

ASTE 望遠鏡搭載

345GHz 帯両偏波超伝導受信機の開発

大阪府立大学

修士一年

栗津 友哉

要旨

星は分子雲の内部で生まれると考えられている。したがって、星形成の過程を理解するためには、その材料となる分子雲との関係を理解しなければならない。

分子雲の主成分は水素分子である。ただし、星形成の前段階のような、分子雲が低温の状態 (10K) では、水素分子は電磁波を放射することができない。そこで分子雲の研究には、水素、ヘリウムに次ぐ存在量を持つ一酸化炭素のような、ミリ波・サブミリ波帯で回転遷移による分子輝線の観測がよく用いられる。

私は南米チリ、アタカマ砂漠の標高 4800 メートルの地点に設置されている ASTE(Atacama Submillimeter Telescope Experiment)望遠鏡に搭載する、345GHz 帯の新受信機の開発を行っている。

今まで ASTE で用いられてきた 345GHz 帯用の受信機は天体からくる信号のうち、片偏波成分のみしか受信できないシステムであった。観測対象である分子雲は 10K と低温であるため、分子雲から来る信号は非常に弱い。そのような弱い信号を正しく受けるには、ある程度の時間、望遠鏡をその分子雲の方向に向けて積分時間を稼がなければならない。したがって空の広い領域を観測するには非常に時間がかかることになる。そこで私は片偏波のみしか受信できない ASTE345GHz 帯用の受信機を改良し、両方の偏波を受信できるようなシステムにすることを目指した。

それを実現するために偏波分離器と呼ばれる、天体からの信号を縦偏波と横偏波の二つに分離する装置を取り付けることにした。

ASTE のカートリッジ型受信機は装置を取り付ける範囲が極めて小さい。そこでまず、3D CAD のソフトを用いて各コンポーネントが収まりきるような配置を決定した。そしてその配置を実現し、尚且つ十分冷却されるように、各コンポーネントの固定治具の設計を行った。

また、345GHz 帯の偏波分離器の評価も行った。まず、シミュレーションソフトを用いて、設計された偏波分離機の電波の挿入損失や偏波の漏れこみなどの解析を行った。そして実際に偏波分離機を用いて実験を行い、シミュレーションによって得られた結果との比較を行うことにした。こちらは現在実験を行っている最中である。

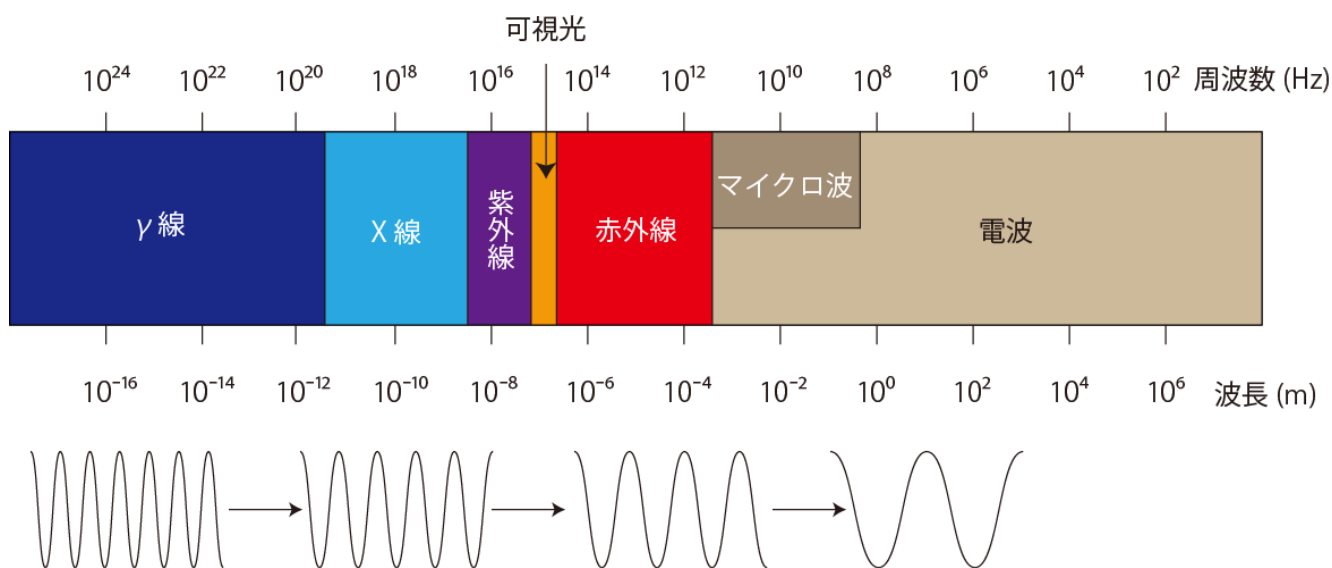
目次

1. イントロダクション	4
1-1 電磁波	4
1-2 一酸化炭素分子の回転遷移スペクトル	4
1-3 望遠鏡	6
1-4 電波望遠鏡の構成	7
1-4-1 光学系	8
1-4-2 受信機	8
1-4-3 分光器	9
1-4-4 計算機・制御系	9
1-5 2SB ミクサー	10
1-6 ASTE 望遠鏡	13
2. ASTE 搭載 345GHz 帯両偏波超伝導受信機的设计	15
2-1 研究背景	15
2-2 偏波分離機	17
2-3 ASTE345GHz 帯両偏波受信機的设计	18
3. 偏波分離器の評価	23
3-1 シミュレーターソフトによる評価	23
3-2 高周波ネットワークを用いた実験による評価	25
4. まとめと今後	32
5. 参考文献	33

1. イントロダクション

1-1 電磁波

電磁波の周波数や波長によって分類したものを図 () に示す。周波数が大きなもの（波長の小さなもの）から順に、 γ 線、X線、紫外線、可視光、赤外線、電波と並んでいる。このうち、人間の可視光領域は波長にして 380nm~750nm であるので、人間が肉眼で見ることのできる電磁波の範囲は極めて狭いということがうかがえる。



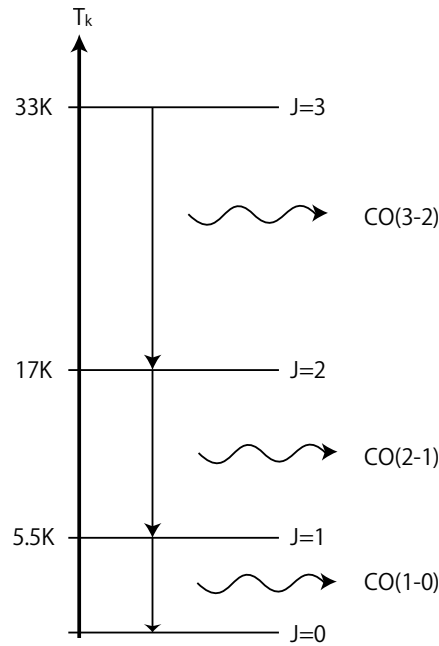
図(1.1) 電磁波の周波数（波長）による分類

1-2 一酸化炭素分子の回転遷移スペクトル

太陽のように自ら輝く星（恒星）は宇宙空間に存在する分子雲の内部で生まれると考えられている。分子雲とは、内部のガスが主に分子の状態である星間雲のことである。

分子雲は一般に低温（約 10K）であるため、可視光や近赤外線の波長領域で電磁波を放射することができない。ただし低温であっても、分子の回転遷移は引き起こされ、ミリ波・サブミリ波帯での放射が行われる。

分子雲の主な成分は水素分子である。しかし、水素分子は永久双極子モーメントを持たないため、10K という低温において電磁波の放射が行われず、その観測は非常に難しくなっている。そこで分子雲の観測には、水素分子やヘリウムに次ぐ存在量を持つ一酸化炭素 (CO)分子輝線観測がよく用いられる。



(図 1.2) CO 分子の回転遷移に対するエネルギーレベル

2原子分子である CO のエネルギー準位 E_J は、回転量子数 J ($J=0,1,2,3,\dots$) を用いて、

$$E_J = hBJ(J+1) \quad (1-1)$$

と表される。式(1)中の h はプランク定数であり、 B は回転定数と呼ばれる定数である。分子がある状態から別の状態に遷移するとき、そのエネルギー差に相当する周波数 f_0 に輝線スペクトルを放射する。この f_0 をその分子の静止周波数という (分子が観測者に対して静止しているときに観測される周波数)。

