

1. 実験の目的

現在通信ネットワークで主として用いられている同軸ケーブル及び光のファイバケーブルの構造や特性・得失を理解し、デジタル信号の波形観測や符号誤り率の測定を通じて、デジタル信号の伝送特性と、その評価技術に対する理解を深める。

また、同軸ケーブルを用いる実験では、オシロスコープとネットワークアナライザの使用法を習得し、バイポーラ信号やユニポーラ信号という二種類のデジタル信号の波形を観測し、それらの信号の特性を理解する。さらに、これらの信号を送送させた場合の通信符号誤り率を測定することでデジタル信号伝送に関する理解を深める。

2. 実験 1:同軸ケーブル伝送路の特性

2. 1. 概要

図 1 に示す装置を用いて同軸ケーブルの伝送特性を測定した。「誤り率測定器送信部」は、二値のデジタル信号を生成する。受信側では、オシロスコープを用いて伝送波形を観測し、誤り率測定器受信部を用いて符号誤り率を測定した。また、使用した主な機器・器具は表 1 の通りである。

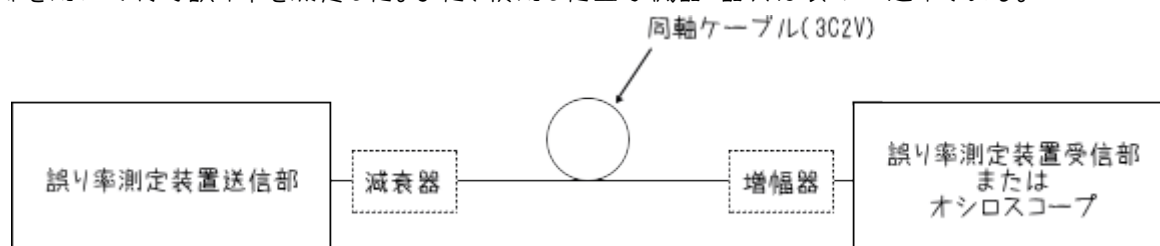


図 1 実験の基本構成

表 1 使用機器

使用機器	製造メーカー	型番	製造番号	定格
同軸ケーブル 3C2V(1m、100m×3)				
オシロスコープ	LeCroy	LC564AD	10001	1GHz
ネットワークアナライザ	ADVANTEST	R3765B	100902151	300kHz-8GHz
誤り率測定装置(ノ受信部)	Anritsu	ME3501B	6200203451	
減衰器(アッテネータ)				

2. 2. 実験項目

2. 2. 1. バイポーラ信号とユニポーラ信号の波形、アイパターンの観測

誤り率測定器の送信部で生成されたバイポーラ信号・ユニポーラ信号波形を、オシロスコープを用いて以下の手順によって観測した。

(1) 誤り率測定器の送信部のバイポーラ出力端子とオシロスコープの入力端子を、短い同軸ケーブルで接続した。誤り率測定器送信部の背面のユニポーラ出力のデータ端子とクロック端子も、オシロスコープに同軸ケーブルで図 2 のように接続した。

(2) オシロスコープのトリガを、波形が画面に大きく表示されるように設定し、バイポーラ、ユニポーラそれぞれの信号波形とアイパターンを観測した。波形のデータは画像データとして

3. 5 インチフロッピーディスクに保存し、実験室のパーソナルコンピュータに取り込んだ。ケーブルの長さは1～2m、100m、200m、300mのものを利用し、それぞれ波形を観測した。

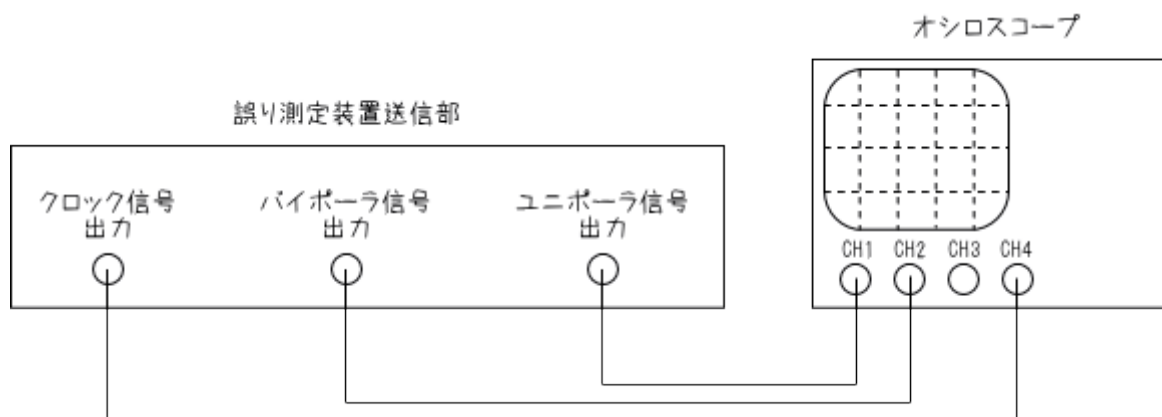


図 2 波形観測のための機器の接続

2. 2. 2. 同軸ケーブルの周波数特性の測定

ネットワークアナライザを用いて、数種の長さの同軸ケーブルの伝送特性を以下の手順で測定した。

(1) ネットワークアナライザの2つの入力端子(TEST PORT1と2)の間に長さ約1～2mの短い同軸ケーブルを接続した。

(2) ネットワークアナライザの[ACTIVE CHANNEL]のCH12を選び、表示画面の横軸と縦軸を波形が見やすいように設定して同軸ケーブルの伝送特性測定を行った。測定データは画像データとして3.5インチフロッピーディスクに保存し、実験室のパーソナルコンピュータに取り込んだ。

(3) 同様の測定を長さ100m、200m、300mのケーブルについても行った。

2. 2. 3. 同軸ケーブルを伝送させた信号の符号誤り率特性の測定

同軸ケーブルを伝送させた信号の符号誤り率を以下の手順で測定した。

(1) 誤り率測定器の送信部と受信部の間に図3に示すように減衰器と同軸ケーブルを接続した。このとき減衰器には極性は無いため、接続の向きについては特に留意しなかった。

(2) 伝送路の長さ約1～2m、100m、200m、300mのケーブルとした場合の符号誤り率を、減衰器の減衰率の関数として測定した。

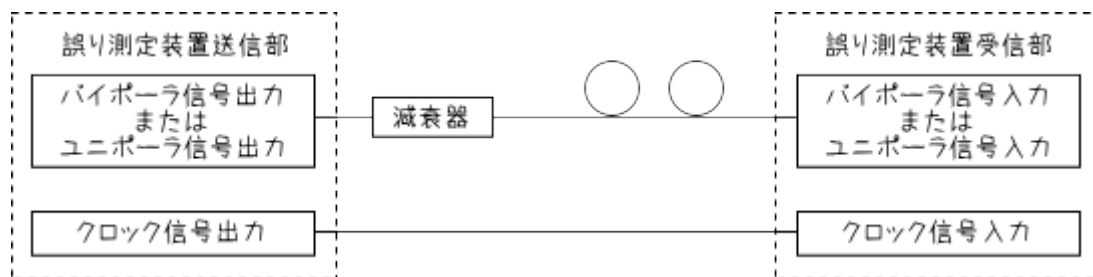


図 3 符号誤り率測定のための機器の接続

2. 2. 4. 増幅回路の伝送特性に対する効果の測定

図 4 に示す増幅回路を制作し、これを伝送路の受信側に挿入した場合の効果を下の手順で測定した。

(1) 図 4 の回路をプリント基板上に制作した。インダクタンス 50nH のコイルは、(1) 式を用いて長さや巻き数の理論値を求め、その後ネットワークアナライザを用いて自己インダクタンスを測定し、 50nH に近いインダクタンスを持つコイルを自作した。トランジスタは型番が C2644 のものを用いた。

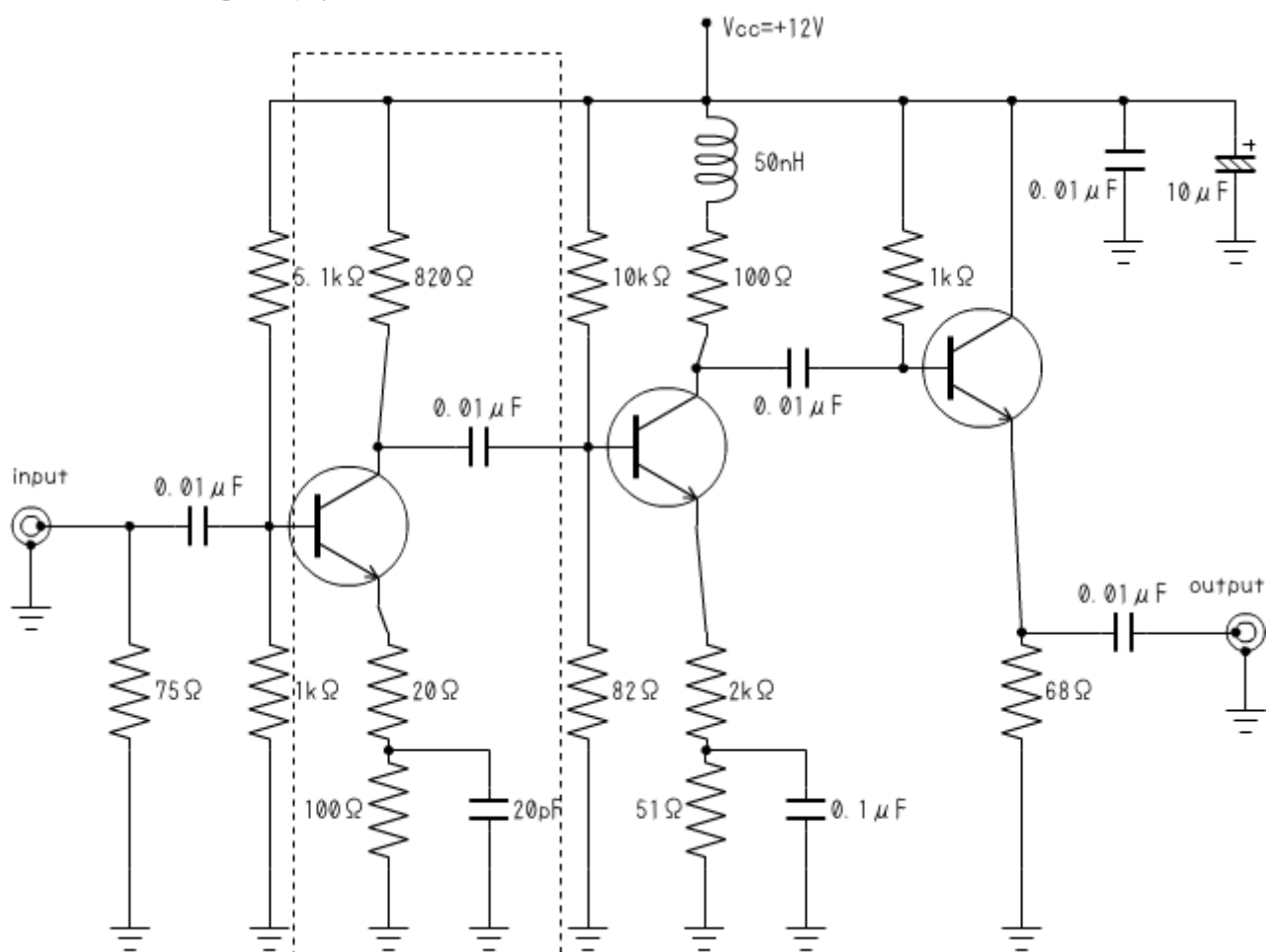


図 4 増幅器の回路図

(2) 増幅回路の動作確認を、ネットワークアナライザを用いて行った。接続は、TEST PORT1→減衰器→回路→TEST PORT2 とした。

(3) バイポーラ信号を用いて、増幅回路を挿入した伝送路の符号誤り率特性を図 5 の構成のようにして測定した。

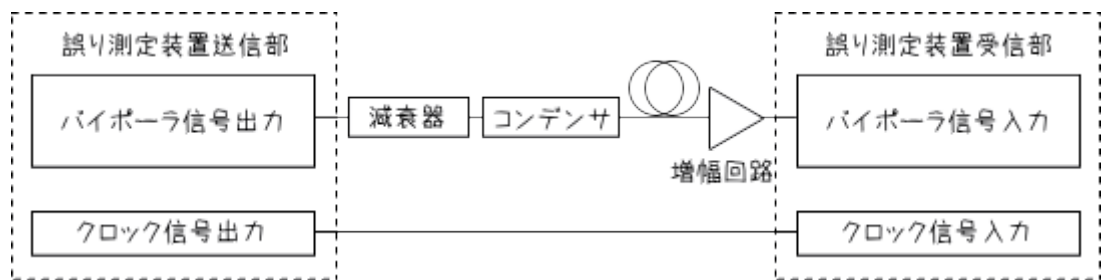


図 5 増幅回路を用いた伝送路

2.3. 実験結果とその考察

2.3.1. 実験項目 2.2.1 について

観測したバイポーラ信号とそのアイパターンの概形を図 6、ユニポーラ信号とそのアイパターンの概形を図 7 に示す。図 6、図 7 のアイパターンはクロック信号も同時に記録したものである。

図 6 のバイポーラ信号と図 7 のユニポーラ信号について、オシロスコープの電圧のレンジは同じだが、バイポーラ信号の方がユニポーラ信号に比べて振幅が大きい。振幅が大きいということは、送られてきた信号が 1 なのか 0 なのかを判断しやすいということである。

また、周期の長さについても、バイポーラ信号の方がユニポーラ信号に比べて短くなっている。周期が短いと一定時間あたりに遅れる信号の量が多くなるため、バイポーラ信号の方がより多くの信号を送信することができると言える。

アイパターンは、オシロスコープの画面に信号をすべてオーバーラップさせることにより測定できます。アイパターンは、各ポイントが電圧値または、該当する値(光パワーなど)に関係しているため非常に有効な測定方法である。波形が同じ位置(タイミング・電圧)で複数重ね合っていれば品質の良い波形(「アイが開いている」と言う)であり、逆に波形の位置がずれている場合は、品質の悪い波形でありジッターが悪くなる。¹

図 6 と図 7 のケーブル長が 1~2m のものをそれぞれ比べてみると、それほど差は見られない。しかし、100m、200m、300m と順に見ていくと、バイポーラ信号のものに比べてユニポーラ信号のアイパターンの方が波形のずれが大きくなっている。つまり、バイポーラ信号の方がユニポーラ信号に比べて品質のよい信号(波形)であると言える。

