

卒業論文
RF 帯域中の周波数を任意選択可能にする
周波数変換器の開発

茨城大学理学部理学科物理学コース
学籍番号 17s2011n 小関知宏

2020 年度
(令和 2 年度)

概要

茨城大学では、日立市と高萩市にある、口径 32 m の宇宙電波望遠鏡を 2 台（日立アンテナ、高萩アンテナ）運用している。これらのアンテナでは 2 つの受信機を使い、6.600–7.112 GHz（連続波および 6.7 GHz メタノールメーザー）、8.192–8.704 GHz（連続波）の電波を観測している。これらの電波は微弱かつ高周波であるため増幅する必要があり、周波数を下げる必要がある。現在、日立・高萩アンテナにおける周波数変換は、DSB(Double sideband) ミキサーと 6.3–7.1 GHz または 8.0–8.8GHz を通過させる RF バンドパスフィルターを用いて行っている。しかし、この方法では観測周波数（RF:Radio Frequency）信号に対して RF バンドパスフィルターをかけているため、6.3–8.8 GHz の任意の 512 MHz 帯域の RF 信号を周波数変換できないという問題がある。

そこで本研究では、サイドバンド分離型ミキサーを用いることにより、LO 信号の周波数を変更するだけで、天体からの入力信号を逆サイドバンド信号の漏れ込む事なく中間周波数（IF:Intermediate Frequency）に周波数変換できる周波数変換器を開発することが目的である。

本研究では、観測に使用する入力周波数が 5–10 GHz、出力周波数 0.5–1.0 GHz に対応した周波数変換器を作成し、信号発振器によって信号を入力、サイドバンド分離比を測定することでサイドバンド分離型ミキサーを用いた周波数変換器の開発を行い、その結果 IF 信号 500 MHz を除いた測定点において要求仕様を満たすことができた。

目次

1	序論	4
1.1	研究背景	4
1.2	研究目的	5
2	装置の原理	5
2.1	周波数変換の原理	5
2.2	サイドバンド分離型ミキサーを用いた周波数変換の原理	6
2.2.1	原理	6
2.2.2	各素子の解説	7
2.3	サイドバンド分離比	8
2.4	要求仕様	8
3	サイドバンド分離比測定に用いる機器	9
4	サイドバンド分離比を用いた評価	15
4.1	IF バンドパスフィルターを用いない測定	15
4.1.1	アッテネーターの入れ替え	22
4.2	観測に使用する系での測定 (IF バンドパスフィルターを用いた測定)	29
4.2.1	IF バンドパスフィルターの入れ替え	30
4.3	hybrid の組み合わせの選定	39
5	考察	53
6	まとめ・今後の課題	54
付録 A	アッテネーターのカタログ	56
付録 B	IF hybrid の性能表	58
付録 C	RF hybrid の性能表	68
付録 D	divider のカタログ	76

1 序論

1.1 研究背景

天体からの信号強度は微弱なため、増幅器を用いて信号強度を増幅する必要がある。しかし、天体の信号は高周波であり同軸ケーブルを用いて増幅器まで長距離伝送すると信号の損失が大きくなってしまいます。そのため、天体からの信号を低い周波数に変換する必要がある。周波数変換は、天体からの RF 信号と局部発振器 (LO:Local Oscillator) 信号をミキサーで混合させ、RF 信号の周波数と LO 信号の周波数の差周波の周波数を持つ IF 信号に変換させるヘテロダイン方式で行っている。ここで、RF 信号の周波数が LO 周波数より高い場合を USB(Upper Side Band)、低い場合を LSB(Lower Side Band) という。

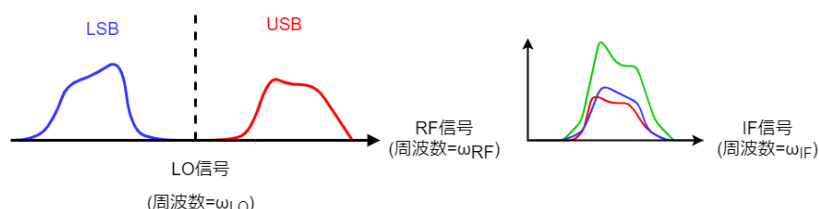


図 1.1 周波数変換のイメージ

IF 信号の周波数は RF 信号の周波数と LO 周波数の差の絶対値であるため、1 つの IF 信号の周波数に対しては 2 つの RF 信号の周波数が対応する。そのため、バンドパスフィルターをかけずに周波数変換を行うと、IF 信号の周波数が同じ USB 信号と LSB 信号の区別がつかなくなったり、片方のみに目的とするサイドバンドがある場合逆のサイドバンド (イメージバンド) から大気雑音が入り雑音温度が上昇するといった問題がある。これを防ぐために、日立・高萩アンテナでは RF 信号に対して周波数が固定された RF バンドパスフィルター (図 1.2) をかけている。

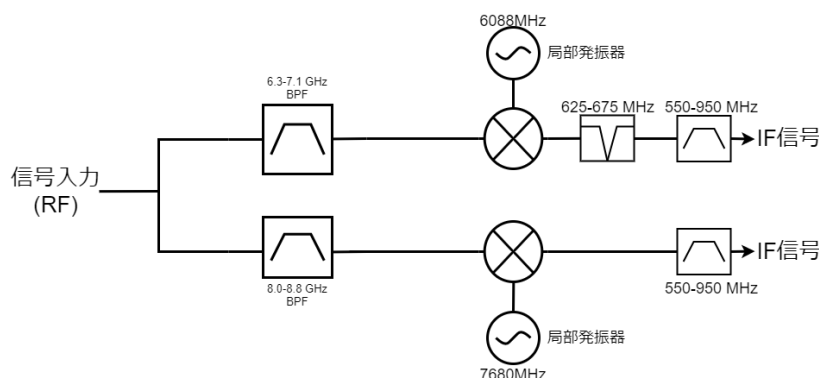


図 1.2 現在使用している茨城 32 m 望遠鏡の周波数変換器のブロック図

1.2 研究目的

前述のように日立・高萩アンテナでは RF 信号に対して周波数が固定された RF バンドパスフィルターをかけている。そのため、6.3–8.8 GHz の任意の 512 MHz 帯域の RF 信号を IF 信号に周波数変換できず、RF バンドパスフィルターを通過できない周波数帯を観測するためには RF バンドパスフィルターを交換する必要がある。

この問題を解決する方法としてサイドバンド分離型ミキサーを用いた周波数変換器を用いて周波数変換する方法がある。この周波数変換器は RF バンドパスフィルターを用いずに、LO 信号周波数を変えるだけで逆サイドバンドの漏れ込みなく周波数変換が行える。

本研究では、この周波数変換器を作成し、実際の観測で使用する周波数を信号発振器から入力し、サイドバンド分離比を指標に構成する素子の選定及び配置を行い、その素子を用いて新たな周波数変換器を開発する。

2 装置の原理

本節ではミキサーをもちいた周波数変換の原理および本研究で開発する 2SB 方式の周波数変換の原理について説明を行う。

2.1 周波数変換の原理

ミキサーを用いた周波数変換器の原理を説明する。RF 信号と LO 信号の 2 つを混合し周波数変換を行うミキサーは半導体ダイオードの非線形な電流-電圧特性 (I - V 特性) を利用している。周波数変換の原理を以下で説明する。まず、ダイオードの I - V 特性は図 2.1 に示す通りであり、降伏現象を除いた I - V の関係は式 (2.1) で表せる。

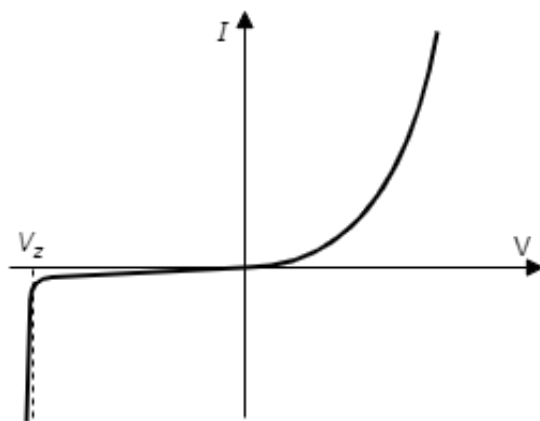


図 2.1 ダイオードの I - V 特性。 V_z は降伏電圧である。

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{V}{V_0} \right) - 1 \right) \quad (2.1)$$

ここで、 I_0 は逆飽和電流、 $V_0 = nkT/e$ 、 e は電子の電気量、 n は理想係数、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。式 (2.1) の指数部分を maclaurin 展開すると式 (2.2) となる。

$$I = I_0 \left(\left(\frac{V}{V_0} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 + \dots \right) \quad (2.2)$$

3 次以上の項を微小であるとして 2 次までの近似とすると、式 (2.3) となる。

$$I \approx I_0 \left(\left(\frac{V}{V_0} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (2.3)$$

次に、アンテナから入力される信号 $V_R(t)$ と、局部発振器から入力される信号 $V_L(t)$ を以下のように定義する。

$$V_R(t) = V_{R0} \cos(\omega_R t + \phi_R) \quad (2.4)$$

$$V_L(t) = V_{L0} \cos(\omega_L t + \phi_L) \quad (2.5)$$

ここで、 V_{R0} と V_{L0} は各信号の振幅、 ω_R と ω_L は各信号の角振動数、 ϕ_R と ϕ_L は初期位相を表している。

式 (2.4)、(2.5) を式 (2.3) に代入し計算すると式 (2.6) になる。

$$\begin{aligned} I &= a[V_R(t) + V_L(t)] + A[V_R(t) + V_L(t)]^2 \\ &= aV_{R0} \cos(\omega_R t + \phi_R) + aV_{L0} \cos(\omega_L t + \phi_L) \\ &\quad + \frac{1}{2}A(V_{R0}^2 + V_{L0}^2) + \frac{1}{2}AV_{R0}^2 \cos 2(\omega_R t + \phi_R) + \frac{1}{2}AV_{L0}^2 \cos 2(\omega_L t + \phi_L) \\ &\quad + AV_{R0}V_{L0} \cos[(\omega_R + \omega_L)t + (\phi_R + \phi_L)] \\ &\quad + AV_{R0}V_{L0} \cos[(\omega_R - \omega_L)t + (\phi_R - \phi_L)] \end{aligned} \quad (2.6)$$

a と A はある係数である。周波数変換器では、最終項の差周波数成分のみを IF バンドパスフィルターを用いて取り出すことで、RF 信号周波数 ($\nu_{RF} = \frac{\omega_{RF}}{2\pi}$) を IF 信号周波数 ($\nu_{IF} = \frac{|\omega_R - \omega_L|}{2\pi}$) にダウンコンバートしている。

2.2 サイドバンド分離型ミキサーを用いた周波数変換の原理

2.2.1 原理

USB 側の信号と LSB 側の信号を区別して取り出すことをサイドバンド分離と呼ぶ。これは、図 2.2 を用いて考えると以下のような手順で実現される。

1. RF 信号 (LSB : $\cos(\omega_L t + \phi_L)$ 、USB : $\cos(\omega_U t + \phi_U)$) を divider で 2 つに等分配する。
2. LO 信号の位相を 90° 遅延させたもの (LO : $\cos(\omega_{LO} t - 90^\circ)$) をミキサー 1 へ、 0° 遅延したもの (LO : $\cos(\omega_{LO} t)$) をミキサー 2 へ送る。

3. 各ミキサーで入力される RF 信号と LO 信号を混合する。
4. ミキサー 1 の IF 信号の出力位相を 0° 遅延させたものと、ミキサー 2 の IF 出力の位相を 90° 遅延させたものを混合して、出力 1(LSB port) に出す。ミキサー 1 の IF 信号の出力の位相を 90° 遅延させたものと、ミキサー 2 の IF 出力の位相を 0° 遅延させたものを混合して出力 2 (USB port) に出す。

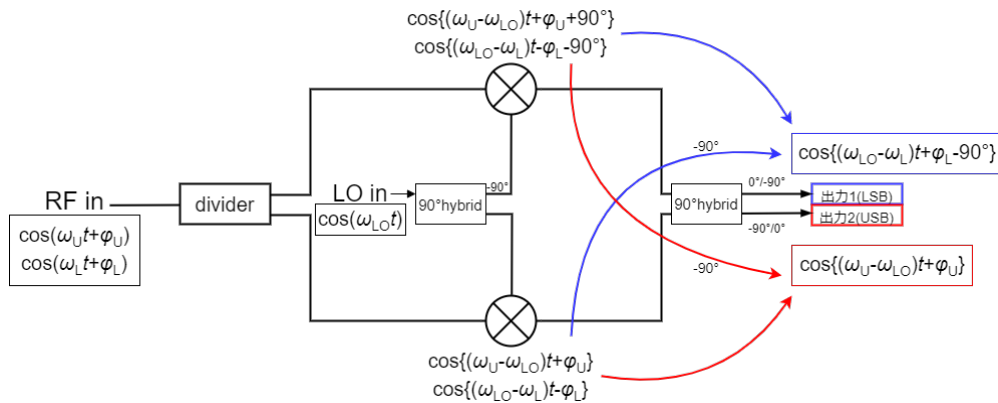


図 2.2 サイドバンド分離型ミキサーを用いた周波数変換器のブロック図

2.2.2 各素子の解説

本研究で使用する使用する素子は、divider、 90° hybrid、ミキサー、バンドパスフィルタ、アッテネーターである。

divider

入力された 1 つの信号を 2 つに等分配する素子である。

90° Hybrid

以下のように信号を分配、結合する素子である。入力される信号が 1 つの場合、divider と同様に 2 つの信号に等分配するが出力される信号の片方の位相は 90° 遅延された状態で出力される。入力される信号が 2 つの場合次の関係で信号が結合され出力される。

信号 a、b が入力され信号 A、B が出力されるとする。この時、出力される信号 A は、信号 a の位相を 0° 遅延させたものと信号 b の位相を 90° 遅延させたものの和である。一方で、出力される信号 B は、信号 a の位相を 90° 遅延させたものと信号 b の位相を 0° 遅延させたものの和である。

ミキサー

2 つの信号を混合し、それらの和もしくは差の周波数の信号を出力する素子である。

バンドパスフィルタ

特定の周波数の信号のみを通す素子である。

アッテネーター

信号の強度を減衰させる素子である。

2.3 サイドバンド分離比

サイドバンド分離比は、着目するサイドバンド及び逆（イメージ）側のサイドバンドに同じ強度の信号を入力した際に出力される信号強度比と定義される。理論的には入力された USB 信号成分は USB port のみから出力し、LSB port には出力されない。LSB の場合も同様である。

実際には、使用している素子の個体差によって逆側のサイドバンドの位相が 180° ずれずに 90° hybrid で結合する際、異なる経路から入力される信号強度が異なるなどして、USB 信号が入力された場合に一部の信号が LSB port から、LSB 信号が入力された場合、一部の信号が USB port からそれぞれ漏れ出る。このときの目的のサイドバンド入力から変換された信号のパワーを P_1 、逆側のサイドバンド入力から変換されたパワーを P_2 とすると、サイドバンド分離比は次のように計算できる。

$$\text{サイドバンド分離比} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = 10 \log_{10} P_1 - 10 \log_{10} P_2 \quad (2.7)$$

2.4 要求仕様

本研究の要求仕様は観測に使用する LO 信号周波数範囲 5–10 GHz において逆サイドバンドに漏れ込まないといえるサイドバンド分離比が 20 dB 以上得られることである。

3 サイドバンド分離比測定に用いる機器

RF 信号と LO 信号の周波数をそれぞれ変化させて、スペクトラムアナライザーを用いて IF 信号の周波数と出力強度を読み取り記録する。

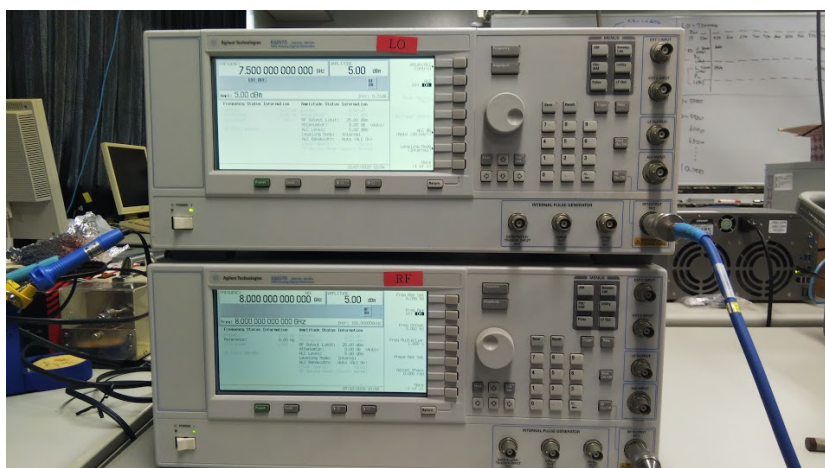


図 3.1 LO 信号用信号発振器 (上)、RF 信号用信号発振器 (下)

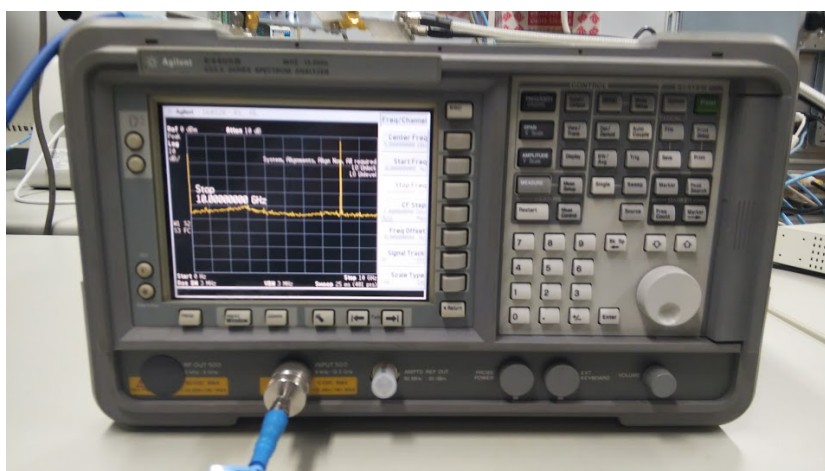


図 3.2 スペクトラムアナライザー

本研究の測定では、LO 信号の周波数は 5–10 GHz の範囲で 500 MHz ごとに変化させ、その LO 周波数に対して IF 信号が 500–1000 MHz になるように RF 信号を選択し、50 MHz ごとに変化させた。

メーカーから購入した各素子および同軸ケーブルの名称、型番、対応周波数、製造社名、S/N を以下の表 1 にまとめた。また使用した素子、同軸ケーブルを図 3.3–3.7 に示す。各素子の詳しい仕様については付録を参照。

表 1 使用した素子の仕様

名称	型番	対応周波数	製造社名	S/N
divider	RFLT2W4G18G	4–18 GHz	RF-LAMBDA	16030700013
hybrid	IPP-2216RT	6–8.5 GHz	IPP	20021001–20021004
	QH320-0S	500–1000 MHz	R&K	19041001–19041004
ミキサー	M1-0310M	3-10 GHz	Marki	
同軸ケーブル	RG-55A/U	1 GHz 以下	Fujikura	
	MWX221	18 GHz または 26.5GHz 以下	潤工社	



図 3.3 divider

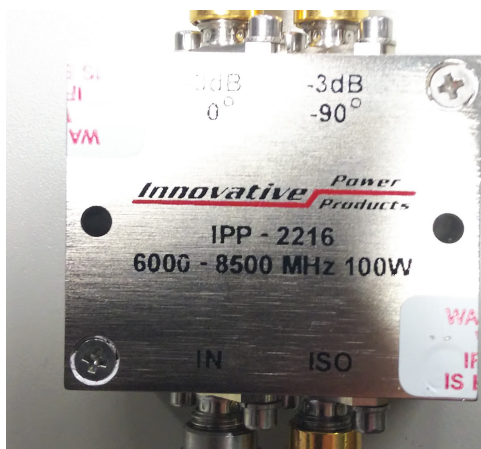


図 3.4 hybrid(型番 : IPP-2216RT)

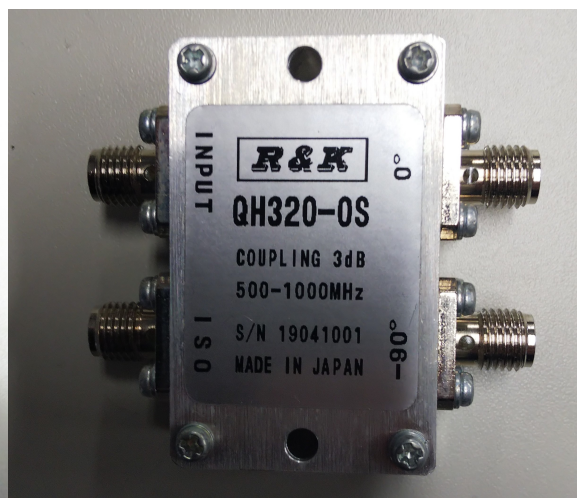


図 3.5 hybrid(型番 : QH320-0S)