回転量子数が $J+1$ から J へ変わる場合、そのエネルギー差 ΔE は式(1)から

$$\Delta E = 2hB(J+1) \quad (1-2)$$

となるので、 f_0 は

$$f_0 = \frac{\Delta E}{h} = 2B(J+1) \quad (1-3)$$

となる。

式(3)から CO の各準位からの遷移に対する周波数を求めてまとめたものを表(1.1)に示す。

表(1.1) CO の各遷移に対する周波数の値

遷移	名称	周波数(GHz)
$J = 1 \rightarrow 0$	CO(1-0)	115.271204
$J = 2 \rightarrow 1$	CO(2-1)	230.538001
$J = 3 \rightarrow 2$	CO(3-2)	345.795989

1-3 望遠鏡

望遠鏡にはいくつか種類がある。よく目にするような図(1.3)のような筒上の望遠鏡は光学望遠鏡と呼ばれる。これは可視光領域で天体を観測するための望遠鏡である。

先程も述べたように、可視光の波長領域は電磁波の全周波数領域のほんのわずかな部分を表しているにすぎない。つまり可視光領域に感度を持つ光学望遠鏡を用いるだけでは宇宙からやってくる電磁波の一部分しか捉えることができないのである。



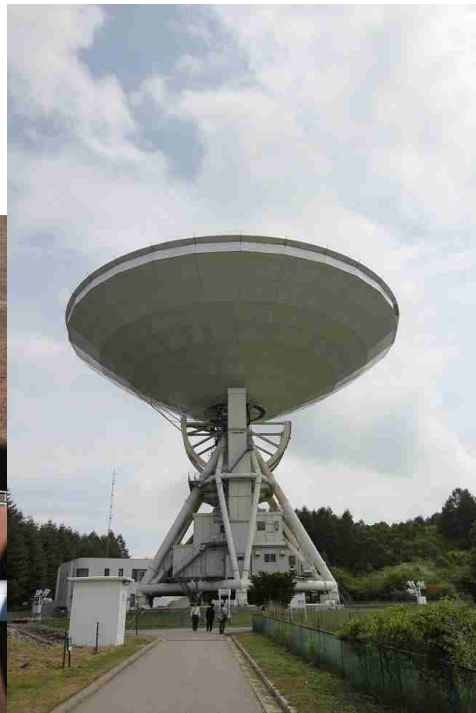
図(1.3)光学望遠鏡

天体から放射されるさまざまな周波数の電磁波を観測するために、X線・ γ 線望遠鏡や赤外線望遠鏡、電波望遠鏡など、周波数に応じた望遠鏡が存在する。

図(1.4)はハワイ島マウナケア山頂にある、すばる望遠鏡である。このすばる望遠鏡は可視光領域での観測はもちろんのこと、赤外線領域での観測も行える。また図(1.5)は国立天文台野辺山に設置されている45m電波望遠鏡である。この望遠鏡はその名の通り電波領域に感度を持つ望遠鏡である。



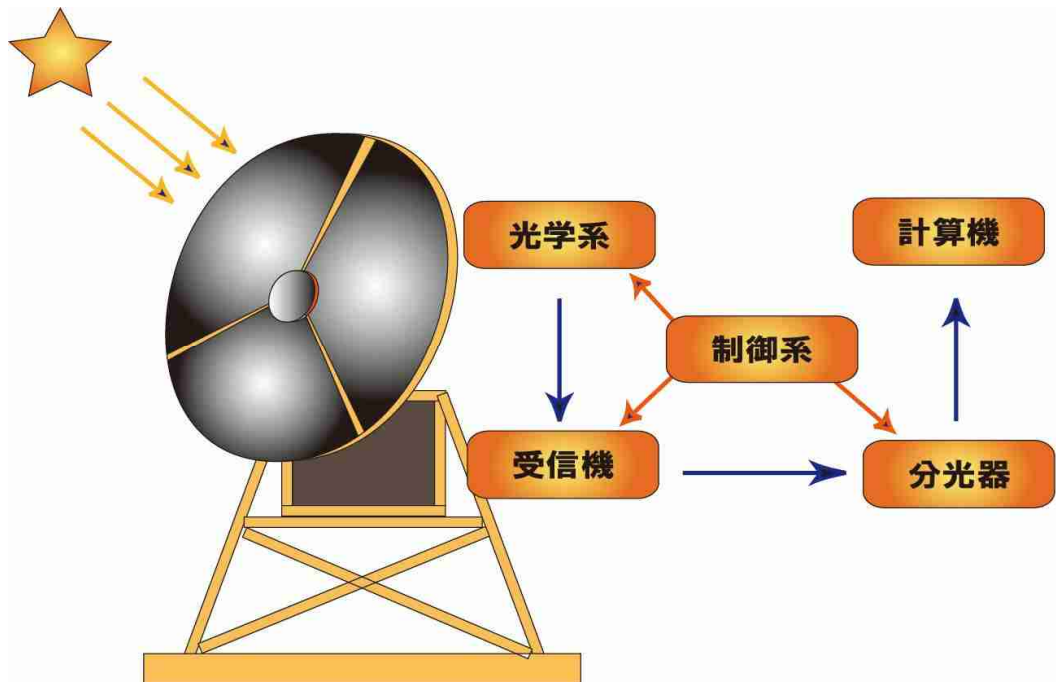
図(1.4) すばる望遠鏡 (国立天文台提供)



図(1.5) 45m 電波望遠鏡

1-4 電波望遠鏡の構成

先程述べたいくつかの望遠鏡のうち、我々の研究室が主に研究・開発を行っているものは電波望遠鏡である。電波望遠鏡の構成を図(1.6)に示す。

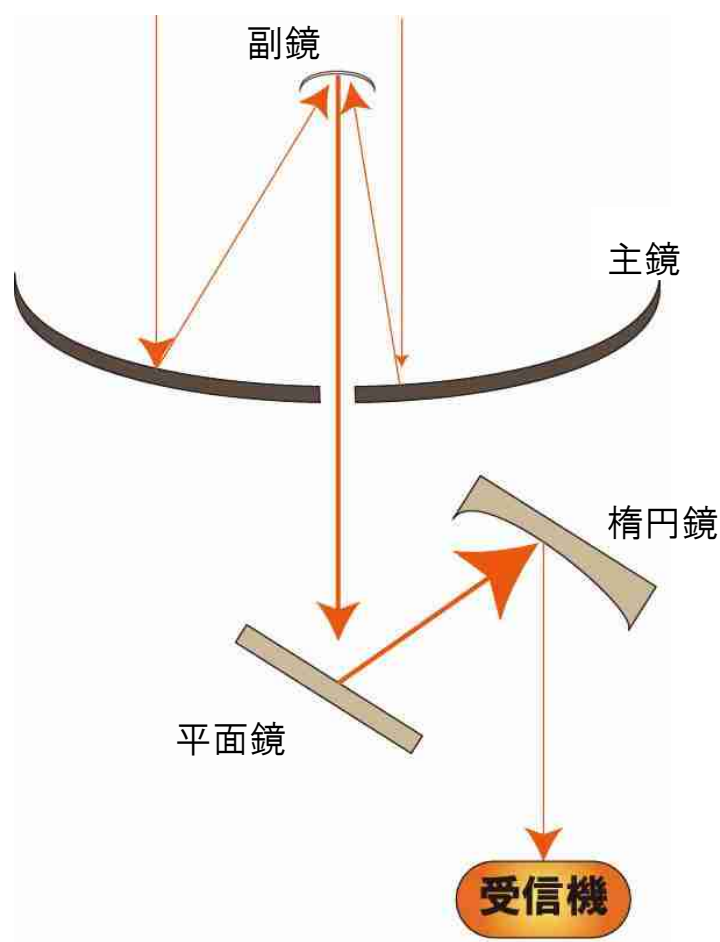


V 図(1.6) 電波望遠鏡の構成

図(1.6)に示したそれぞれの構成要素について以下に説明する。

1-4-1 光学系

天体からやってくる電波は微弱である。したがってパラボラアンテナを用いて集めることにより、初めて観測することができる。図(1.7)のように天体からの電波はパラボラアンテナの主鏡部分で反射され、次に副鏡で反射され、パラボラアンテナ部を抜ける。その後は、受信機の配置によって、幾枚かの楕円鏡や平面鏡に反射され、受信機へと導かれる。天体からの電波が受信機に導かれるまでの経路のことを光学系と呼ぶ。