両信号において、ケーブル長が 1~2m のものについては、クロック信号との同期がとれている。しかし、ケーブル長が長くなるにつれて、信号の立ち上がり、立ち下りの傾きが増し、クロック信号よりも遅れてくる。ケーブル長が 300m のユニポーラ信号のアイパターンを見ると、画面いっぱいに波形が表示されていて、明らかにクロック信号と同期ができていない。ユニポーラ信号はケーブルが長くなると、データが正しく遅れなくなるため、長距離の信号伝送に向かない信号であると言える。

¹ エイム電子株式会社 アイパターンの基礎 <http://www.aim-ele.co.jp/tech/optical-tech3/>

2.3.2. 実験項目 2.2.2 について

同軸ケーブルの伝送特性の測定データを図 8 に示す。

ケーブル長が 1～2m の信号は、300kHz から 8GHz の周波数でほとんど減衰しなかった。100m、200m、300m のケーブル長では、高周波数帯域になるに従い、信号の強度が減少している。

高周波数の信号を送信する際に、送信するケーブルに表皮効果とよばれる効果が現れ、その影響でケーブルの抵抗が増す。つまり、伝送する信号が高周波数であればあるだけケーブルの単位長さあたりの抵抗も増すのである。そのため、ケーブルが長くなれば長くなるほど、全体的な抵抗値が上がり、信号が減衰する。

表皮効果は高周波電流が導体を通れる時、電流密度が導体の表面で高く、表面から離れると低くなる現象のことである。周波数が高くなるほど電流が表面へ集中するので、導体の交流抵抗は高くなる。²

さらに、伝送する信号が高周波数であるということは、誘電体の応答に遅れが生じ、誘電体損失も大きくなるということである。この誘電体損失が大きくなるとケーブルの単位長さあたりの抵抗も増すため、信号の減衰の原因となる。

誘電体損失とは誘電体に交流電場を加えたときに、誘電体内の双極子が電場の振動に追従できなくなって生じる損失。信号伝送では、伝送路上の導体(信号配線)と接地線との間の寄生容量に電荷を蓄積する際に生じ、漏れ電流の増大を引き起こすことになる。高周波ほど、導体中を電流が流れにくくなり、特に 1GHz を超える高周波信号の伝送で問題となっている。³

バイポーラ信号、ユニポーラ信号の方形波のエッジを作るのは高周波成分である。この高周波成分が減衰することで、立ち上がりや立ち下がりエッジのとれた丸まった波形になってしまうことが分かる。

2.3.3. 実験項目 2.2.3 について

符号誤り率と減衰器の減衰率の関係をバイポーラ信号について表 2 に、ユニポーラ信号について表 3 に示した。

またこの関係で、符号誤り率を減衰器の減衰率の関数としたグラフを、バイポーラ信号について図 9 に、ユニポーラ信号について図 10 に示す。

減衰器で減衰させた信号を入力すると、入力信号が小さくなるために振幅も小さくなり、結果誤り率は増加の一途をたどるのではないかと思っただが、バイポーラ信号、ユニポーラ信号ともに減衰率を増加することにより符号誤り率が減少した。

伝送線路にインピーダンスの不整合があると、進行波の一部がその点で反射され、逆方向に伝搬する波(反射波)を生じる。進行波と反射波は、互いに逆方向に伝搬しながら足し合わされたり打ち消しあったりし、その振幅に波を生じる。この最大の振幅と最小の振幅の比率を定在波比(standing waveratio:SWR)と言い、特に電圧については電圧定在波比(voltage standing waveratio:VSWR)と言う。⁴

² ウィキペディア 表皮効果 <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A1%A8%E7%9A%AE%E5%8A%B9%E6%9E%9C>

³ 日経エレクトロニクス 誘電損失 <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/WORD/20060602/117798/>

⁴ 電圧定在波比 <http://homepage3.nifty.com/tsato/terms/vswr.html>

この電圧定在波比を減衰器は減少させているということがいえる。減衰器なしで信号を送った場合は、誤り率測定装置受信部の信号入力部分において反射波が発生してしまうことになる。しかし、減衰器を挿入すると誤り率測定装置受信部に入力される信号が減衰器の減衰率だけ減少し、そこで生じる反射波も減衰器の減衰率だけ減少されていることになる。さらにこの反射波が減衰器により減衰されて伝送されている信号と足し合わさったり打ち消し会ったりするわけだが、減衰器を2度通っている信号なので、減衰器の減衰率の2乗小さい信号になっている。結果、伝送されている信号と反射波との相互干渉が減少し、結果電圧定在波比が減少するため、信号の品質が格段に向上しているのである。

長さ300mのケーブルについて、ユニポーラ信号は5dB程度まで符号誤り率を測定できたが、それ以上の減衰率では信号が小さくなりすぎて誤り率測定装置で測定ができなかった。しかし、バイポーラ信号では20dB減衰させた信号の誤り率を測定できた。これはももとのバイポーラ信号の振幅の高さがユニポーラ信号よりも高いからであると考えられる。

図8より、長さ300mのケーブルの5dB減衰する周波数というのは1MHzであり、20dB減衰する周波数は20MHzであることが分かる。バイポーラ信号はケーブル長300mでも、20MHzの信号を伝える事ができるため、それだけ信号の形もユニポーラ信号に比べて立ち上がり、立ち下がりがはっきりしている。事実、図6と図7からもバイポーラ信号の方がユニポーラ信号に比べ、ケーブル長の長さが長くなっても波形が崩れていないことが分かる。このことから、バイポーラ信号の方がユニポーラ信号より長距離の信号伝送に適しているといえる。

図4の増幅回路は、回路の初段がトランジスタのエミッタ端子をグランドに接続したエミッタ接地になっている増幅回路である。

エミッタ接地増幅回路は一般的に利得が大きいですが、温度とバイアスに大きく左右されるため、安定的な利得が得られない。また、入力のダイナミックレンジが小さいため、入力信号がその範囲を超えると出力に大きな歪みとなって現れてしまう。⁵

これらの問題を緩和するために、エミッタ端子とグラウンドの間に負帰還として抵抗値の小さな抵抗を挿入している。これにより、回路の歪みと安定性が改善されるが、今度は利得が小さくなってしまう。そのため、トランジスタを2つ用いた2段増幅回路として、利得の小ささを補い、高い利得を得ることのできるようにしている。さらに3段目はコレクタ接地となっていて、出力インピーダンスを小さくしている。

図4の破線部分の利得は、

$$G = 20 \log_{10} \left| \frac{820}{20 + \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{1}{|j2\pi f \times 220 \times 10^{-12}|}}} \right|$$

で表される。これより、1MHzのとき利得 $G = 17.6$ [dB]、100MHzのとき利得 $G = 29.7$ [dB]である。

⁵ ウィキペディア エミッタ接地回路

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%9F%E3%83%83%E3%82%BF%E6%8E%A5%E5%9C%B0%E5%9B%9E%E8%B7%AF>

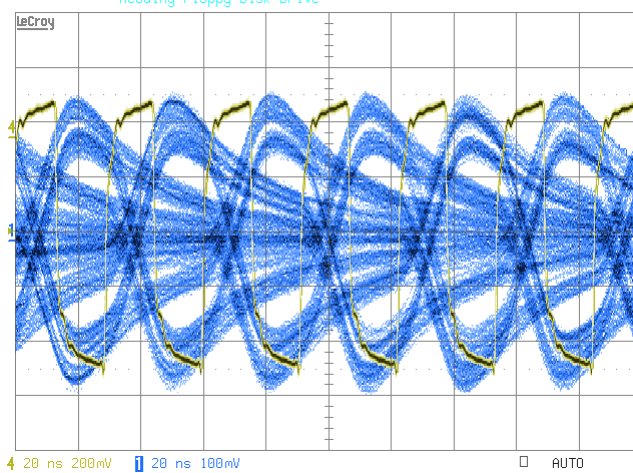
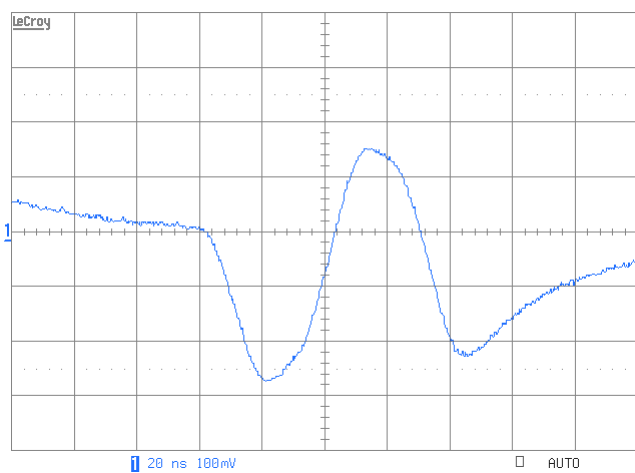
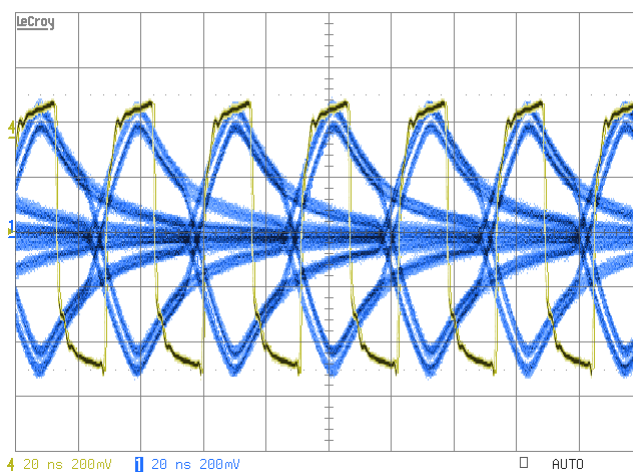
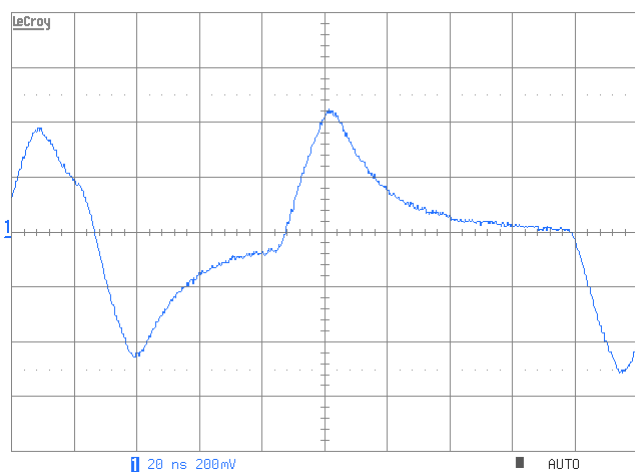
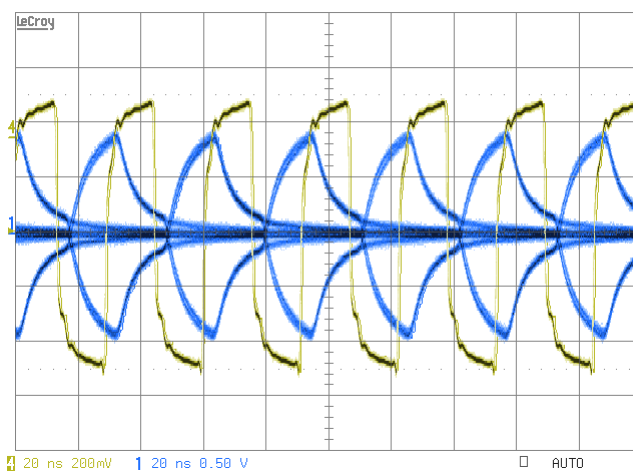
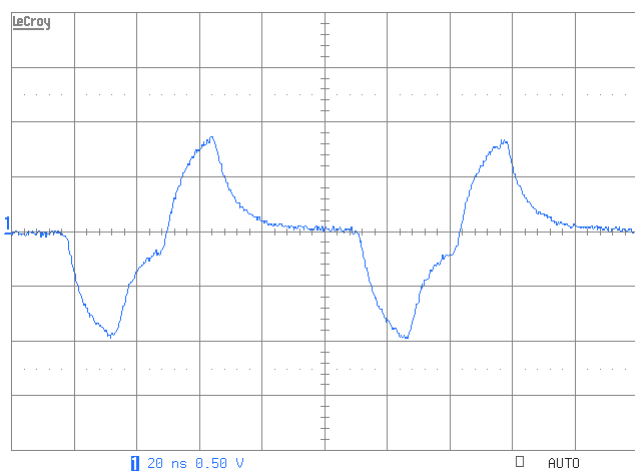
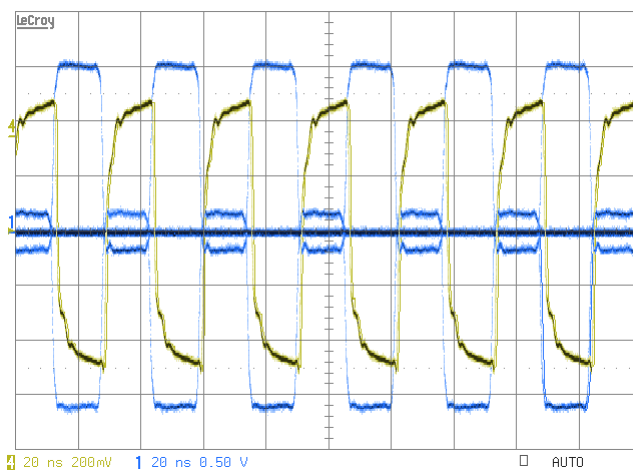
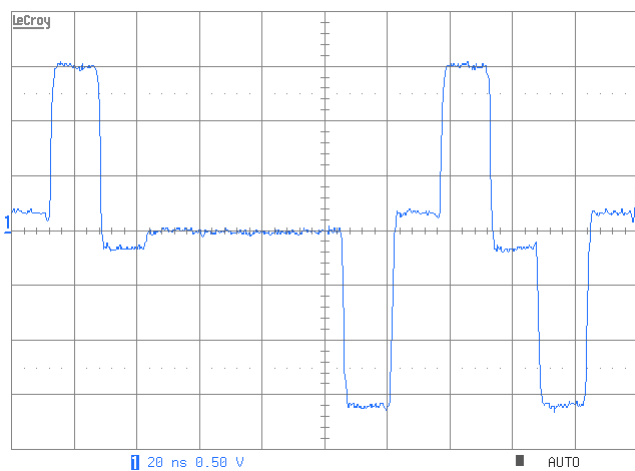


