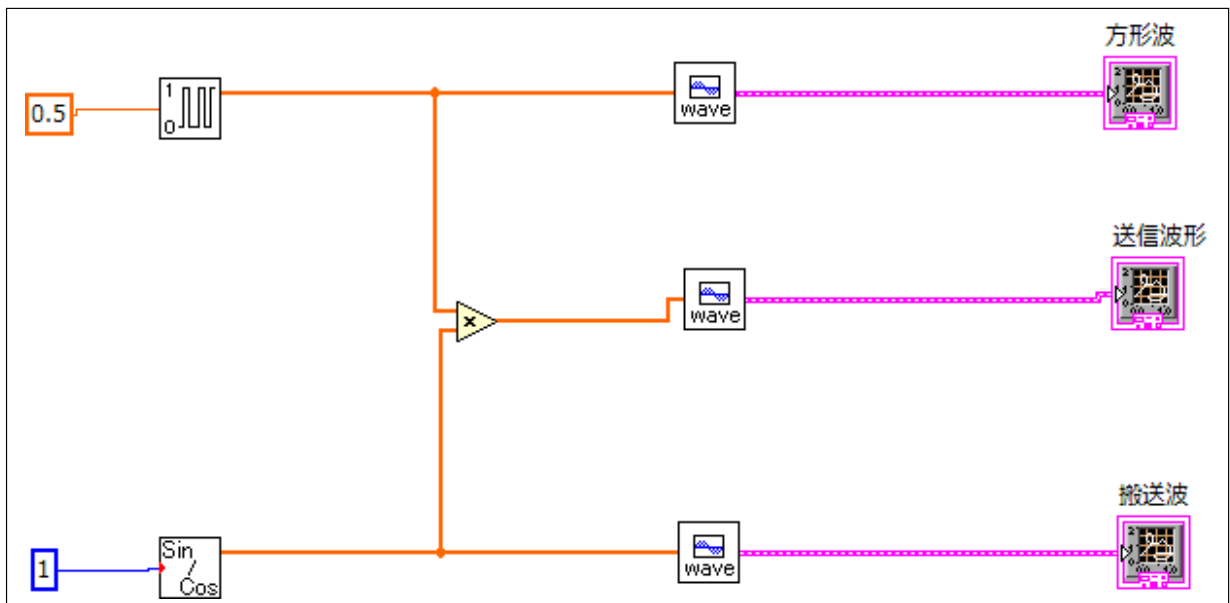


図1 OOK 信号出力回路

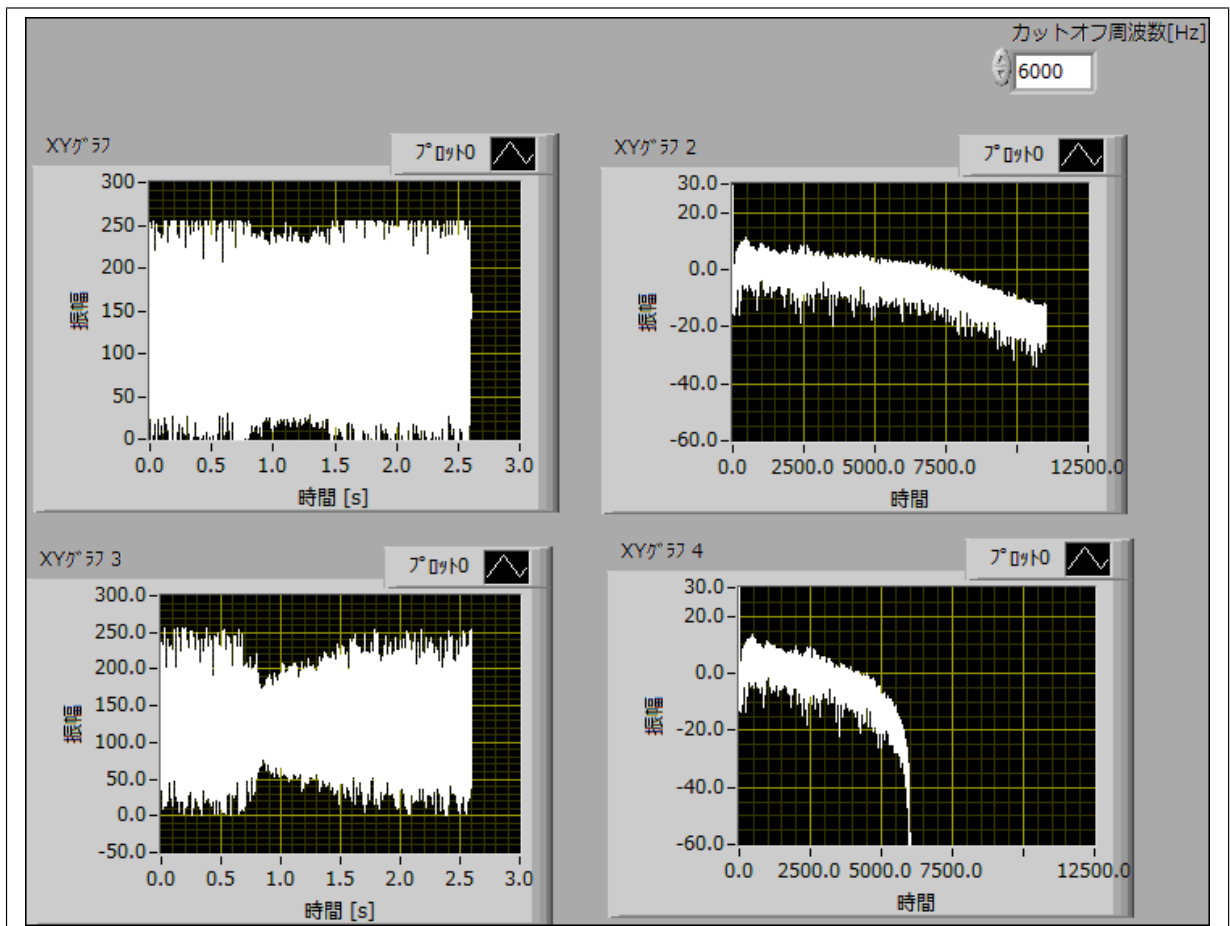


図2 LPF の動作

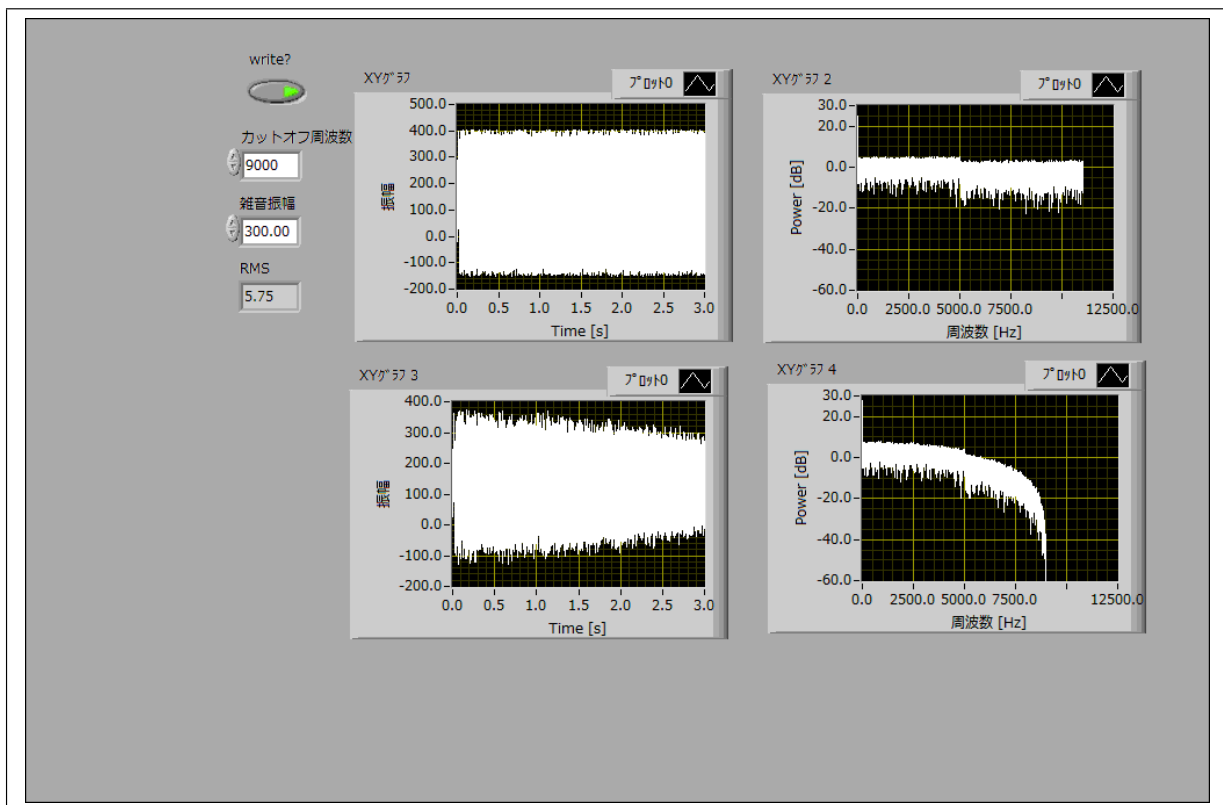


図3 LPFによる劣化

3.2.2 Amp

実験のミスにより、データが保存されていなかった。

3.3 アナログ信号受信時の特性解析

3.3.1 アナログ送信波の構成

Q 値	Pd(dB)	PI1(dB)	PI2(dB)	α (dB)
10	0.054	0.027	0.027	0.027
50	0.116	0	0	0.116
100	0.116	0	0	0.116