図(1.7) 光学系の構成

1-4-2 受信機

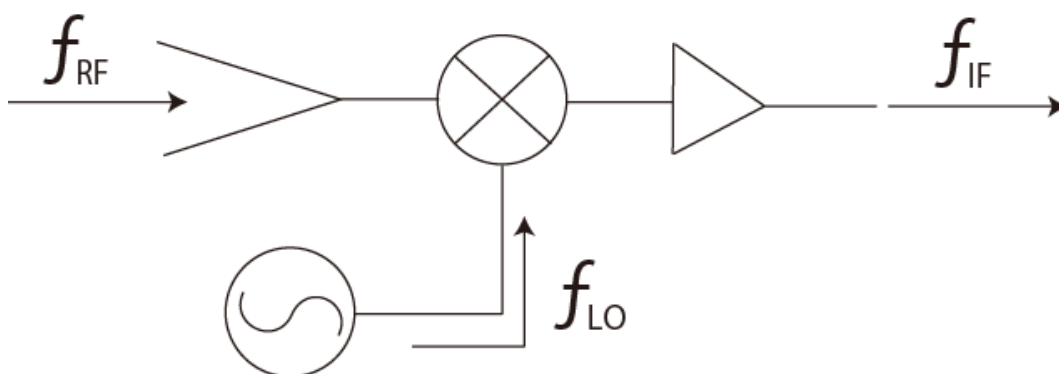
電波望遠鏡のアンテナで集められた天体からの信号は、マイクロ波伝送路を通して受信機へと導かれる。そして受信機の中で増幅や周波数変換、検波といった作用を受ける。天体からの信号は非常に弱いため、受信機は低雑音でなければならない。

電波領域での分光観測に多く用いられているものに、ヘテロダイン受信方式がある。これは、図(1.8)のように、観測する対象からやってくる電波の周波数 f_{RF} (RF は radio frequency の略) とその周波数に非常に近い周波数 f_{LO} (LO は local oscillator の略) とを混ぜ合わせて、その差周波 f_{IF} (IF は intermediate frequency の略) を取り出し、取り出したその信号を増幅、そして検波をするという方式である。

これらの周波数の関係を式で表すと次のようになる。

$$f_{RF} = f_{LO} \pm f_{IF} \quad (1-4)$$

この式から受信機は f_{LO} に対して f_{IF} となる二つの周波数帯(サイドバンド)において感度があることが分かる。 $f_{LO} + f_{IF}$ であるものをアップーサイドバンド(USB)、 $f_{LO} - f_{IF}$ であるものをローワーサイドバンド(LSB)と呼ぶ。



図(1.8) ヘテロダイン受信方式の仕組み

1-4-3 分光器

天体からのスペクトルを得るためには、電磁波を周波数によって細かく分割し、各周波数ごとの強度を測定する必要がある。この作業を行うのが分光器である。分光器にはいくつか種類がある。例えば前にも述べた 45m 電波望遠鏡ではピエゾ効果を利用した音響光学型分光器や、広帯域・高周波数分解能な観測に対応したデジタル分光器が用いられている。

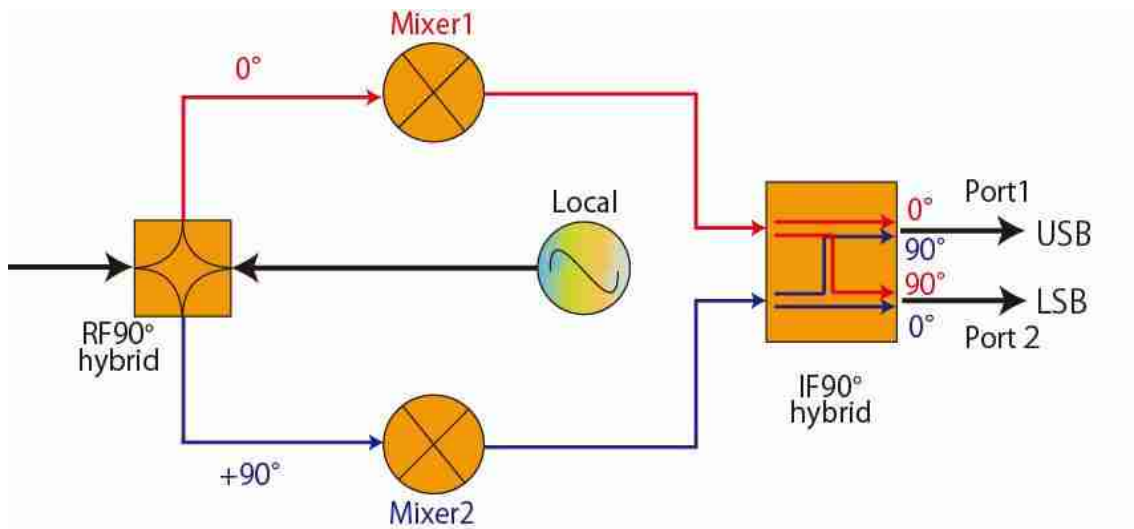
1-4-4 計算機・制御系

計算機は、分光器から出力された周波数ごとに選別された電波の強度に関するデータの取得・処理を行う。また電波望遠鏡の駆動や装置の制御も行う。

1-5 2SB ミクサー

2SB ミクサーとは、Double Sideband Separating Mixer の略である。2SB システムを用いることで、天体の信号(RF : Radio Frequency)を 2 系統に分離し、導波管の内部で両者の位相を操作した後、USB と LSB の情報を別々に取り出すことができる。

USB と LSB の信号を別々に取り出す原理について説明する。図(1.9)に 2SB システムのブロックダイアグラムを示す。



図(1.9) 2SB システムのブロックダイアグラム

USB 側と LSB 側のそれぞれの RF 信号が次のように表されるとする。

$$\text{USB : } \cos(\omega_U t + \phi_U) \quad (1-5)$$

$$\text{LSB : } \cos(\omega_L t + \phi_L) \quad (1-6)$$

次にこれらの信号を RF90° ハイブリッドというデバイスに入力する。RF90° ハイブリッドは、USB、LSB の信号をそれぞれ等しく 1/2 ずつ 2 系統に分配し、さらに片方の系統に出力された信号は位相が変化せず、もう片方の系統に出力された信号は位相が 90° 遅れるという性質を持つ。このようにして分配された信号はそれぞれ別の Mixer に導かれる。位相が変化しなかった方の信号が Mixer1 に導かれ、位相が 90° 遅れた方の信号は Mixer2 に導かれるとする。すると、それぞれの信号は次のようになる。

$$\text{Mixer1 に向かう USB : } \cos(\omega_U t + \phi_U) \quad (1-7)$$

$$\text{Mixer1 に向かう LSB: } \cos(\omega_L t + \phi_L) \quad (1-8)$$

$$\text{Mixer2 に向かう USB: } \cos(\omega_U t + \phi_U - 90^\circ) \quad (1-9)$$

$$\text{Mixer2 に向かう LSB: } \cos(\omega_L t + \phi_L - 90^\circ) \quad (1-10)$$

Mixer に導かれた RF 信号は、LO 信号と Mixing されることで差周波の信号が出力される。LO 信号は以下のような式で表されるとする。

$$\text{LO: } \cos(\omega_{LO} t + \phi_{LO}) \quad (1-11)$$

ただし以降の計算では $\phi_{LO} = 0$ として差し支えない。

式(1-7)から式(1-10)までの各 RF 信号が、式(1-11)の LO 信号と Mixing すると、出力はそれぞれ以下ようになる。

$$\text{Mixer1 からの USB の出力: } \cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U] \quad (1-12)$$

$$\text{Mixer1 からの LSB の出力: } \cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L] \quad (1-13)$$

$$\text{Mixer2 からの USB の出力: } \cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U - 90^\circ] \quad (1-14)$$

$$\text{Mixer2 からの LSB の出力: } \cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L + 90^\circ] \quad (1-15)$$

USB 側の出力は $\omega_U - \omega_{LO}$ だが、LSB 側は $\omega_{LO} - \omega_L$ である。したがって、LSB 側では位相の定数項の符号が反転することに注意しなければならない。