図 6 バイポーラ信号の波形とアイパターン(上から1~2m、100m、200m、300m)

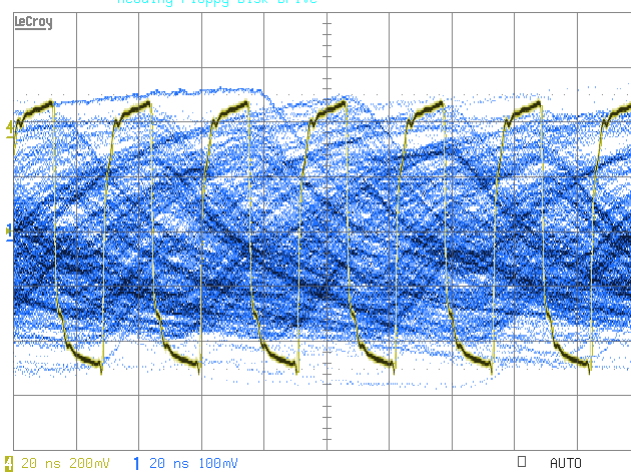
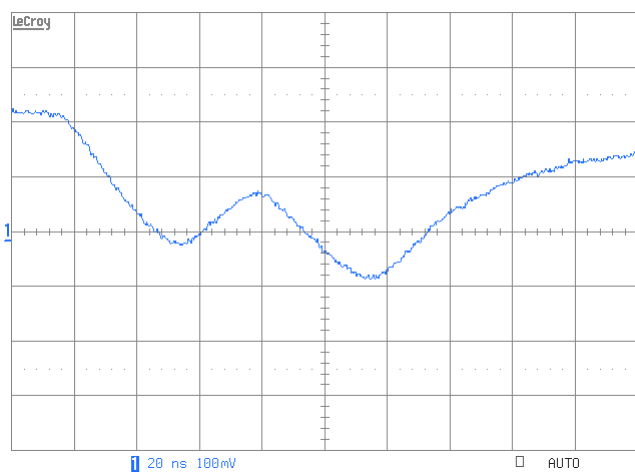
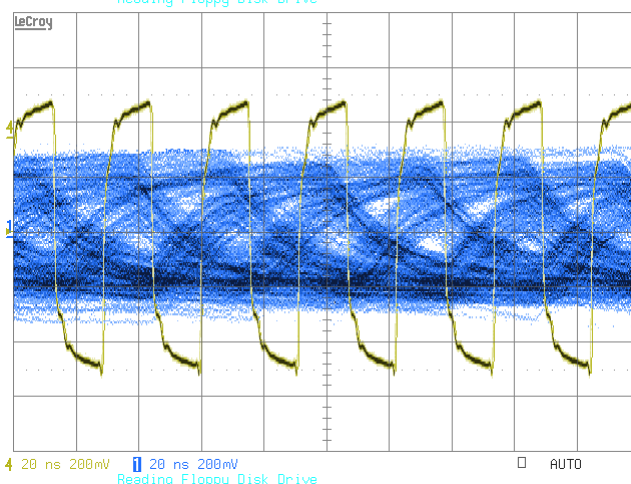
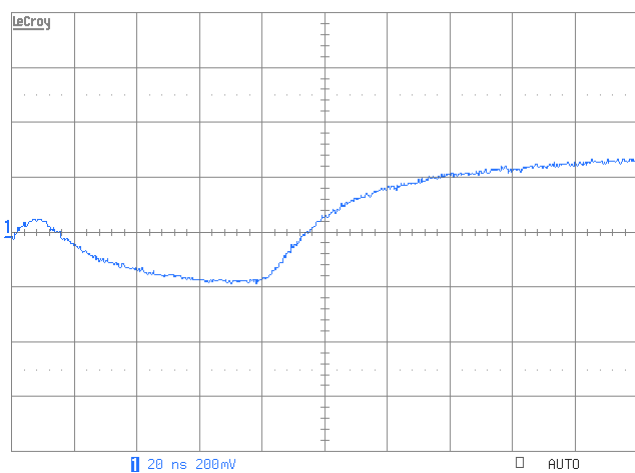
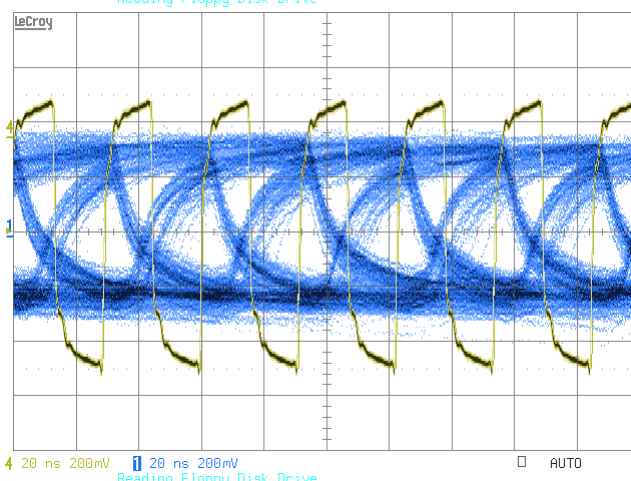
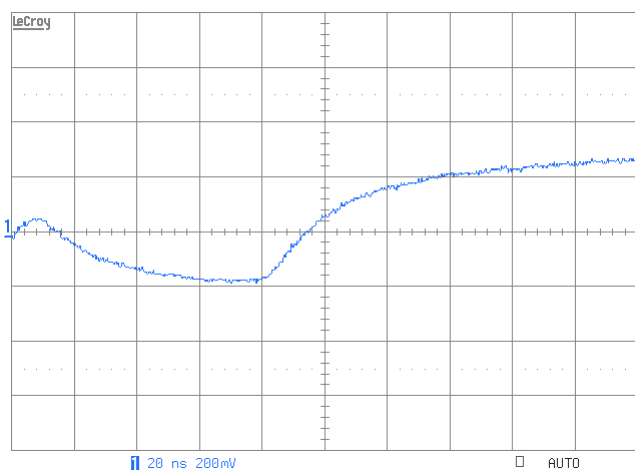
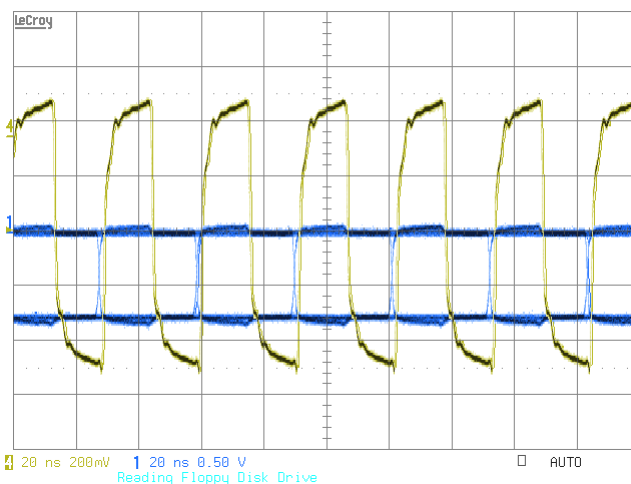
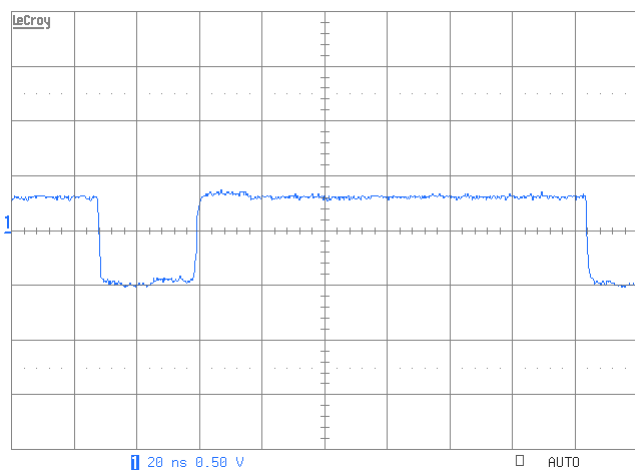
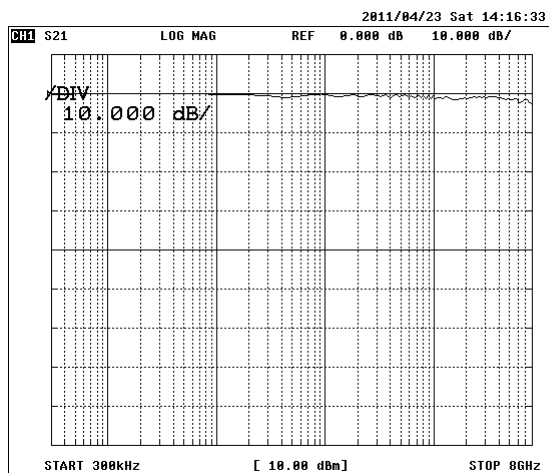
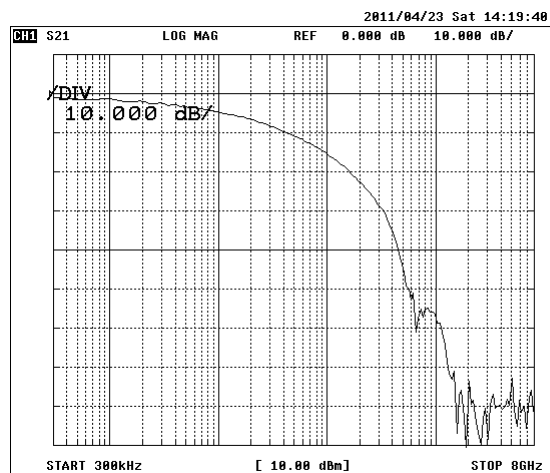


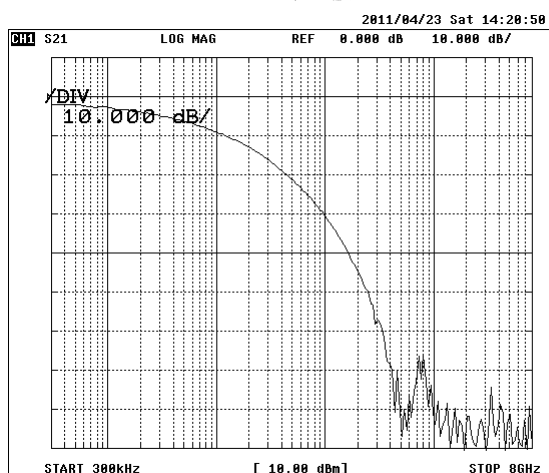
図 7 ユニポーラ信号の波形とアイパターン(上から1~2m、100m、200m、300m)



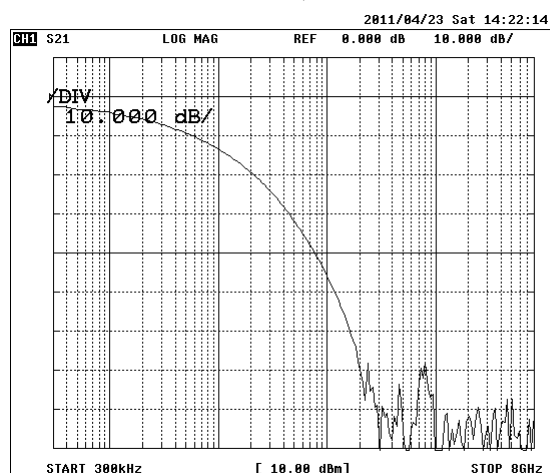
1~2m



100m



200m



300m

図 8 同軸ケーブルの伝送特性

表 2 バイポーラの符号誤り率と減衰器の減衰率の関係

dB	1m	100m	200m	300m
0.0	0	0	0.0011	0.001
0.1	0	0	0.0011	0.001
0.2	0	0	0.0011	0.001
0.3	0	0	0.0011	0.001
0.4	0	0	0.0011	0.001
0.5	0	0	0.0011	0.001
0.6	0	0	0.0011	0.001
0.7	0	0.0042	0.0011	0.001
0.8	0	0.051	0.0011	0.001
0.9	0	0.097	0.0011	0.001
1.0	0	0.31	0.0011	0.01
1.1	0	0.31	0.0011	0.025
1.2	0	0.34	0.0011	0.025
1.3	0	0.4	0.0011	0.025
1.4	0	0.43	0.0011	0.025
1.5	0	0.43	0.0011	0.025
1.6	0	0.43	0.0011	0.025
1.7	0	0.43	0.0011	0.025
1.8	0	0.43	0.0011	0.065
1.9	0	0.43	0.0011	0.065
2.0	0	0.4	0.0011	0.065
2.1	0	0.36	0.0011	0.065
2.2	0	0.33	0.0011	0.065
2.3	0	0.27	0.0011	0.065
2.4	0	0.098	0.0011	0.065
2.5	0	0.04	0.0011	0.065
2.6	0	0.0058	0.0011	0.064
2.7	0	0.017	0.0011	0.064
2.8	0	0.5	0.0011	0.63
2.9	0	0.5	0.0011	0.63
3.0	0	0.5	0.0011	0.63
3.1	0	0.5	0.0011	0.62
3.2	0	0.5	0.0011	0.62
3.3	0	0.45	0.0011	0.62
3.4	0	0.39	0.0011	0.62
3.5	0	0.072	0.0011	0.62
3.6	0	0.0013	0.0011	0.61
3.7	0	0.0013	0.0011	0.61
3.8	0	0.0013	0.0011	0.61
3.9	0	0.0013	0.0011	0.61
4.0	0	0.0013	0.0011	0.6
4.1	0	0.0013	0.0011	0.6
4.2	0	0.0013	0.0011	0.6
4.3	0	0.0013	0.0011	0.59
4.4	0	0.0013	0.0011	0.59
4.5	0	0.0013	0.0011	0.59
4.6	0	0.0013	0.0011	0.59
4.7	0	0.0013	0.0011	0.58
4.8	0	0.0013	0.0011	0.58
4.9	0	0.0013	0.0011	0.58
5.0	0	0.0013	0.0011	0.57
5.1	0	0.0013	0.0011	0.57
5.2	0	0.0013	0.0011	0.57