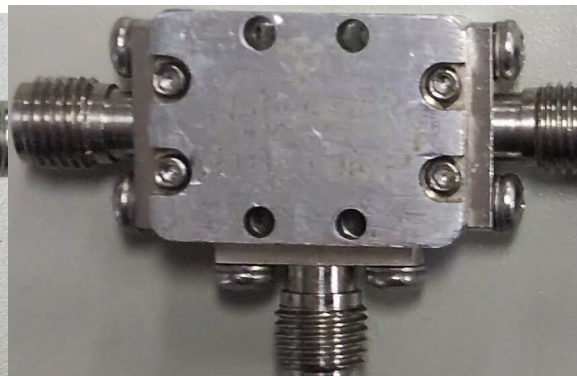


図 3.6 ミキサー

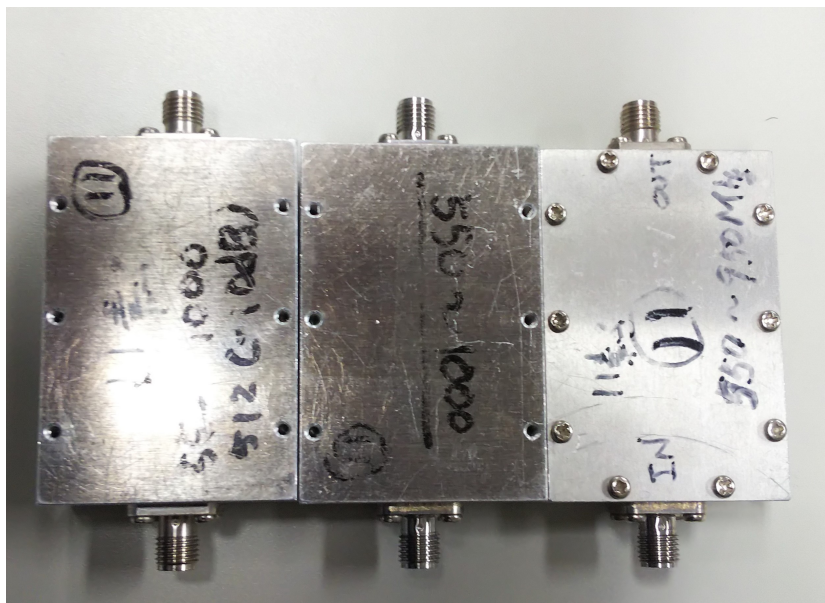


図 3.7 IF バンドパスフィルター。通過帯域は左から 550–1000 MHz、550–1000 MHz、550–950 MHz で設計されている。

測定は横軸の範囲を 100 kHz で表示し、出力強度をスペクトラムアナライザーで 100 回平均をとったものを表示させ、その値を記録した。スペクトラムアナライザーに表示されるスペクトルの例を図に示す。

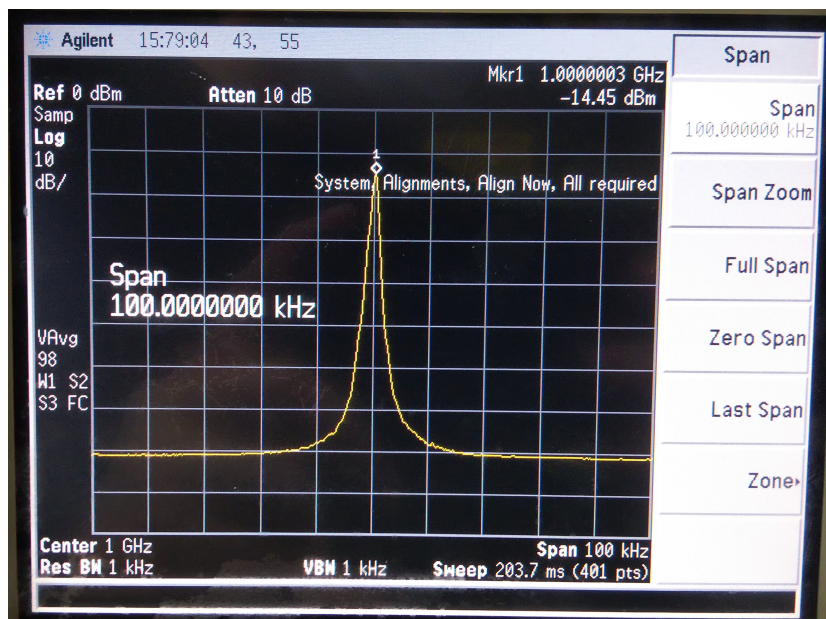


図 3.8 RF 周波数=5000 MHz、LO 周波数=4000 MHz の際の IF 信号スペクトル。横軸は周波数であり、中心周波数が 1GHz、±50 kHz が表示範囲。縦軸は信号強度 (dBm) で、上端が上端が 0 dBm、下端が - 100 dBm。マーカーのついているところが信号ピークであり、周波数は 1.0000003 GHz であり信号強度は-14.45 dBm である。

バンドパスフィルタの挿入について

スペクトラムアナライザの表示範囲を 0–10 GHz にすると、図 3.9 のようになる。

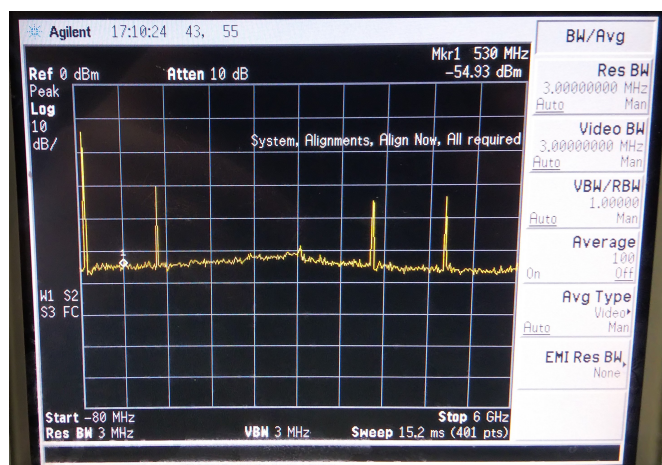


図 3.9 LO 信号周波数 5 GHz、RF 信号周波数 4 GHz 入力した時の IF バンドパスフィルターを取り付けていない周波数変換器の出力。横軸は MHz で示されており一番左の出力ピークが 0 Hz 左から 2 つ目の出力ピークが本研究の測定対象である。右側 2 つの信号ピークはそれぞれ RF 信号、LO 信号の周波数成分である。

式 (2.6) より、異なる周波数を持つ 2 つの信号を混合すると、差周波数成分以外の成分も生成される。式 (2.6) の第 1 項は RF 周波数成分、第 2 項は LO 周波数成分、第 3 項は直流成分、第 4 項は RF 信号の第 2 高調波、第 7 項は LO 信号の第 2 高調波、第 6 項は RF 周波数と LO 周波数の和周波数成分、第 5 項は差周波数成分である。バンドパスフィルターをかけた後に通過域外の周波数成分が表示されているのは、バンドパスフィルターの性能によるものである。理想的なバンドパスフィルターは通過域の周波数成分のみを通過させ、それ以外の周波数成分を完全に減衰させる。しかし、実際には通過域から減衰域へ滑らかに移行する（このときの傾きをロールオフという）。そのため、バンドパスフィルターの通過域外の成分も少量通過してしまう。

4 サイドバンド分離比を用いた評価

4.1 IF バンドパスフィルターを用いない測定

先行研究によると、IF バンドパスフィルターを用いると通過帯域の端においてサイドバンド分離比が低くなることが指摘された（佐藤 2019）。そのため、ミキサーと IF hybrid の間に IF バンドパスフィルターを挿入するとサイドバンド分離比への影響が大きい。そこで、IF バンドパスフィルターの影響がない状況下において、要求仕様を満たすサイドバンド分離比を得ることができるかを確認するための実験を行った。実験を行ったブロック図は図 4.1 である。

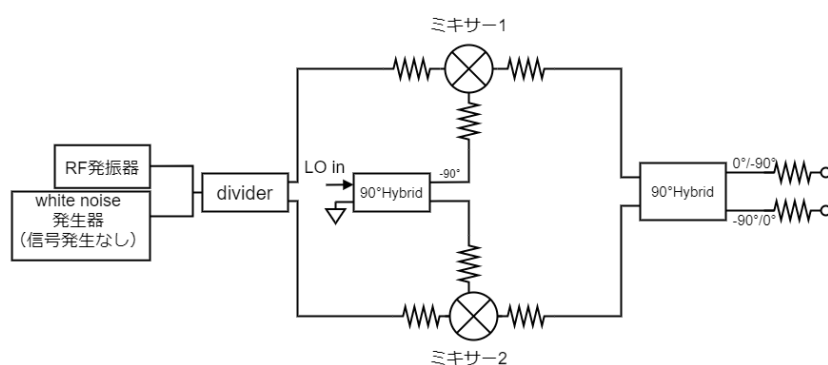


図 4.1 サイドバンド分離比の測定ブロック図 (IF バンドパスフィルターなし)

図 4.1 中の white noise 発生器は LO 信号強度を決定するためのものであり、サイドバンド分離比を測定する本実験においては信号が出ていない。そのため、50 Ω の抵抗がついていることと同値である。

測定結果は横軸を IF 周波数 (MHz)、縦軸を出力強度 (dBm) のグラフで示す。赤いマーカーが USB port からの出力、青いマーカーが LSB port からの出力である。

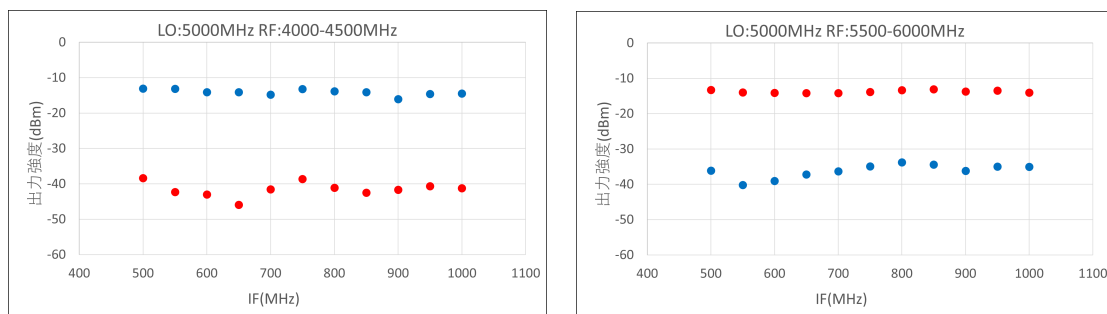


図 4.2 LO 信号の周波数:5000 MHz 時の出力強度

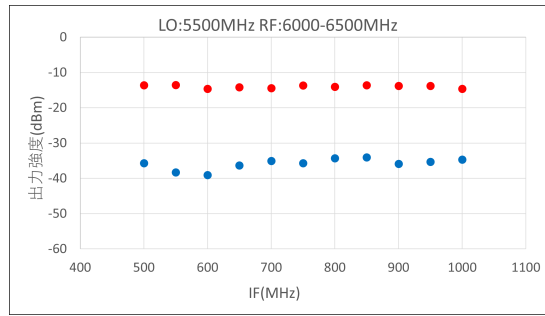
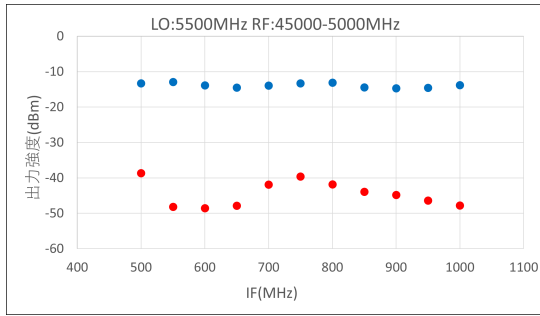


図 4.3 LO 信号の周波数:5500 MHz 時の出力強度

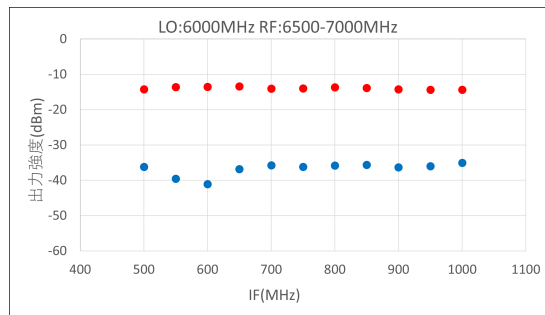
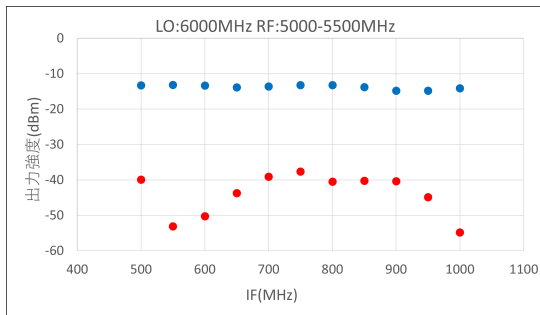


図 4.4 LO 信号の周波数:6000 MHz 時の出力強度

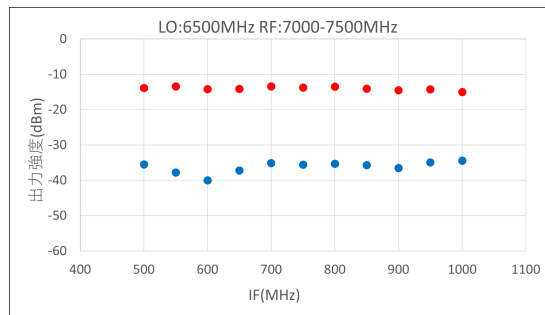
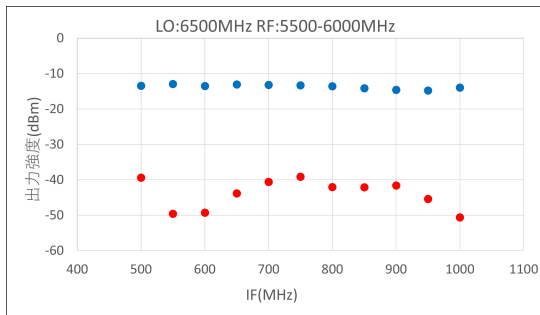


図 4.5 LO 信号の周波数:6500 MHz 時の出力強度

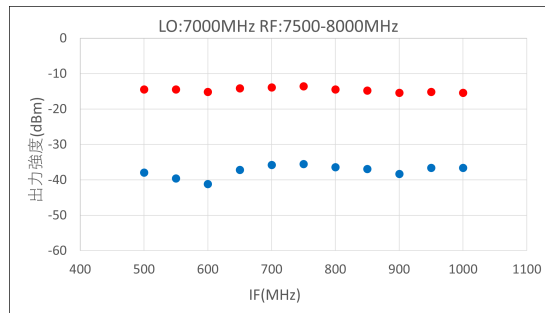
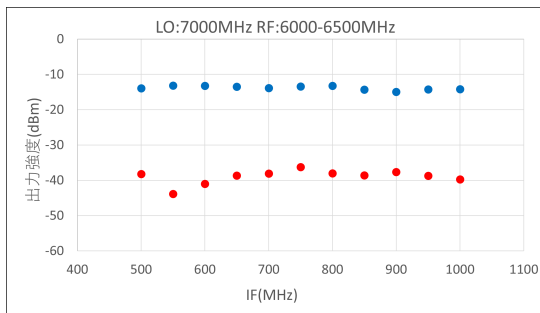


図 4.6 LO 信号の周波数:7000 MHz 時の出力強度

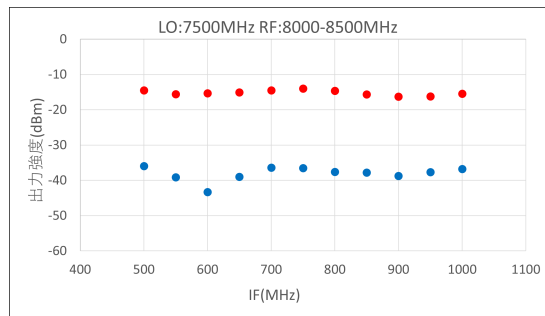
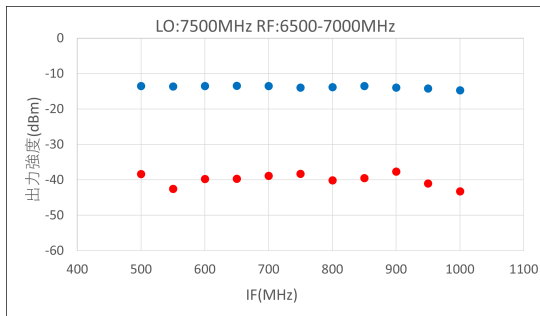


図 4.7 LO 信号の周波数:7500 MHz 時の出力強度

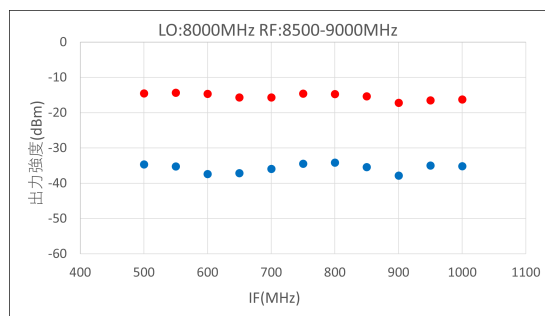
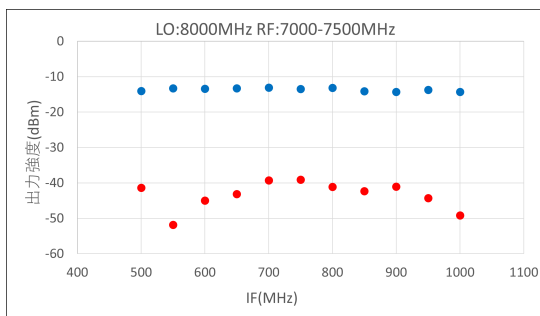


図 4.8 LO 信号の周波数:8000 MHz 時の出力強度

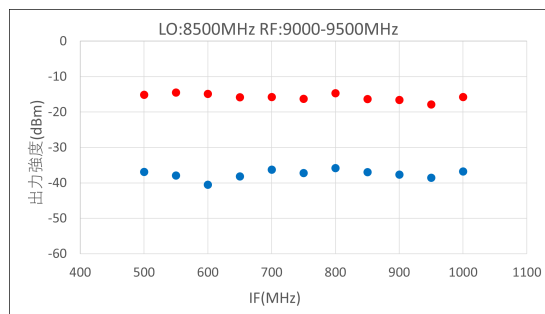
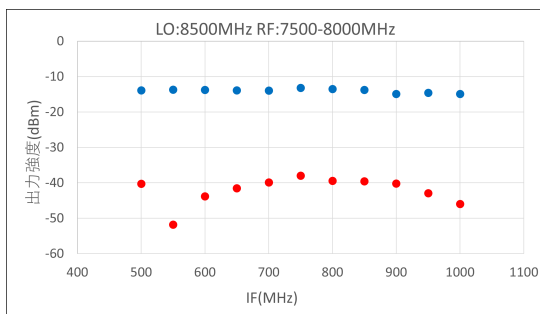


図 4.9 LO 信号の周波数:8500 MHz 時の出力強度

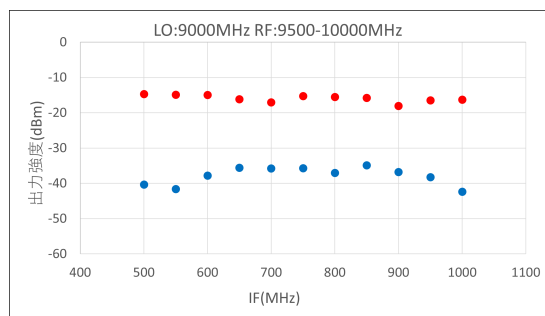
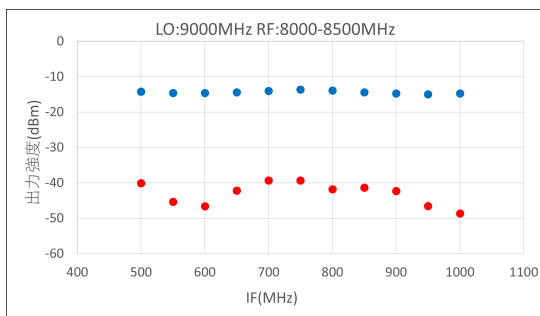