このようにして出力された 4 種類の信号を、さらに IF90° ハイブリッドというデバイスに導入する。このデバイスは RF90° ハイブリッドと同じ働きをするが、入力・出力共に 2 系統存在する。つまり、Mixer1 と Mixer2 両方からの信号入力に対し、位相の変化を受けず振幅が 1/2 で出力される系統と、90° の位相の遅れをもって振幅が 1/2 で出力される 2 つの系統が存在する。

ここで Mixer1 からの信号が IF90° ハイブリッドによる位相変化を受けない側の出力を Port1、Mixer2 からの信号が位相変化を受けない側の出力を Port2 とする。すると、Port1、Port2 からのそれぞれの出力は次のようになる。

$$\text{Mixer1} \rightarrow \text{Port1 の USB 出力 : } \cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U] \quad (1-16)$$

$$\text{Mixer1} \rightarrow \text{Port2 の USB 出力 : } \cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U + 90^\circ] \quad (1-17)$$

$$\text{Mixer1} \rightarrow \text{Port1 の LSB 出力 : } \cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L] \quad (1-18)$$

$$\text{Mixer1} \rightarrow \text{Port2 の LSB 出力 : } \cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L + 90^\circ]$$

$$\begin{aligned} \text{Mixer2} \rightarrow \text{Port1 の USB 出力 : } & \cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U - 90^\circ + 90^\circ] \\ & = \cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U] \end{aligned} \quad (1-19)$$

$$\text{Mixer2} \rightarrow \text{Port2 の USB 出力 : } \cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U - 90^\circ] \quad (1-20)$$

$$\begin{aligned} \text{Mixer2} \rightarrow \text{Port1 の LSB 出力 : } & \cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L + 90^\circ + 90^\circ] \\ & = \cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L + 180^\circ] \end{aligned} \quad (1-21)$$

$$\text{Mixer2} \rightarrow \text{Port2 の LSB 出力 : } \cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L + 90^\circ] \quad (1-22)$$

これらをまとめると

- Port1 の USB 出力 : $\cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U] + \cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U]$
 $= 2\cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U]$
- Port1 の LSB 出力 : $\cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L] + \cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L + 180^\circ]$
 $= 0$
- Port2 の USB 出力 : $\cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U + 90^\circ] + \cos[(\omega_U - \omega_{LO})t + \phi_U - 90^\circ]$
 $= 0$
- Port2 の LSB 出力 : $\cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L + 90^\circ] + \cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L + 90^\circ]$
 $= 2\cos[(\omega_{LO} - \omega_L)t - \phi_L + 90^\circ]$

したがって、Port1 からは USB の信号のみが出力され、Port2 からは LSB の信号のみが出力されるということになる。このようにして、2SB 受信が実現されるのである。

1-6 ASTE 望遠鏡

ASTE とは Atacama Submillimeter Telescope Experiment の略である。これは、南米チリの北部、アタカマ砂漠の標高 4800m の高地に設置されている、サブミリ波望遠鏡である。ASTE が設置されている場所は、大気の透過率が極めて良好な世界屈指のサブミリ波観測サイトであることが知られている。2002 年に設置され、2004 年に本格的に観測が開始された。

鏡面は 205 枚の鏡面パネルを調整することで、アンテナ全体で誤差が $20\mu\text{m}$ 以下という高い精度を達成している。

現在 ASTE 望遠鏡の分光観測では 345GHz 帯、492GHz 帯、THz 帯、VLBI 観測用の 230GHz 帯の 4 つの受信機が用いられている。これらの受信機は図(1.10)のようなカートリッジ型が採用されているので、受信機の入れ替えが容易である。

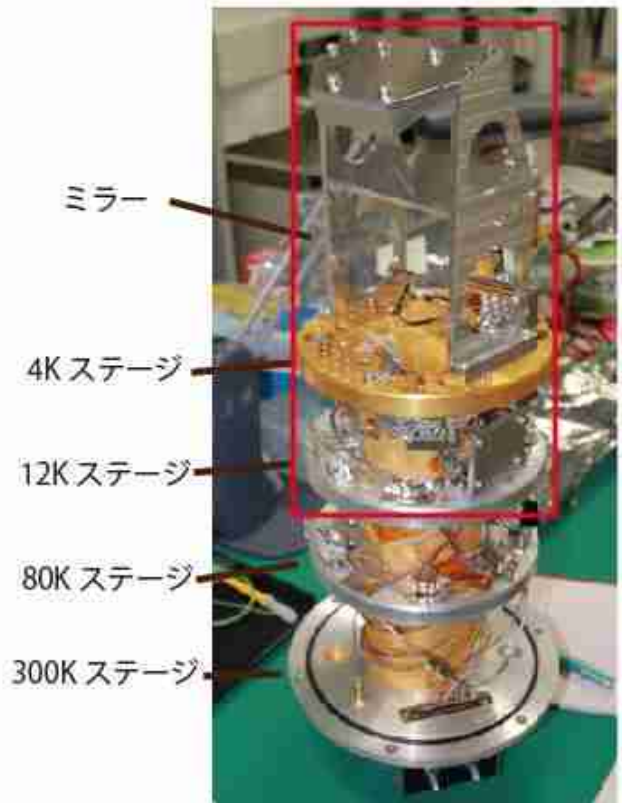
また、遠隔操作によって観測を行うことが可能で、東京都にある国立天文台三鷹や長野県の野辺山宇宙電波観測所、チリのサン・ペドロから指示を送ることができる。

表(1-1) ASTE の基本情報

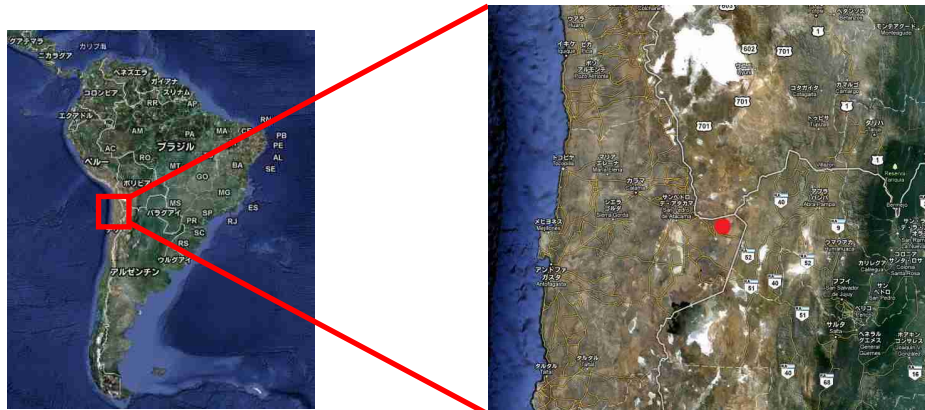
主鏡サイズ	10m
ビームサイズ	21" @345GHz
観測	分光観測・連続波観測
指向精度	1.5" 以内



図(1.9) ASTE 望遠鏡



図(1.10) ASTE 搭載用受信機



図(1.11) ASTE サイト

2. ASTE 搭載 345GHz 帯両偏波超伝導受信機の設計

2-1 研究背景

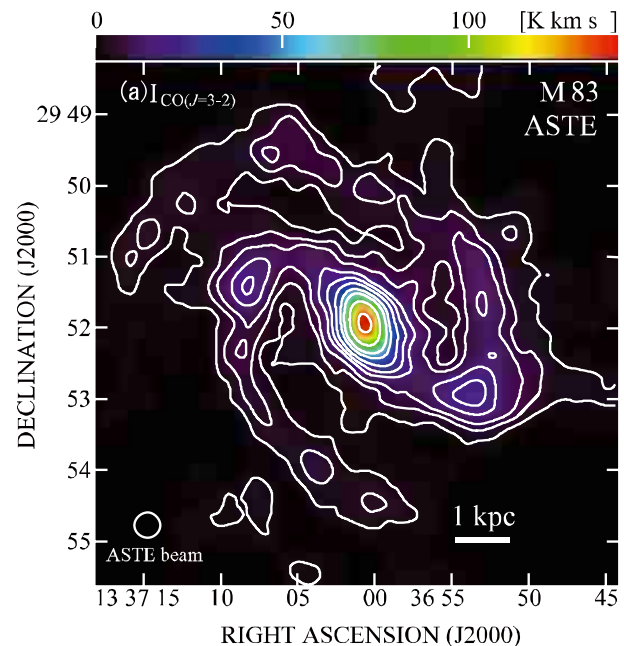
2-1-1 観測効率の高い受信機の必要性

我々が観測対象としているのは分子雲である。分子雲は絶対温度で 10K と、非常に低温である。そのような低温な物質からの信号を受信するためには、一定の時間その観測対象に望遠鏡を向け続ける必要がある。