dB	1m	100m	200m	300m
5.3	0	0.0013	0.0011	0.56
5.4	0	0.0013	0.0011	0.56
5.5	0	0.0013	0.0011	0.56
5.6	0	0.0013	0.0011	0.56
5.7	0	0.0013	0.0011	0.56
5.8	0	0.0013	0.0011	0.54
5.9	0	0.0013	0.0011	0.54
6.0	0	0.0013	0.0011	0.52
6.1	0	0.0013	0.0011	0.52
6.2	0	0.0013	0.0011	0.52
6.3	0	0.0013	0.0011	0.52
6.4	0	0.0013	0.0011	0.52
6.5	0	0.0012	0.0011	0.51
6.6	0	0.0012	0.0011	0.5
6.7	0	0.0012	0.0011	0.5
6.8	0	0.0012	0.001	0.5
6.9	0	0.0012	0.58	0.5
7.0	0	0.0012	0.57	0.48
7.1	0.1	0.0012	0.56	0.47
7.2	0.1	0.0012	0.55	0.47
7.3	0.42	0.0012	0.55	0.47
7.4	0.43	0.0012	0.54	0.47
7.5	0.43	0.0012	0.53	0.47
7.6	0.43	0.0012	0.52	0.47
7.7	0.43	0.0012	0.52	0.43
7.8	0.43	0.0012	0.51	0.44
7.9	0.43	0.0012	0.5	0.44
8.0	0.43	0.0012	0.49	0.44
8.1	0.0031	0.0012	0.48	0.44
8.2	0.0031	0.0012	0.47	0.44
8.3	0.0031	0.0012	0.47	0.44
8.4	0.0031	0.0012	0.46	0.44
8.5	0.27	0.0012	0.45	0.44
8.6	0.0031	0.0012	0.45	0.44
8.7	0.0031	0.0011	0.44	0.44
8.8	0.0031	0.0011	0.44	0.44
8.9	0.0031	0.0011	0.44	0.44
9.0	0.0031	0.0012	0.43	0.43
9.1	0.0031	0.0012	0.43	0.42
9.2	0.0031	0.0012	0.43	0.41
9.3	0.0031	0.0012	0.43	0.41
9.4	0.0031	0.0012	0.43	0.4
9.5	0.0031	0.0013	0.43	0.4
9.6	0.0031	0.0013	0.43	0.39
9.7	0.0031	0.0013	0.43	0.39
9.8	0.0031	0.0014	0.43	0.39
9.9	0.0031	0.0014	0.43	0.38
10.0	0.0031	0.0018	0.41	0.38
10.1	0.0031	0.0018	0.41	0.37
10.2	0.0031	0.0018	0.41	0.36
10.3	0.0031	0.0018	0.41	0.35
10.4	0.0031	0.0018	0.41	0.35
10.5	0.0031	0.0018	0.41	0.34

dB	1m	100m	200m	300m
10.6	0.0031	0.0018	0.41	0.33
10.7	0.0031	0.0018	0.41	0.33
10.8	0.0031	0.0018	0.41	0.33
10.9	0.0031	0.0018	0.41	0.32
11.0	0.0031	0.0017	0.39	0.32
11.1	0.0028	0.0017	0.39	0.32
11.2	0.0028	0.0017	0.39	0.32
11.3	0.0028	0.0017	0.39	0.32
11.4	0.0028	0.0017	0.39	0.32
11.5	0.0028	0.0017	0.39	0.32
11.6	0.0028	0.0017	0.39	0.32
11.7	0.0028	0.0017	0.39	0.32
11.8	0.0028	0.0017	0.39	0.1
11.9	0.0028	0.0017	0.39	0.092
12.0	0.0028	0.0019	0.36	0.085
12.1	0.0028	0.0017	0.36	0.076
12.2	0.0028	0.0016	0.36	0.07
12.3	0.0028	0.0016	0.36	0.062
12.4	0.0028	0.0016	0.36	0.056
12.5	0.0028	0.0016	0.36	0.048
12.6	0.0028	0.0016	0.36	0.039
12.7	0.0028	0.36	0.36	0.03
12.8	0.0028	0.35	0.36	0.023
12.9	0.0028	0.34	0.36	0.017
13.0	0.0028	0.33	0.29	0.013
13.1	0.0028	0.33	0.28	0.0098
13.2	0.0028	0.32	0.11	0.007
13.3	0.0028	0.09	0.1	0.0045
13.4	0.0028	0.085	0.096	0.003
13.5	0.0028	0.099	0.09	0.0016
13.6	0.0028	0.092	0.082	0.0008
13.7	0.0028	0.065	0.074	0.00023
13.8	0.0028	0.061	0.065	0
13.9	0.0028	0.068	0.056	0
14.0	0.0028	0.1	0.048	0
14.1	0.0028	0.11	0.041	0
14.2	0.0028	0.13	0.035	0
14.3	0.0028	0.16	0.028	0
14.4	0.0028	0.16	0.024	0
14.5	0.0028	0.19	0.022	0
14.6	0.0028	0.22	0.011	0
14.7	0.0028	0.21	0.0059	0
14.8	0.0028	0.18	0.0026	0
14.9	0.0028	0.18	0.00095	0
15.0	0.0028	0.18	0.00044	0
15.1	0.0028	0.17	0	0
15.2	0.0028	0.17	0	0.00043
15.3	0.0028	0.19	0	0.0013
15.4	0.0028	0.19	0	0.0026
15.5	0.0028	0.18	0	0.005
15.6	0.0028	0.15	0	0.0077
15.7	0.0028	0.1	0	0.01
15.8	0.0028	0.068	0	0.015

dB	1m	100m	200m	300m
15.9	0.0028	0.045	0	0.021
16.0	0.0028	0.026	0	0.029
16.1	0.003	0.015	0	0.036
16.2	0.003	0.005	0	0.043
16.3	0.003	0.00069	0	0.05
16.4	0.003	0	0	0.057
16.5	0.003	0	0	0.069
16.6	0.003	0	0	0.078
16.7	0.003	0	0	0.3
16.8	0.003	0	0	0.3
16.9	0.003	0	0	0.32
17.0	0.003	0	0	0.33
17.1	0.0031	0	0	0.34
17.2	0.0033	0	0	0.34
17.3	0.0034	0	0	0.35
17.4	0.0034	0	0	0.36
17.5	0.0033	0	0	0.37
17.6	0.0034	0	0	0.38
17.7	0.0036	0	0	0.39
17.8	0.0036	0	0	0.4
17.9	0.0037	0	0	0.41
18.0	0.0035	0	0	0.42
18.1	0.0036	0	0	0.41
18.2	0.0037	0	0	0.41
18.3	0	0	0	0.4
18.4	0	0	0	0.39
18.5	0	0	0	0.38
18.6	0	0	0	0.37
18.7	0	0	0	0.36
18.8	0	0	0	0.34
18.9	0	0	0	0.33
19.0	0	0	0	0.31
19.1	0	0	0	0.17
19.2	0	0	0	0.074
19.3	0	0	0	0.064
19.4	0	0	0	0.055
19.5	0	0	0	0.049
19.6	0	0	0	0.036
19.7	0	0	0	0.034
19.8	0	0	0	0.033
19.9	0	0	0	0.031
20.0	0	0	0	0.017
20.1	0	0	0	0.074
20.2	0	0	0	0.064
20.3	0	0	0	0.055
20.4	0	0	0	0.049
20.5	0	0	0	0.04
20.6	0	0	0	0.034
20.7	0	0	0	0.023
20.8	0	0	0	0.013
20.9	0	0	0	0.0055
21.0	0	0	0	0.001
21.1	0	0	0	0.5

dB	1m	100m	200m	300m
21.2	0	0	0	0.5
21.3	0	0	0	0.5
21.4	0	0	0	0.5
21.5	0	0	0	0.5
21.6	0	0	0	0.5
21.7	0	0	0.000006	0.5
21.8	0	0	0.00092	0.5
21.9	0	0	0.004	0.5
22.0	0	0	0.0085	0.5
22.1	0	0	0.015	0.5
22.2	0	0	0.024	0.5
22.3	0	0	0.034	0.5
22.4	0	0	0.044	0.5
22.5	0	0	0.057	0.5
22.6	0	0	0.068	0.5
22.7	0	0	0.08	0.5
22.8	0	0	0.092	0.5
22.9	0	0	0.1	0.5
23.0	0	0	0.3	0.5
23.1	0	0	0.31	0.5
23.2	0	0	0.34	0.5
23.3	0	0	0.36	0.5
23.4	0	0	0.37	0.5
23.5	0	0	0.38	0.5
23.6	0	0	0.38	0.5
23.7	0	0	0.38	0.5
23.8	0	0	0.38	0.5
23.9	0	0	0.38	0.5
24.0	0	0	0.38	0.5
24.1	0	0	0.35	0.5
24.2	0	0	0.33	0.5
24.3	0	0	0.33	0.5
24.4	0	0	0.32	0.5
24.5	0	0	0.31	0.5
24.6	0	0	0.31	0.5
24.7	0	0	0.31	0.5
24.8	0	0	0.31	0.5
24.9	0	0	0.29	0.5
25.0	0	0	0.11	0.5
25.1	0	0	0.95	0.5
25.2	0	0	0.08	0.5
25.3	0	0	0.063	0.5
25.4	0	0	0.05	0.5
25.5	0	0	0.037	0.5
25.6	0	0	0.019	0.5
25.7	0	0	0.0098	0.5
25.8	0	0	0.0037	0.5
25.9	0	0	0.002	0.5
26.0	0	0	0.0043	0.5
26.1	0	0	0.032	0.5
26.2	0	0	0.03	0.5
26.3	0	0	0.083	0.5
26.4	0	0	0.096	0.5

dB	1m	100m	200m	300m
26.5	0	0	0.015	0.5
26.6	0	0	0.5	0.5
26.7	0	0	0.5	0.5
26.8	0	0	0.5	0.5
26.9	0	0	0.5	0.5
27.0	0	0	0.5	0.5
27.1	0	0	0.5	0.5
27.2	0	0	0.5	0.5
27.3	0	0	0.5	0.5
27.4	0	0	0.5	0.5
27.5	0	0	0.5	0.5
27.6	0	0	0.5	0.5
27.7	0	0	0.5	0.5
27.8	0	0	0.5	0.5
27.9	0	0	0.5	0.5
28.0	0	0	0.5	0.5
28.1	0	0	0.5	0.5
28.2	0	0	0.5	0.5
28.3	0	0	0.5	0.5
28.4	0	0	0.5	0.5
28.5	0	0	0.5	0.5
28.6	0	0	0.5	0.5
28.7	0	0.000042	0.5	0.5
28.8	0	0.004	0.5	0.5
28.9	0	0.025	0.5	0.5
29.0	0	0.058	0.5	0.5
29.1	0	0.1	0.5	0.5
29.2	0	0.3	0.5	0.5
29.3	0	0.31	0.5	0.5
29.4	0	0.34	0.5	0.5
29.5	0	0.41	0.5	0.5
29.6	0	0.41	0.5	0.5
29.7	0	0.41	0.5	0.5
29.8	0	0.41	0.5	0.5
29.9	0	0.41	0.5	0.5
30.0	0	0.41	0.5	0.5
30.1	0	0.38	0.5	0.5
30.2	0	0.35	0.5	0.5
30.3	0	0.32	0.5	0.5
30.4	0	0.31	0.5	0.5
30.5	0	0.24	0.5	0.5
30.6	0	0.09	0.5	0.5
30.7	0	0.047	0.5	0.5
30.8	0	0.011	0.5	0.5
30.9	0	0.002	0.5	0.5
31.0	0	0.49	0.5	0.5
31.1	0	0.49	0.5	0.5
31.2	0	0.48	0.5	0.5
31.3	0	0.064	0.5	0.5
31.4	0	0.031	0.5	0.5
31.5	0	0.0057	0.5	0.5
31.6	0	0.0023	0.5	0.5
31.7	0	0.0024	0.5	0.5

dB	1m	100m	200m	300m
31.8	0	0.0027	0.5	0.5
31.9	0	0.0019	0.5	0.5
32.0	0	0.0008	0.5	0.5
32.1	0	0.00027	0.5	0.5
32.2	0	0.5	0.5	0.5
32.3	0	0.5	0.5	0.5
32.4	0	0.5	0.5	0.5
32.5	0	0.5	0.5	0.5
32.6	0	0.5	0.5	0.5
32.7	0	0.5	0.5	0.5
32.8	0	0.5	0.5	0.5
32.9	0	0.5	0.5	0.5
33.0	0	0.5	0.5	0.5
33.1	0	0.5	0.5	0.5
33.2	0	0.5	0.5	0.5
33.3	0	0.5	0.5	0.5
33.4	0	0.5	0.5	0.5
33.5	0	0.5	0.5	0.5
33.6	0	0.5	0.5	0.5
33.7	0	0.5	0.5	0.5
33.8	0	0.5	0.5	0.5
33.9	0	0.5	0.5	0.5
34.0	0	0.5	0.5	0.5
34.1	0	0.5	0.5	0.5
34.2	0	0.5	0.5	0.5
34.3	0	0.5	0.5	0.5
34.4	0	0.5	0.5	0.5
34.5	0	0.5	0.5	0.5
34.6	0	0.5	0.5	0.5
34.7	0	0.5	0.5	0.5
34.8	0	0.5	0.5	0.5
34.9	0	0.5	0.5	0.5
35.0	0	0.5	0.5	0.5
35.1	0	0.5	0.5	0.5
35.2	0	0.5	0.5	0.5
35.3	0.00016	0.5	0.5	0.5
35.4	0.01	0.5	0.5	0.5
35.5	0.27	0.5	0.5	0.5
35.6	0.44	0.5	0.5	0.5
35.7	0.43	0.5	0.5	0.5
35.8	0.43	0.5	0.5	0.5
35.9	0.43	0.5	0.5	0.5
36.0	0.43	0.5	0.5	0.5
36.1	0.43	0.5	0.5	0.5
36.2	0.43	0.5	0.5	0.5
36.3	0.24	0.5	0.5	0.5
36.4	0.06	0.5	0.5	0.5
36.5	0.0025	0.5	0.5	0.5
36.6	0.31	0.5	0.5	0.5
36.7	0.47	0.5	0.5	0.5
36.8	0.0094	0.5	0.5	0.5
36.9	0.018	0.5	0.5	0.5
37.0	0.011	0.5	0.5	0.5