図 4.10 LO 信号の周波数:9000 MHz 時の出力強度

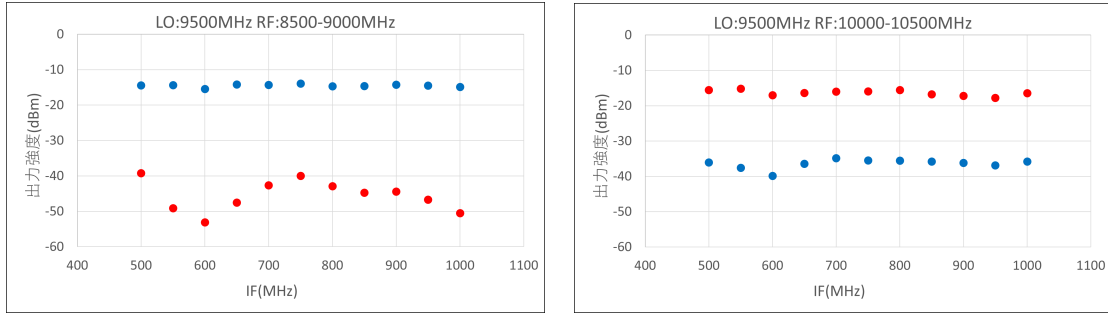


図 4.11 LO 信号の周波数:9500 MHz 時の出力強度

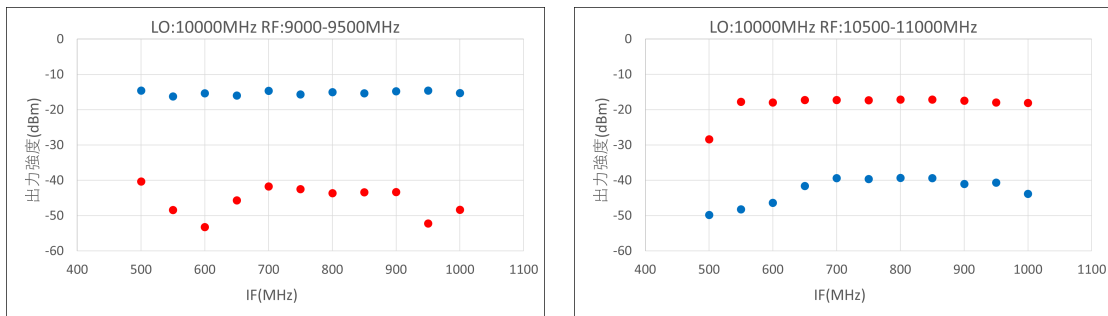


図 4.12 LO 信号の周波数:10000 MHz 時の出力強度

ここで、縦軸：出力強度のグラフからサイドバンド分離比を求める方法を記す。USB 信号を P_U (dBm) という強度で入力した際に、USB port と LSB port に出力されるパワーをそれぞれ P_{UU} (dBm)、 P_{UL} (dBm)、LSB 信号を P_L (dBm) という強度で入力した際に、USB port と LSB port に出力されるパワーをそれぞれ P_{LU} (dBm)、 P_{LL} (dBm) とおくとサイドバンド分離比は次のように計算できる。ただし、 $P_U = P_L$ とする。

$$\text{サイドバンド分離比 (dB)} = P_{UU}(\text{dBm}) - P_{UL}(\text{dBm}) \quad \text{or} \quad P_{LL}(\text{dBm}) - P_{LU}(\text{dBm}) \quad (4.1)$$

計算したサイドバンド分離比を横軸が IF 周波数 (MHz)、縦軸がサイドバンド分離比 (dB) のグラフとして以下に示す。図中の赤いマーカーは USB 信号に対応する RF 信号を入力した場合を、青いマーカーは LSB 信号に対応する RF 信号を入力した場合のサイドバンド分離比の計算結果を表している。本研究の要求仕様であるサイドバンド分離比が 20 dB 以上であれば、目的の信号の強度に対して、逆側の信号の混入強度が 1 % 以下となる。

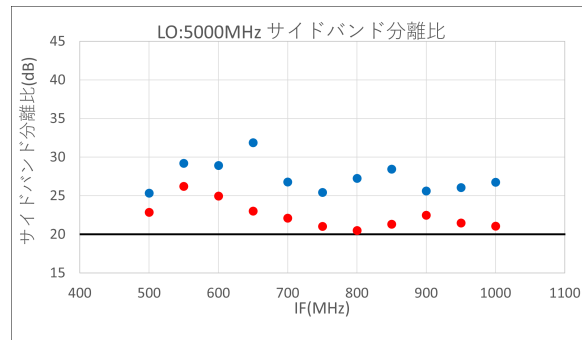


図 4.13 LO 信号周波数が 5000 MHz 時のサイドバンド分離比

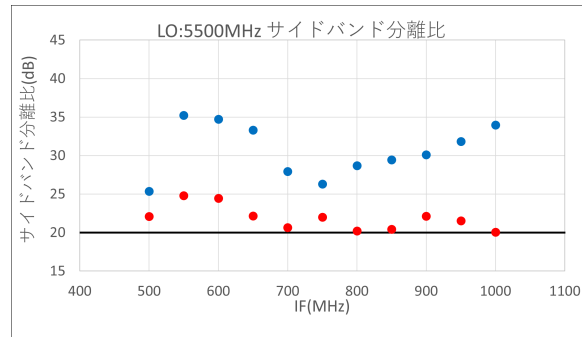


図 4.14 LO 信号周波数が 5500 MHz 時のサイドバンド分離比

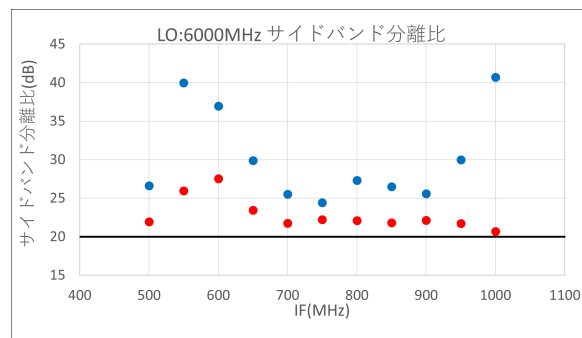


図 4.15 LO 信号周波数が 6000 MHz 時のサイドバンド分離比

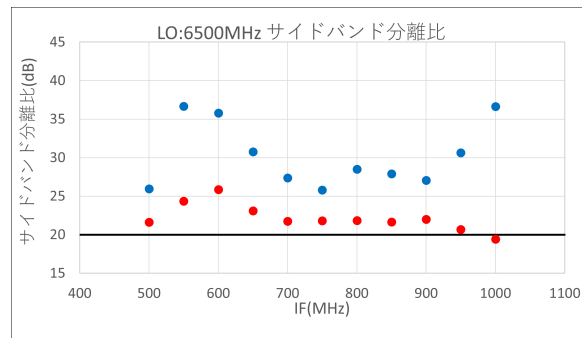


図 4.16 LO 信号周波数が 6500 MHz 時のサイドバンド分離比

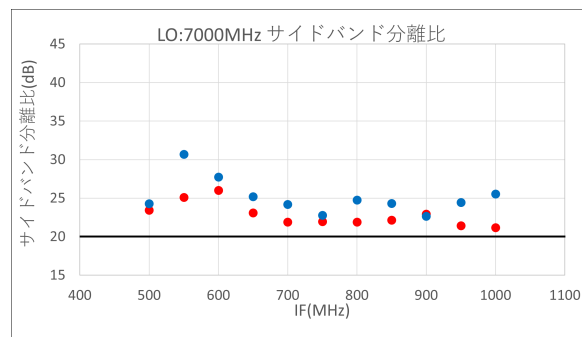


図 4.17 LO 信号周波数が 7000 MHz 時のサイドバンド分離比

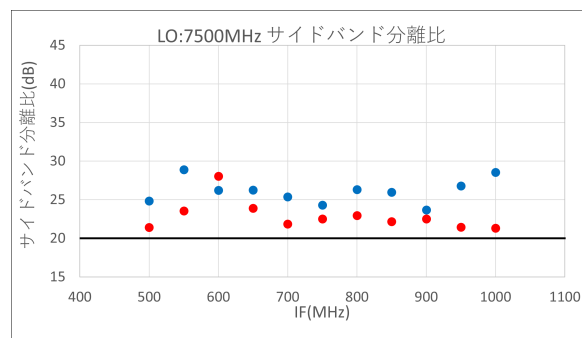


図 4.18 LO 信号周波数が 7500 MHz 時のサイドバンド分離比

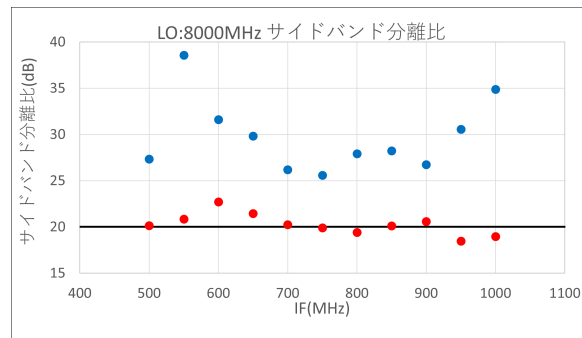


図 4.19 LO 信号周波数が 8000 MHz 時のサイドバンド分離比

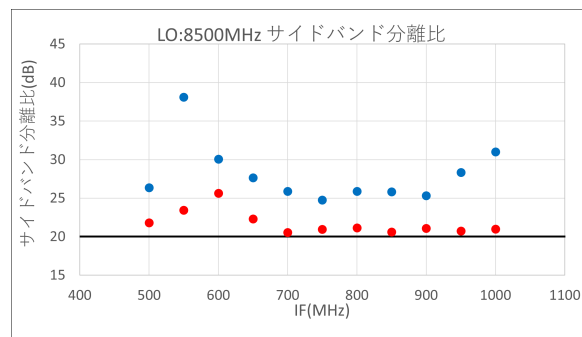


図 4.20 LO 信号周波数が 8500 MHz 時のサイドバンド分離比

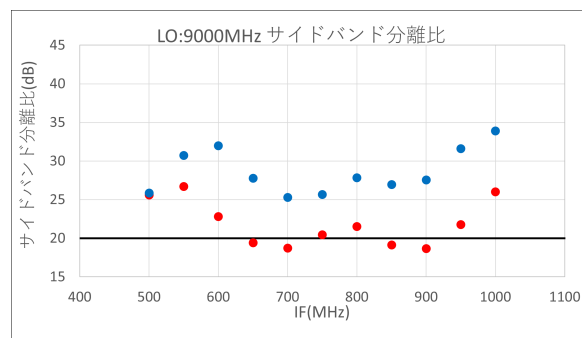


図 4.21 LO 信号周波数が 9000 MHz 時のサイドバンド分離比

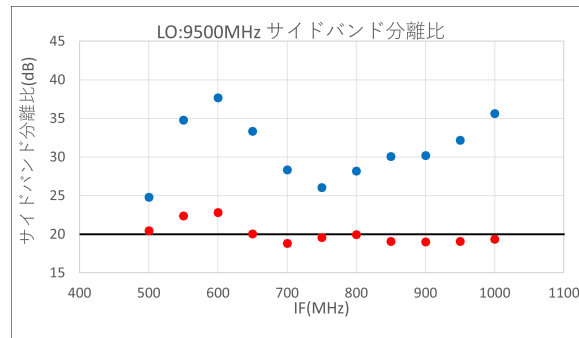


図 4.22 LO 信号周波数が 9500 MHz 時のサイドバンド分離比

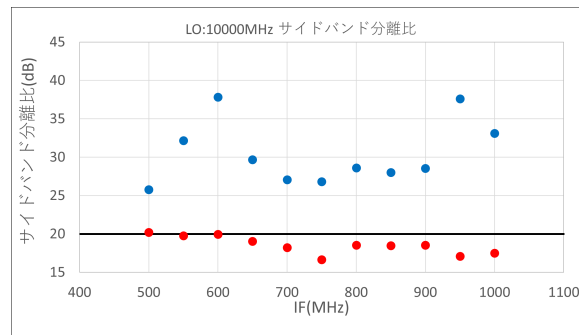


図 4.23 LO 信号周波数が 10000 MHz 時のサイドバンド分離比

この実験により LO 信号が 5000–6000 MHz、7000 MHz、7500 MHz、8500 MHz では要求仕様を満たすことが分かった。一方で、LO 周波数が 6500 MHz、8000 MHz、9000 MHz 以上の場合要求仕様を満たさないことが分かった。この原因の 1 つとして考えられるのは、周波数変換後の hybrid に入力されるまでの間のアッテネーターおよび SMA ケーブルの個体差によって結合する信号同士の位相がずれてしまったまたは、IF hybrid で信号を結合する際の強度が異なっていることが挙げられる。

4.1.1 アッテネーターの入れ替え

図 4.24 にアッテネーターの配置する場所の番号を示す。

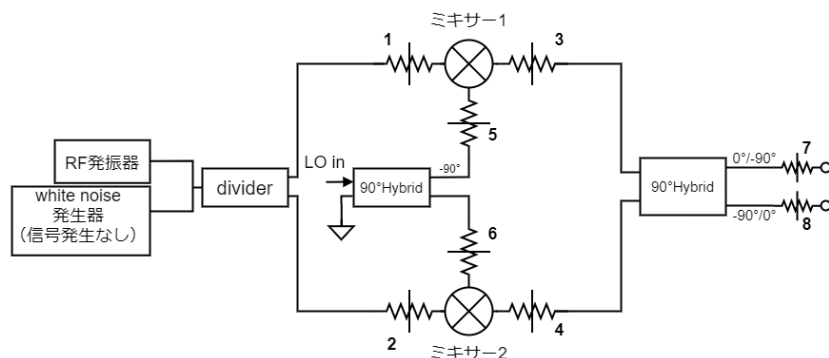


図 4.24 各アッテネーターの場所に置ける番号の振り分け

図 4.13–4.23 の測定を行った配置 (表 2: パターン 1) を初期配置とし各 1–8 の場所にあるアッテネーターにそれぞれ A–H とアルファベット順に名前を付ける。本実験ではアッテネーターの組み合わせ全てに対してサイドバンド分離比の測定を行うことは不可能であるためパターン 2–8 の実験を行った。

表 2 アッテネーターの位置を決定するために行った実験のパターン

位置	1	2	3	4	5	6	7	8
パターン 1	A	B	C	D	E	F	G	H
パターン 2	A	B	C	D	F	E	G	H
パターン 3	E	F	C	D	A	B	G	H
パターン 4	E	F	C	D	B	A	G	H
パターン 5	A	B	E	F	C	D	G	H
パターン 6	A	B	E	F	D	C	G	H
パターン 7	A	B	C	D	G	H	E	F
パターン 8	A	B	C	D	H	G	E	F

図 4.13–4.23 よりサイドバンド分離比の周波数依存性は、RF 信号や LO 信号に対する依存性に比べて、IF 信号に対する依存性の方がより大きいことが分かる。そのため、アッテネーターの位置を決定する実験では、LO 信号の周波数として測定範囲の中央値である 7500 MHz のみで測定を行い、サイドバンド分離比が大きい配置を探った。その結果が以下の図である。

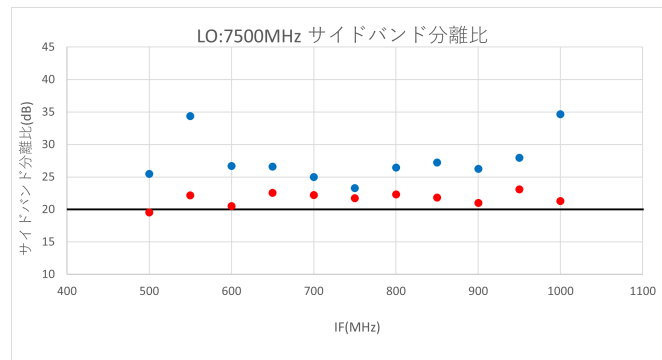


図 4.25 アッテネーターの配置を決定するための実験:パターン 2

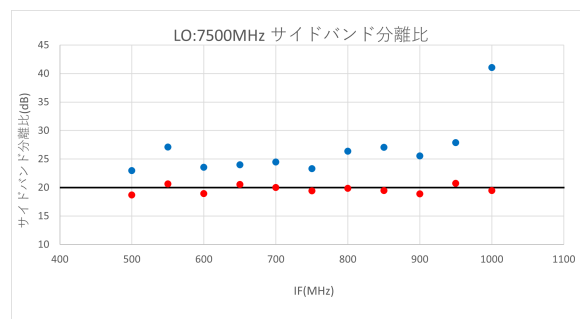


図 4.26 アッテネーターの配置を決定するための実験:パターン 3

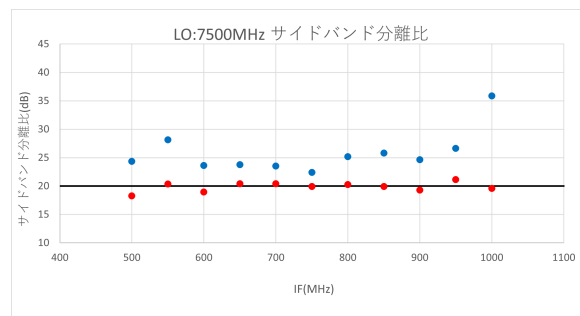


図 4.27 アッテネーターの配置を決定するための実験:パターン 4

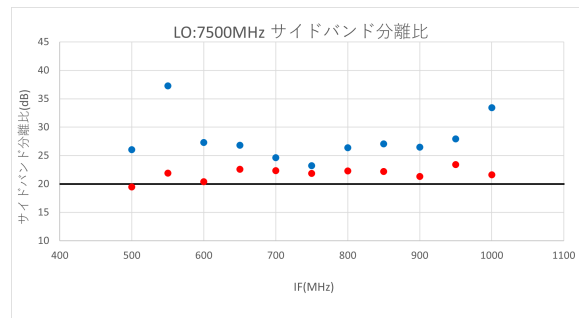


図 4.28 アッテネーターの配置を決定するための実験:パターン 5

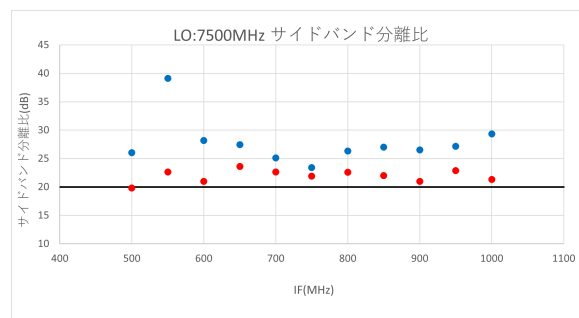


図 4.29 アッテネーターの配置を決定するための実験:パターン 6

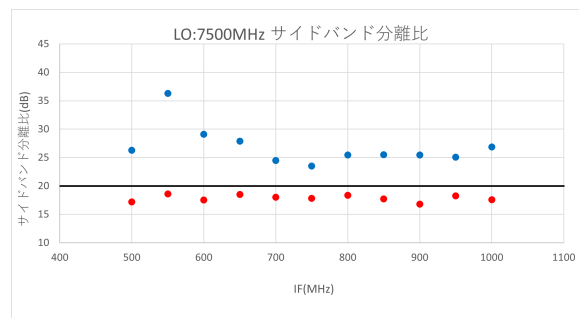


図 4.30 アッテネーターの配置を決定するための実験:パターン 7

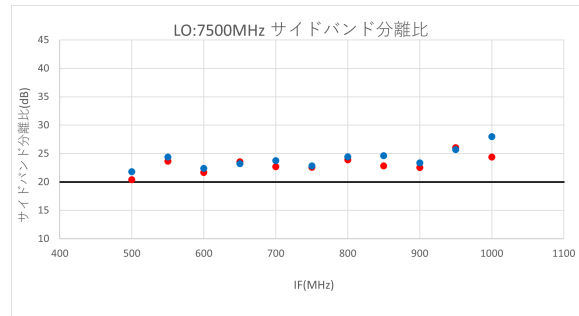


図 4.31 アッテネーターの配置を決定するための実験:パターン 8

サイドバンド分離比が IF 周波数 500–1000 MHz の全てで要求仕様を満たしたのはパターン 8 のみであった。したがって、このパターン 8 には LO 周波数が 5000 MHz と 10000 MHz の時を追加で測定をすることにした。