図(2.1)の左の図は系外銀河である M83 を可視光で観測したものである。図(2.1)の右の図は同じ銀河を CO(3-2)で観測を行い、マッピングしたものである。この CO(3-2)の観測には、現在 ASTE で用いられている 345GHz 帯の受信機が使われた。図中にも描かれている通り、ASTE のビームサイズは約 22" であるのに対し、マップの範囲は 35'×35' と非常に広域である。このマップを描くために観測に要した時間は 42 時間である。



(欧州南天文台提供)



(Muraoka et al.2009)

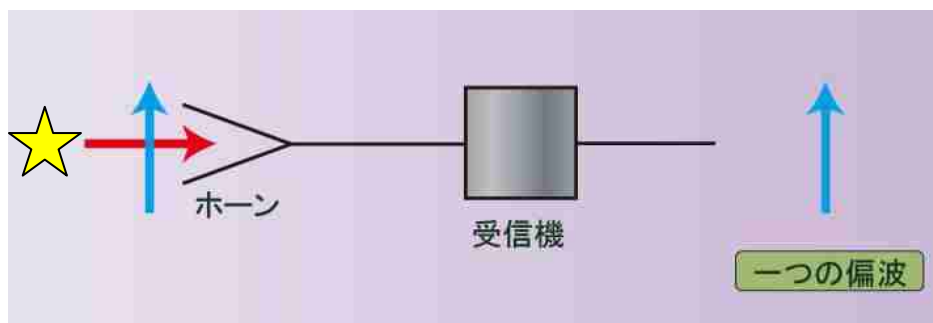
図(2.1) 系外銀河 M83

(左：可視光観測によるもの・右：CO(3-2)によってマッピングしたもの)

このように、電波による観測は、非常に時間がかかることがわかる。したがって、観測時間を少しでも短縮するためには観測効率の良い受信機を作ることが非常に重要となってくる

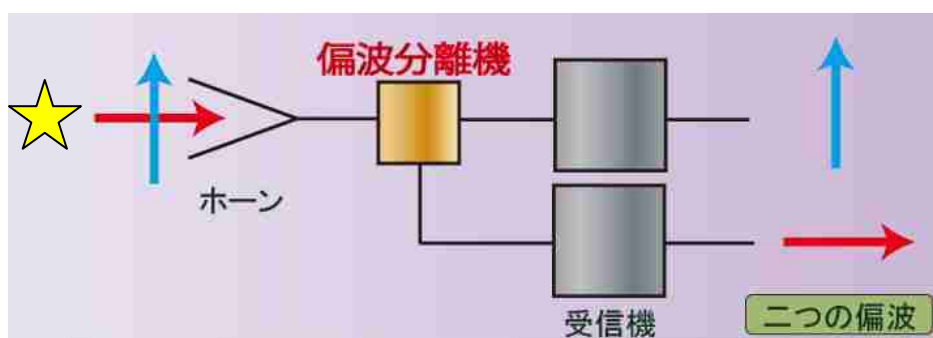
2-1-2 ASTE の受信機システム

現在の ASTE345GHz 帯用の受信機の構成を図(2.2)に示す。現在の受信機では天体からの信号のうち、片偏波成分のみしか受信しか出来ない。これはホーン直後の導波管の形状によって、他の成分が除去されているからである。



図(2.2) 現在の ASTE345GHz 帯用受信機のシステム

そこで今回、ホーン直後に偏波分離器を取り付けることで、両偏波取り出すことができるようなシステムを 345GHz 帯受信機に導入することにした。偏波分離機を取り付けた場合の受信機の構成を図(2.3)に示す。



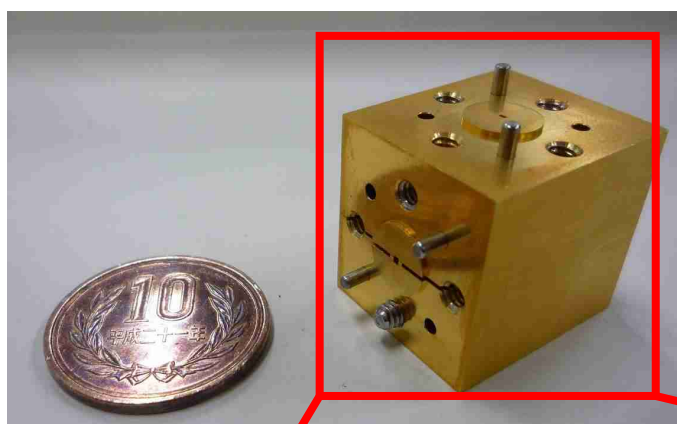
図(2.3) 偏波分離機を取り付けた場合の受信機のシステム

これが実現すれば、観測効率は 2 倍となる。

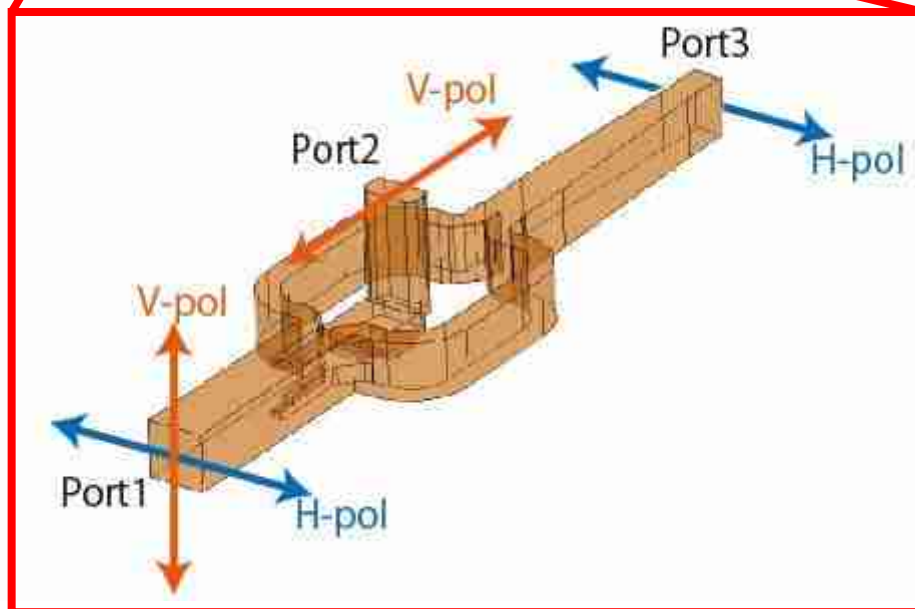
2-2 偏波分離機

偏波分離機は直交偏波を二つに分けるための装置である。図(2.4)が今回取り付けることとした 345GHz 帯用の偏波分離機である。この内部構造を表したものが図(2.5)である。また、それぞれの Port の導波管サイズを表(2-1)に示す。

図(2.5)の Port1 から信号が入力されると、垂直偏波(V-pol)は内部の階段構造を通過した後、上部の Port2 から出てくる。また、水平偏波(H-pol)は、内部の $B \phi$ iot junction と呼ばれる構造により、二つのアーム部に均等に分けられた後、アームの合流地点で再度結合し、Port3 から出てくる。以上のような原理で両偏波を別々に取り出すことが可能になる。