dB	1m	100m	200m	300m
37.1	0.01	0.5	0.5	0.5
37.2	0.01	0.5	0.5	0.5
37.3	0.0099	0.5	0.5	0.5
37.4	0.0094	0.5	0.5	0.5
37.5	0.0094	0.5	0.5	0.5
37.6	0.0052	0.5	0.5	0.5
37.7	0.0032	0.5	0.5	0.5
37.8	0.0016	0.5	0.5	0.5
37.9	0.00063	0.5	0.5	0.5
38.0	0.5	0.5	0.5	0.5
38.1	0.5	0.5	0.5	0.5
38.2	0.5	0.5	0.5	0.5
38.3	0.5	0.5	0.5	0.5
38.4	0.5	0.5	0.5	0.5
38.5	0.5	0.5	0.5	0.5
38.6	0.5	0.5	0.5	0.5
38.7	0.5	0.5	0.5	0.5
38.8	0.5	0.5	0.5	0.5
38.9	0.5	0.5	0.5	0.5
39.0	0.5	0.5	0.5	0.5
39.1	0.5	0.5	0.5	0.5
39.2	0.5	0.5	0.5	0.5
39.3	0.5	0.5	0.5	0.5
39.4	0.5	0.5	0.5	0.5
39.5	0.5	0.5	0.5	0.5
39.6	0.5	0.5	0.5	0.5
39.7	0.5	0.5	0.5	0.5
39.8	0.5	0.5	0.5	0.5
39.9	0.5	0.5	0.5	0.5
40.0	0.5	0.5	0.5	0.5
40.1	0.5	0.5	0.5	0.5
40.2	0.5	0.5	0.5	0.5
40.3	0.5	0.5	0.5	0.5
40.4	0.5	0.5	0.5	0.5
40.5	0.5	0.5	0.5	0.5
40.6	0.5	0.5	0.5	0.5
40.7	0.5	0.5	0.5	0.5
40.8	0.5	0.5	0.5	0.5
40.9	0.5	0.5	0.5	0.5
41.0	0.5	0.5	0.5	0.5
41.1	0.5	0.5	0.5	0.5
41.2	0.5	0.5	0.5	0.5
41.3	0.5	0.5	0.5	0.5
41.4	0.5	0.5	0.5	0.5
41.5	0.5	0.5	0.5	0.5
41.6	0.5	0.5	0.5	0.5
41.7	0.5	0.5	0.5	0.5
41.8	0.5	0.5	0.5	0.5
41.9	0.5	0.5	0.5	0.5
42.0	0.5	0.5	0.5	0.5
42.1	0.5	0.5	0.5	0.5
42.2	0.5	0.5	0.5	0.5
42.3	0.5	0.5	0.5	0.5

dB	1m	100m	200m	300m
42.4	0.5	0.5	0.5	0.5
42.5	0.5	0.5	0.5	0.5
42.6	0.5	0.5	0.5	0.5
42.7	0.5	0.5	0.5	0.5
42.8	0.5	0.5	0.5	0.5
42.9	0.5	0.5	0.5	0.5
43.0	0.5	0.5	0.5	0.5
43.1	0.5	0.5	0.5	0.5
43.2	0.5	0.5	0.5	0.5
43.3	0.5	0.5	0.5	0.5
43.4	0.5	0.5	0.5	0.5
43.5	0.5	0.5	0.5	0.5
43.6	0.5	0.5	0.5	0.5
43.7	0.5	0.5	0.5	0.5
43.8	0.5	0.5	0.5	0.5
43.9	0.5	0.5	0.5	0.5
44.0	0.5	0.5	0.5	0.5
44.1	0.5	0.5	0.5	0.5
44.2	0.5	0.5	0.5	0.5
44.3	0.5	0.5	0.5	0.5
44.4	0.5	0.5	0.5	0.5
44.5	0.5	0.5	0.5	0.5
44.6	0.5	0.5	0.5	0.5
44.7	0.5	0.5	0.5	0.5
44.8	0.5	0.5	0.5	0.5
44.9	0.5	0.5	0.5	0.5
45.0	0.5	0.5	0.5	0.5
45.1	0.5	0.5	0.5	0.5
45.2	0.5	0.5	0.5	0.5
45.3	0.5	0.5	0.5	0.5
45.4	0.5	0.5	0.5	0.5
45.5	0.5	0.5	0.5	0.5
45.6	0.5	0.5	0.5	0.5
45.7	0.5	0.5	0.5	0.5
45.8	0.5	0.5	0.5	0.5
45.9	0.5	0.5	0.5	0.5
46.0	0.5	0.5	0.5	0.5
46.1	0.5	0.5	0.5	0.5
46.2	0.5	0.5	0.5	0.5
46.3	0.5	0.5	0.5	0.5
46.4	0.5	0.5	0.5	0.5
46.5	0.5	0.5	0.5	0.5
46.6	0.5	0.5	0.5	0.5
46.7	0.5	0.5	0.5	0.5
46.8	0.5	0.5	0.5	0.5
46.9	0.5	0.5	0.5	0.5
47.0	0.5	0.5	0.5	0.5

表 3 ユニポーラの符号誤り率と減衰器の減衰率の関係

dB	1m	100m	200m	300m
0.0	0	0	0.015	0.36
0.1	0	0	0.019	0.36
0.2	0	0	0.025	0.36
0.3	0	0	0.032	0.36
0.4	0	0	0.037	0.36
0.5	0	0	0.044	0.36
0.6	0	0	0.052	0.36
0.7	0	0	0.059	0.36
0.8	0	0	0.067	0.36
0.9	0	0	0.075	0.36
1.0	0	0	0.083	0.36
1.1	0	0	0.093	0.36
1.2	0	0	0.1	0.36
1.3	0	0	0.29	0.37
1.4	0	0	0.3	0.38
1.5	0	0	0.3	0.39
1.6	0	0	0.32	0.39
1.7	0	0	0.32	0.4
1.8	0	0	0.33	0.4
1.9	0	0	0.34	0.41
2.0	0	0	0.35	0.41
2.1	0	0	0.36	0.41
2.2	0	0	0.37	0.41
2.3	0	0	0.39	0.4
2.4	0	0	0.4	0.34
2.5	0	0	0.41	0.33
2.6	0	0	0.41	0.31
2.7	0	0	0.42	0.3
2.8	0	0	0.42	0.23
2.9	0	0	0.42	0.19
3.0	0	0	0.43	0.1
3.1	0	0	0.43	0.1
3.2	0	0	0.43	0.091
3.3	0	0.000026	0.43	0.082
3.4	0	0.0001	0.43	0.076
3.5	0	0.0008	0.43	0.068
3.6	0	0.0034	0.43	0.06
3.7	0	0.0084	0.43	0.054
3.8	0	0.018	0.43	0.048
3.9	0	0.03	0.42	0.041
4.0	0	0.049	0.41	0.034
4.1	0	0.068	0.35	0.028
4.2	0	0.09	0.3	0.023
4.3	0	0.25	0.22	0.017
4.4	0	0.28	0.1	0.014
4.5	0	0.33	0.092	0.01
4.6	0	0.36	0.078	0.0069
4.7	0	0.37	0.066	0.0043
4.8	0	0.39	0.053	0.0023
4.9	0	0.41	0.043	0.0016
5.0	0.01	0.42	0.033	0.0032
5.1	0.01	0.43	0.025	0.01
5.2	0.42	0.43	0.016	0.5

dB	1m	100m	200m	300m
5.3	0.43	0.4	0.01	0.5
5.4	0.43	0.32	0.0047	0.5
5.5	0.43	0.21	0.0022	0.5
5.6	0.43	0.096	0.002	0.5
5.7	0.43	0.072	0.041	0.5
5.8	0.43	0.045	0.5	0.5
5.9	0.43	0.023	0.5	0.5
6.0	0.43	0.01	0.5	0.5
6.1	0.43	0.0032	0.5	0.5
6.2	0.43	0.0025	0.5	0.5
6.3	0.43	0.5	0.5	0.5
6.4	0.43	0.5	0.5	0.5
6.5	0.43	0.5	0.5	0.5
6.6	0.43	0.5	0.5	0.5
6.7	0.37	0.5	0.5	0.5
6.8	0.5	0.5	0.5	0.5
6.9	0.5	0.5	0.5	0.5
7.0	0.5	0.5	0.5	0.5
7.1	0.5	0.5	0.5	0.5
7.2	0.5	0.5	0.5	0.5
7.3	0.5	0.5	0.5	0.5
7.4	0.5	0.5	0.5	0.5
7.5	0.5	0.5	0.5	0.5
7.6	0.5	0.5	0.5	0.5
7.7	0.5	0.5	0.5	0.5
7.8	0.5	0.5	0.5	0.5
7.9	0.5	0.5	0.5	0.5
8.0	0.5	0.5	0.5	0.5
8.1	0.5	0.5	0.5	0.5
8.2	0.5	0.5	0.5	0.5
8.3	0.5	0.5	0.5	0.5
8.4	0.5	0.5	0.5	0.5
8.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8.6	0.5	0.5	0.5	0.5
8.7	0.5	0.5	0.5	0.5
8.8	0.5	0.5	0.5	0.5
8.9	0.5	0.5	0.5	0.5
9.0	0.5	0.5	0.5	0.5
9.1	0.5	0.5	0.5	0.5
9.2	0.5	0.5	0.5	0.5
9.3	0.5	0.5	0.5	0.5
9.4	0.5	0.5	0.5	0.5
9.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9.6	0.5	0.5	0.5	0.5
9.7	0.5	0.5	0.5	0.5
9.8	0.5	0.5	0.5	0.5
9.9	0.5	0.5	0.5	0.5
10.0	0.5	0.5	0.5	0.5
10.1	0.5	0.5	0.5	0.5
10.2	0.5	0.5	0.5	0.5
10.3	0.5	0.5	0.5	0.5
10.4	0.5	0.5	0.5	0.5
10.5	0.5	0.5	0.5	0.5

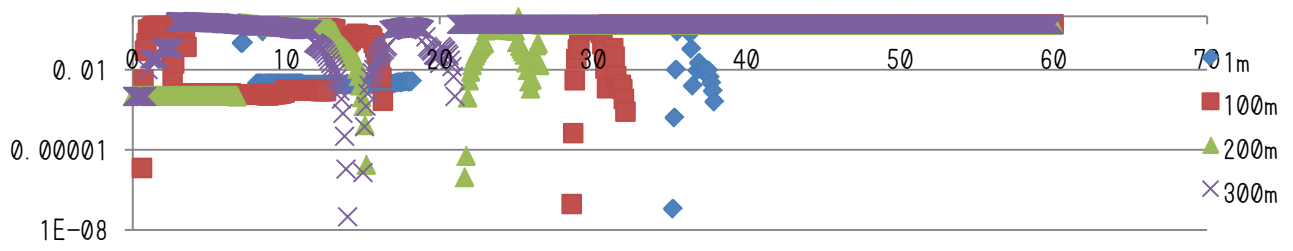


図 9 同軸ケーブル伝送信号(バイポーラ)の符号誤り率と減衰器の減衰率の関係

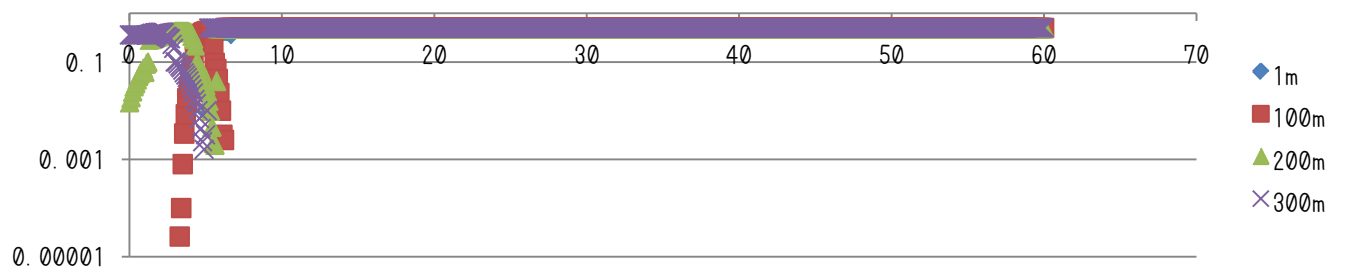


図 10 同軸ケーブル伝送信号(ユニポーラ)の符号誤り率と減衰器の減衰率の関係

図 4 中のコイルの長さや巻き数は次の様にして求めた。

長さ l [m]、断面積 S [m²]、単位長さあたりの巻き数 n [m⁻¹]のコイルの自己インダクタンス L [H]は以下の式で求められる。

$$L = \mu_0 n^2 l S \quad (\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m})$$

コイル全体の巻き数を N とすると、 $N = nl$ より

$$L = \mu_0 n^2 l S = \mu_0 n \cdot nl \cdot S = \mu_0 n N S$$

となる。

コイルの直径を 10mm としたが、金属の弾性で巻いたコイルの直径が大きくなると考え直径 11mm で計算した。断面積 S は、

$$S = (5.5 \times 10^{-3})^2 \times \pi = 9.5 \times 10^{-5}$$

となる。

コイルの巻き数 N を 1 としたが、回路に接続するために若干多く巻くため、誤差を考慮して 1.5 で計算をした。回路で用いるコイルの自己インダクタンスは 50nH であるので、単位長さあたりの巻き数 n は

$$50 \times 10^{-9} = 4\pi \times 10^{-7} \times n \times 1.5 \times 9.5 \times 10^{-5} \\ \therefore n = 279.4$$

となる。

$N = nl$ であるから、得られた n と、設定したコイルの巻き数 N を代入して計算すると長さ l は

$$l = \frac{1.5}{279.4} = 0.0054$$

となる。つまり $l = 0.0054$ [m] = 5.4[cm]であることがわかった。

以上より、自己インダクタンス 50nH を実現するためのコイルの巻き方は直径 11mm で、長さ 5.4cm、巻き数 1.5 のコイルである。

これに基づいてコイルを作成し、作成したコイルの自己インダクタンスを計測した。LC 直列回路の共振周波数は次の式で求めることができる。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