表1 Q 値ごとの妨害度

図4が、作成した回路である。この回路図の前段がアナログ送信機の回路であり、後段が高周波増幅回路である。

また、表1は、BPFのQ値と、その時の妨害波の抑圧度である。これを見ると、Q値が大きく

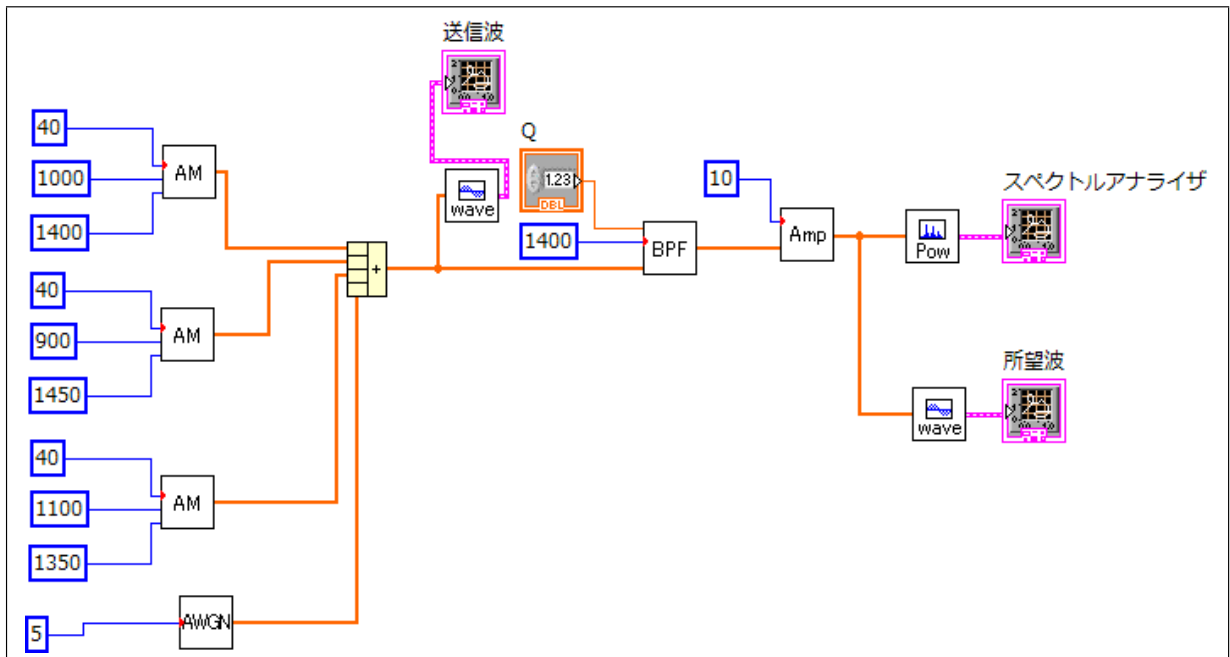


図4 アナログ送信機と高周波増幅回路

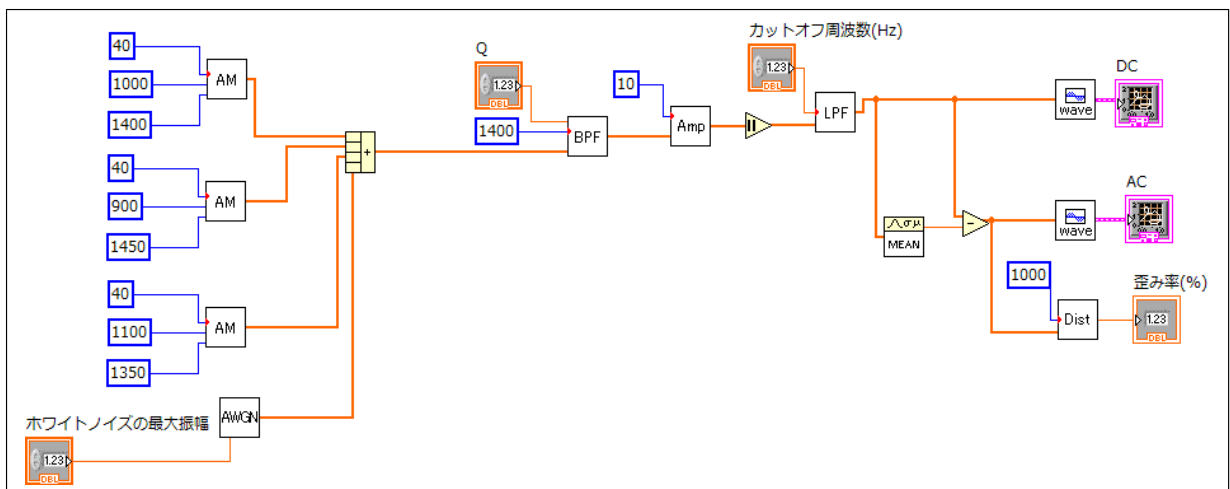


図5 ストレート受信機

なると抑圧度が大きくなる事がわかる。

3.3.2 受信機の作成

図5、図6、図7がそれぞれ、ストレート受信機、スーパーヘテロダイン2乗検波受信機、同期検波受信機の回路図である。

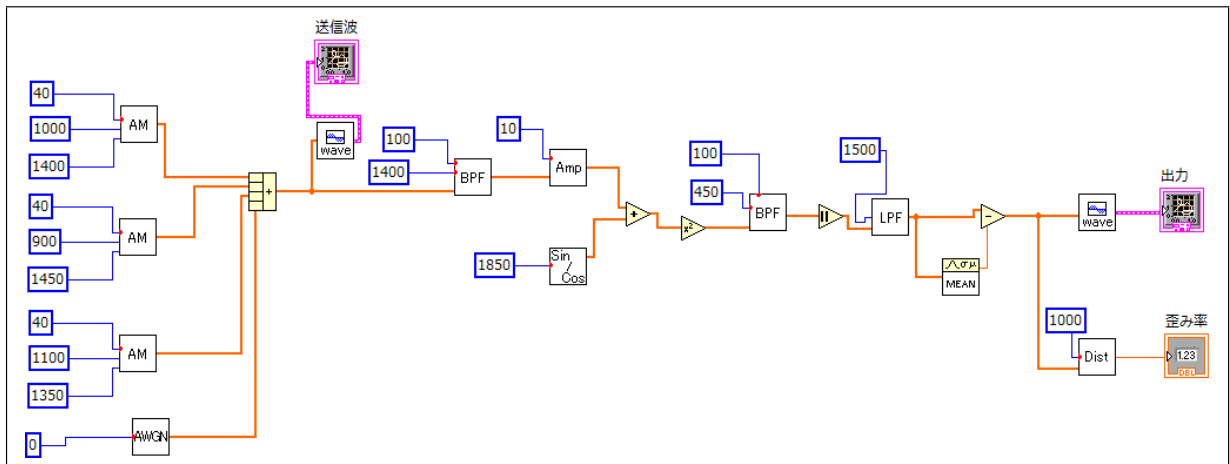


図 6 スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機

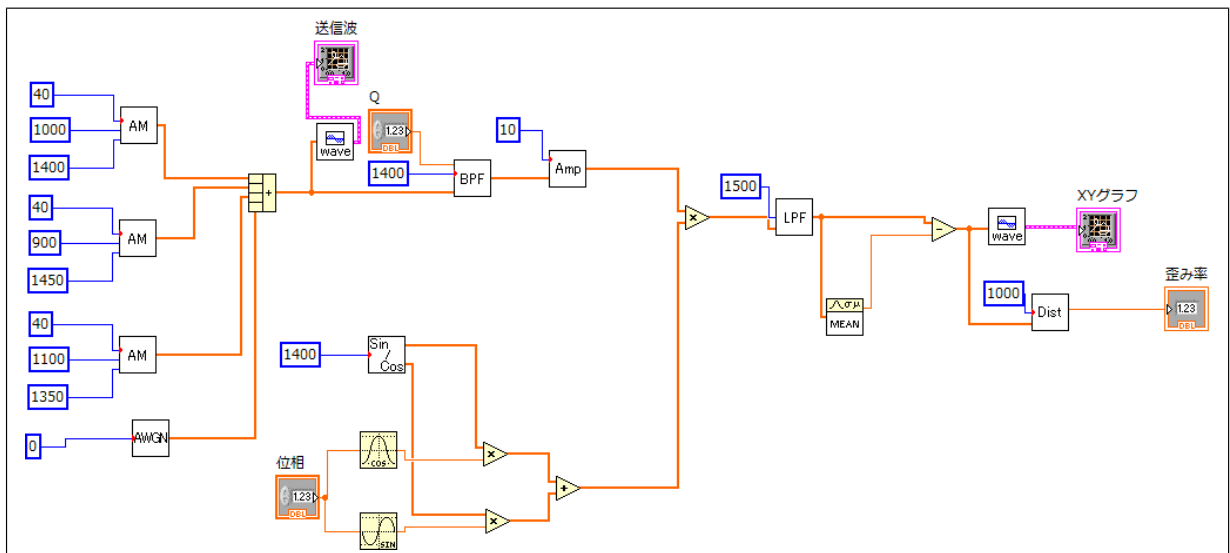


図 7 同期検波受信機

3.3.3 受信機の特徴

図 8、図 9 がそれぞれ、ストレート受信機、スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機によって復号された信号の波形である。また、歪み率はそれぞれ、0.087% と 0.356% となった。

3.4 デジタル信号受信時の特性解析

3.4.1 デジタル送信波の構成