その結果が以下の図である。

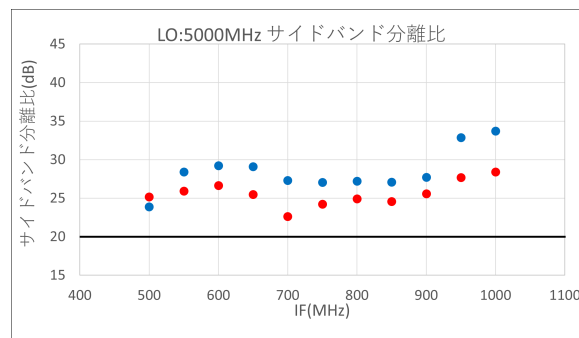


図 4.32 パターン 8 における LO 信号周波数が 5000 MHz 時のサイドバンド分離比

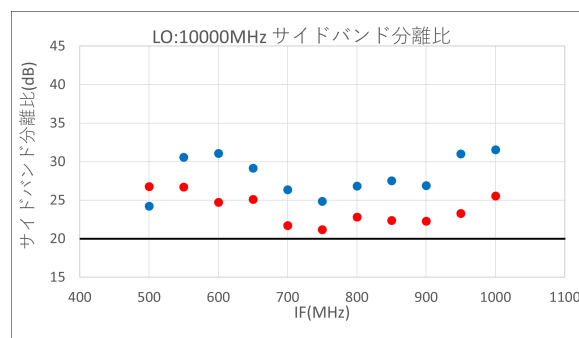


図 4.33 パターン 8 における LO 信号周波数が 10000 MHz 時のサイドバンド分離比

この結果より、パターン 8 を選択することですべての周波数においてサイドバンド分離比が 20 dB 以上得られる可能性があると考え、残りの LO 周波数に対しても測定を行った。この測定結果を以下の図にまとめた。

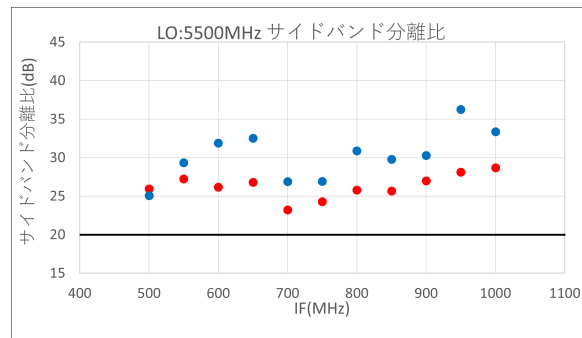


図 4.34 パターン 8 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 5500 MHz)

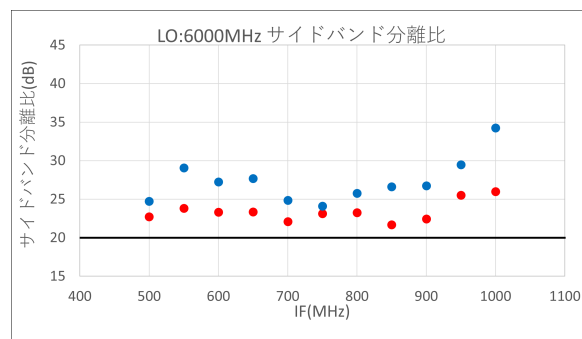


図 4.35 パターン 8 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 6000 MHz)

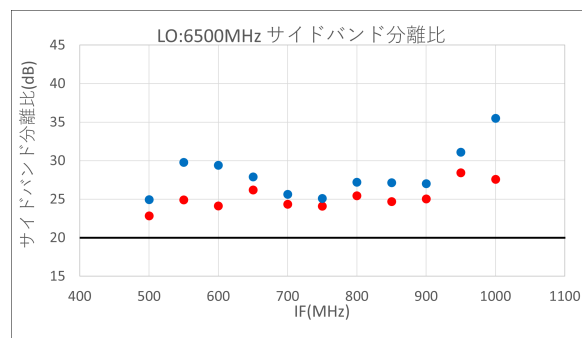


図 4.36 パターン 8 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波 : 6500 MHz)

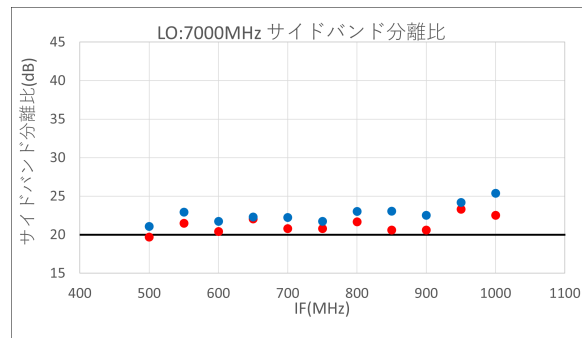


図 4.37 パターン 8 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 7000 MHz)

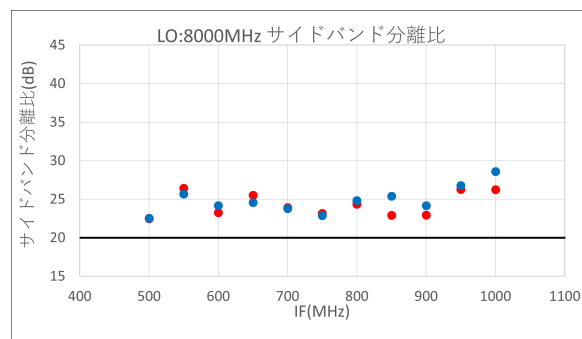


図 4.38 パターン 8 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 8000 MHz)

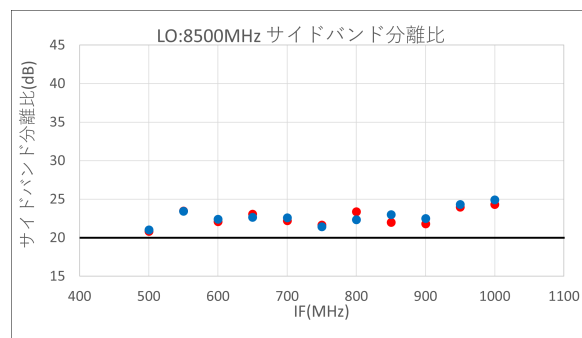


図 4.39 パターン 8 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 8500 MHz)

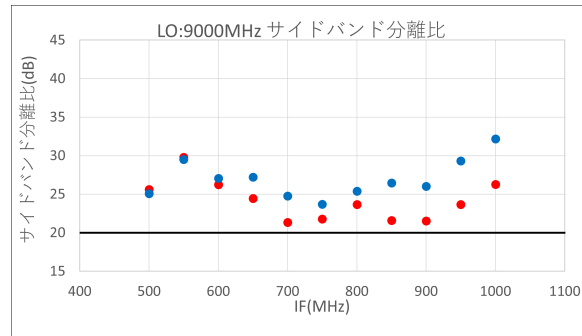


図 4.40 パターン 8 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 9000 MHz)

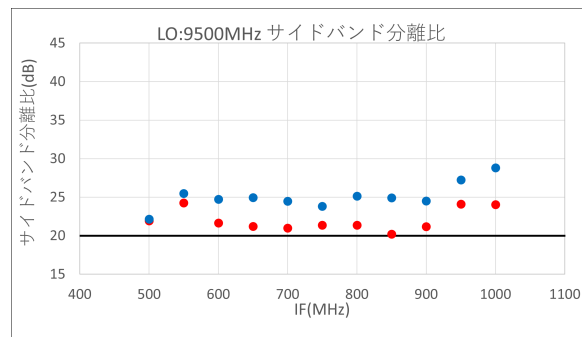


図 4.41 パターン 8 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 9500 MHz)

本測定により、LO 信号が 6500 MHz、8000 MHz、9000 MHz 以上の場合に対するサイドバンド分離比の要求仕様をすべて満たした。一方で、LO 周波数 7000 MHz においては IF 信号周波数 500 MHz において要求を満たさなくなってしまった。

4.2 観測に使用する系での測定 (IF バンドパスフィルターを用いた測定)

4.1.1 節で決定したアッテネーター配置により、IF バンドパスフィルターを用いない場合では LO 周波数 7000 MHz を除くすべての領域で 20 dB 以上のサイドバンド分離比が保証されていると判断できる。これを踏まえて次に、実用化する上で必要な IF バンドパスフィルターを取り付けてサイドバンド分離比の測定を行った。IF バンドパスフィルターを取り付ける理由は、式 (2.6) の第 7 成分以外の不要な成分、すなわち、入力信号の 1 次成分、高調波成分、RF 信号と LO 信号の周波数の和成分を挿入して取り除くためである。本実験では、不要な white noise 発生器も取り除いた構成で測定を行った (図 4.42)。

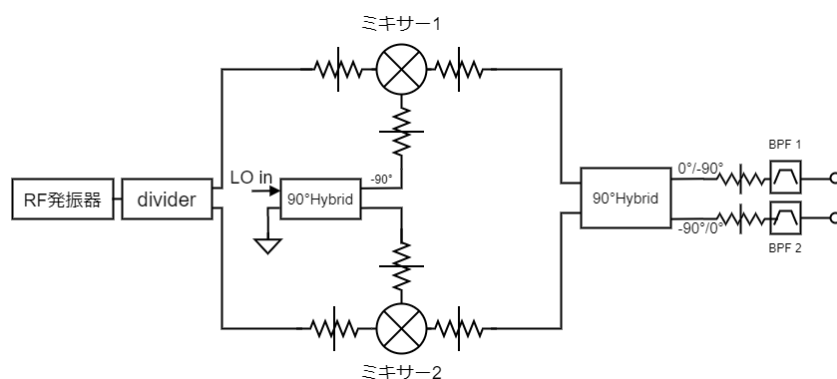


図 4.42 IF バンドパスフィルターを取り付けたブロック図

4.2.1 IF バンドパスフィルターの入れ替え

この実験のためにまず最初に 3 つの IF バンドパスフィルターを用意した。前述の通り、アッテネーターに個体差があり、その結果としてサイドバンド分離比にも変化が見られたことから、IF バンドパスフィルターの取り付け位置に関しても同様の実験を行った。IF バンドパスフィルターは図 3.7 の右から A-C と名付けて識別した。また、IF バンドパスフィルターの配置は図 4.42 中の上側 (LSB port) を 1 とし、下側 (USB port) を 2 として組み合わせを以下の表に示す。

表 3 IF バンドパスフィルターの配置パターン

フィルター位置	1	2
パターン 1	A	B
パターン 2	A	C
パターン 3	B	A
パターン 4	B	C
パターン 5	C	A
パターン 6	C	B

本測定はアッテネーターの時と同様に、まず LO 信号の周波数 7500 MHz で行った。その出力強度を測定しサイドバンド分離比を計算したものを以下の図に示す。

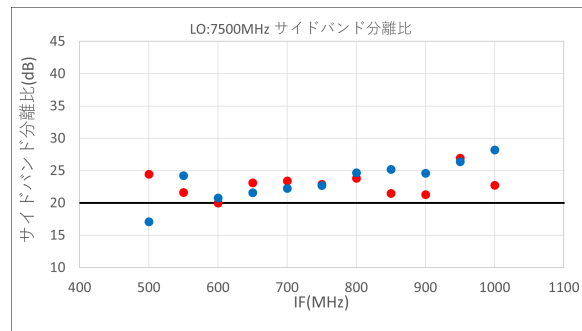


図 4.43 パターン 1 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 7500 MHz)

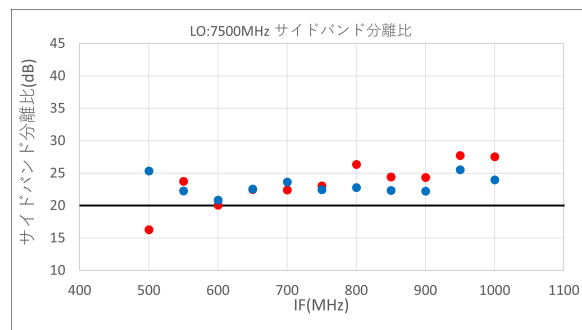


図 4.44 パターン 2 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 7500 MHz)

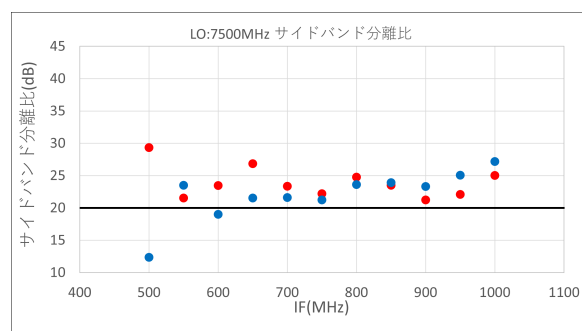


図 4.45 パターン 3 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 7500 MHz)

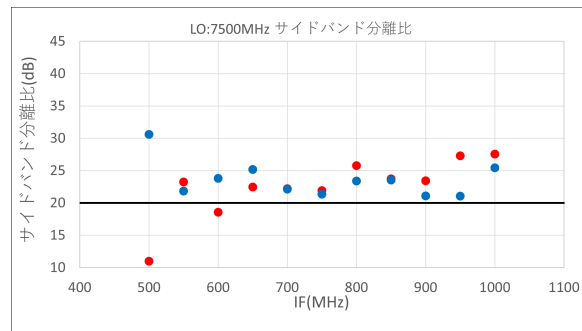


図 4.46 パターン 4 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 7500 MHz)

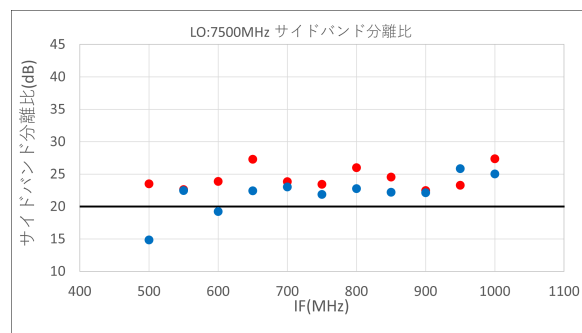


図 4.47 パターン 5 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 7500 MHz)

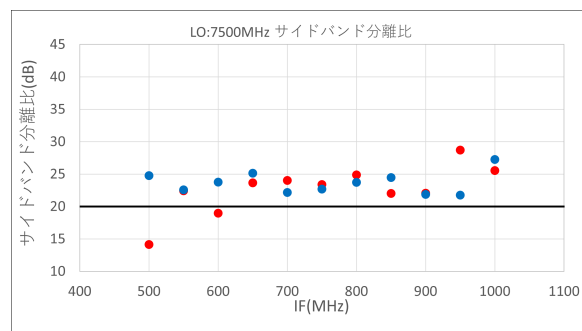


図 4.48 パターン 6 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 7500 MHz)

この結果よりバンドパスフィルターの最適な組み合わせをパターン 3 と判断した。そしてさらに LO 信号が 7500 MHz の時を含め、5–10 GHz の範囲で測定をした。測定結果を以下に横軸 : IF 周波数 (MHz)、縦軸 : 出力強度 (dBm) のグラフを示す。赤いマーカーが USB port からの出力、青いマーカーが LSB port からの出力である。

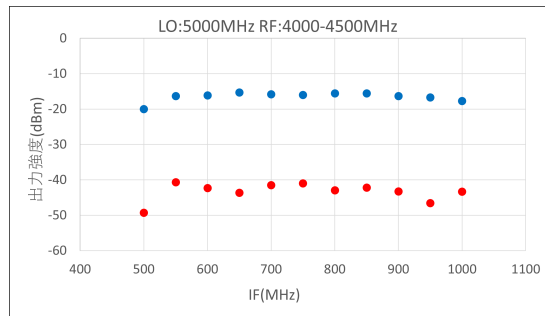
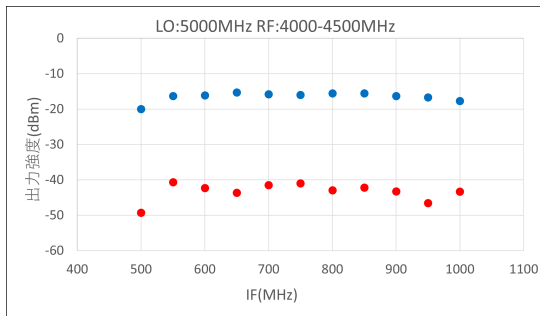


図 4.49 IF バンドパスフィルターを挿入した LO 信号の周波数:5000 MHz 時の出力強度

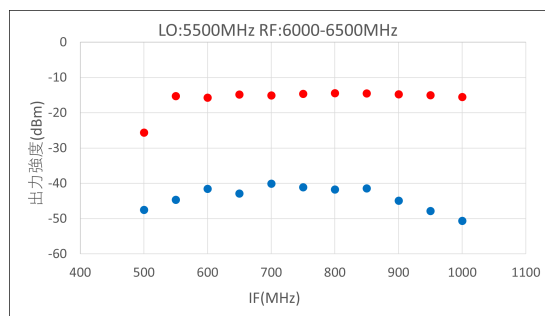
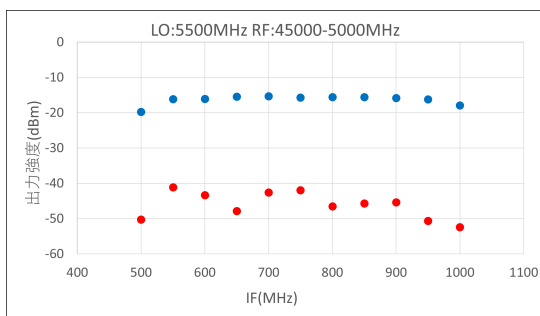


図 4.50 IF バンドパスフィルターを挿入した LO 信号の周波数:5500 MHz 時の出力強度

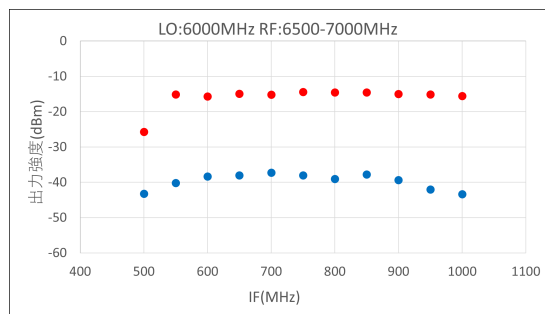
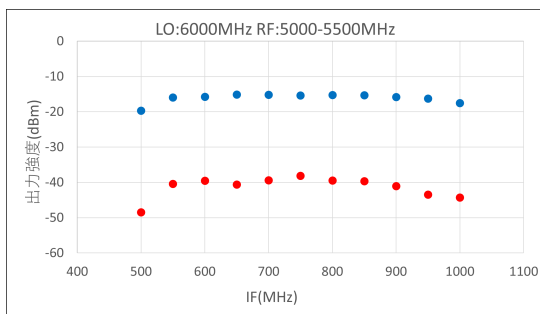


図 4.51 IF バンドパスフィルターを挿入した LO 信号の周波数:6000 MHz 時の出力強度

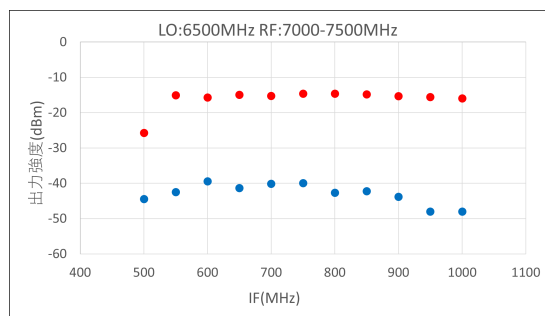
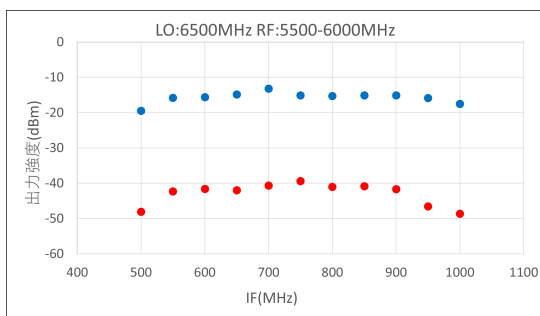


図 4.52 IF バンドパスフィルターを挿入した LO 信号の周波数:6500 MHz 時の出力強度

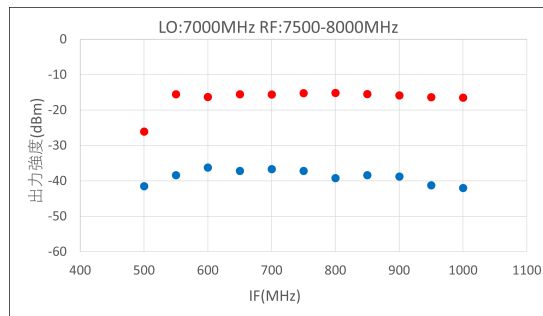
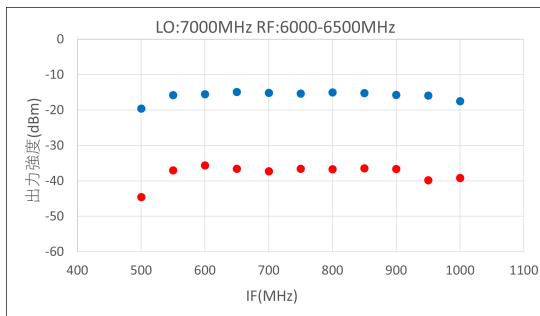