コイルのインダクタンスが 50nH で、コンデンサの容量が 0.01 μ F であれば、それらを直列に接続した回路の共振周波数は 7.1MHz になる。

図 11 に、実際にネットワークアナライザを用いてコイルの共振周波数を測定したものを示す。

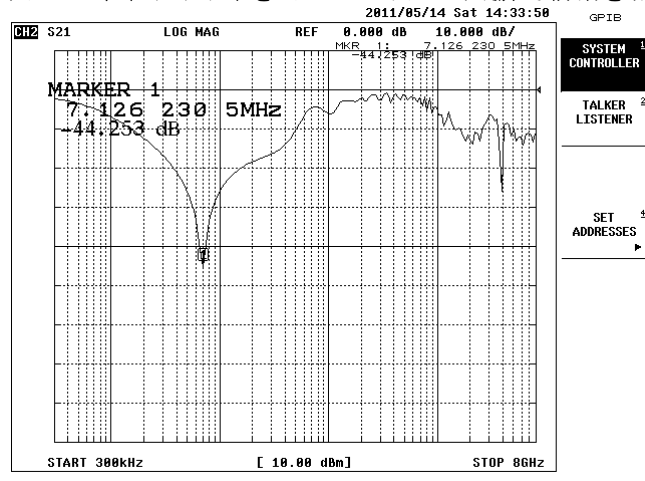


図 11 作成したコイルの共振周波数

図 11 は、共振周波数にマーカーを設定している。マーカーの値は 7.126MHz となっている。このことから、作成したコイルは目的の自己インダクタンスをもっていることが確認できた。

2.3.4. 実験項目 2.2.4 について

増幅回路の周波数特性について、図 12 に示す。なお、入力の段階で 10dB 信号を減衰させている。

図 12 より、200MHz までの信号が増幅され、それより大きい周波数の信号は増幅されない事がわかる。

増幅回路を挿入した回路における符号誤り率と減衰器の減衰率の関係を表 4 に示す。

またこの関係で、符号誤り率と減衰器の減衰率の関数について図 13 に示す。

図 9 では減衰率を大きくしていくと信号が小さくなり、誤り率測定装置で信号が検出できずに 40dB では最低の誤り率であったが、増幅回路を挿入することにより、40dB でも信号の誤り率が測定できた。

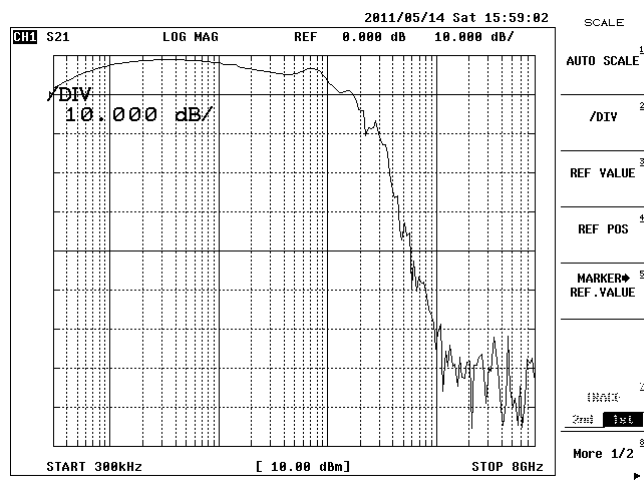


図 12 増幅回路の周波数特性

表 4 増幅回路を挿入した伝送路のバイポーラ信号の符号誤り率と減衰器の減衰率の関係

dB	1m	100m	200m	300m
0.0	0.51	0	0	0
0.1	0.51	0	0	0
0.2	0.51	0	0	0
0.3	0.51	0	0	0
0.4	0.51	0	0	0
0.5	0.51	0	0	0
0.6	0.51	0	0	0
0.7	0.51	0	0	0
0.8	0.51	0	0	0
0.9	0.51	0	0	0
1.0	0.48	0	0	0
1.1	0.48	0	0	0
1.2	0.48	0	0	0
1.3	0.48	0	0	0
1.4	0.48	0	0	0
1.5	0.48	0	0	0
1.6	0.48	0	0	0
1.7	0.48	0	0	0
1.8	0.48	0	0	0
1.9	0.48	0	0	0
2.0	0.48	0	0	0
2.1	0.48	0	0	0
2.2	0.47	0	0	0
2.3	0.47	0	0	0
2.4	0.46	0	0	0
2.5	0.43	0	0	0
2.6	0.42	0	0	0
2.7	0.42	0	0	0
2.8	0.42	0	0	0
2.9	0.4	0	0	0
3.0	0.37	0	0	0
3.1	0.37	0	0	0
3.2	0.35	0	0	0
3.3	0.29	0	0	0
3.4	0.1	0	0	0
3.5	0.1	0	0	0
3.6	0.098	0	0	0
3.7	0.098	0	0	0
3.8	0.095	0	0	0
3.9	0.092	0	0	0
4.0	0.089	0	0	0
4.1	0.086	0	0	0
4.2	0.084	0	0	0
4.3	0.08	0	0	0
4.4	0.073	0	0	0
4.5	0.066	0	0	0
4.6	0.06	0	0	0
4.7	0.057	0	0	0
4.8	0.053	0	0	0
4.9	0.047	0	0	0
5.0	0.043	0	0	0
5.1	0.037	0	0	0
5.2	0.035	0	0	0

dB	1m	100m	200m	300m
5.3	0.03	0	0	0
5.4	0.026	0	0	0
5.5	0.02	0	0	0
5.6	0.04	0	0	0
5.7	0.032	0	0	0
5.8	0.032	0	0	0
5.9	0.027	0	0	0
6.0	0.022	0	0	0
6.1	0.013	0	0	0
6.2	0.0088	0	0	0
6.3	0.0082	0	0	0
6.4	0.0051	0	0	0.0003
6.5	0.0043	0	0	0.0085
6.6	0.0033	0	0	0.021
6.7	0.0025	0	0	0.034
6.8	0.0018	0	0	0.048
6.9	0.0012	0	0	0.062
7.0	0.00068	0	0	0.081
7.1	0.34	0	0	0.095
7.2	0.13	0	0	0.3
7.3	0.000037	0	0	0.32
7.4	0.15	0	0	0.37
7.5	0	0	0	0.4
7.6	0	0	0	0.42
7.7	0	0	0	0.43
7.8	0	0	0	0.43
7.9	0	0	0	0.43
8.0	0	0	0	0.43
8.1	0	0	0	0.43
8.2	0	0	0	0.42
8.3	0	0	0	0.42
8.4	0	0	0	0.42
8.5	0	0	0	0.41
8.6	0	0	0	0.4
8.7	0	0	0	0.39
8.8	0	0	0	0.37
8.9	0	0	0	0.36
9.0	0	0	0	0.34
9.1	0	0	0	0.11
9.2	0	0	0	0.093
9.3	0	0	0	0.077
9.4	0	0	0	0.062
9.5	0	0	0	0.035
9.6	0	0	0	0.01
9.7	0	0	0	0.0017
9.8	0	0	0	0.5
9.9	0	0	0	0.49
10.0	0	0	0	0.49
10.1	0	0	0	0.49
10.2	0	0	0	0.41
10.3	0	0	0	0.19
10.4	0	0	0	0.048
10.5	0	0	0	0.00058

dB	1m	100m	200m	300m
10.6	0	0	0	0
10.7	0	0	0	0
10.8	0	0	0	0
10.9	0	0	0	0
11.0	0	0	0	0
11.1	0	0	0	0
11.2	0	0	0	0
11.3	0	0	0	0
11.4	0	0	0	0
11.5	0	0	0	0
11.6	0.000032	0	0	0
11.7	0.0001	0	0	0
11.8	0.00087	0	0	0
11.9	0.0025	0	0	0
12.0	0.0055	0	0	0
12.1	0.0048	0	0	0
12.2	0.0043	0	0	0
12.3	0.0066	0	0	0
12.4	0.0082	0	0	0
12.5	0.0053	0	0	0
12.6	0.0052	0	0	0
12.7	0.011	0	0	0
12.8	0.012	0	0	0
12.9	0.0045	0	0.0016	0
13.0	0.0059	0	0.031	0
13.1	0.0056	0	0.1	0
13.2	0.006	0	0.35	0
13.3	0.008	0	0.43	0
13.4	0.0087	0	0.43	0
13.5	0.0036	0	0.43	0
13.6	0.0017	0	0.43	0
13.7	0.0097	0	0.43	0
13.8	0.000072	0	0.43	0
13.9	0	0	0.43	0
14.0	0	0	0.43	0
14.1	0	0	0.43	0
14.2	0	0	0.43	0
14.3	0	0	0.43	0
14.4	0	0	0.43	0
14.5	0	0	0.41	0
14.6	0	0	0.37	0
14.7	0	0	0.094	0
14.8	0	0	0.025	0
14.9	0	0	0.0023	0
15.0	0	0	0.43	0
15.1	0	0	0.5	0
15.2	0	0	0.5	0
15.3	0	0	0.5	0
15.4	0	0	0.49	0
15.5	0	0	0.15	0
15.6	0	0	0.00061	0
15.7	0	0	0.0001	0
15.8	0	0	0.0001	0

dB	1m	100m	200m	300m
15.9	0	0	0.0001	0
16.0	0	0	0.0001	0
16.1	0	0	0.0001	0
16.2	0	0	0.0001	0
16.3	0	0	0.0001	0
16.4	0	0	0.0001	0
16.5	0	0	0.0001	0
16.6	0	0	0.0001	0
16.7	0	0	0.0001	0
16.8	0	0	0.0001	0
16.9	0	0	0.0001	0
17.0	0	0	0.0001	0
17.1	0	0	0.0001	0
17.2	0	0	0.0001	0
17.3	0	0	0.0001	0
17.4	0	0	0.0001	0
17.5	0	0	0.0001	0
17.6	0	0	0.0001	0
17.7	0	0	0.0001	0
17.8	0	0	0.0001	0
17.9	0	0	0.0001	0
18.0	0	0	0.0001	0
18.1	0	0	0.0001	0
18.2	0	0	0.0001	0
18.3	0	0	0.0001	0
18.4	0	0	0.0001	0
18.5	0	0	0.0001	0
18.6	0	0	0.0001	0
18.7	0	0	0.0001	0
18.8	0	0	0.0001	0
18.9	0	0	0.0001	0
19.0	0	0.00086	0.0001	0
19.1	0	0.072	0.0001	0.38
19.2	0	0.31	0.0001	0.38
19.3	0	0.31	0.0001	0.38
19.4	0	0.31	0.0001	0.38
19.5	0	0.39	0.0001	0.37
19.6	0	0.43	0.0001	0.37
19.7	0	0.43	0.0001	0.37
19.8	0	0.43	0.0001	0.36
19.9	0	0.43	0.0001	0.35
20.0	0	0.43	0.0001	0.35
20.1	0	0.43	0.0001	0.34
20.2	0	0.43	0.0001	0.33
20.3	0	0.43	0.0001	0.33
20.4	0	0.39	0.0001	0.33
20.5	0	0.33	0.0001	0.32
20.6	0	0.3	0.0001	0.32
20.7	0	0.28	0.0001	0.31
20.8	0	0.2	0.0001	0.31
20.9	0	0.063	0.0001	0.3
21	0	0.0084	0.0001	0.3
21.1	0	0.072	0.0001	0.29

dB	1m	100m	200m	300m
21.2	0	0.5	0.0001	0.28
21.3	0	0.47	0.0001	0.27
21.4	0	0.022	0.0001	0.25
21.5	0	0.00091	0.0001	0.22
21.6	0	0.00088	0.0001	0.2
21.7	0	0.00089	0.0001	0.19
21.8	0	0.00089	0.0001	0.15
21.9	0	0.00086	0.0001	0.11
22.0	0	0.00084	0.0001	0.097
22.1	0	0.00075	0.00095	0.094
22.2	0	0.00081	0.0001	0.1
22.3	0	0.00083	0.0001	0.14
22.4	0	0.00085	0.0001	0.19
22.5	0	0.00085	0.0001	0.25
22.6	0	0.00083	0.0001	0.28
22.7	0	0.00075	0.0001	0.3
22.8	0	0.00074	0.0001	0.34
22.9	0	0.00073	0.0001	0.37
23.0	0	0.00072	0.0001	0.4
23.1	0	0.00072	0.0001	0.42
23.2	0	0.0007	0.0001	0.43
23.3	0	0.00067	0.0001	0.45
23.4	0	0.00065	0.0001	0.45
23.5	0	0.00065	0.0001	0.46
23.6	0	0.00065	0.0001	0.46
23.7	0	0.00065	0.0001	0.46
23.8	0	0.00064	0.0001	0.46
23.9	0	0.00066	0.0001	0.46
24.0	0	0.00064	0.0001	0.46
24.1	0	0.00063	0.0001	0.46
24.2	0	0.00063	0.0001	0.46
24.3	0	0.00062	0.000098	0.46
24.4	0	0.00062	0.0001	0.46
24.5	0	0.00062	0.0001	0.46
24.6	0	0.00061	0.000098	0.46
24.7	0	0.0006	0.0001	0.46
24.8	0	0.0006	0.000099	0.46
24.9	0	0.0006	0.078	0.46
25.0	0	0.0006	0.013	0.46
25.1	0	0.00058	0.00087	0.45
25.2	0	0.00056	0	0.43
25.3	0	0.00054	0	0.4
25.4	0.0054	0.00055	0	0.37
25.5	0.096	0.00056	0	0.29
25.6	0.32	0.00054	0	0.17
25.7	0.36	0.00052	0	0.072
25.8	0.42	0.00051	0	0.04
25.9	0.43	0.00051	0	0.031
26.0	0.43	0.00049	0	0.015
26.1	0.43	0.00049	0	0.00094
26.2	0.43	0.00048	0	0.00014
26.3	0.43	0.00047	0	0.000032
26.4	0.43	0.00047	0	0.000032