図 10 が、OOK 信号送信機の回路である。また、この送信機の送信信号のパワースペクトルは図 11 のようになった。

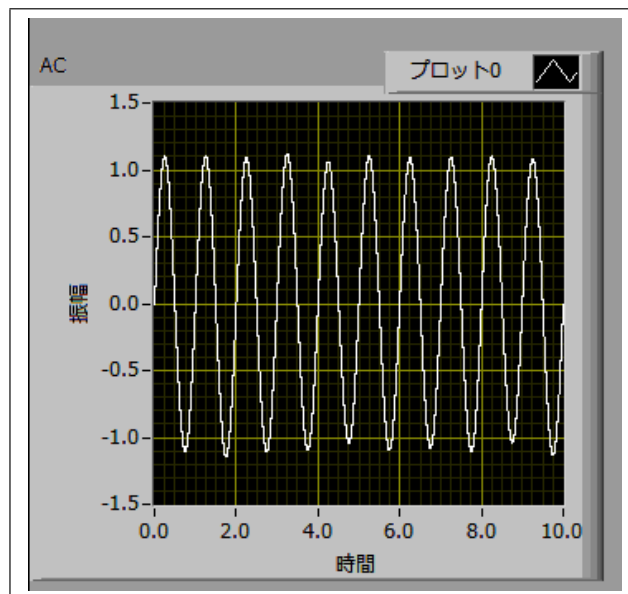


図 8 ストレート受信機の受信波形

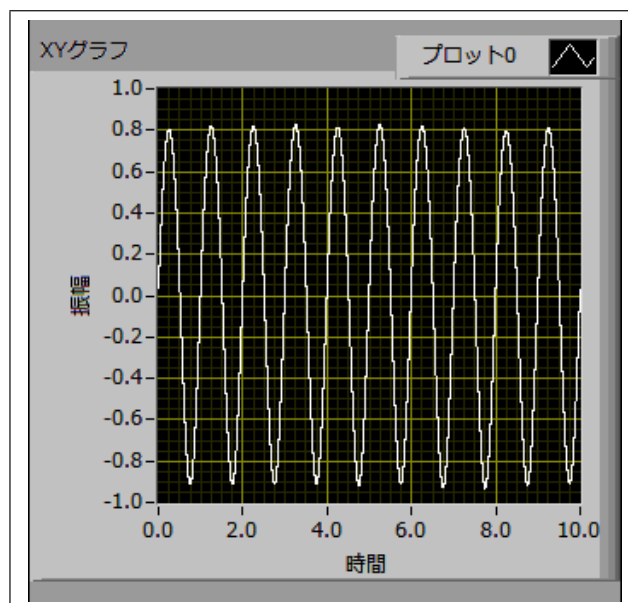


図 9 スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機の受信波形

4 課題・考察

4.1 課題 5

式 (1) の、抑圧度としての妥当性を検討する。

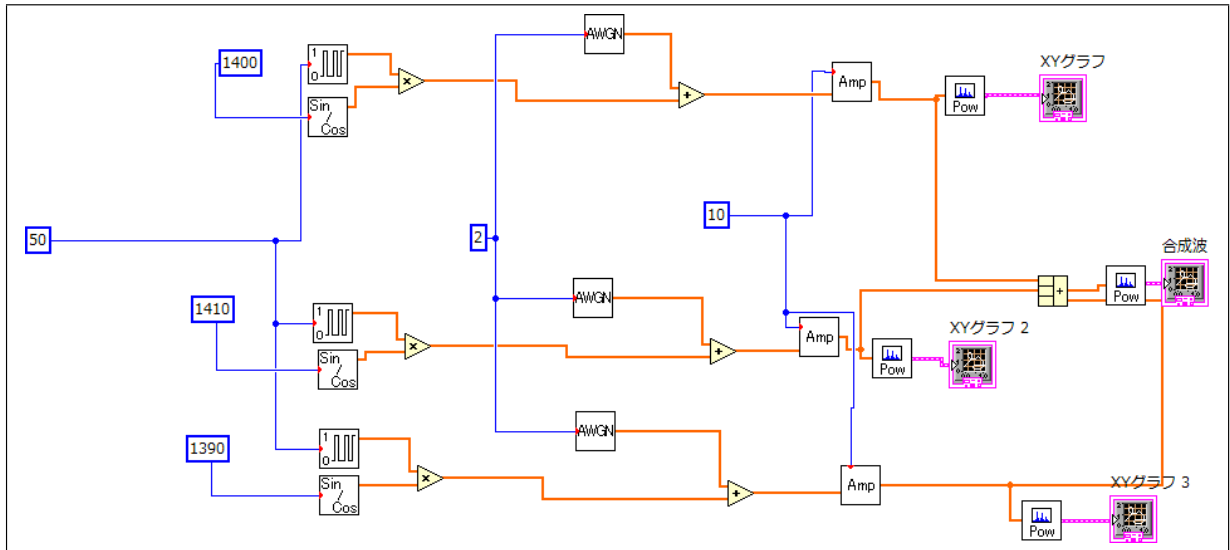


図 10 OOK 信号送信機

まず、抑圧度 α を、所望波の出力 A_D と、妨害波の出力 A_I を用いて、

$$\alpha = 10 \log \left(\frac{A_D}{A_I} \right)$$

で定義する。ところで、パワースペクトルの値（所望波 P_D 、妨害波 P_I ）は、LabVIEW が表示するグラフ上ではデシベル単位で表示されているため、

$$\begin{aligned} P_D - P_I &= 10 \log \left(\frac{A_D}{A_0} \right) - 10 \log \left(\frac{A_I}{A_0} \right) \\ &= 10 \log \left(\frac{A_D}{A_I} \right) \end{aligned}$$