図(2.4) 345GHz 帯偏波分離器



図(2.5) 偏波分離器の内部構造

表(2-1) 345GHz 帯偏波分離器の各 Port の導波管サイズ

Port1	0.736mm × 0.736mm
Port2	0.736mm × 0.368mm
Port3	0.736mm × 0.369mm

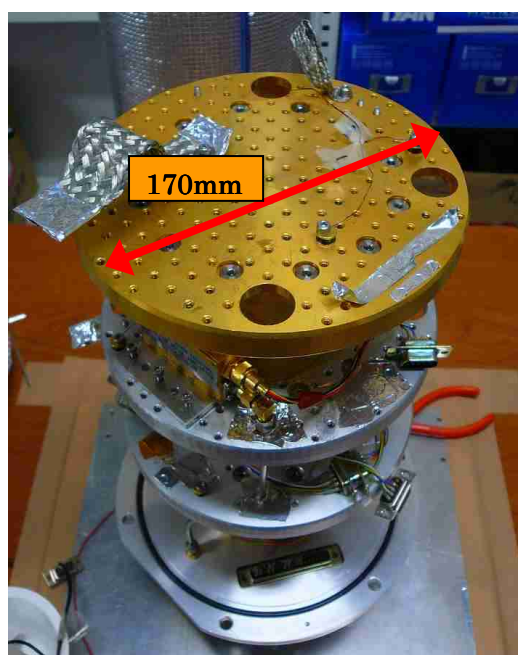
2-3 ASTE345GHz 帯両偏波受信機の設計

2-3-1 設計方針

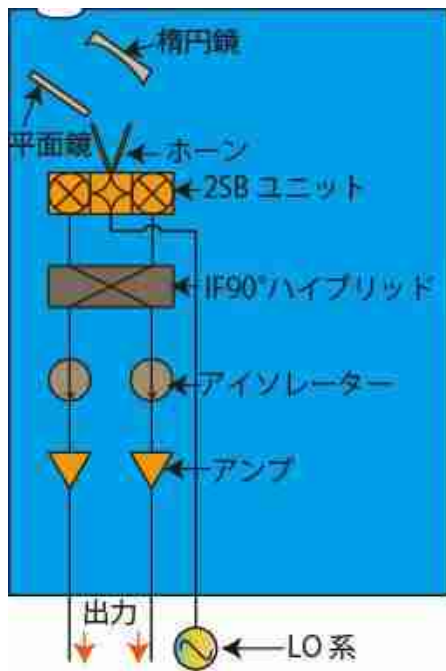
ASTE345GHz 帯受信機を新たに設計する際に、注意すべき点は以下の二つであった。

- (1) ASTE に搭載されている冷却デューワーは内部のスペースが狭い。そのため、受信機上でのコンポーネントの設置スペースも極めて狭くなる。各コンポーネントを設置する、4K ステージは図(2.6)に示すように直径 170mm である。
- (2) 今まで ASTE で用いられていた 345GHz 帯受信機のブロックダイアグラムを図(2.7)に示し、新たに偏波分離器を取り付けた受信機のブロックダイアグラムを図(2.7)に示す。
図(2.8)を見ると分かるように、偏波分離器を取り付けることで、受信機に設置しなければならないコンポーネントの数が二倍に増える (図(2.7)の赤線で囲った部分)。

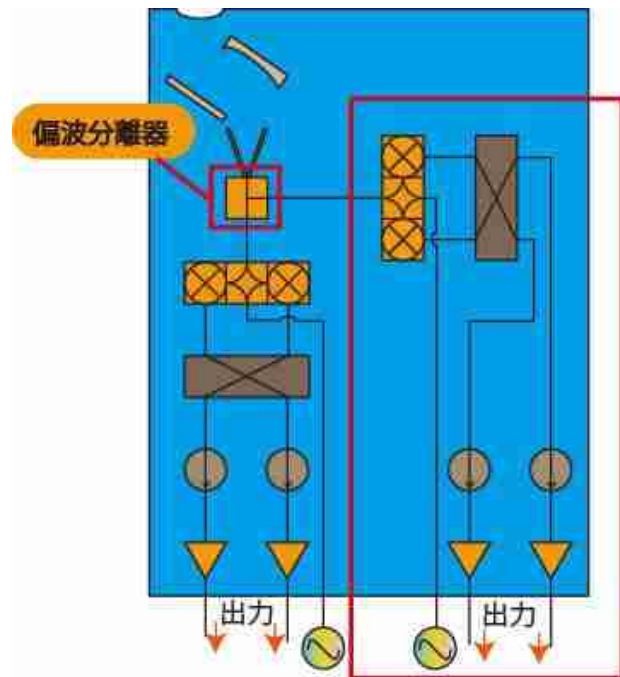
これらの点を踏まえ、Autodesk Inventor という 3D CAD のソフトを用いて新受信機の設計を行った。



図(2.6) ASTE の受信機の 4K ステージ



図(2.7) 今までの受信機の構造

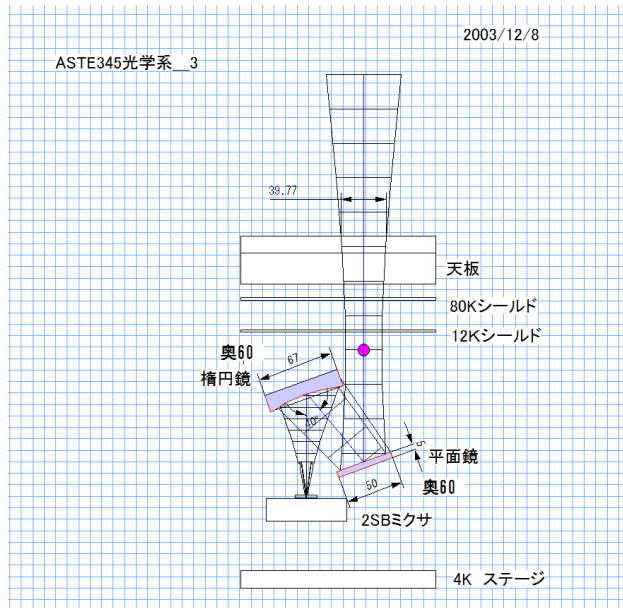


図(2.8) 新たな受信機の構造

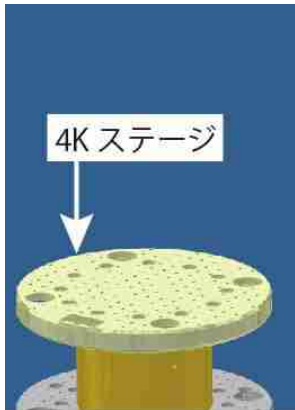
2-3-2 コンポーネントの配置の決定と固定治具の設計

3DCAD のソフトによるコンポーネントの配置の決定までの流れは以下の通りである。

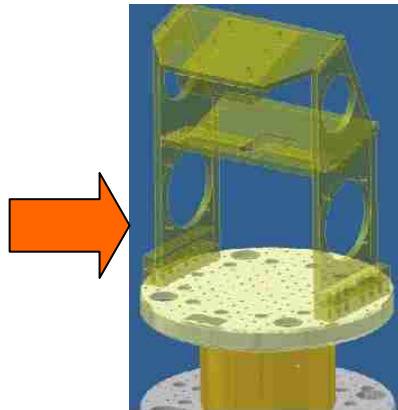
- ① まず始めに、受信機の形を 3DCAD のソフト上で再現した。そして 4K ステージ上に平面鏡・楕円鏡・ホーンの三つのコンポーネントを図(2.10)に示すような光学系の設計図面に基づいて配置を行った。この三つのコンポーネントは光学系の設計通りに配置しなければ、信号を正しく導くことができない。
- ② ホーンから偏波分離器、そして 2SB ユニットにかけては信号の損失をできるだけ減らすために、全て直接繋ぐ形にした。
- ③ 2SB ユニットの二つのミキサから IF90° ハイブリッドに至る二つの経路は、2SB 受信機の原理から、同じ長さにしなくてはならない。そのためそれを実現できるような配置にした。
- ④ その後、その他のコンポーネントが限られたスペースに収まりきるように配置を決定した。
- ⑤ 全てのコンポーネントの配置が決定した後、その配置を実現できるような、各コンポーネントの固定治具の設計を行った。固定治具は各コンポーネントを固定する役割の他に、4K ステージと接地することでそれらを効率よく冷却する役割も兼ね備えてなければならない。したがって熱伝導性が良い素材を選ぶ必要がある。今回は材料無酸素銅を採用した。