図 4.53 IF バンドパスフィルターを挿入した LO 信号の周波数:7000 MHz 時の出力強度

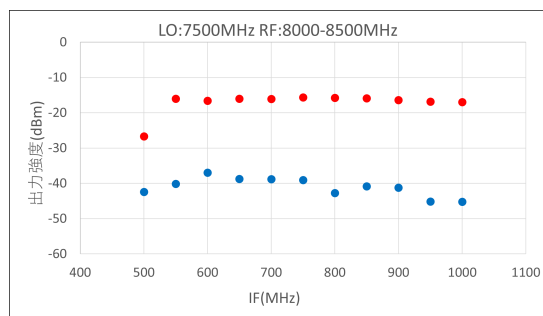
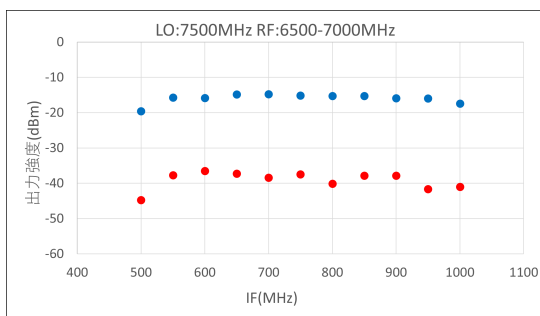


図 4.54 IF バンドパスフィルターを挿入した LO 信号の周波数:7500 MHz 時の出力強度

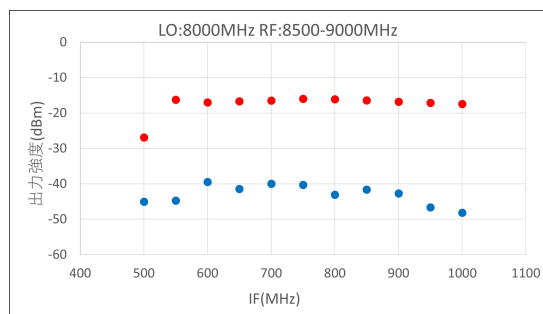
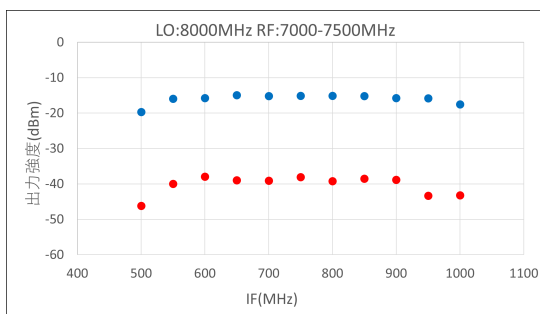


図 4.55 IF バンドパスフィルターを挿入した LO 信号の周波数:8000 MHz 時の出力強度

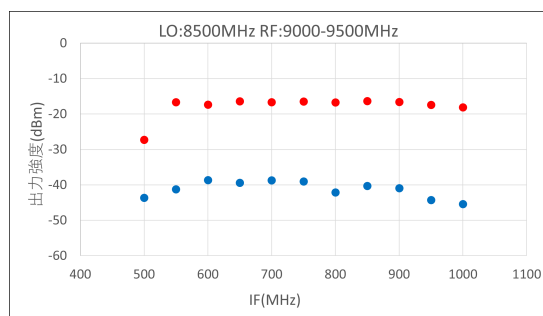
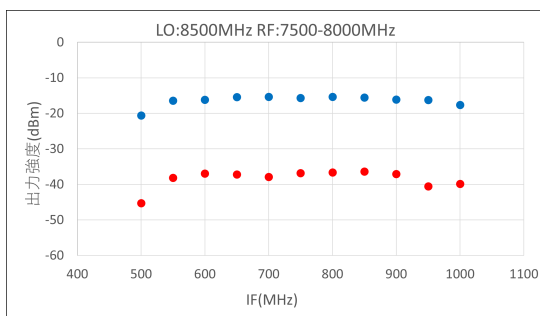


図 4.56 IF バンドパスフィルターを挿入した LO 信号の周波数:8500 MHz 時の出力強度

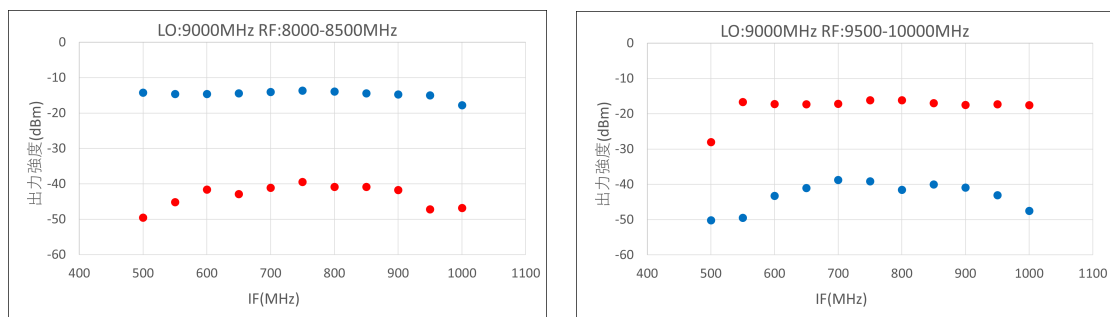


図 4.57 IF バンドパスフィルターを挿入した LO 信号の周波数:9000 MHz 時の出力強度

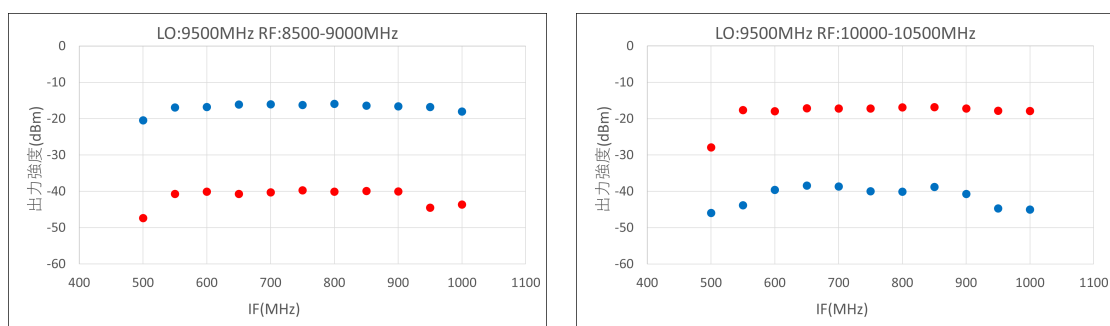


図 4.58 IF バンドパスフィルターを挿入した LO 信号の周波数:9500 MHz 時の出力強度

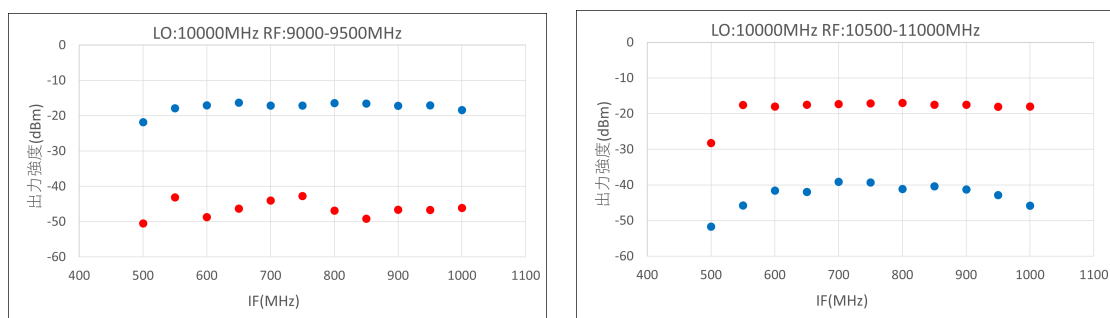


図 4.59 IF バンドパスフィルターを挿入した LO 信号の周波数:10000 MHz 時の出力強度

この図から式 (4.1) を用いてサイドバンド分離比を計算した結果を以下に示す。図中の赤いマーカーは USB 信号に対応する RF 信号を入力した場合を、青いマーカーは LSB 信号に対応する RF 信号を入力した場合のサイドバンド分離比の計算結果を示している。

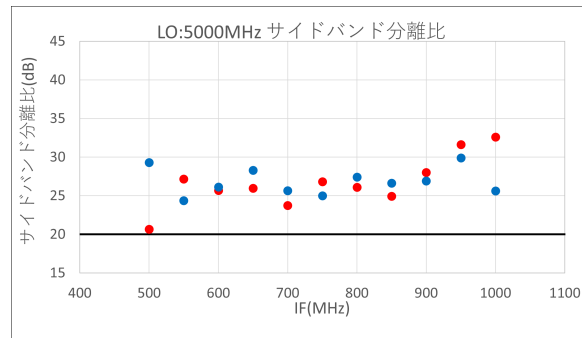


図 4.60 IF バンドパスフィルターを挿入した場合のサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 5000 MHz)

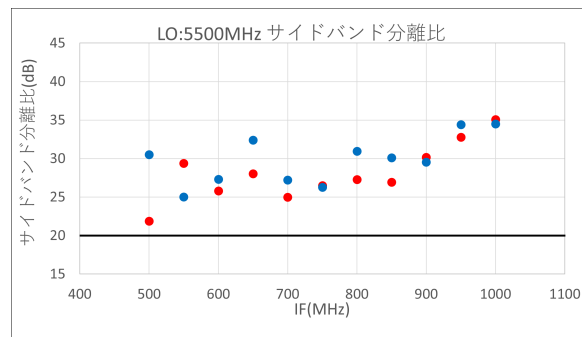


図 4.61 IF バンドパスフィルターを挿入した場合のサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 5500 MHz)

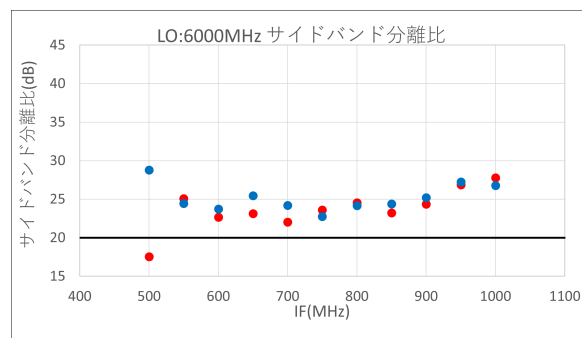


図 4.62 IF バンドパスフィルターを挿入した場合のサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 6000 MHz)

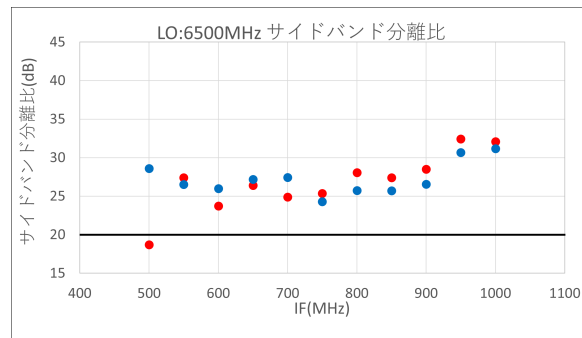


図 4.63 IF バンドパスフィルターを挿入した場合のサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 6500 MHz)

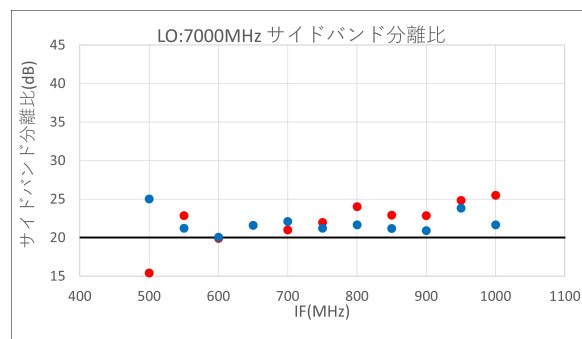


図 4.64 IF バンドパスフィルターを挿入した場合のサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 7000 MHz)

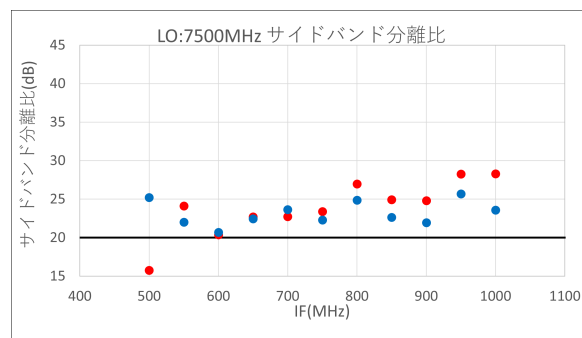


図 4.65 IF バンドパスフィルターを挿入した場合のサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 7500 MHz)

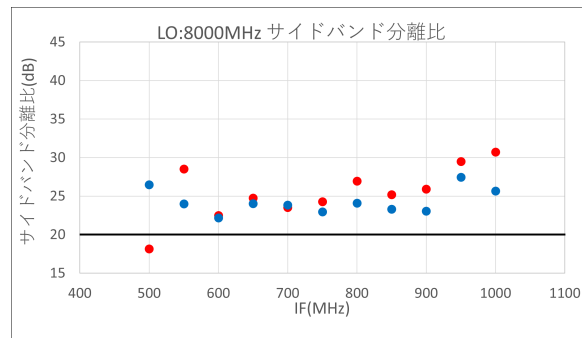


図 4.66 IF バンドパスフィルターを挿入した場合のサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 8000 MHz)

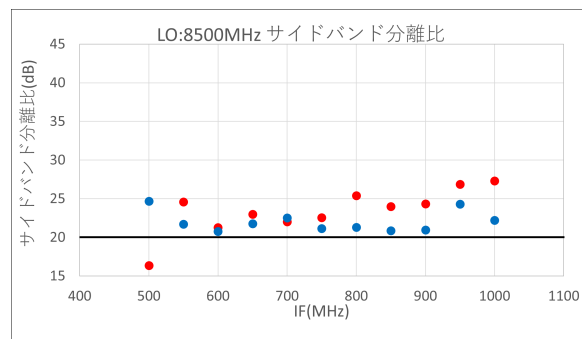


図 4.67 IF バンドパスフィルターを挿入した場合のサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 8500 MHz)

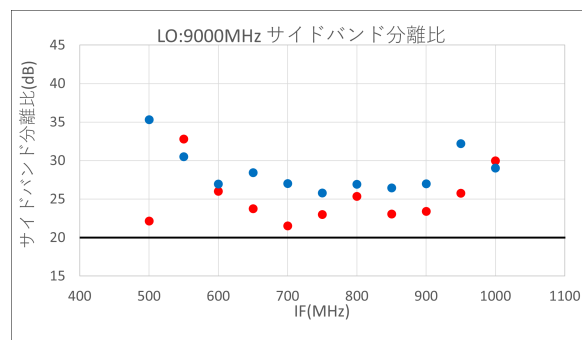


図 4.68 IF バンドパスフィルターを挿入した場合のたサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 9000 MHz)

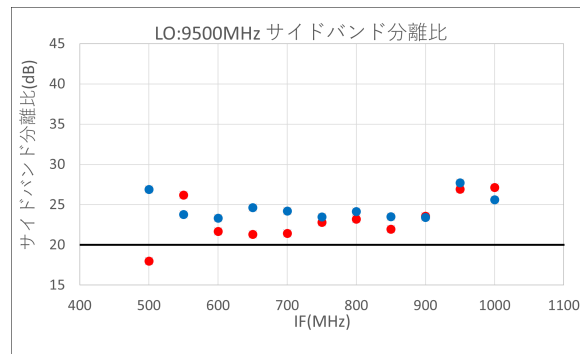


図 4.69 IF バンドパスフィルターを挿入した場合のたサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 9500 MHz)

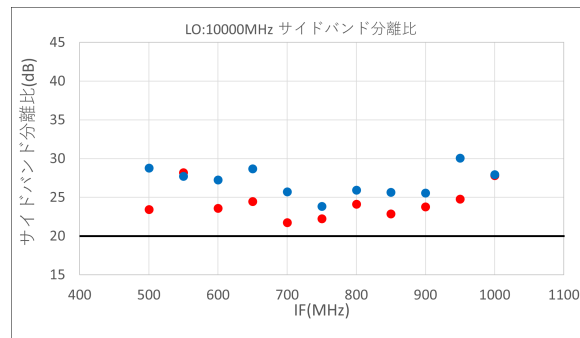


図 4.70 IF バンドパスフィルターを挿入した場合のサイドバンド分離比 (LO 信号周波数 : 10000 MHz)

図 4.60-4.70 より IF バンドパスフィルターの通過帯域外にあたる IF 信号周波数 500 MHz では LO 周波数 6000–8500 MHz、9500 MHz の測定点では要求仕様を満たさないことが分かった。また、IF バンドパスフィルターの通過帯域内の RF 信号周波数 7600 MHz で LO 信号周波数 7000 MHz における測定点でも要求仕様を満たさないことが分かった。

4.3 hybrid の組み合わせの選定

前述にある RF 信号周波数 7600 MHz、LO 信号周波数 7000 MHz の測定点でのサイドバンド分離比は 19.88 dB であった。この測定点は IF hybrid と RF hybrid の組み合わせによって要求仕様を満たすことが可能であると考え実験を行った。実験は IF hybrid が 4 個と RF hybrid が 4 個の全ての組み合わせで行い、LO 信号周波数 7500 MHz のみで測定した。測定した組み合わせは以下の表である。なお、4.2 節ではパターン 2 で測定を行っていた。

表 4 RF hybrid、IF hybrid の配置パターン

組み合わせ	RF hybrid の製造番号	IF hybrid の製造番号
パターン 1	20021001	19041001
パターン 2	20021001	19041002
パターン 3	20021001	19041003
パターン 4	20021001	19041004
パターン 5	20021002	19041001
パターン 6	20021002	19041002
パターン 7	20021002	19041003
パターン 8	20021002	19041004
パターン 9	20021003	19041001
パターン 10	20021003	19041002
パターン 11	20021003	19041003
パターン 12	20021003	19041004
パターン 13	20021004	19041001
パターン 14	20021004	19041002
パターン 15	20021004	19041003
パターン 16	20021004	19041004