である。ただし、 A_0 は、デシベルの基準値である。これより、

$$\alpha = P_D - P_I$$

となる。ところで、実験の設定では、妨害波が2つある。実際にはどちらもほとんど同じ値を示したため、式 (1) では適当に、2つの妨害波のうち、より大きい値を示したものを P_I として採用するようにした。

4.2 課題 6

二段目の BPF に入力される信号の式は、次のようになる。

$$\begin{aligned} (A(1 + m \sin(\omega)) \sin(\omega_1) + \sin(\omega + \omega_m))^2 &= \frac{1}{8} (A^2 m^2 \cos(2\omega - 2\omega_1) + A^2 m^2 \cos(2\omega + 2\omega_1) \\ &\quad - 4A^2 m \sin(\omega - 2\omega_1) - 4A^2 m \sin(\omega + 2\omega_1) \dots (\text{略})) \end{aligned}$$

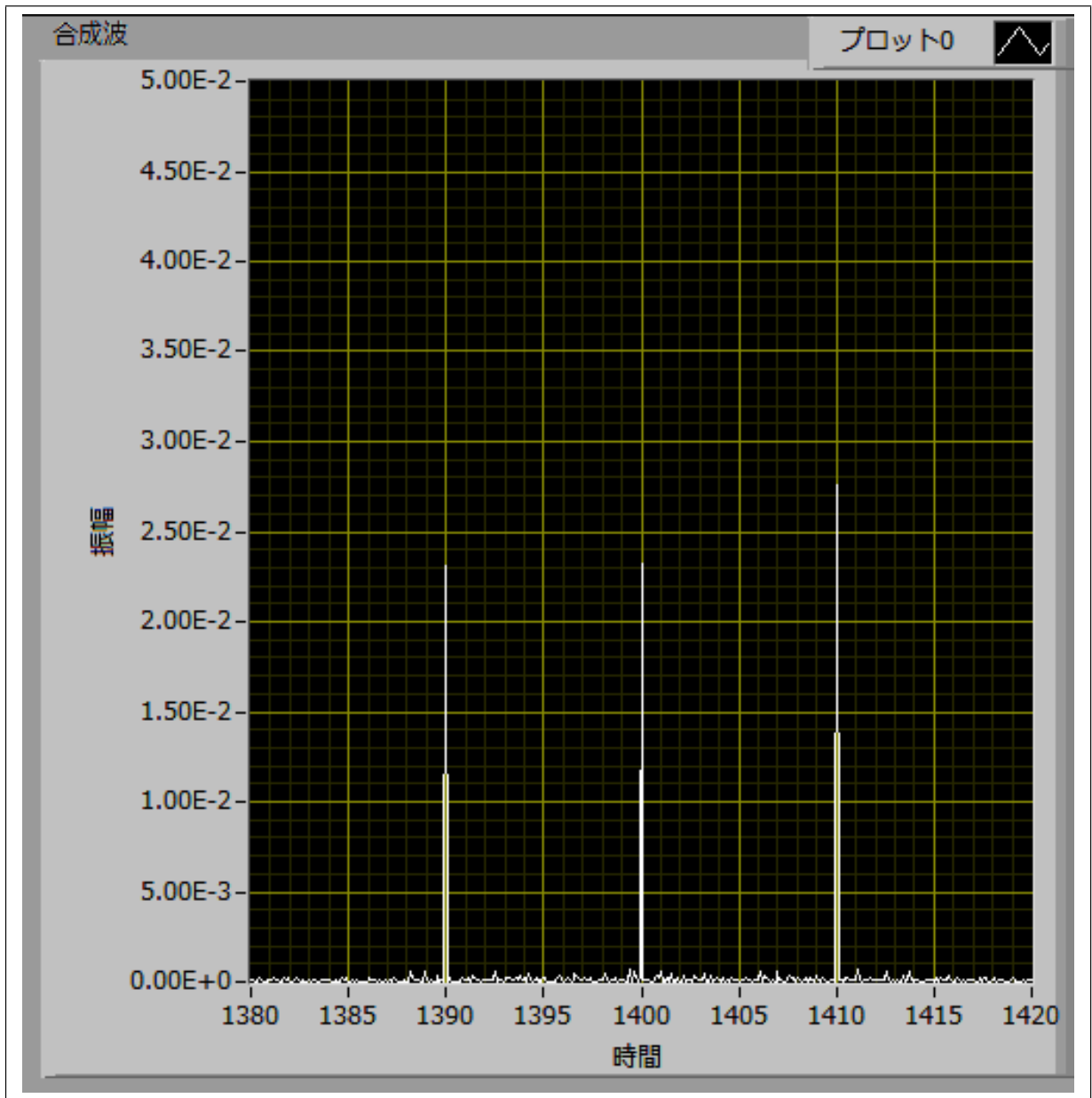


図 11 OOK 信号のパワースペクトル

ただし、

$$\begin{aligned}\omega &= 2\pi t \times \text{搬送波周波数} \\ \omega_1 &= 2\pi t \times \text{信号周波数} \\ \omega_m &= 2\pi t \times \text{中間周波数}\end{aligned}$$

である。この式から、 ω_m 周辺の周波数の項のみを取り出すと、

$$-\frac{1}{2}A\sin(\omega_m - \omega_1) + \frac{1}{2}A\sin(\omega_1 + \omega_m) = A\cos(\omega_m)\sin(\omega_1)$$

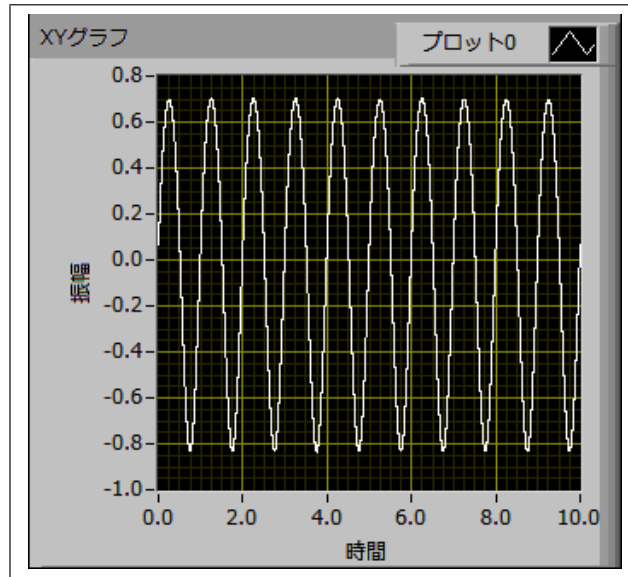


図 12 $\phi = 0$ のときの波形

となる。これをストレート受信機と同様に検波することにより、 $\sin(2\pi f_1 t)$ の信号が取り出せる。

4.3 課題 7

LPF に入力される信号の式は次のようになる。

$$(1 + m \sin(\omega_1)) \sin(\omega) \sin(\omega + \phi) = \frac{1}{4} (Am \sin(\omega_1 - \phi) + Am \sin(\omega_1 + \phi) - Am \sin(-2\omega + \omega_1 - \phi) - Am \sin(2\omega + \omega_1 + \phi) - 2A \cos(2\omega + \phi) + 2A \cos(\phi))$$

ただし、

$$\omega = 2\pi t \times \text{搬送波周波数}$$

$$\omega_1 = 2\pi t \times \text{信号周波数}$$

$$\phi = \text{掛け合わせる正弦波の位相}$$

である。

この信号から、低周波成分のみを取り出すと、

$$\frac{1}{4} (Am \sin(\omega_1 - \phi) + Am \sin(\omega_1 + \phi) + 2A \cos(\phi)) = \frac{1}{2} Am \sin(\omega_1) \cos(\phi) + \frac{1}{2} A \cos(\phi)$$