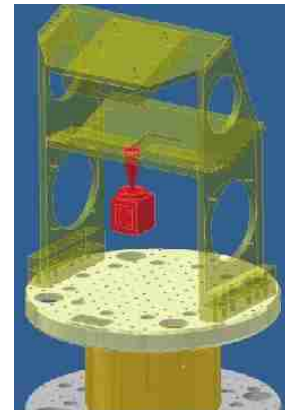
図(2.10) 光学系の設計図



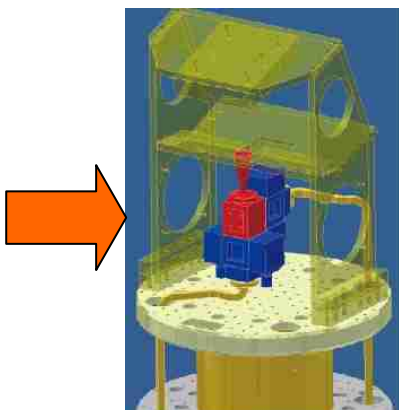
受信機の再現



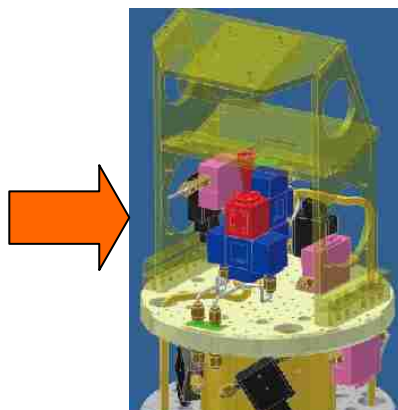
光学系の設置



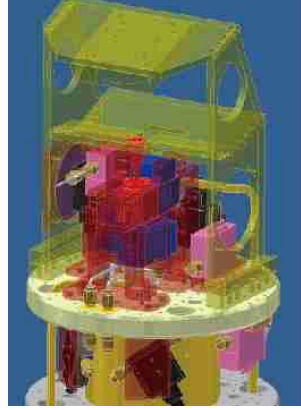
ホーン・偏波分離器の設置



2SBユニット・導波管の設置



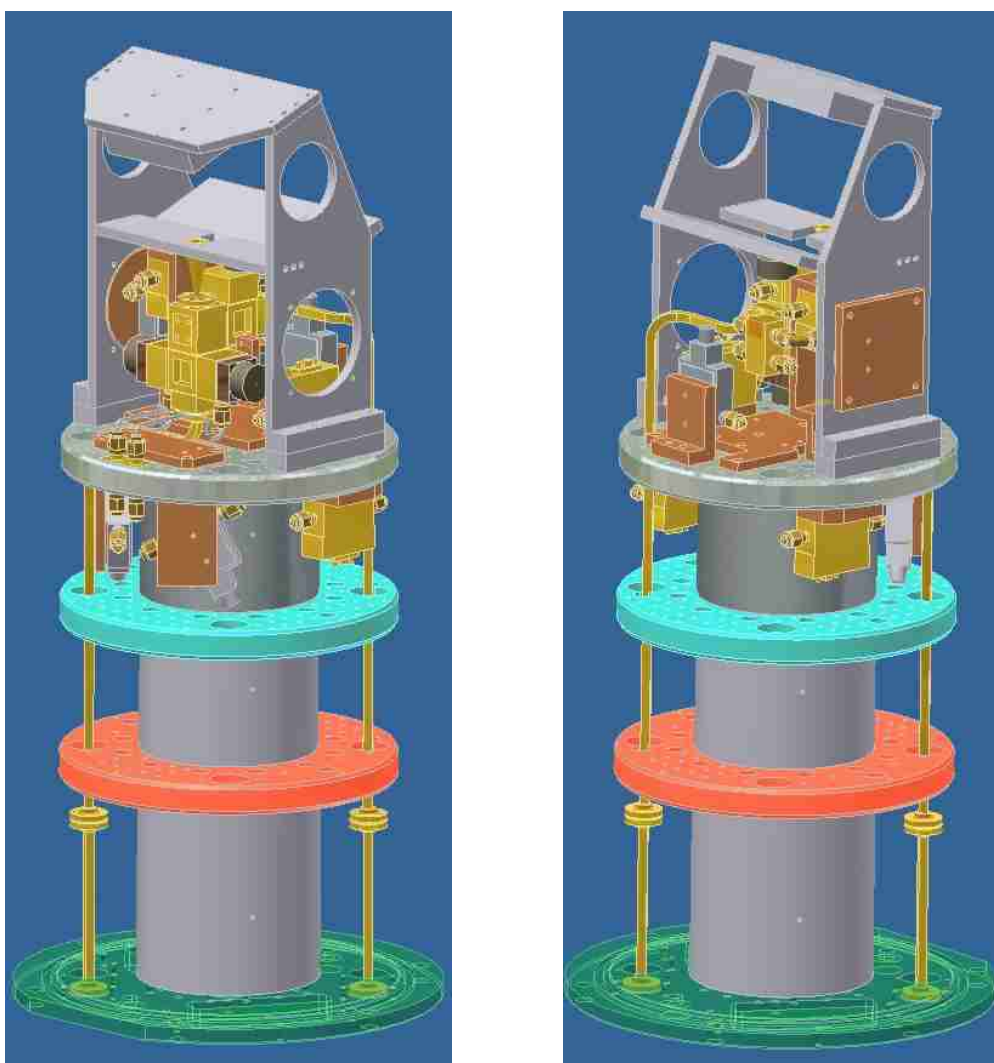
その他コンポーネントの設置



固定治具の設計

図(2.11) 設計の流れ

3DCAD のソフトによって設計した受信機の全体図を図(2.12)に示す。



図(2.12) 設計した受信機の全体図

2-3-3 固定治具の図面の作成

固定治具の設計が終わった後、それらの図面の作成を行った。作成した図面の詳細は末尾の付録に示す。

2-3-4 組み立て

設計を行った固定治具の製作を町工場に依頼し作っていただいた。固定治具を取り付けた実際の受信機を図(2.13)に示す。



図(2.13) 設計を行った固定治具を取り付けた受信機

3. 偏波分離器の評価

偏波分離器の評価は次の二つを行うことにした。

- ① 高周波三次元電磁界シミュレーターHFSS による評価
- ② 高周波ネットワークを用いた実験による評価

また、偏波分離器の評価項目としては以下の二点が挙げられる。

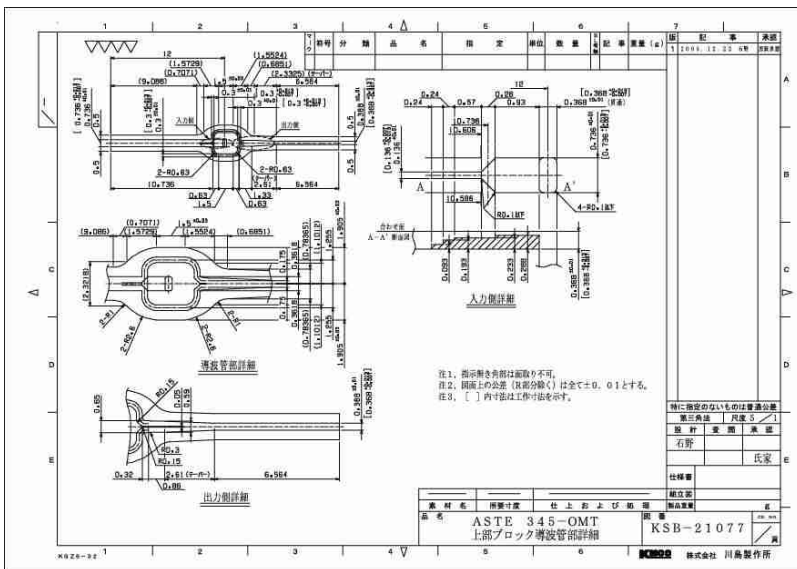
- ・挿入損失 : 図(2.5)の Port1 から入力された信号が Port2・Port3 から出力される際にどれだけの量の損失があるかを示す。
 - ・偏波分離特性 : Port1 から入力された信号が、本来出力されるべき Port とは逆の Port へと出力される量を示す
- 各評価について次から述べる。

3-1 シミュレーターソフトによる評価

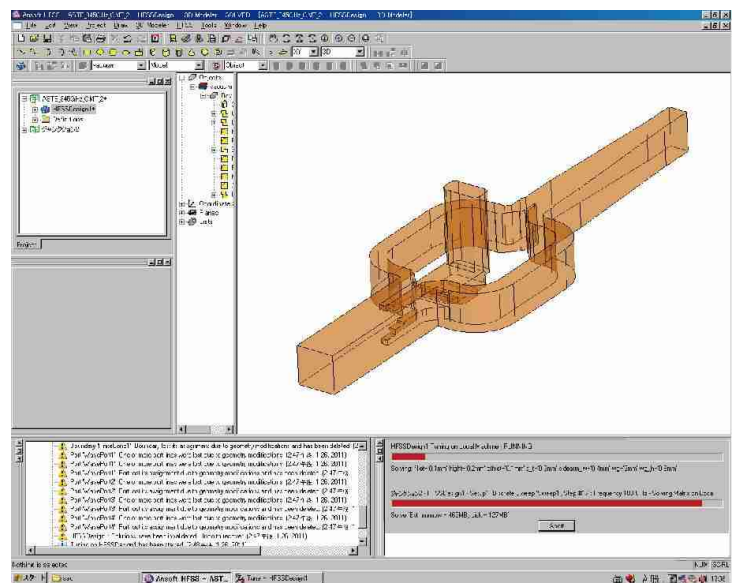
3-1-1 偏波分離器の内部構造モデルの作成

今回取り付けることにした偏波分離器は図(2.4)に示したが、この偏波分離器は 2007 年度に開発されたものである。この偏波分離器を開発の際に行われたシミュレーションに関する資料が無かったため、今回再度シミュレーションを行うことにした。シミュレーションには高周波三次元電磁界シミュレーターのソフトである HFSS を用いた。