出力強度を測定しサイドバンド分離比を計算したものを以下の図に示す。

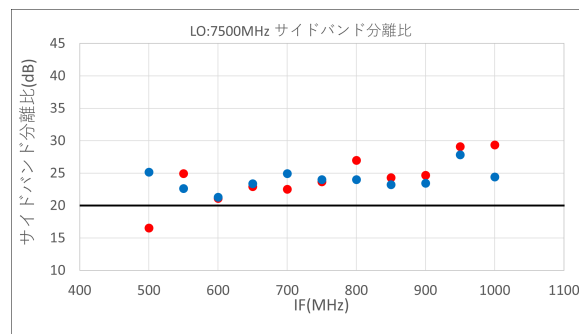


図 4.71 hybrid の組み合わせパターン 1 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

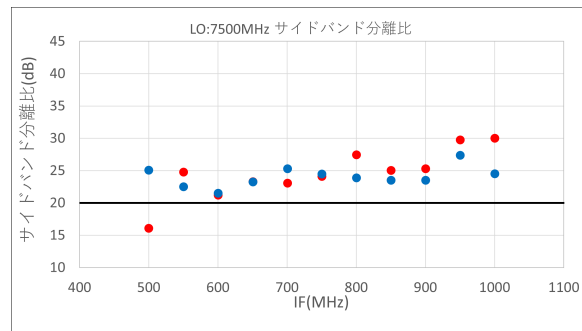


図 4.72 hybrid の組み合わせパターン 2 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

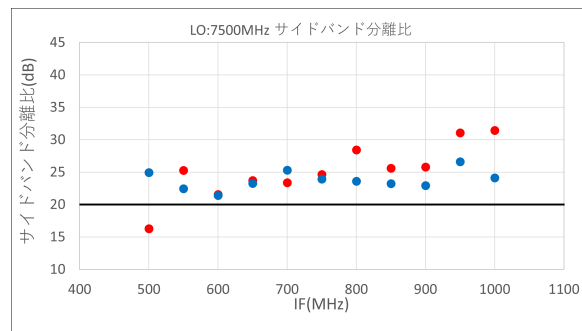


図 4.73 hybrid の組み合わせパターン 3 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

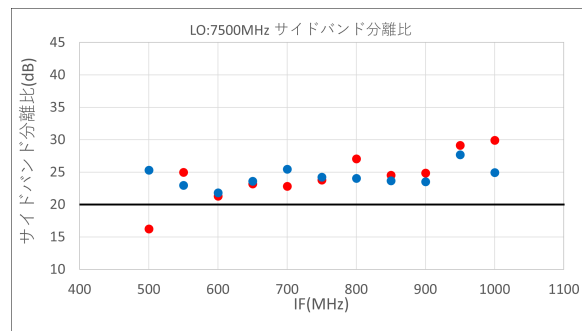


図 4.74 hybrid の組み合わせパターン 4 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

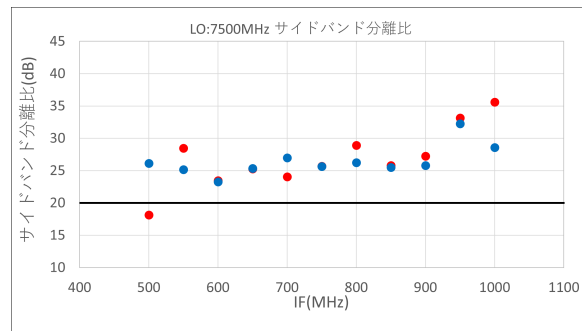


図 4.75 hybrid の組み合わせパターン 5 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

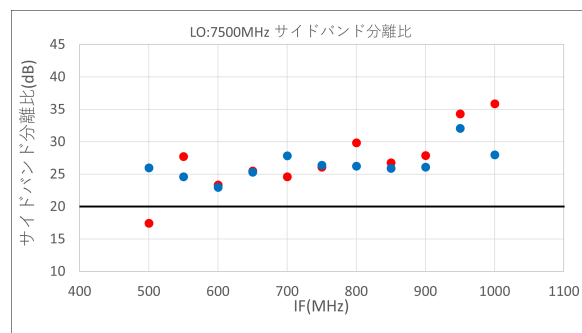


図 4.76 hybrid の組み合わせパターン 6 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

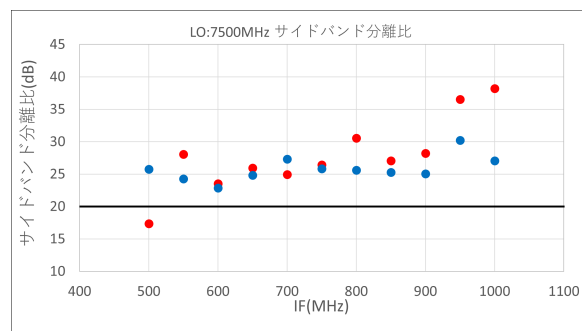


図 4.77 hybrid の組み合わせパターン 7 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

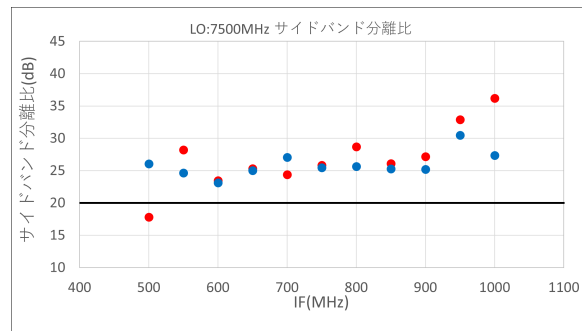


図 4.78 hybrid の組み合わせパターン 8 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

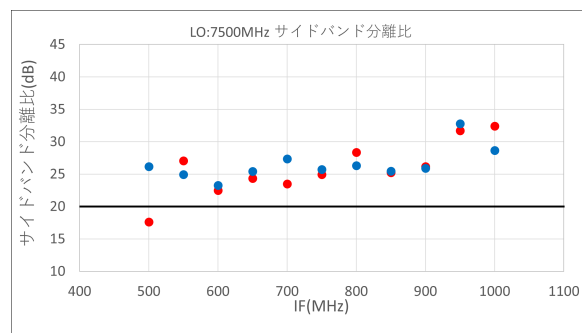


図 4.79 hybrid の組み合わせパターン 9 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

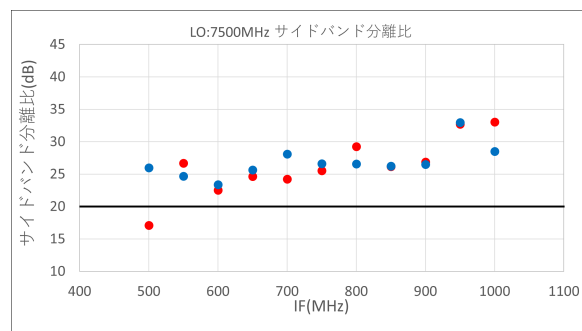


図 4.80 hybrid の組み合わせパターン 10 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

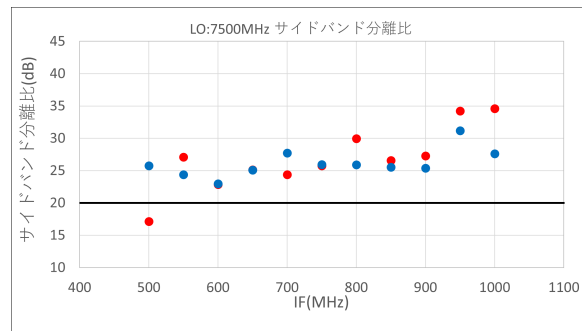


図 4.81 hybrid の組み合わせパターン 11 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

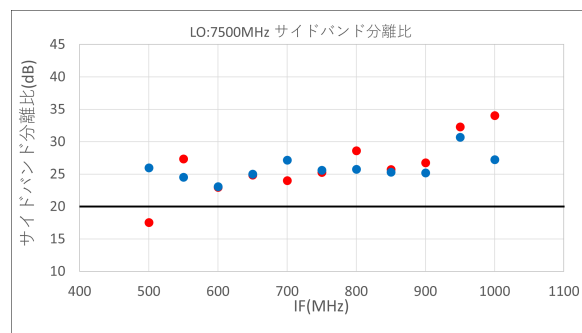


図 4.82 hybrid の組み合わせパターン 12 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

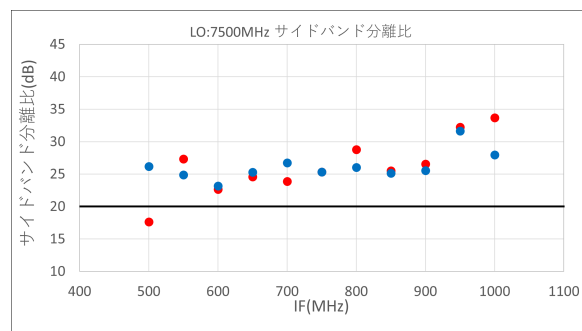


図 4.83 hybrid の組み合わせパターン 13 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

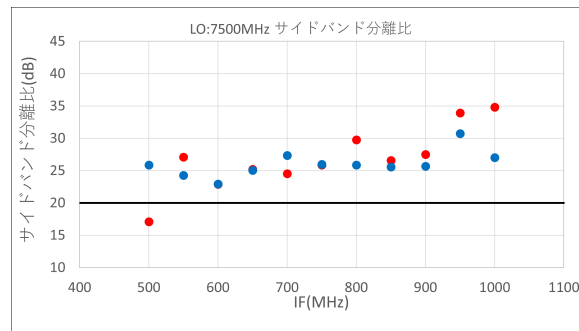


図 4.84 hybrid の組み合わせパターン 14 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

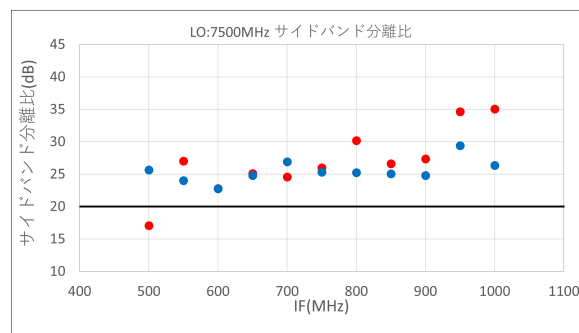


図 4.85 hybrid の組み合わせパターン 15 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

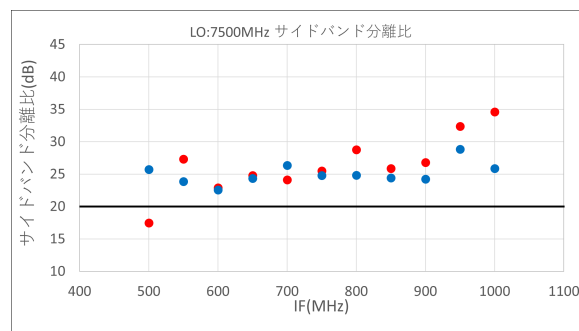


図 4.86 hybrid の組み合わせパターン 16 におけるサイドバンド分離比 (LO 信号周波数: 7500 MHz)

この結果より RF hybrid と IF hybrid の最適な組み合わせをパターン 7 と判断し LO 周波数が 7500 MHz の時を含め、LO 周波数が 5–10 GHz の範囲で測定をした。測定結果を以下に横軸：IF 周波数 (MHz)、縦軸：出力強度 (dBm) のグラフを示す。赤いマーカーが USB port からの出力、青いマーカーが LSB port からの出力である。

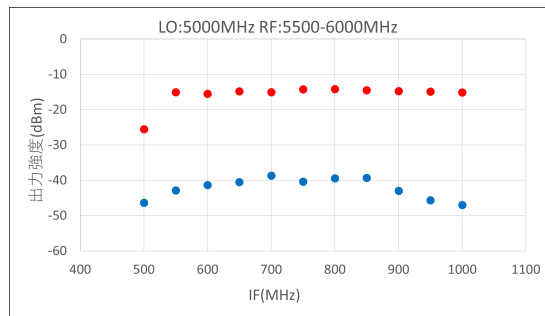
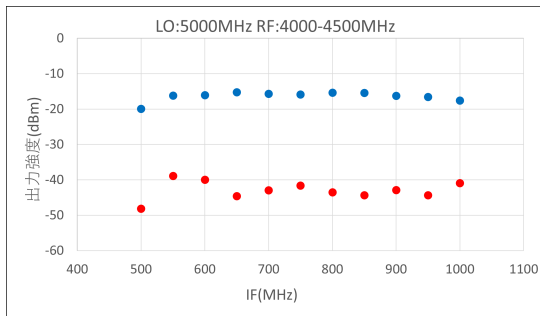


図 4.87 最適化した構成による LO 信号の周波数:5000 MHz 時の出力強度

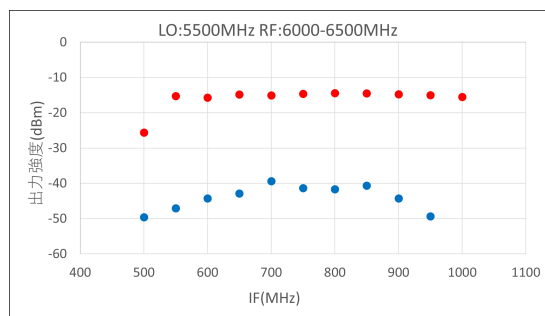
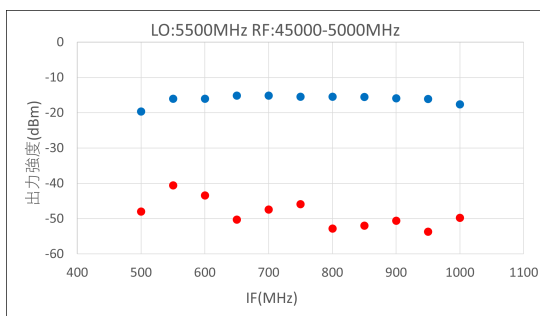


図 4.88 最適化した構成による LO 信号 5500 MHz 時の出力強度

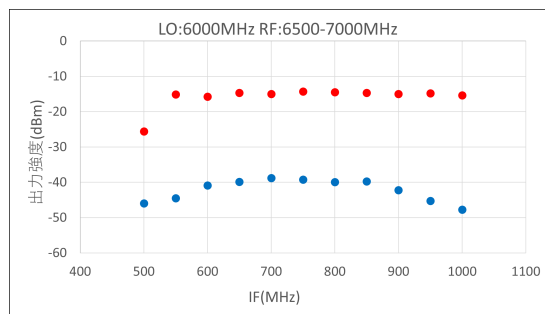
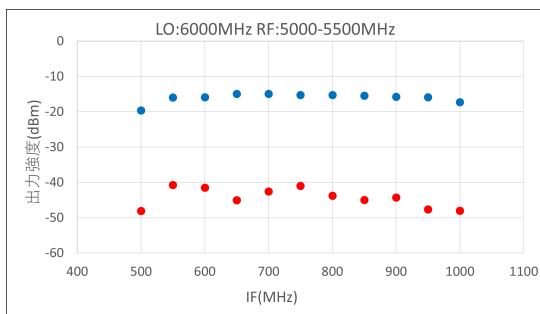


図 4.89 最適化した構成による LO 信号 6000 MHz 時の出力強度

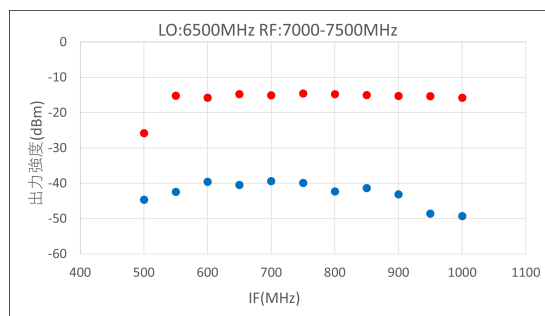
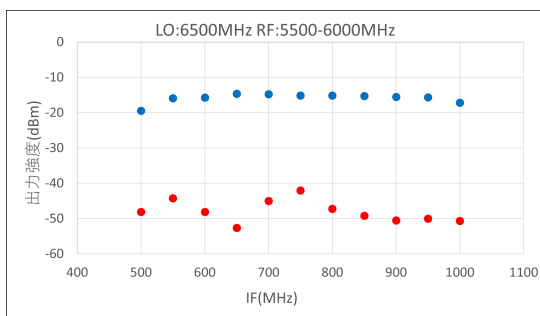


図 4.90 最適化した構成による LO 信号 6500 MHz 時の出力強度

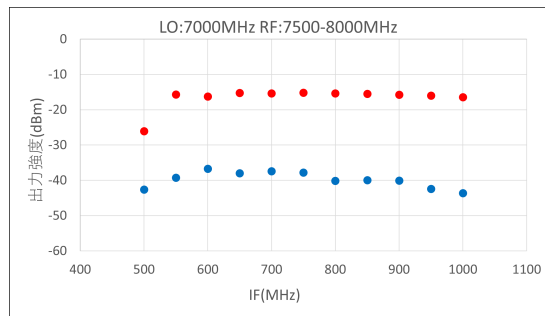
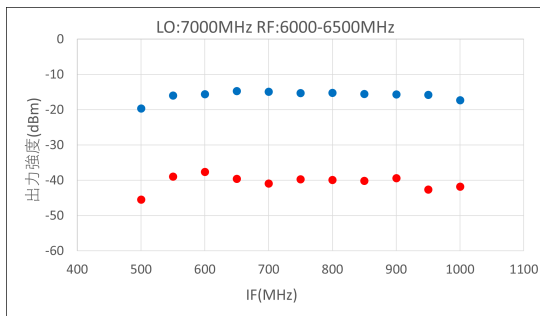


図 4.91 最適化した構成による LO 信号 7000 MHz 時の出力強度

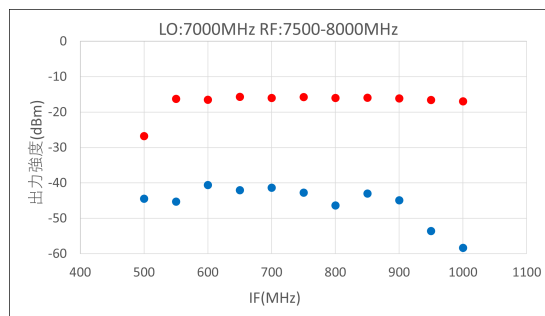
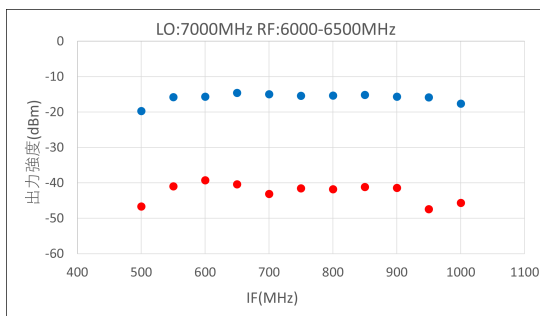


図 4.92 最適化した構成による LO 信号 7500 MHz 時の出力強度

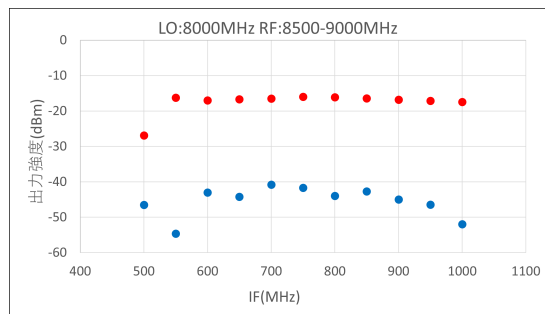
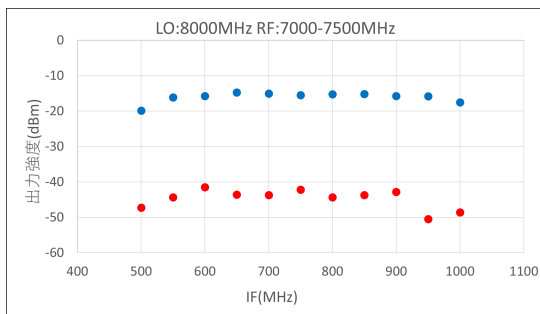


図 4.93 最適化した構成による LO 信号 8000 MHz 時の出力強度

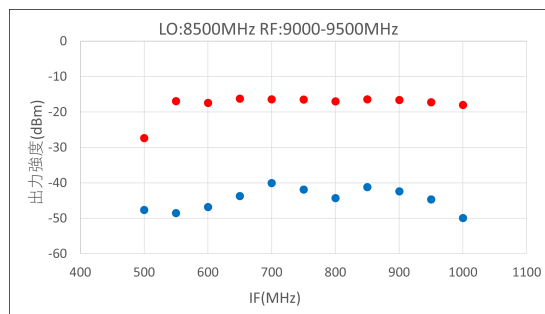
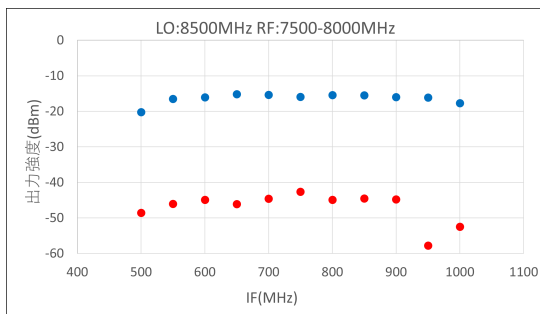


図 4.94 最適化した構成による LO 信号 8500 MHz 時の出力強度

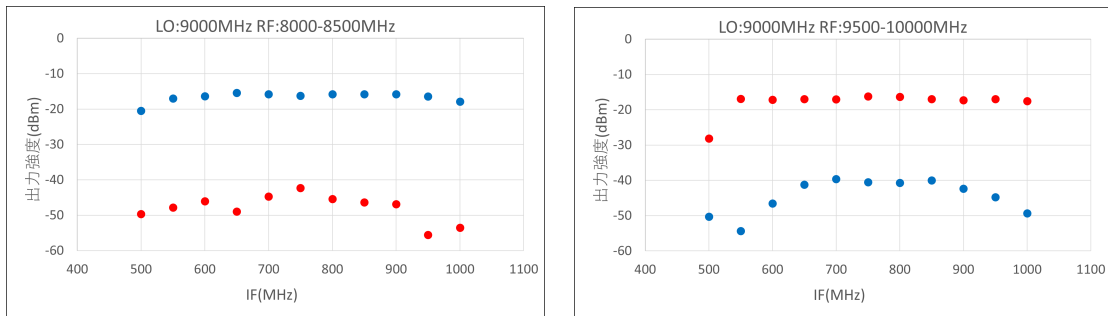


図 4.95 最適化した構成による LO 信号 9000 MHz 時の出力強度

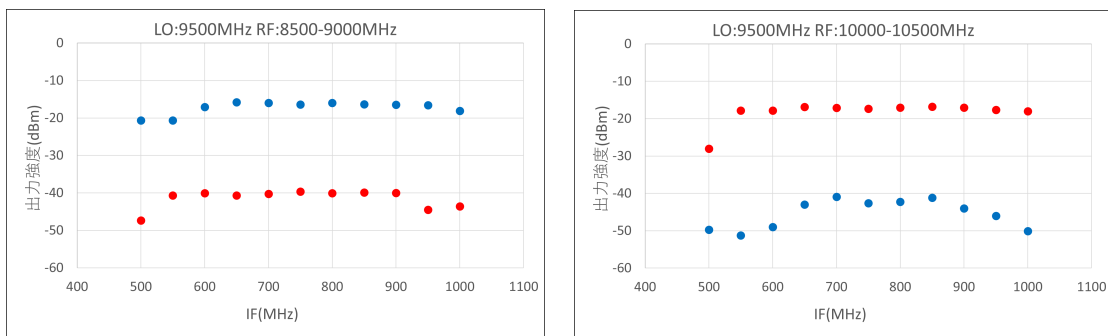


図 4.96 最適化した構成による LO 信号 9500 MHz 時の出力強度

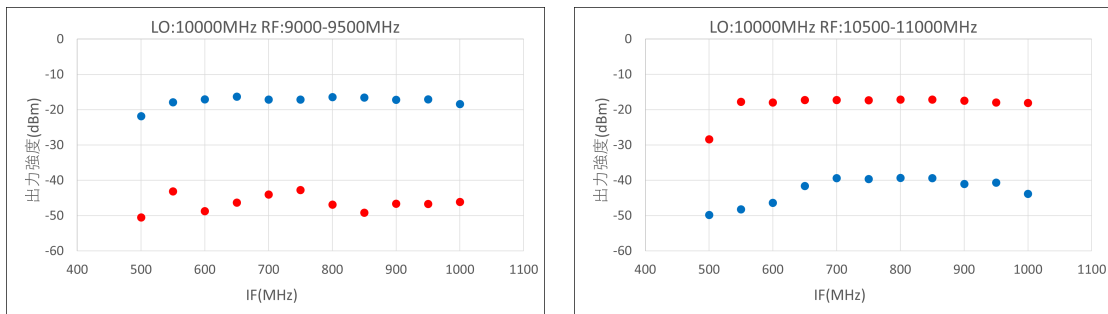


図 4.97 最適化した構成による LO 信号 10000 MHz 時の出力強度

この測定結果から式 (4.1) を用いてサイドバンド分離比を計算した結果を以下に示す。図中の赤いマーカーは USB 信号に対応する RF 信号を入力した場合を、青いマーカーは LSB 信号に対応する RF 信号を入力した場合のサイドバンド分離比の計算結果を示している。