となる。 $\phi = 0$ のとき、この信号の直流成分を除くことで、 $\frac{1}{2} Am \sin(\omega_1)$ が得られる。

また、 $\phi \neq 0$ のとき、得られる信号は $\frac{1}{2} Am \sin(\omega_1) \cos(\phi)$ となるため、信号の出力が $\cos(\phi)$ 倍されることになる。

実際に位相 ϕ の値を変化させると、図 12～図 15 のように、 $\cos(\phi)$ に従って振幅が変化していることがわかる。

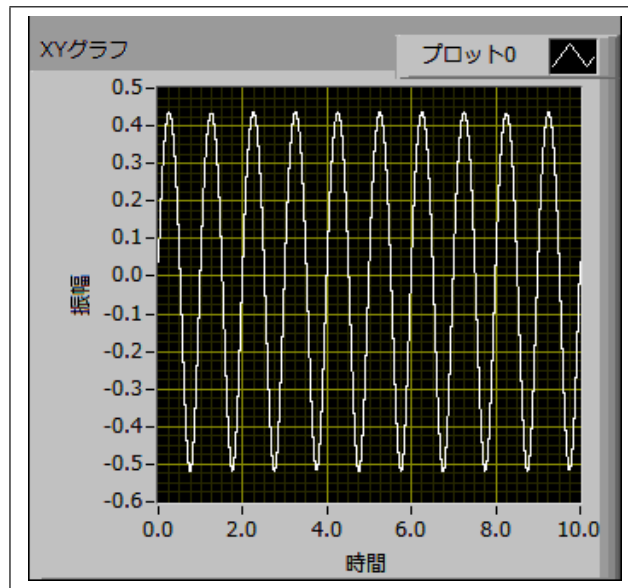


図 13 $\phi = 0.9$ のときの波形

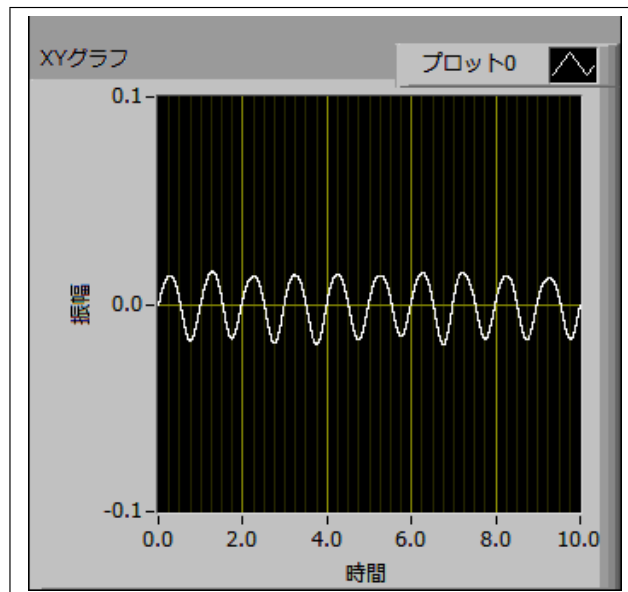


図 14 $\phi = 1.5$ のときの波形

4.4 課題 8

まず、各受信機の BPF の Q 値および LPF のカットオフ周波数、中間周波数の、選択度への寄与を検討する。

ストレート受信機については、BPF の Q 値の寄与が大きい。これは、選択を行っている素子が BPF のみだからである。LPF は、選択された信号から、低周波成分を抜き出すのに使われて

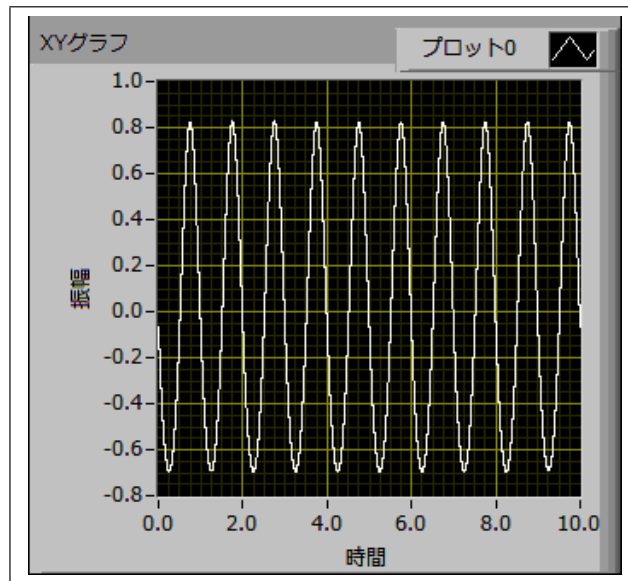


図 15 $\phi = 3$ のときの波形

いるだけである。

スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機については、後段の BPF の Q 値の寄与が大きい。これは、選択を行っているのが後段の BPF だからである。前段の BPF は無くても動くが、これがないと Amp への入力が大きくなり、Amp での歪みが大きくなってしまう。LPF については、ストレート受信機と同様である。また、中間周波数については、小さくしたほうが同じ Q 値の BPF を使ったとしても高い選択度を実現できるため、これも重要である。

同期検波受信機については、BPF の Q 値はほとんど寄与しない。これは、選択に使われているのは BPF ではなく、受信波に掛けられる正弦波の周波数だからである。また、LPF のカットオフ周波数は、取り出したい信号の周波数より大きければ、ほとんど寄与しない。

以上のことから、ストレート受信機については BPF が、スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機については後段の BPF が最も支配的なフィルタであると考えられる。同期検波受信機については、どのフィルタも選択度に対しては支配的でないと考えられる。

実際に、BPF の Q 値を変えて、歪み率を計算した結果が図 16～図 22 である。図には示していないが、LPF の値は歪み率には寄与しなかった。

図 16～図 18 を見るとわかるように、ストレート受信機においては、BPF の Q 値が強く歪み値に寄与している。また、図 19～図 21 を見るとわかるように、 Q_2 が低いときに顕著に歪み率が低下することから、スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機においては、後段のほうが大きく歪み率に寄与していることがわかる (Q_1, Q_2 はそれぞれ、前段の BPF と後段の BPF の Q 値である)。また、図 22 を見るとわかるように、低い Q 値においても低い歪み率であることから、同期検波受信機においては、BPF の Q 値は歪み率に寄与しないことがわかる。

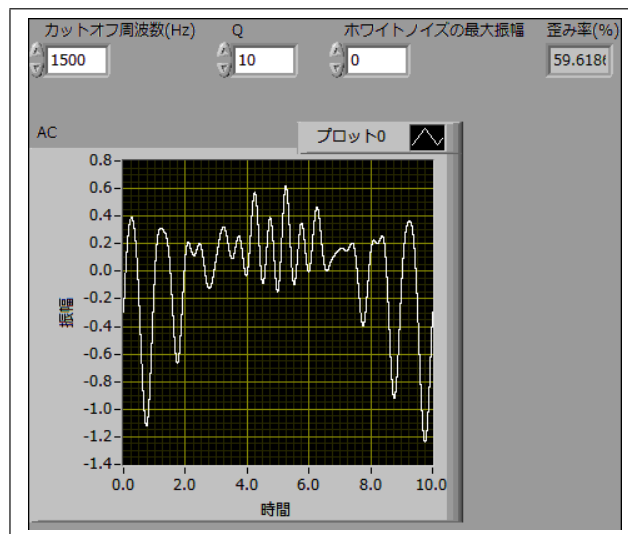


図 16 ストレート受信機 ($Q = 10$)