dB	1m	100m	200m	300m
26.5	0.43	0.00046	0	0.000032
26.6	0.43	0.00045	0	0
26.7	0.36	0.00044	0	0
26.8	0.31	0.00044	0	0
26.9	0.29	0.00045	0	0
27.0	0.098	0.00044	0	0
27.1	0.025	0.00044	0	0
27.2	0.095	0.00044	0	0
27.3	0.053	0.00044	0	0
27.4	0.05	0.00044	0	0
27.5	0.037	0.00041	0	0
27.6	0.014	0.00041	0	0
27.7	0.022	0.00041	0	0
27.8	0.011	0.0004	0	0
27.9	0.02	0.0004	0	0
28.0	0.021	0.0004	0	0
28.1	0.02	0.00038	0	0
28.2	0.02	0.00039	0	0
28.3	0.02	0.00038	0	0
28.4	0.02	0.00038	0	0
28.5	0.02	0.00038	0	0
28.6	0.02	0.00038	0	0
28.7	0.02	0.00038	0	0
28.8	0.02	0.00037	0	0
28.9	0.02	0.00037	0	0
29.0	0.02	0.00037	0	0
29.1	0.02	0.00039	0	0
29.2	0.02	0.00037	0	0
29.3	0.02	0.00037	0	0
29.4	0.02	0.00037	0	0
29.5	0.02	0.00037	0	0
29.6	0.02	0.00036	0	0
29.7	0.02	0.00036	0	0
29.8	0.02	0.00035	0	0
29.9	0.02	0.00034	0	0
30.0	0.02	0.00034	0	0
30.1	0.02	0.00034	0	0
30.2	0.02	0.00034	0	0
30.3	0.02	0.00034	0	0
30.4	0.02	0.00035	0	0
30.5	0.02	0.00034	0	0
30.6	0.02	0.00034	0	0
30.7	0.02	0.00033	0	0
30.8	0.02	0.1	0	0
30.9	0.02	0.084	0	0
31.0	0.019	0.056	0	0
31.1	0.019	0.029	0	0
31.2	0.019	0.012	0	0
31.3	0.019	0.0055	0	0
31.4	0.019	0.0028	0	0
31.5	0.019	0.00035	0	0
31.6	0.019	0.000075	0	0
31.7	0.019	0	0	0

dB	1m	100m	200m	300m
31.8	0.019	0	0	0
31.9	0.019	0	0	0
32.0	0.019	0	0	0
32.1	0.019	0	0	0
32.2	0.019	0	0	0
32.3	0.019	0	0	0
32.4	0.019	0	0	0
32.5	0.019	0	0	0
32.6	0.019	0	0	0
32.7	0.019	0	0	0
32.8	0.019	0	0	0
32.9	0.019	0	0	0
33.0	0.019	0	0	0
33.1	0.019	0	0	0
33.2	0.019	0	0	0
33.3	0.019	0	0	0
33.4	0.019	0	0	0
33.5	0.019	0	0	0
33.6	0.019	0	0	0
33.7	0.019	0	0	0.000015
33.8	0.019	0	0	0.00001
33.9	0.019	0	0	0
34.0	0.019	0	0	0.00002
34.1	0.019	0	0	0.00005
34.2	0.019	0	0	0.00013
34.3	0.019	0	0	0.00017
34.4	0.019	0	0	0.00028
34.5	0.019	0	0	0.00037
34.6	0.019	0	0	0.001
34.7	0.019	0	0	0.0017
34.8	0.019	0	0	0.0047
34.9	0.019	0	0	0.0084
35.0	0.019	0	0	0.016
35.1	0.019	0	0	0.028
35.2	0.019	0	0	0.041
35.3	0.019	0	0	0.057
35.4	0.019	0	0	0.071
35.5	0.019	0	0	0.097
35.6	0.019	0	0	0.13
35.7	0.019	0	0	0.29
35.8	0.019	0	0	0.34
35.9	0.019	0	0	0.38
36.0	0.018	0	0	0.4
36.1	0.018	0	0	0.42
36.2	0.018	0	0	0.43
36.3	0.018	0	0	0.43
36.4	0.018	0	0	0.42
36.5	0.018	0	0	0.41
36.6	0.018	0	0	0.41
36.7	0.018	0	0	0.4
36.8	0.018	0	0	0.39
36.9	0.37	0	0	0.38
37	0.37	0	0	0.36

dB	1m	100m	200m	300m
37.1	0.37	0	0	0.35
37.2	0.37	0	0	0.32
37.3	0.37	0	0	0.1
37.4	0.37	0	0	0.082
37.5	0.37	0	0	0.058
37.6	0.37	0	0	0.035
37.7	0.37	0	0	0.015
37.8	0.37	0	0	0.004
37.9	0.35	0	0	0.0022
38.0	0.33	0	0	0.018
38.1	0.28	0	0	0.32
38.2	0.1	0	0	0.37
38.3	0.081	0	0	0.2
38.4	0.073	0	0	0.1
38.5	0.056	0	0	0.028
38.6	0.035	0	0	0.0062
38.7	0.018	0	0	0.00067
38.8	0.0074	0	0	0.00012
38.9	0.0031	0	0	0.00012
39	0.00099	0	0	0.0001
39.1	0.000039	0	0	0.000087
39.2	2.1E-06	0	0	0.000083
39.3	3.1E-08	0	0	0.5
39.4	0	0	0	0.5
39.5	0	0	0	0.5
39.6	0	0	0	0.5
39.7	0	0	0	0.5
39.8	0	0	0	0.5
39.9	0	0	0	0.5
40.0	0	0	0	0.5
40.1	0	0	0	0.5
40.2	0	0	0	0.5
40.3	0	0	0	0.5
40.4	0	0	0	0.5
40.5	0	0	0	0.5
40.6	0	0	0	0.5
40.7	0	0	0	0.5
40.8	0	0	0.000013	0.5
40.9	0	0	0.000039	0.5
41.0	0	0	0.00057	0.5
41.1	0	0	0.0054	0.5
41.2	0	0	0.03	0.5
41.3	0	0	0.095	0.5
41.4	0	0	0.35	0.5
41.5	0	0	0.42	0.5
41.6	0	0	0.43	0.5
41.7	0	0	0.43	0.5
41.8	0	0	0.43	0.5
41.9	0	0	0.43	0.5
42.0	0	0	0.43	0.5
42.1	0	0	0.43	0.5
42.2	0	0	0.43	0.5
42.3	0	0	0.42	0.5

dB	1m	100m	200m	300m
42.4	0	0	0.41	0.5
42.5	0	0	0.38	0.5
42.6	0	0	0.34	0.5
42.7	0	0	0.096	0.5
42.8	0	0	0.05	0.5
42.9	0	0	0.015	0.5
43.0	0	0	0.003	0.5
43.1	0	0	0.0025	0.5
43.2	0	0	0.041	0.5
43.3	0	0	0.047	0.5
43.4	0	0	0.33	0.5
43.5	0	0	0.21	0.5
43.6	0	0	0.059	0.5
43.7	0	0	0.025	0.5
43.8	0	0	0.0035	0.5
43.9	0	0	0.002	0.5
44.0	0	0	0.00099	0.5
44.1	0	0	0.00012	0.5
44.2	0	0	0.0001	0.5
44.3	0	0	0.00015	0.5
44.4	0	0	0.00014	0.5
44.5	0	0	0.0001	0.5
44.6	0	0	0.000086	0.5
44.7	0	0	0.00008	0.5
44.8	0	0	0.5	0.5
44.9	0	0	0.5	0.5
45.0	0	0	0.5	0.5
45.1	0	0	0.5	0.5
45.2	0	0	0.5	0.5
45.3	0	0	0.5	0.5
45.4	0	0	0.5	0.5
45.5	0	0	0.5	0.5
45.6	0	0	0.5	0.5
45.7	0	0	0.5	0.5
45.8	0	0	0.5	0.5
45.9	0	0	0.5	0.5
46.0	0	0	0.5	0.5
46.1	0	0	0.5	0.5
46.2	0	0	0.5	0.5
46.3	0	0	0.5	0.5
46.4	0	0	0.5	0.5
46.5	0	0	0.5	0.5
46.6	0	0	0.5	0.5
46.7	0	0	0.5	0.5
46.8	0	0.000014	0.5	0.5
46.9	0	0.00077	0.5	0.5
47.0	0	0.014	0.5	0.5
47.1	0	0.068	0.5	0.5
47.2	0	0.3	0.5	0.5
47.3	0	0.32	0.5	0.5
47.4	0	0.34	0.5	0.5
47.5	0	0.39	0.5	0.5
47.6	0	0.42	0.5	0.5

dB	1m	100m	200m	300m
47.7	0	0.43	0.5	0.5
47.8	0	0.43	0.5	0.5
47.9	0	0.43	0.5	0.5
48.0	0	0.43	0.5	0.5
48.1	0	0.42	0.5	0.5
48.2	0	0.39	0.5	0.5
48.3	0	0.35	0.5	0.5
48.4	0	0.32	0.5	0.5
48.5	0	0.26	0.5	0.5
48.6	0	0.094	0.5	0.5
48.7	0	0.064	0.5	0.5
48.8	0	0.03	0.5	0.5
48.9	0	0.0099	0.5	0.5
49.0	0	0.0017	0.5	0.5
49.1	0	0.0066	0.5	0.5
49.2	0	0.18	0.5	0.5
49.3	0	0.42	0.5	0.5
49.4	0	0.37	0.5	0.5
49.5	0	0.08	0.5	0.5
49.6	0	0.0077	0.5	0.5
49.7	0	0.00057	0.5	0.5
49.8	0	0.00017	0.5	0.5
49.9	0	0.00021	0.5	0.5
50.0	0	0.00034	0.5	0.5
50.1	0	0.00021	0.5	0.5
50.2	0	0.012	0.5	0.5
50.3	0	0.000093	0.5	0.5
50.4	0	0.5	0.5	0.5
50.5	0	0.5	0.5	0.5
50.6	0	0.5	0.5	0.5
50.7	0	0.5	0.5	0.5
50.8	0	0.5	0.5	0.5
50.9	0	0.5	0.5	0.5
51.0	0	0.5	0.5	0.5
51.1	0	0.5	0.5	0.5
51.2	0	0.5	0.5	0.5
51.3	0	0.5	0.5	0.5
51.4	0	0.5	0.5	0.5
51.5	0	0.5	0.5	0.5
51.6	0	0.5	0.5	0.5
51.7	0	0.5	0.5	0.5
51.8	0	0.5	0.5	0.5
51.9	0	0.5	0.5	0.5
52.0	0	0.5	0.5	0.5
52.1	3.1E-08	0.5	0.5	0.5
52.2	3.1E-08	0.5	0.5	0.5
52.3	0	0.5	0.5	0.5
52.4	0	0.5	0.5	0.5
52.5	0	0.5	0.5	0.5
52.6	1.5E-07	0.5	0.5	0.5
52.7	3.3E-06	0.5	0.5	0.5
52.8	0.00027	0.5	0.5	0.5
52.9	0.0047	0.5	0.5	0.5

dB	1m	100m	200m	300m
53.0	0.018	0.5	0.5	0.5
53.1	0.044	0.5	0.5	0.5
53.2	0.074	0.5	0.5	0.5
53.3	0.31	0.5	0.5	0.5
53.4	0.35	0.5	0.5	0.5
53.5	0.37	0.5	0.5	0.5
53.6	0.4	0.5	0.5	0.5
53.7	0.42	0.5	0.5	0.5
53.8	0.43	0.5	0.5	0.5
53.9	0.43	0.5	0.5	0.5
54.0	0.43	0.5	0.5	0.5
54.1	0.41	0.5	0.5	0.5
54.2	0.38	0.5	0.5	0.5
54.3	0.35	0.5	0.5	0.5
54.4	0.31	0.5	0.5	0.5
54.5	0.093	0.5	0.5	0.5
54.6	0.059	0.5	0.5	0.5
54.7	0.026	0.5	0.5	0.5
54.8	0.0097	0.5	0.5	0.5
54.9	0.0018	0.5	0.5	0.5
55.0	0.0058	0.5	0.5	0.5
55.1	0.2	0.5	0.5	0.5
55.2	0.23	0.5	0.5	0.5
55.3	0.035	0.5	0.5	0.5
55.4	0.02	0.5	0.5	0.5
55.5	0.0067	0.5	0.5	0.5
55.6	0.0045	0.5	0.5	0.5
55.7	0.0028	0.5	0.5	0.5
55.8	0.0052	0.5	0.5	0.5
55.9	0.0026	0.5	0.5	0.5
56.0	0.0016	0.5	0.5	0.5
56.1	0.00056	0.5	0.5	0.5
56.2	0.00022	0.5	0.5	0.5
56.3	0.5	0.5	0.5	0.5
56.4	0.5	0.5	0.5	0.5
56.5	0.5	0.5	0.5	0.5
56.6	0.5	0.5	0.5	0.5
56.7	0.5	0.5	0.5	0.5
56.8	0.5	0.5	0.5	0.5
56.9	0.5	0.5	0.5	0.5
57.0	0.5	0.5	0.5	0.5
57.1	0.5	0.5	0.5	0.5
57.2	0.5	0.5	0.5	0.5
57.3	0.5	0.5	0.5	0.5
57.4	0.5	0.5	0.5	0.5
57.5	0.5	0.5	0.5	0.5
57.6	0.5	0.5	0.5	0.5
57.7	0.5	0.5	0.5	0.5
57.8	0.5	0.5	0.5	0.5
57.9	0.5	0.5	0.5	0.5
58.0	0.5	0.5	0.5	0.5
58.1	0.5	0.5	0.5	0.5
58.2	0.5	0.5	0.5	0.5

dB	1m	100m	200m	300m
58.3	0.5	0.5	0.5	0.5
58.4	0.5	0.5	0.5	0.5
58.5	0.5	0.5	0.5	0.5
58.6	0.5	0.5	0.5	0.5
58.7	0.5	0.5	0.5	0.5
58.8	0.5	0.5	0.5	0.5
58.9	0.5	0.5	0.5	0.5
59.0	0.5	0.5	0.5	0.5
59.1	0.5	0.5	0.5	0.5
59.2	0.5	0.5	0.5	0.5
59.3	0.5	0.5	0.5	0.5
59.4	0.5	0.5	0.5	0.5
59.5	0.5	0.5	0.5	0.5
59.6	0.5	0.5	0.5	0.5
59.7	0.5	0.5	0.5	0.5
59.8	0.5	0.5	0.5	0.5
59.9	0.5	0.5	0.5	0.5
60	0.5	0.5	0.5	0.5