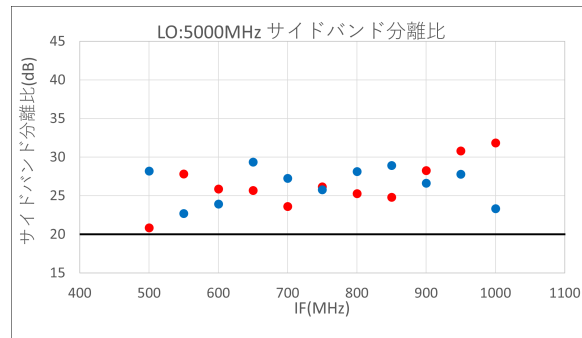


図 4.98 最適化した組み合わせのサイドバンド分離比 (LO 信号 5000 MHz)

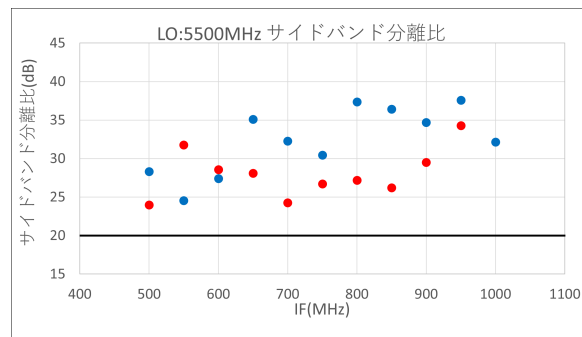


図 4.99 最適化した組み合わせのサイドバンド分離比 (LO 信号 5500 MHz)

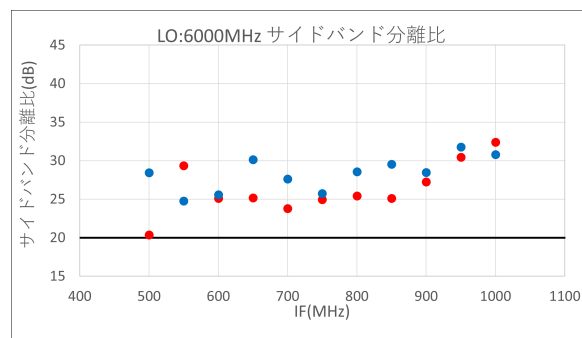


図 4.100 最適化した組み合わせのサイドバンド分離比 (LO 信号 6000 MHz)

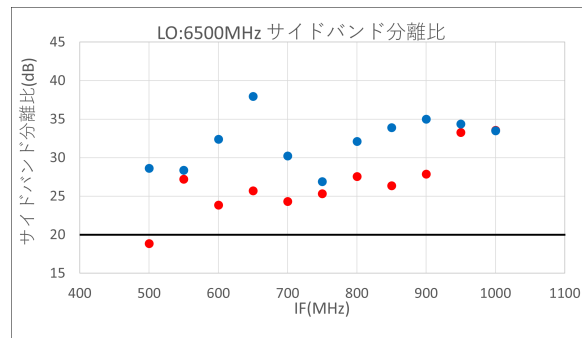


図 4.101 最適化した組み合わせのサイドバンド分離比 (LO 信号 6500 MHz)

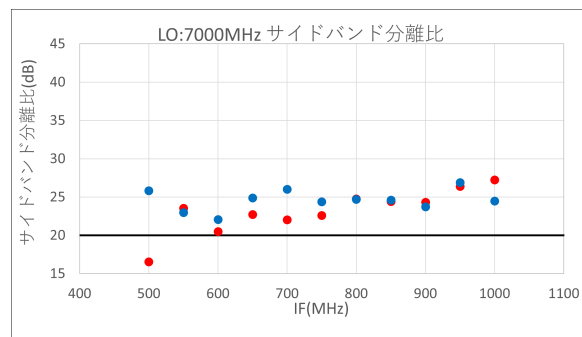


図 4.102 最適化した組み合わせのサイドバンド分離比 (LO 信号 7000 MHz)

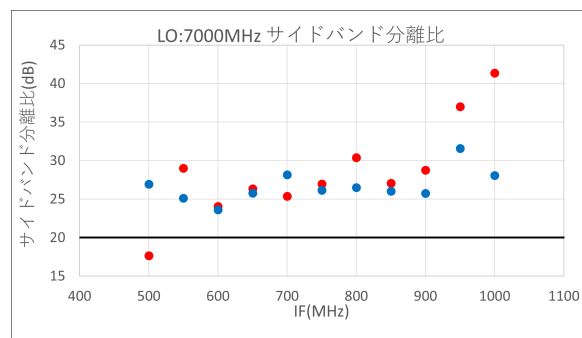


図 4.103 最適化した組み合わせのサイドバンド分離比 (LO 信号 7500 MHz)

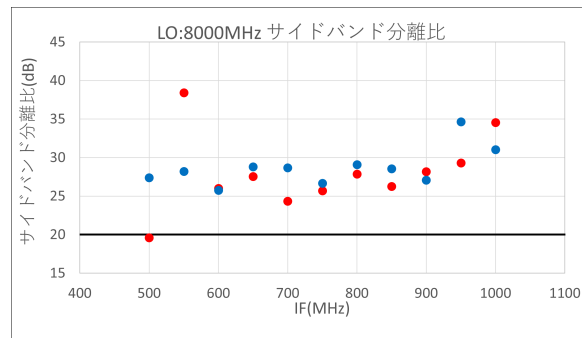


図 4.104 最適化した組み合わせのサイドバンド分離比 (LO 信号 8000 MHz)

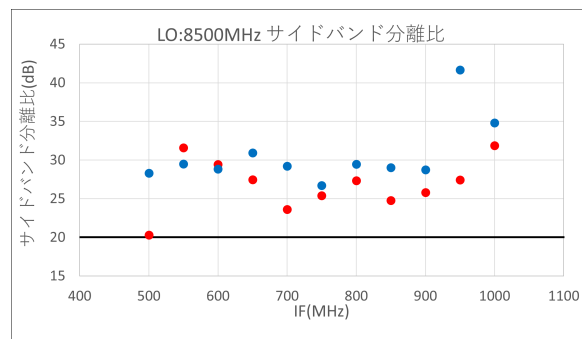


図 4.105 最適化した組み合わせのサイドバンド分離比 (LO 信号 8500 MHz)

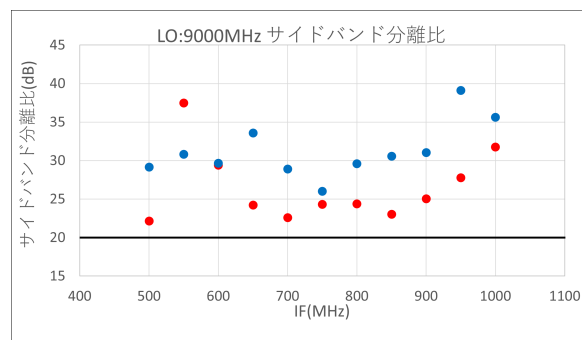


図 4.106 最適化した組み合わせのサイドバンド分離比 (LO 信号 9000 MHz)

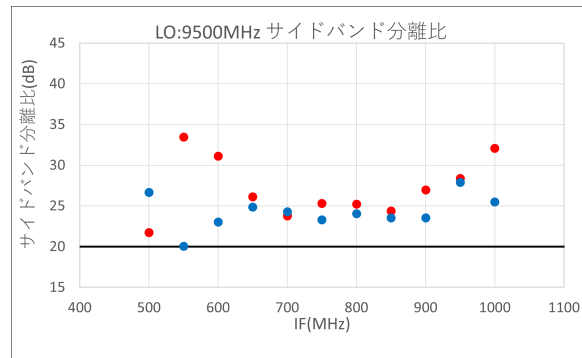


図 4.107 最適化した組み合わせのサイドバンド分離比 (LO 信号 9500 MHz)

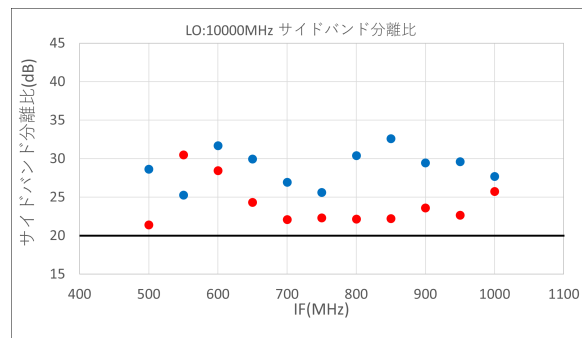


図 4.108 最適化した組み合わせのサイドバンド分離比 (LO 信号 10000 MHz)

5 考察

結果の図 4.98–4.108 より IF バンドパスフィルターの通過帯域内 550 MHz から 1000 MHz では要求仕様を満たすことが確認できた。一方で、IF 信号の 500 MHz においては LO 信号 6500–8000 MHz にかけて要求仕様を満たさないことが分かった。この原因は IF バンドパスフィルターの挿入損失差にあると考えられる。そのため、IF バンドパスフィルターの性能差を調べるため信号発振器から信号強度 5dB、400–1100 MHz の間で 50 MHz ごとに信号を入力し各周波数の挿入損失を調べた。その結果が以下の図である。

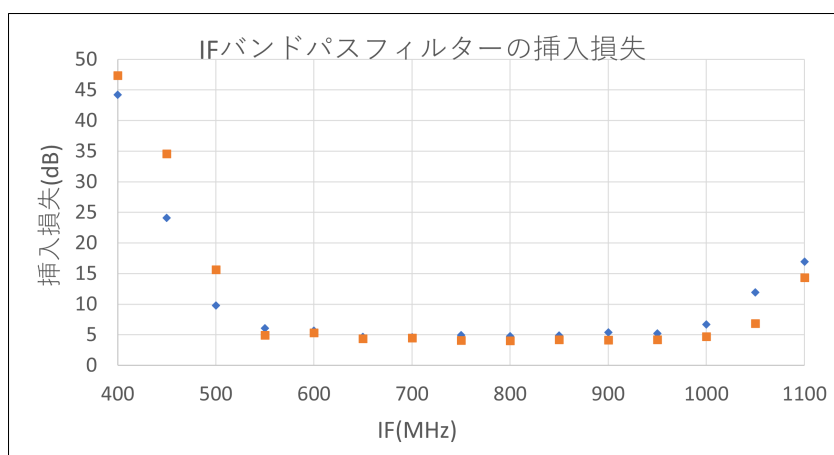


図 5.1 IF バンドパスフィルターの挿入損失。橙色が IF バンドパスフィルター A、青色が IF バンドパスフィルター B の挿入損失を表している。

この図より、IF 信号の周波数 500 MHz では IF バンドパスフィルター B のほうが挿入損失が A に比べて小さいことが分かる。したがって、USB の信号を入力した場合には USB port からの出力強度に比べて LSB port からの出力強度の損失が小さいと言える。つまり、IF バンドパスフィルター挿入前に比べてサイドバンド分離比は低い値になると考えることができる。これは IF バンドパスフィルター挿入前の図 4.31 と挿入後の図 4.65 を比較すると挿入前に比べて挿入後の IF 信号 500 MHz での USB となる入力した際のサイドバンド分離比が低いことに一致する。

よって、IF 信号が 500 MHz の場合にサイドバンド分離比が 20 dB 以上得られない原因は測定で使った 2 つの IF バンドパスフィルターの挿入損失が異なっていることが主な原因であるといえる。

6 まとめ・今後の課題

本研究ではアッテネーター、IF バンドパスフィルター、hybrid の組み合わせを最適化することによって IF バンドパスフィルターの通過帯域内 550 MHz から 1000 MHz では要求仕様を満たすことができた。一方で、IF 信号が 500 MHz においては要求仕様を満たさないことが分かった。IF 信号が 500 MHz の測定点で要求仕様を満たすためには 2 つの IF バンドパスフィルターの周波数特性をそろえる必要がある。

また、本研究ではアッテネーターの全ての組み合わせは測定ができなかった。しかし、個々の性能差を詳しく測定することにより全ての組み合わせを調べずに、最適なアッテネーターの組み合わせを決定することができる。

謝辞

本研究を進めるにあたって、指導教員の米倉覚則教授、百瀬宗武教授をはじめ電波天文観測研究室の皆様には、多くのご指導をいただきました。研究を支えていただいた皆様に感謝申し上げます。

指導教員である米倉覚則教授には何度も助言や実験にたいして的確なご指導をいただきました。また、ゼミやポスター発表をはじめ百瀬宗武教授にも多くの助言をいただきました。重ねて感謝申し上げます。

参考文献

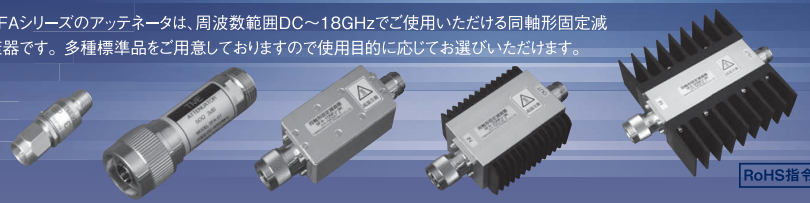
- [1] 中井直正（編）. 宇宙の観測 II-電波天文学. シリーズ現代の天文学 16. 日本評論社,2009.
- [2] 佐藤将太.2019 年度卒業研究論文.（茨城大学 理学部理学科物理学コース電波天文観測研究室）

付録 A アッテネーターのカタログ

アッテネーター・ダミー
 分配器・合成器
 方向性結合器
 切波器
 アクセサリ
 フィルタ

同軸形固定減衰器 SFAシリーズ

SFAシリーズのアッテネーターは、周波数範囲DC～18GHzでご使用いただける同軸形固定減衰器です。多種標準品をご用意しておりますので使用目的に応じてお選びいただけます。



RoHS指令対応品
(◆を除く)

注意事項 本製品は一般電子機器の汎用、標準的な用途の為に設計・製造されたものです。

- ・高温・多湿の環境下で周囲温度が急激に変化すると減衰器内部で結露が発生することがあります。
- ・結露により絶縁劣化、性能不良、錆などが発生することがありますので、ご注意ください。
- ・静電気の発生し易い環境ではESDにより損傷を受けることがありますので、十分注意して下さい。
- ・過度な電力、急激な高電圧パルスを印加しないで下さい。
- ・印加される可能性がある場合はフェールセーフ設計(保護回路、保護装置、冗長回路など)を設けたシステムにてご使用下さい。

型名表示説明 御見積時・ご注文の際は、下記参照の上、型名をご指定いただけますようお願いいたします。

■ SFA-01AXPJ、SFA-01AXPJ-30の場合

1	2	3	4	5	6
SFA	01	X	PJ	10	-100

1 **タイプ名** 2 **許容電力** 3 **コネクタ** 4 **入出力コネクタ**
 SFA 01:1W X:SMA PJ:入力側P,出力側J

5 **減衰量**(※標準減衰量の場合) 6 **特性インピーダンス**
 3:3 dB 15:15dB 100:50Ω
 6:6 dB 20:20dB
 10:10dB 30:30dB

■ SFA-Kシリーズの場合

1	2	3	4	5	6
SFA	01	N	PJ	10	-K

1 **タイプ名** 2 **許容電力** 3 **コネクタ**
 SFA 01:1W 20:20W N:N
 031:3W 30:30W X:SMA
 051:5W 50:50W
 10:10W

4 **入出力コネクタ** 5 **減衰量**(※標準減衰量の場合) 6 **識別**
 PJ:入力側P 3:3 dB K:小型を表す
 出力側J 6:6 dB
 JJ:入力側J 10:10dB
 出力側J 20:20dB

共通仕様

特性インピーダンス:50(Ω)
 標準減衰量:3.6,10,20(dB)
 ※上記以外の特殊減衰量は、別途お問い合わせ下さい。

仕様

型名	周波数範囲 (MHz)	電力 (W)	減衰量誤差 (dB以内)	VSWR 以下	コネクタ	質量 (g)	使用温度 範囲
SFA-01A	DC～18000	1	±(3%+0.5):DC~124GHz ±(3%+0.7):124~18GHz	0~2.5dB時:1.35 以外:1.3	SMA	(7)	-20～+65℃
SFA-01AXPJ-30	DC～8000	1	±(3%+0.5)	1.3	SMA	(7)	-20～+65℃
SFA-01-K	DC～4000	1	±(3%+0.5):DC~3GHz ±(3%+0.7):3~4GHz	1.2 1.3	NPJ	(81)	-20～+65℃
SFA-031-K	DC～4000	3	±(3%+0.5):DC~3GHz ±(3%+0.7):3~4GHz	1.2 1.3	NPJ	(110)	-10～+50℃
SFA-051-K	DC～4000	5	±(3%+0.5):DC~3GHz ±(3%+0.7):3~4GHz	1.2 1.3	NPJ	(116)	-10～+50℃
SFA-10-K	DC～4000	10	±(3%+0.5):DC~3GHz ±(5%+0.5):3~4GHz	1.3	N/SMA	(242)	-10～+50℃
SFA-20-K	DC～4000	20	±(3%+0.5):DC~3GHz ±(5%+0.5):3~4GHz	1.3	N/SMA	(425)	-10～+50℃
SFA-30-K	DC～4000	30	±(3%+0.5):DC~3GHz ±(5%+0.5):3~4GHz	1.3	N/SMA	(537)	-10～+50℃
SFA-50-K	DC～4000	50	±(3%+0.5):DC~3GHz ±(5%+0.5):3~4GHz	1.3	N/SMA	(701)	-10～+50℃

※SFA-20-K、SFA-30-K、SFA-50-KはIN側が最大電力となりますのでご注意ください。

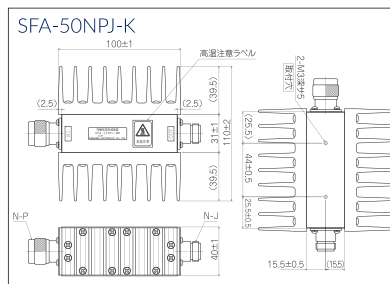
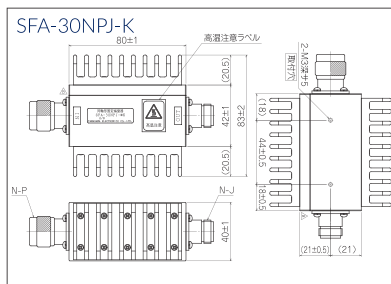
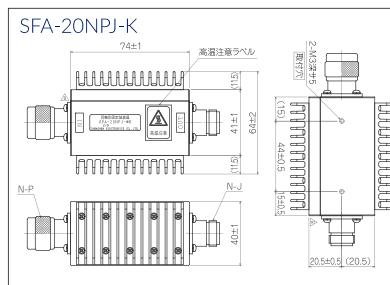
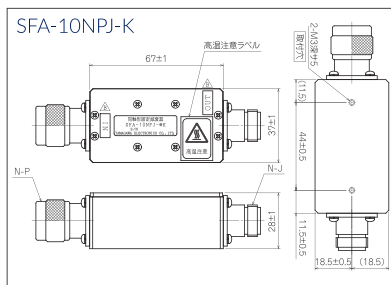
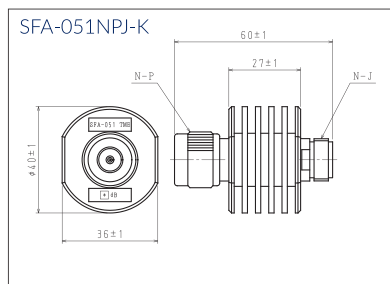
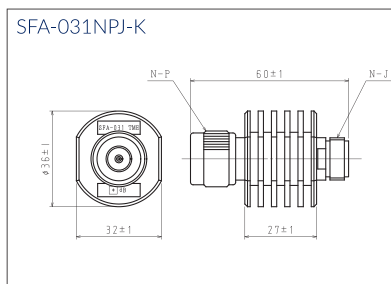
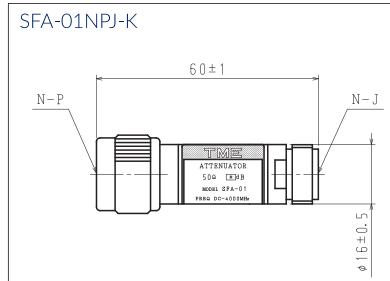
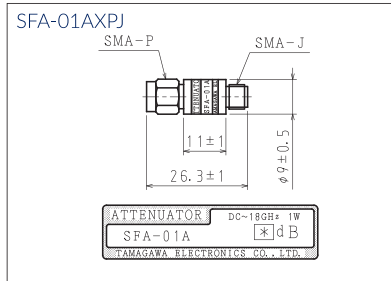
注意: 当製品にはベリリアを使用している製品がございます。
 廃棄する場合には関連法令に従って下さい。

06


TAMAGAWA ELECTRONICS CO., LTD.