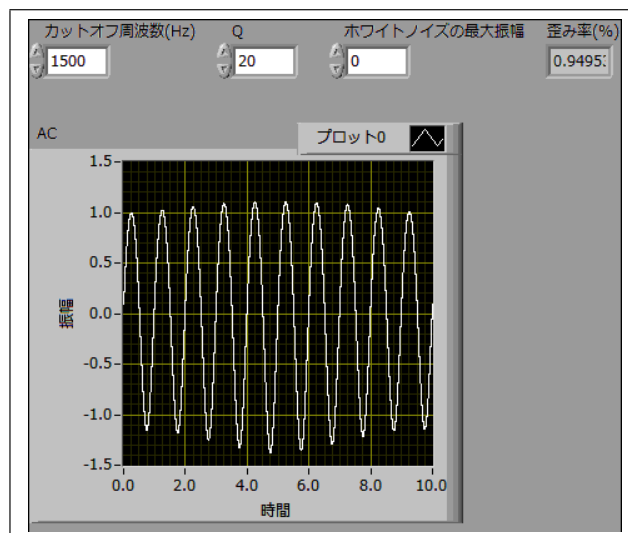


図 17 ストレート受信機 ($Q = 20$)

4.5 課題 9

3つの受信方式について、増幅率の変化による歪み率の変化と、雑音振幅の変化による歪み率の変化を調べた(表2、表3)。これを見ると、増幅率の変化に対してはストレート方式が一番耐久力が高く、雑音振幅の変化に対しては同期検波方式が一番耐久力が高いことがわかる。

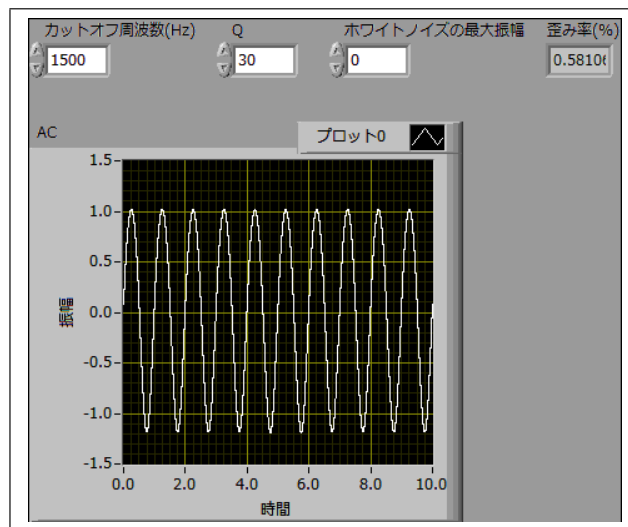


図 18 ストレート受信機 ($Q = 30$)

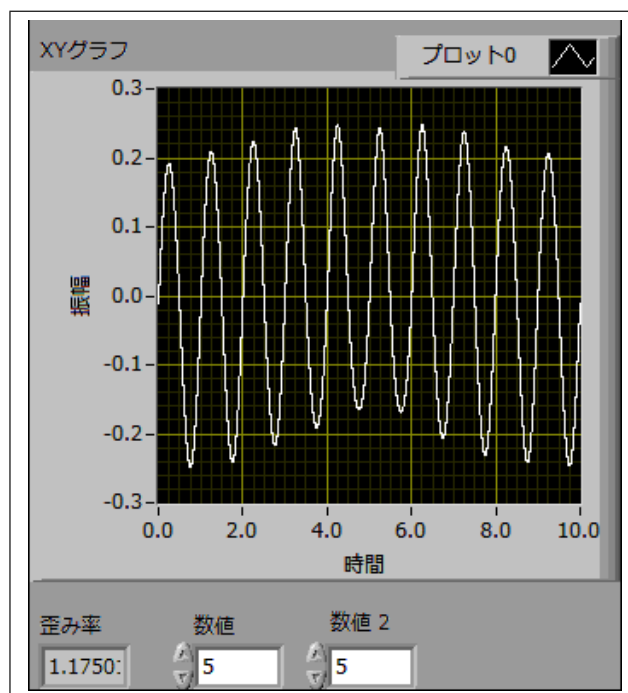


図 19 スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機 ($Q_1 = 5, Q_2 = 5$)

4.6 課題 10

2つの周波数成分を搬送波に乗せた送信波を、ストレート受信機とスーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機で受信した。図 23、図 24 の回路を使用し、BPF の Q 値を変えてながら歪み率を測定したところ、表 4、表 5 のようになった。ただし、スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機の前段の

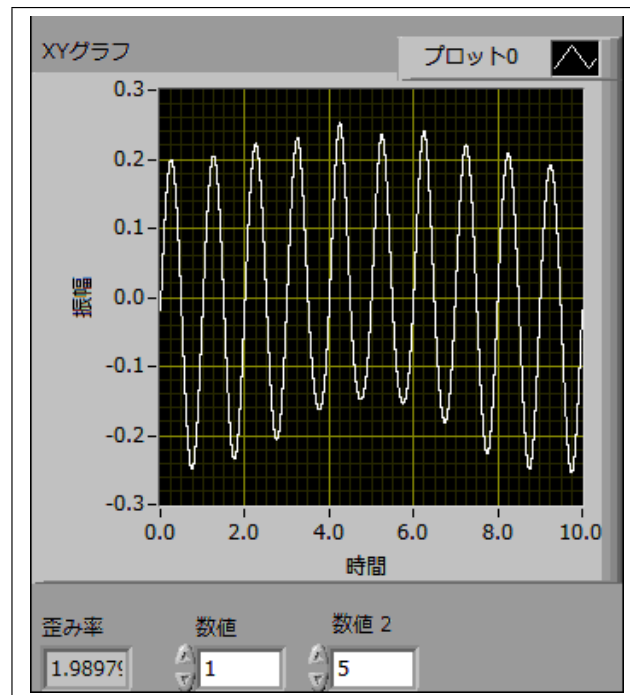


図 20 スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機 ($Q_1 = 1, Q_2 = 5$)

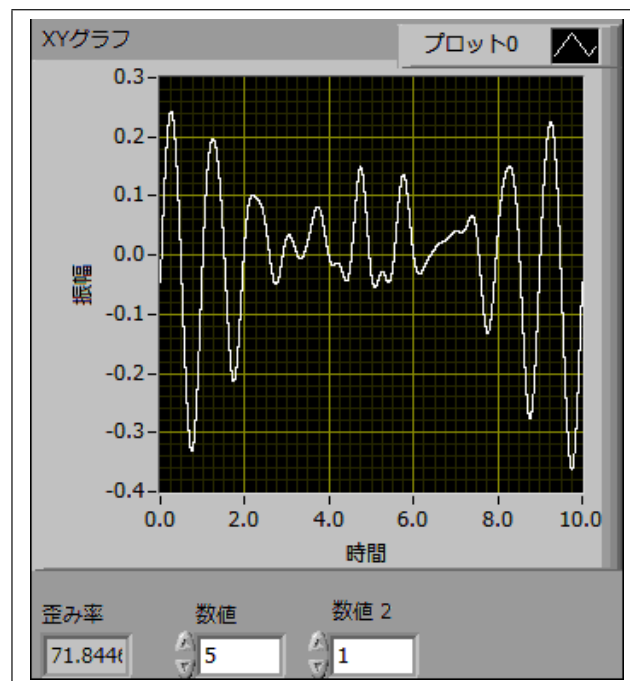


図 21 スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機 ($Q_1 = 5, Q_2 = 1$)

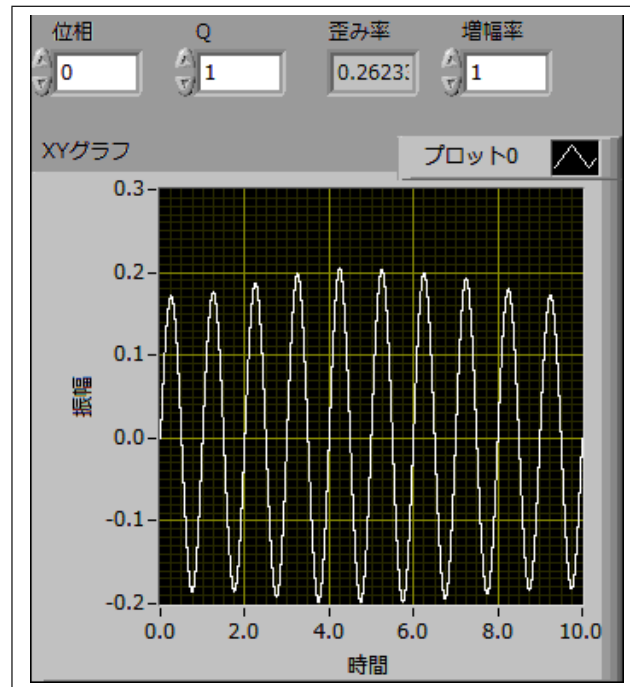


図 22 同期検波受信機 ($Q = 1$)