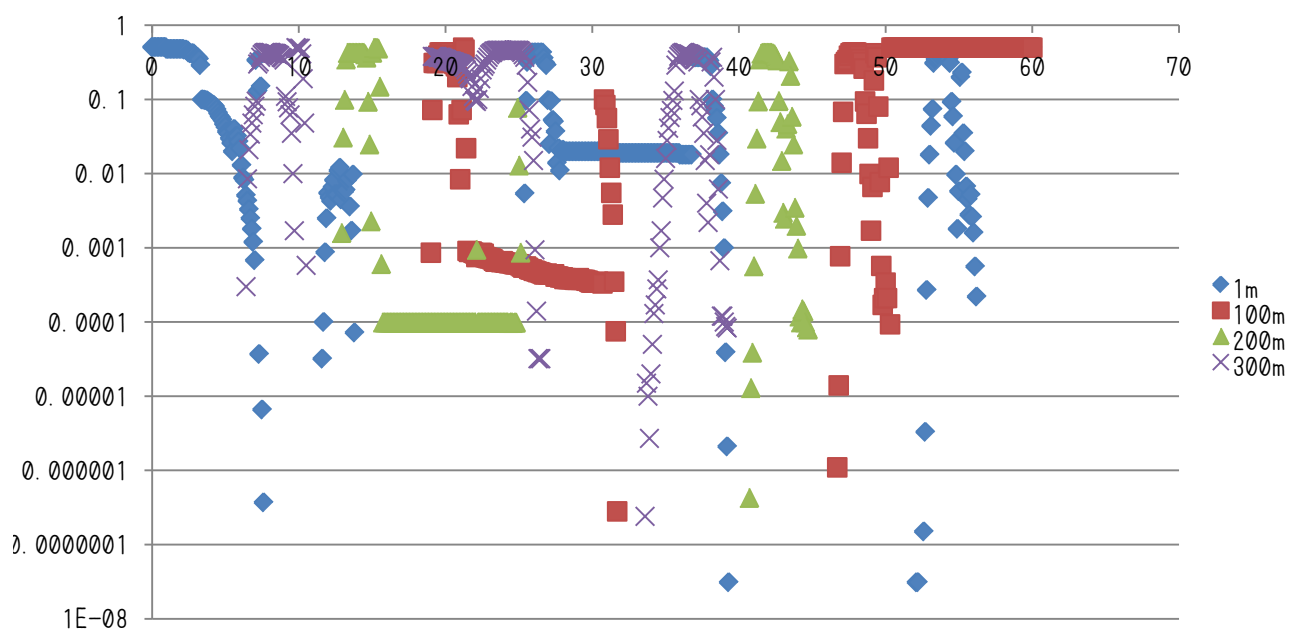


図 13 増幅回路を挿入した同軸ケーブル伝送信号(バイポーラ)の符号誤り率と減衰器の減衰率の関係

3. 実験 2: 光ファイバ伝送路の特性

3. 1. 実験項目

3. 1. 1. 光ファイバケーブルを伝送した後の波形観測

光ファイバを用いた伝送実験を行った。図 14 を用いて、光ファイバを伝送した後の波形とアイパターンを観測し、同軸ケーブルの場合と比較した。また、光ファイバの周波数特性を測定し、同軸ケーブルの周波数特性と比較した。光ファイバはシングルモード光ファイバを用いた。

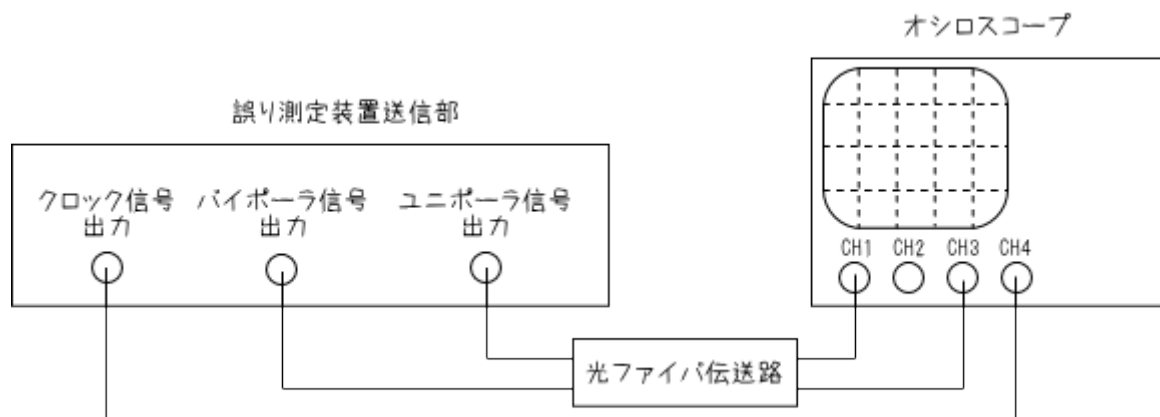


図 14 実験構成

3. 1. 2. 光ファイバケーブルの周波数特性測定

図 15 を用いて、光ファイバの周波数特性を測定した。光テストセット(光信号源)からの波長 1550nm の光を、ネットワークアナライザの TEST PORT1 から出力される掃引高周波信号によって変調し、光ファイバ伝送後、光検出器で光電気変換した信号をネットワークアナライザの TEST PORT2 に加えることで、実験項目 2. 2. 2 で行った同軸ケーブルの周波数特性の測定と同様に、周波数特性を測定した。

変調器の直流バイアス電圧はおおよそ 1.0~2.0V の範囲に、また出力波形の振幅が最も大きくなるように設定し、光ファイバケーブルとして参照用の短い光ケーブルを接続した。光信号を入力した状態でネットワークアナライザの較正を行い、光ファイバを長さ 1km のものに置き換え、再び光信号を入力して周波数特性を測定した。

3. 2. 実験結果とその考察

3. 2. 1. 実験項目 3. 1. 1 について

観測した光ファイバのバイポーラ信号とユニポーラ信号の波形とアイパターンの概形を図 16 に示す。

光ファイバでも、バイポーラ信号やユニポーラ信号の振幅は同軸ケーブルとほとんど変わらない。しかし、光ファイバ 1m の信号でも信号の立ち上がり、立ち下がりのエッジが丸まっていて、高周波数の信号は光ファイバだと伝送路の長さに関係なく減衰してしまうといえる。

しかし、信号の形はバイポーラ信号、ユニポーラ信号ともに 1m のものと 1km とはほとんど同じで、信号の減衰が、伝送距離が長くなっても起こらないということが分かる。

同軸ケーブルでは、ユニポーラ信号はケーブル長が 300m になるとアイパターンが重なって、

品質の悪い信号となっていたが、光ファイバではユニポーラ信号でケーブル長が 1km になってもアイパターンが 1m のものとほとんど変化しなかった。
このことから、光ファイバは長距離の信号伝送にむいたケーブルであるといえる。

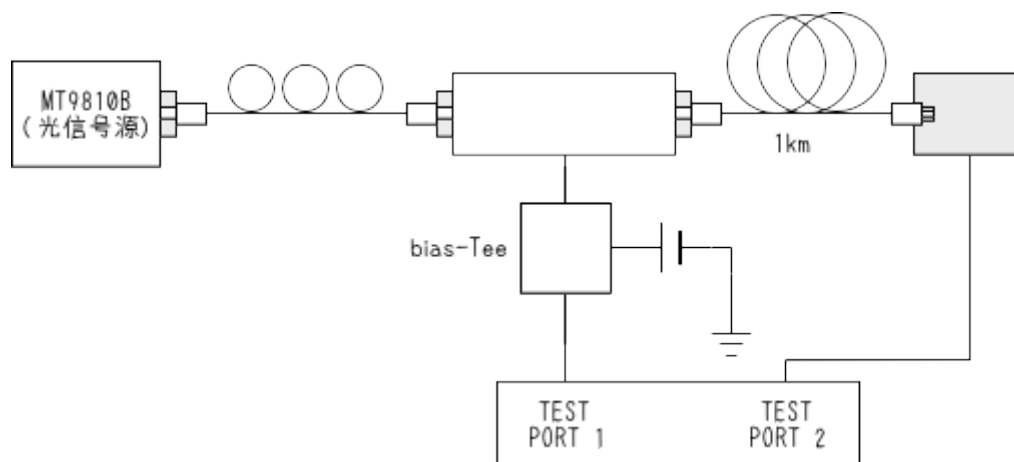


図 15 光ファイバケーブルの周波数特性測定系

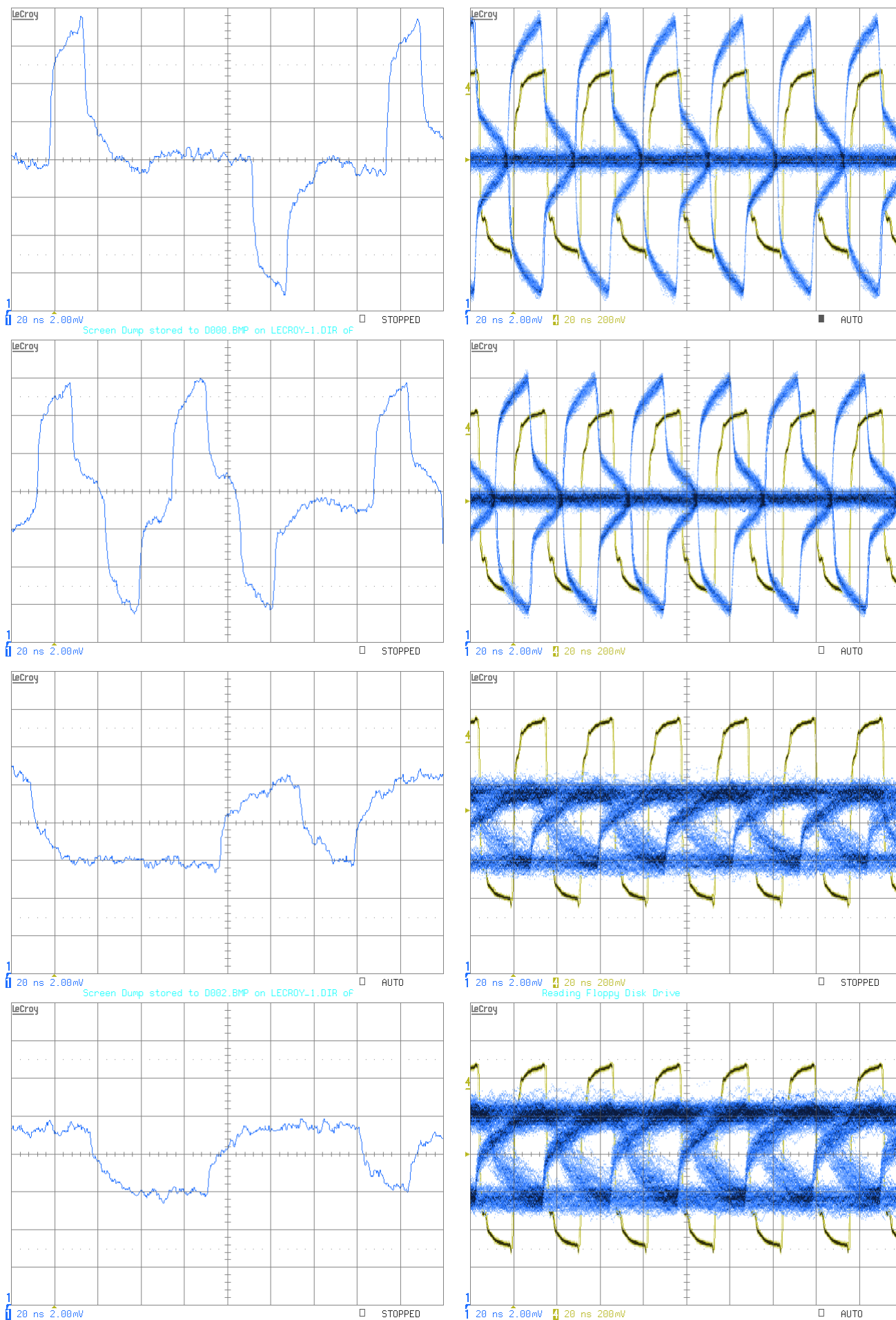


図 16 ユニポーラ信号の波形とアイパターン

3. 2. 2. 実験項目 3. 1. 2 について

図 17 に光ファイバの周波数特性の測定データを示す。

300kHz から既に 40dB 減衰しているが、これは図 15 の光ファイバ伝送路系のいずれかで減衰してしまったのではないかと考えられる。

300kHz で -40dB だった信号は、周波数が上がるにつれて徐々に減衰していき、1GHz で -50dB まで減衰する。1GHz よりも周波数が高くなると、急激に信号は減衰していく。図 16 の波形のエッジが立っていないのは、この急激な減衰が影響しているのかもしれない。

しかし、光ファイバを 1m のものから 1km のものに変えても波形はほとんど変化しなかった。つまり、伝送路長が長くなっても信号を減衰させずに送信するということができる。

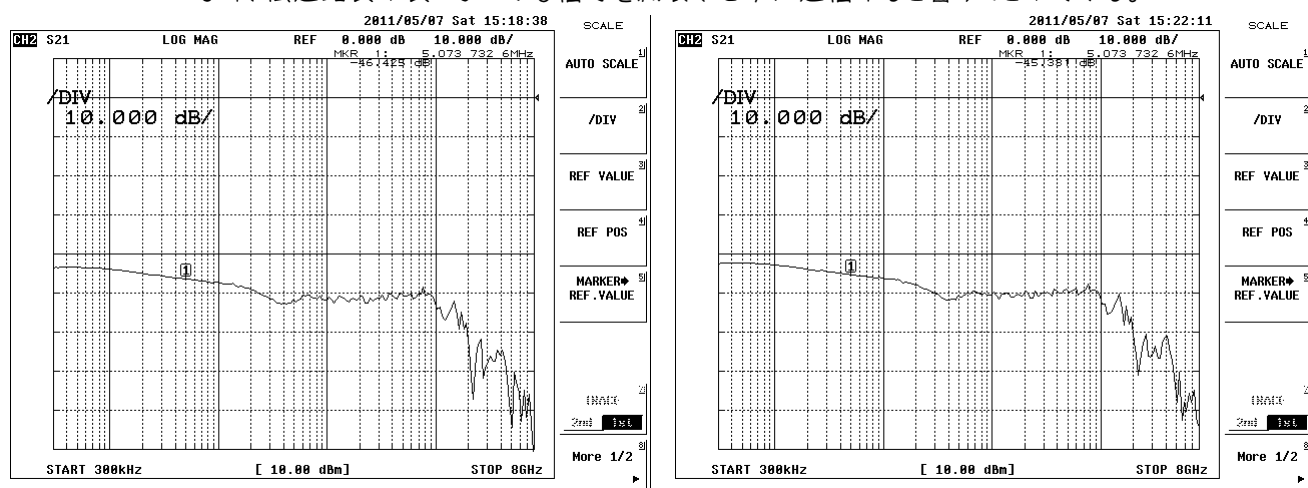


図 17 光ファイバの周波数特性

4. 感想

増幅回路の作成がこの実験で一番大変だと思う。半田付けの手順で、背の低い素子(抵抗など)から順に半田付けしていくことや、リード線の存在などを事前に伝えないと、回路の半田付けがぐちゃぐちゃになったり、ショートしたりの原因になると思った。