図付録 A.1 使用したアッテネーターのカタログ

外形図



アッテネーター・ダンパー

分配器・合成器

方向性結合器

切換器

アクセサリ

フィルタ

付録 B IF hybrid の性能表

EK-10-0232-08-00

TEST REPORT

R&K COMPANY LIMITED
Manufacturing Department

Description	QUADRATURE HYBRIDS
Part Number	QH320-0S
Serial Number	19041001
Date Tested	9-Dec-2019

[illegible]

Approved	Confirmed	Tested
		

図付録 B.1 IF hybrid の性能表 (S/N:19041001)

QUADRATURE HYBRIDS

Model R&K-	QH320-0S	500 - 1000MHz	S/N - 19041001		
Inspection Items	Port/Condition	Specifications	Measurement result		
Insertion Loss (Except Coupling Loss 3.0dB)	INPUT to 0°	max.	3.55	dB	500 MHz
		min.	2.85	dB	815 MHz
	INPUT to -90°	max.	3.62	dB	777 MHz
		min.	2.81	dB	500 MHz
		0.5dB max.	0.21	dB	
Amplitude Balance	0° vs -90°	1.2dB max.	0.81	dB	
Phase Balance	0° vs -90°	-90±3deg max.	-91.9	deg	1000 MHz
Isolation	0° to -90°	18dB min.	22.1	dB	500 MHz
VSWR	INPUT	1.3:1max.	1.18	/	500 MHz
	0°		1.19	/	1000 MHz
	-90°		1.18	/	500 MHz
	ISO		1.19	/	1000 MHz
		Judgment	OK		

図付録 B.2 IF hybrid の性能表 (S/N:19041001)

Description	QUADRATURE HYBRIDS
Part Number	QH320-0S
Serial Number	19041002
Date Tested	9-Dec-2019

Approved	Confirmed	Tested
		

60

QUADRATURE HYBRIDS

Model R&K-	QH320-0S	500 - 1000MHz	S/N - 19041002			
Inspection Items	Port/Condition	Specifications	Measurement result			
Insertion Loss (Except Coupling Loss 3.0dB)	INPUT to 0°	max.	3.59	dB	500	MHz
		min.	2.89	dB	795	MHz
	INPUT to -90°	max.	3.57	dB	777	MHz
		min.	2.77	dB	500	MHz
			0.5dB max.	0.21	dB	
Amplitude Balance	0° vs -90°	1.2dB max.	0.82	dB		
Phase Balance	0° vs -90°	-90±3deg max.	-89.7	deg	500	MHz
Isolation	0° to -90°	18dB min.	22.7	dB	500	MHz
VSWR	INPUT	1.3:1max.	1.19	/	1000	MHz
	0°		1.18	/	1000	MHz
	-90°		1.17	/	1000	MHz
	ISO		1.2	/	1000	MHz
		Judgment	OK			

図付録 B.4 IF hybrid の性能表 (S/N:19041002)

Description	QUADRATURE HYBRIDS
Part Number	QH320-0S
Serial Number	19041002
Date Tested	9-Dec-2019

Approved	Confirmed	Tested
		

QUADRATURE HYBRIDS

Model R&K-	QH320-0S	500 – 1000MHz	S/N – 19041002			
Inspection Items	Port/Condition	Specifications	Measurement result			
Insertion Loss (Except Coupling Loss 3.0dB)	INPUT to 0°	max.	3.59	dB	500	MHz
		min.	2.89	dB	795	MHz
	INPUT to -90°	max.	3.57	dB	777	MHz
		min.	2.77	dB	500	MHz
			0.5dB max.	0.21	dB	
Amplitude Balance	0° vs -90°	1.2dB max.	0.82	dB		
Phase Balance	0° vs -90°	-90±3deg max.	-89.7	deg	500	MHz
Isolation	0° to -90°	18dB min.	22.7	dB	500	MHz
VSWR	INPUT	1.3:1max.	1.19	/	1000	MHz
	0°		1.18	/	1000	MHz
	-90°		1.17	/	1000	MHz
	ISO		1.2	/	1000	MHz
		Judgment	OK			

図付録 B.6 IF hybrid の性能表 (S/N:190410012)

Description	QUADRATURE HYBRIDS
Part Number	QH320-0S
Serial Number	19041003
Date Tested	9-Dec-2019

[illegible]

Approved	Confirmed	Tested
		

QUADRATURE HYBRIDS

Model R&K-	QH320-0S	500 – 1000MHz	S/N – 19041003			
Inspection Items	Port/Condition	Specifications	Measurement result			
Insertion Loss (Except Coupling Loss 3.0dB)	INPUT to 0°	max.	3.6	dB	500	MHz
		min.	2.89	dB	815	MHz
	INPUT to -90°	max.	3.56	dB	777	MHz
		min.	2.75	dB	500	MHz
			0.5dB max.	0.20	dB	
Amplitude Balance	0° vs -90°	1.2dB max.	0.85 dB			
Phase Balance	0° vs -90°	-90±3deg max.	-89.6	deg	500	MHz
Isolation	0° to -90°	18dB min.	22.6	dB	500	MHz
VSWR	INPUT	1.3:1max.	1.19	/	1000	MHz
	0°		1.17	/	1000	MHz
	-90°		1.17	/	500	MHz
	ISO		1.2	/	1000	MHz
		Judgment	OK			

図付録 B.8 IF hybrid の性能表 (S/N:19041003)

Description	QUADRATURE HYBRIDS
Part Number	QH320-0S
Serial Number	19041004
Date Tested	9-Dec-2019

[illegible]

Approved	Confirmed	Tested
		

QUADRATURE HYBRIDS

Model R&K-	QH320-0S	500 – 1000MHz	S/N – 19041004			
Inspection Items	Port/Condition	Specifications	Measurement result			
Insertion Loss (Except Coupling Loss 3.0dB)	INPUT to 0°	max.	3.57	dB	500	MHz
		min.	2.87	dB	815	MHz
	INPUT to -90°	max.	3.61	dB	777	MHz
		min.	2.78	dB	500	MHz
			0.5dB max.	0.21	dB	
Amplitude Balance	0° vs -90°	1.2dB max.	0.83	dB		
Phase Balance	0° vs -90°	-90±3deg max.	-89.9	deg	502	MHz
Isolation	0° to -90°	18dB min.	22.9	dB	500	MHz
VSWR	INPUT	1.3:1max.	1.19	/	1000	MHz
	0°		1.18	/	1000	MHz
	-90°		1.16	/	500	MHz
	ISO		1.2	/	1000	MHz
		Judgment	OK			

図付録 B.10 IF hybrid の性能表 (S/N:19041004)

付録 C RF hybrid の性能表

EK-10-2904-03-00

TEST REPORT

R&K COMPANY LIMITED
Manufacturing Department

Description	QUADRATURE HYBRID
Part Number	IPP-2216RT
Serial Number	20021001
Date Tested	24-Mar-2020

[illegible]

Approved	Confirmed	Tested
		

図付録 C.1 RF hybrid の性能表 (S/N:20021001)

QUADRATURE HYBRID

IPP-2216RT		6000 – 8500MHz	S/N	20021001			
Inspection Items	Port/Condition	Specifications	Measurement result			Judgement	
Insertion Loss	IN to 0°	max.	3.44	dB	6650	-	
		min.	3.09	dB	7275		MHz
	IN to -90°	max.	3.61	dB	7338		MHz
		min.	3.2	dB	6188		MHz
		0.4dB max.	0.34 dB				OK
Amplitude Balance	0° vs -90°	±0.35dB max.	±0.26		dB	OK	
Phase Balance	0° vs -90°	-90 ±6deg max.	-87.9	deg	8238	MHz	OK
Isolation	0° to -90°	17dB min.	21.6	dB	8500	MHz	OK
VSWR	INPUT	1.3:1max.	1.28	/	7875	MHz	OK
	0°		1.23	/	7063	MHz	OK
	-90°		1.21	/	7463	MHz	OK
	ISO		1.25	/	8488	MHz	OK
		Judgement	OK				

図付録 C.2 RF hybrid の性能表 (S/N:20021001)

Description	QUADRATURE HYBRID
Part Number	IPP-2216RT
Serial Number	20021002
Date Tested	24-Mar-2020

Approved	Confirmed	Tested
川口	佐野	鈴木

70

QUADRATURE HYBRID

IPP-2216RT		6000 - 8500MHz	S/N		20021002	
Inspection Items	Port/Condition	Specifications	Measurement result			Judgement
Insertion Loss	IN to 0°	max.	3.42	dB	8500 MHz	-
		min.	3.08	dB	6912 MHz	
	IN to -90°	max.	3.52	dB	7350 MHz	
		min.	3.21	dB	6187 MHz	
		0.4dB max.	0.31 dB			OK
Amplitude Balance	0° vs -90°	±0.35dB max.	±0.22			OK
Phase Balance	0° vs -90°	-90 ±6deg max.	-93.5	deg	8488 MHz	OK
Isolation	0° to -90°	17dB min.	24.4	dB	6625 MHz	OK
VSWR	INPUT	1.3:1max.	1.15	/	7487 MHz	OK
	0°		1.23	/	8500 MHz	OK
	-90°		1.21	/	6950 MHz	OK
	ISO		1.23	/	6338 MHz	OK
		Judgement	OK			

図付録 C.4 RF hybrid の性能表 (S/N:20021002)

TEST REPORT

R&K COMPANY LIMITED
Manufacturing Department

Description	QUADRATURE HYBRID
Part Number	IPP-2216RT
Serial Number	20021003
Date Tested	24-Mar-2020

[illegible]

Approved	Confirmed	Tested
		

図付録 C.5 RF hybrid の性能表 (S/N:20021003)

QUADRATURE HYBRID

IPP-2216RT		6000 ~ 8500MHz	S/N	20021003			
Inspection Items	Port/Condition	Specifications	Measurement result			Judgement	
Insertion Loss	IN to 0°	max.	3.52	dB	6025	MHz	—
		min.	3.09	dB	8150	MHz	
	IN to -90°	max.	3.58	dB	7500	MHz	
		min.	3.23	dB	6125	MHz	
			0.4dB max.	0.36 dB			OK
Amplitude Balance	0° vs -90°	±0.35dB max.	±0.25		dB	OK	
Phase Balance	0° vs -90°	-90 ±6deg max.	-91.5	deg	6062	MHz	OK
Isolation	0° to -90°	17dB min.	25.2	dB	8375	MHz	OK
VSWR	INPUT	1.3:1max.	1.12	/	6887	MHz	OK
	0°		1.14	/	6000	MHz	OK
	-90°		1.11	/	6037	MHz	OK
	ISO		1.13	/	8450	MHz	OK
		Judgement	OK				

図付録 C.6 RF hybrid の性能表 (S/N:20021003)

Description	QUADRATURE HYBRID
Part Number	IPP-2216RT
Serial Number	20021004
Date Tested	24-Mar-2020

Approved	Confirmed	Tested
		

74

QUADRATURE HYBRID

IPP-2216RT		6000 – 8500MHz	S/N	20021004			
Inspection Items	Port/Condition	Specifications	Measurement result			Judgement	
Insertion Loss	IN to 0°	max.	3.29	dB	6050	MHz	-
		min.	2.97	dB	6912	MHz	
	IN to -90°	max.	3.64	dB	7162	MHz	
		min.	3.32	dB	6187	MHz	
		0.4dB max.	0.31 dB				OK
Amplitude Balance	0° vs -90°	±0.35dB max.	±0.34		dB		OK
Phase Balance	0° vs -90°	-90 ±6deg max.	-87.8	deg	7538	MHz	OK
Isolation	0° to -90°	17dB min.	21.1	dB	6900	MHz	OK
VSWR	INPUT	1.3:1max.	1.23	/	7062	MHz	OK
	0°		1.17	/	7462	MHz	OK
	-90°		1.14	/	8500	MHz	OK
	ISO		1.24	/	7512	MHz	OK
		Judgement	OK				

図付録 C.8 RF hybrid の性能表 (S/N:20021004)

付録 D divider のカタログ

RF-LAMBDA
THE LEADER OF RF BROADBAND SOLUTIONS

RFLT2W4G18G

Coaxial 30W 0° 2-Way Power Divider 4~18GHz



Features

- High power handling up to 30W
- Wide band operation
- High isolation within operational band
- Low Insertion Loss
- Stable performance over temperature

Typical Applications

- Aerospace and Military Applications
- Wireless Infrastructure
- Test and Measurement

Electrical Specifications, $T_A = 25^\circ\text{C}$

Parameters		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Units
Frequency Range		4		8	8		18	GHz
Nominal Splitter Loss			3			3		dB
Insertion Loss			0.3	0.4		0.5	0.7	dB
Isolation		18	20		18	20		dB
Input VSWR			1.4	1.5		1.4	1.5	: 1
Output VSWR			1.4	1.5		1.4	1.5	: 1
Amplitude Imbalance			0.1	0.2		0.1	0.2	dB
Phase Imbalance			2	3		3	4	deg
Power Rating	Forward Power	30						W
	Reverse Power	1						W
	Peak Power	300 (10% Duty Cycle, 1 us Pulse Width)						W
Impedance		50						Ohms
Weight		1.0 Max.						ounces
Input / Output Connectors		SMA-Female						
Material		Aluminum						
Finish		Blue Paint						

Coaxial 30W 0° 2-Way Power Divider 4~18GHz

Rev 2. 01-04-2021

RF-LAMBDA USA www.rflambda.com
Sales: sales@rflambda.com Technical: support@rflambda.com

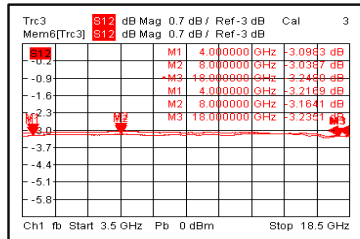
図付録 D.1 使用した divider のカタログ

Environmental Specifications and Test Standards

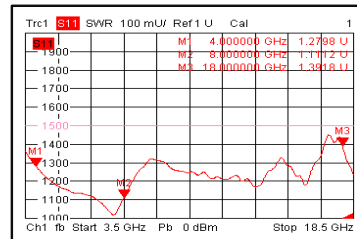
Parameter	Description
Operational Temperature	-40°C~+85°C (Case Temperature)
Storage Temperature	-50°C~+105°C
Thermal Shock	-40°C → +85°C (5 Cycles / 10 hours)
Random Vibration	MIL-STD-202G Table 214-I, Test Condition Letter C 1.5 Hours Per Axis
High Temperature Burn In	Temperature +85°C for 72 Hours
Shock	1. Weight >20g, 50g half sine wave for 11ms, Speed variation 3.44m/s 2. Weight <=20g, 100g Half sine wave for 6ms, Speed variation 3.75m/s 3. Total 18 times (6 directions, 3 repetitions per direction).
Altitude	Standard: 30,000 Ft (Epoxy Sealed Controlled Environment) Optional: Hermetically Sealed (60,000 ft. 1.0 PSI min)
Hermetically Sealed (Optional)	MIL-STD-883 (For Hermetically Sealed Units)

Typical Performance Plots

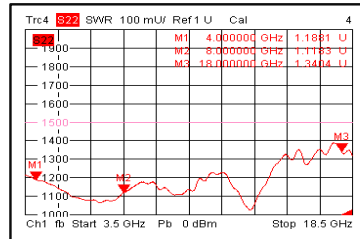
Loss & Amplitude Imbalance



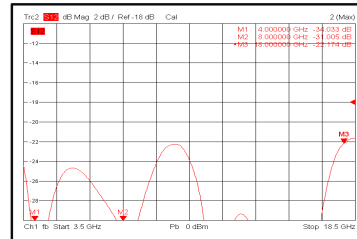
Input VSWR



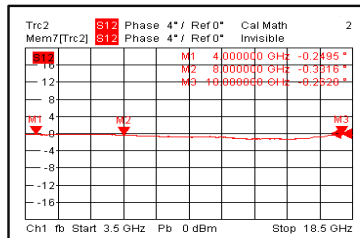
Output VSWR



Isolation



Phase Imbalance



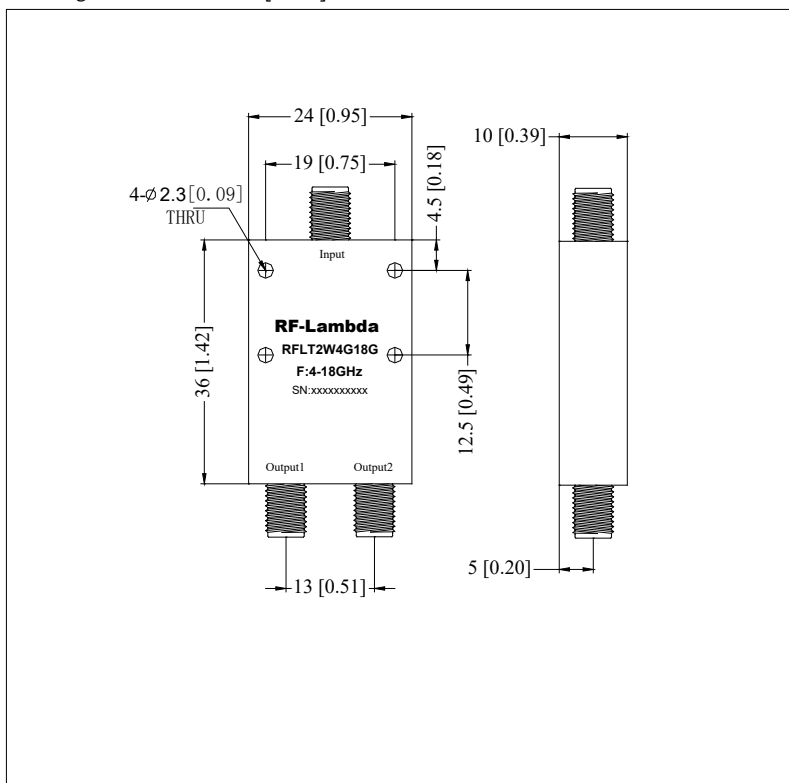
Coaxial 30W 0° 2-Way Power Divider 4~18GHz

Outline Drawing:

All Dimensions in mm [inches]

Outline Tolerances ± 0.5 [0.02]

Mounting Hole Tolerances ± 0.2 [0.008]



Important Notice

The information contained herein is believed to be reliable. RF-Lambda makes no warranties regarding the information contained herein. RF-Lambda assumes no responsibility or liability whatsoever for any of the information contained herein. RF-Lambda assumes no responsibility or liability whatsoever for the use of the information contained herein. The information contained herein is provided "AS IS, WHERE IS" and with all faults, and the entire risk associated with such information is entirely with the user. All information contained herein is subject to change without notice. Customers should obtain and verify the latest relevant information before placing orders for RF-Lambda products. The information contained herein or any use of such information does not grant, explicitly or implicitly, to any party any patent rights, licenses, or any other intellectual property rights, whether with regard to such information itself or anything described by such information. RF-Lambda products are not warranted or authorized for use as critical components in medical, life-saving, or life sustaining applications, or other applications where a failure would reasonably be expected to cause severe personal injury or death.

Rev 2. 01-04-2021

RF-LAMBDA USA www.rflambda.com
Sales: sales@rflambda.com Technical: support@rflambda.com

Coaxial 30W 0° 2-Way Power Divider 4~18GHz

図付録 D.4 使用した divider のカタログ