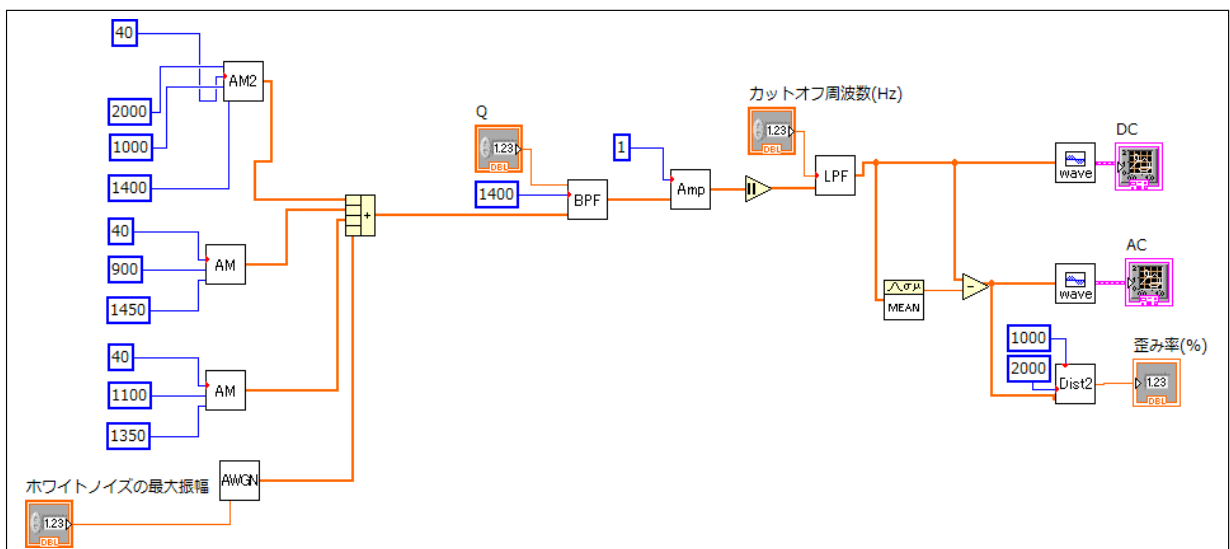


図 23 2周波信号 (ストレート受信機)

方式	増幅率=1	増幅率=5	増幅率=10	増幅率=50	増幅率=100
ストレート	0.009	0.154	0.586	1.667	1.978
スーパーヘテロダイン	0.127	6.163	11.426	53.872	57.307
同期検波	0.077	6.423	15.538	30.226	32.887

表 2 増幅率の変化による歪み率の変化

方式	最大振幅=0	最大振幅=1	最大振幅=10	最大振幅=100
ストレート	0.583	0.664	8.644	93.273
スーパーヘテロダイン	0.130	0.272	7.403	99.257
同期検波	0.075	0.143	4.599	64.878

表 3 雑音振幅の変化による歪み率の変化

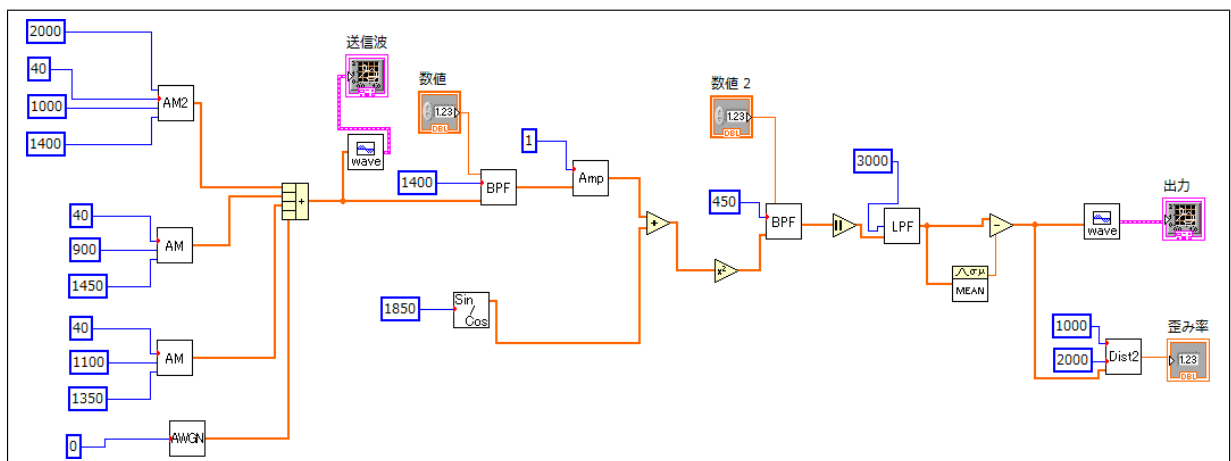


図 24 2 周波信号（スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機）

Q 値	10	20	30	40	100
歪み率 (%)	53.502	2.308	1.105	1.245	2.169

表 4 2 周波信号（ストレート受信機）

BPF の Q 値は 10 とした。この表から、歪み率が最小となる Q 値は、ストレート受信機については $Q = 30$ 、スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機については $Q = 10$ であることがわかる。

4.7 課題 11

音声ファイルを 3 つ作成し、そのうちの 2 つを妨害波信号として、残りの 1 つを所望波信号として利用して送信波を構成し、3 つの方式によって受信し、受信した音声ヘッドホンで聴き比べた。

後段の Q 値	5	10	20	30
歪み率 (%)	9.575	3.173	3.204	3.899

表 5 2 周波信号 (スーパーヘテロダイン 2 乗検波受信機)

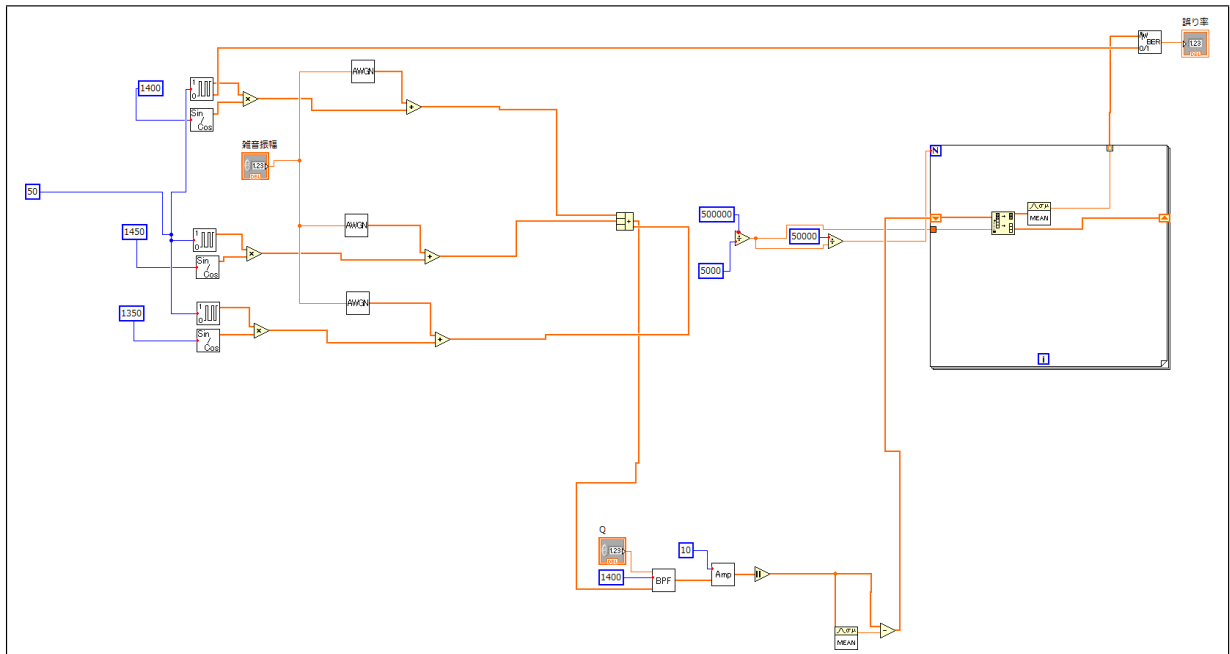


図 25 誤り率を求める回路 (ストレート方式)

どの方式にも雑音が混入していたが、キーンという高い音が雑音として混入していたのは、スーパーヘテロダイン方式のみだった。スーパーヘテロダイン方式とストレート方式では、所望音声の大きさは同程度だったが、同期検波方式では、より大きくはっきりと所望音声聞き取れた。

4.8 課題 12

図 11 から、それぞれの搬送波周波数のところに線スペクトルが出ていることがわかる。

それぞれの線スペクトルのところをよく見ると、太い部分があることがわかる。これが OOK 信号のメインローブと考えられる。OOK 信号が互いに妨害しないためには、メインローブがほかの OOK 信号の線スペクトルがかぶらないようにすれば良いと考えられるが、実際にメインローブの幅がどの程度なのか、この図から読み取ることはできない。

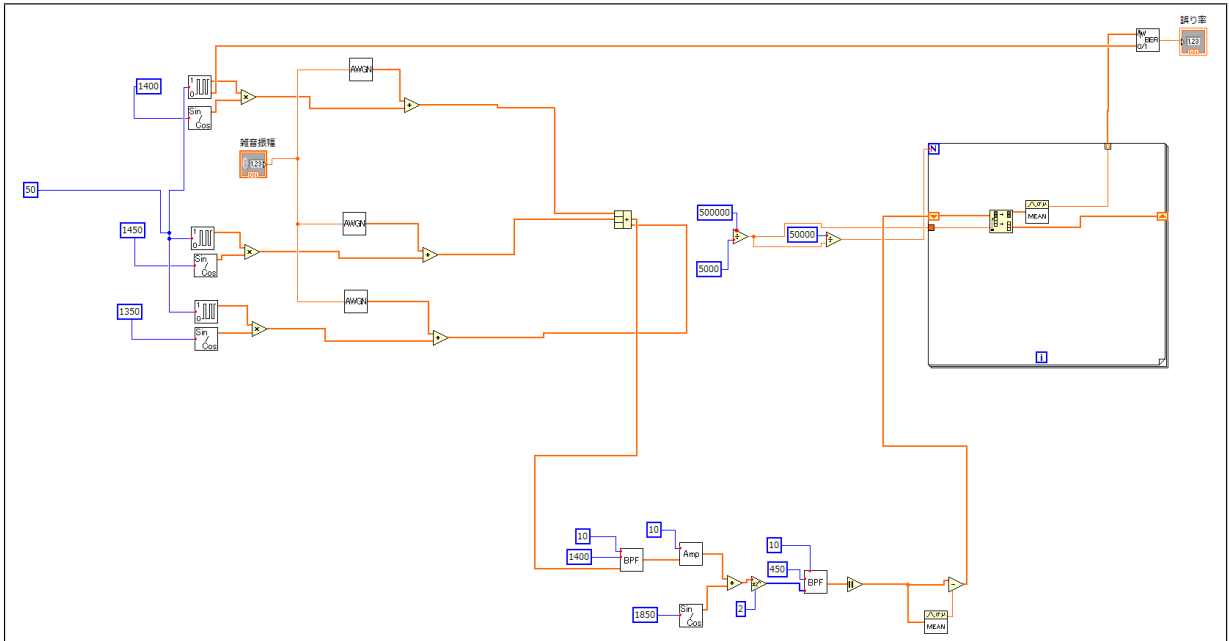


図 26 誤り率を求める回路（スーパーヘテロダイン方式）

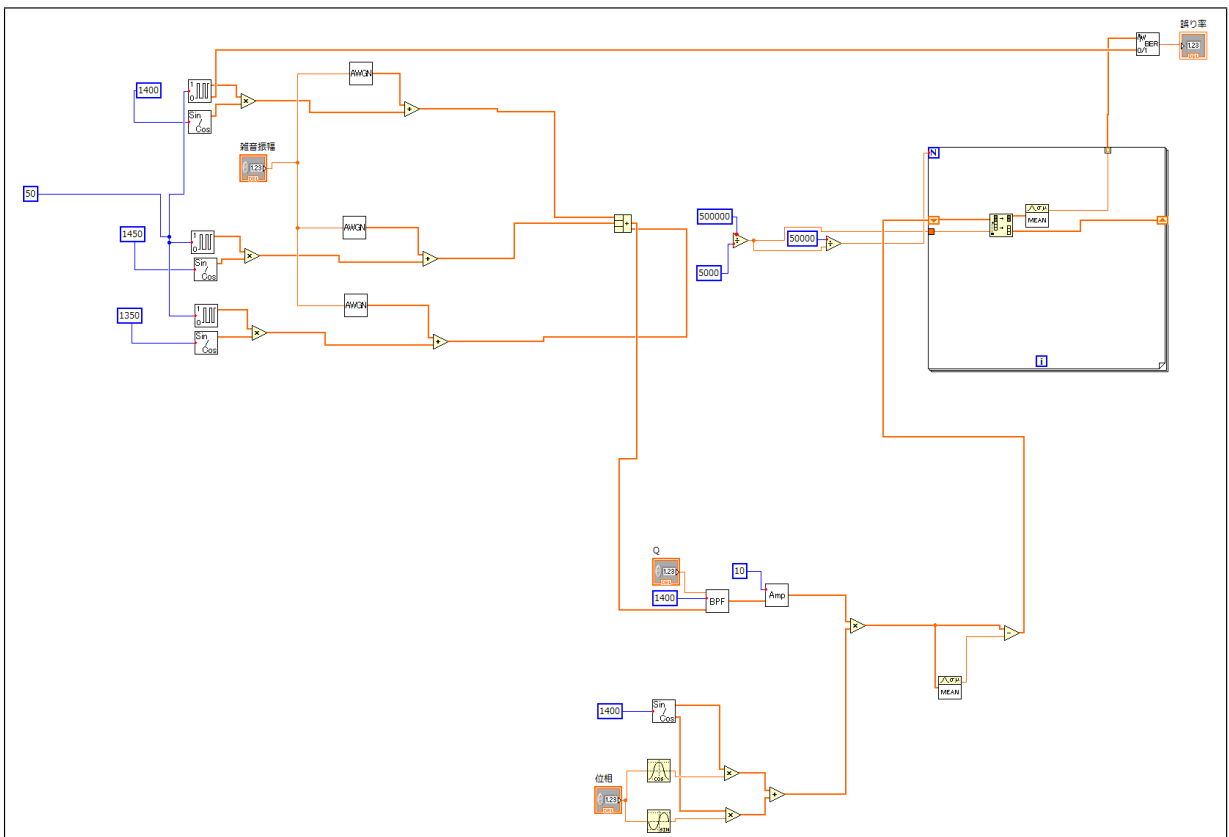


図 27 誤り率を求める回路（同期検波方式）

4.9 課題 13

図 25、図 26、図 27 の回路を使って、3つの受信方式で OOK 信号を受信し、送信ビット列と比較し、誤り率を計算した。その結果、誤り率は以下ようになった。

ストレート方式での誤り率 (%) = 0.002

スーパーヘテロダイン方式での誤り率 (%) = 0.066

同期検波方式での誤り率 (%) = 0

同期検波方式での誤り率が非常に低いことがわかる。

4.10 課題 14

方式	雑音振幅=1	雑音振幅=5	雑音振幅=10	雑音振幅=20	雑音振幅=30	雑音振幅=50
ストレート	0.000	0.116	0.302	0.466	0.464	0.516
ヘテロダイン	0.048	0.198	0.306	0.412	0.482	0.504
同期検波	0.000	0.084	0.216	0.354	0.368	0.442

表 6 雑音があるときの誤り率

図 25、図 26、図 27 の回路を使って、雑音振幅を変化させながら、課題 13 と同様に誤り率を計算した。表 6 は、結果を表にまとめたものである。

この表から、OOK 信号受信時の雑音に対する耐久性は、同期検波が最も高いことがわかる。