図(3.1)に示すような、偏波分離器の設計図面を元にシミュレーターソフト上で図(3.2)のような、偏波分離器の内部構造モデル(ワイヤースケルトンモデル)を作成した。



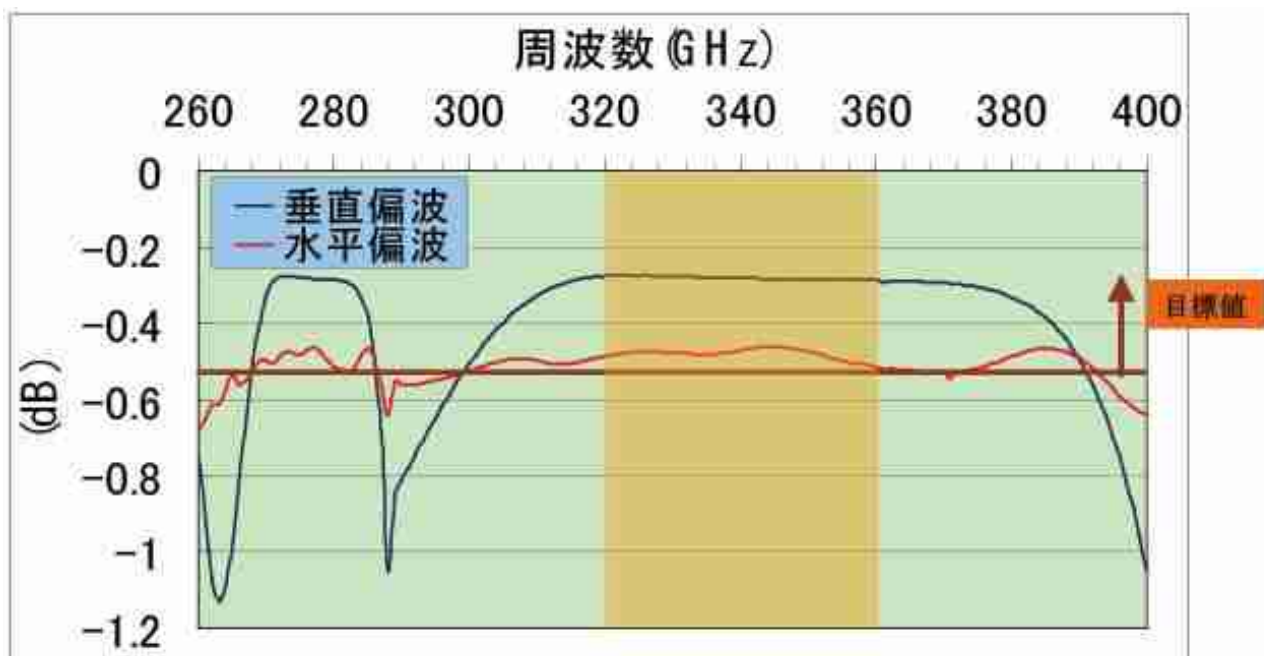
図(3.1) 偏波分離器の設計図面



図(3.2) 偏波分離器のワイヤースケルトンモデル

3-1-2 シミュレーション結果

シミュレーションによって得られた挿入損失の結果と偏波分離特性の結果を、それぞれ図(3.3)・図(3.4)に示す。実際に観測で用いる周波数は320~360GHzである。



図(3.3) 挿入損失



図(3.4) 偏波分離特性

3-1-2 考察

シミュレーションでの挿入損失と偏波分離特性の目標値を表(3.1)に示す。
この目標値を図(3.3)・図(3.4)に褐色の線で表した。

表(3.1) シミュレーションでの目標値

挿入損失	-0.5dB~0dB
偏波分離特性	-30dB 以下

図(3.3)・図(3.4)を見ると、観測に必要な帯域(320~360GHz)で挿入損失は 0.28dB 程度となっており、損失は少ないことが分かる。また偏波分離特性についても約-63dB となっており、逆 Port への漏れこみは非常に少ない設計となっていることが分かる。ただし、挿入損失に関しては水平偏波が垂直偏波に比べて損失割合が高いことが分かる。これは、偏波分離器内を電波が通る際、垂直偏波の通る経路に比べて水平偏波の通る経路が長いことが原因である。

以上のことから、今回用いる 345GHz 帯の偏波分離器は十分な性能が出る設計であるということが確認できた。

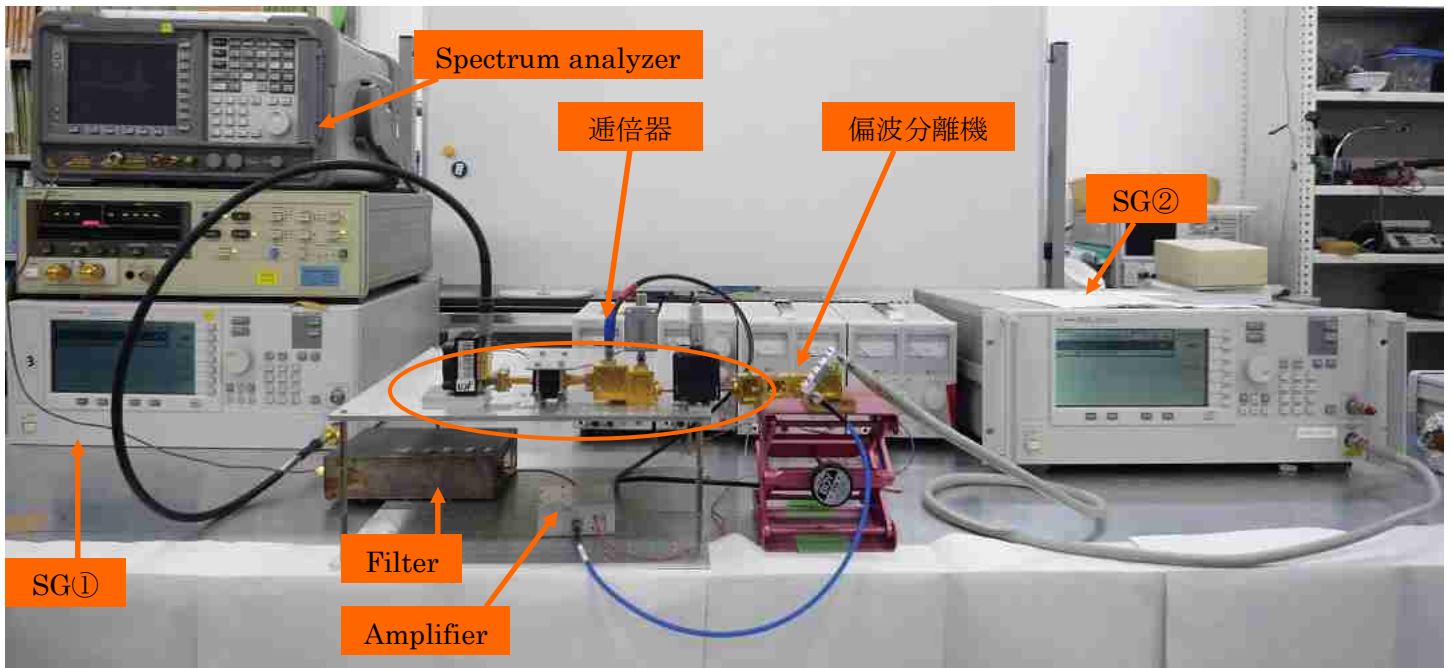
3-2 高周波ネットワークを用いた実験による評価

3-2-1 高周波ネットワークの構築

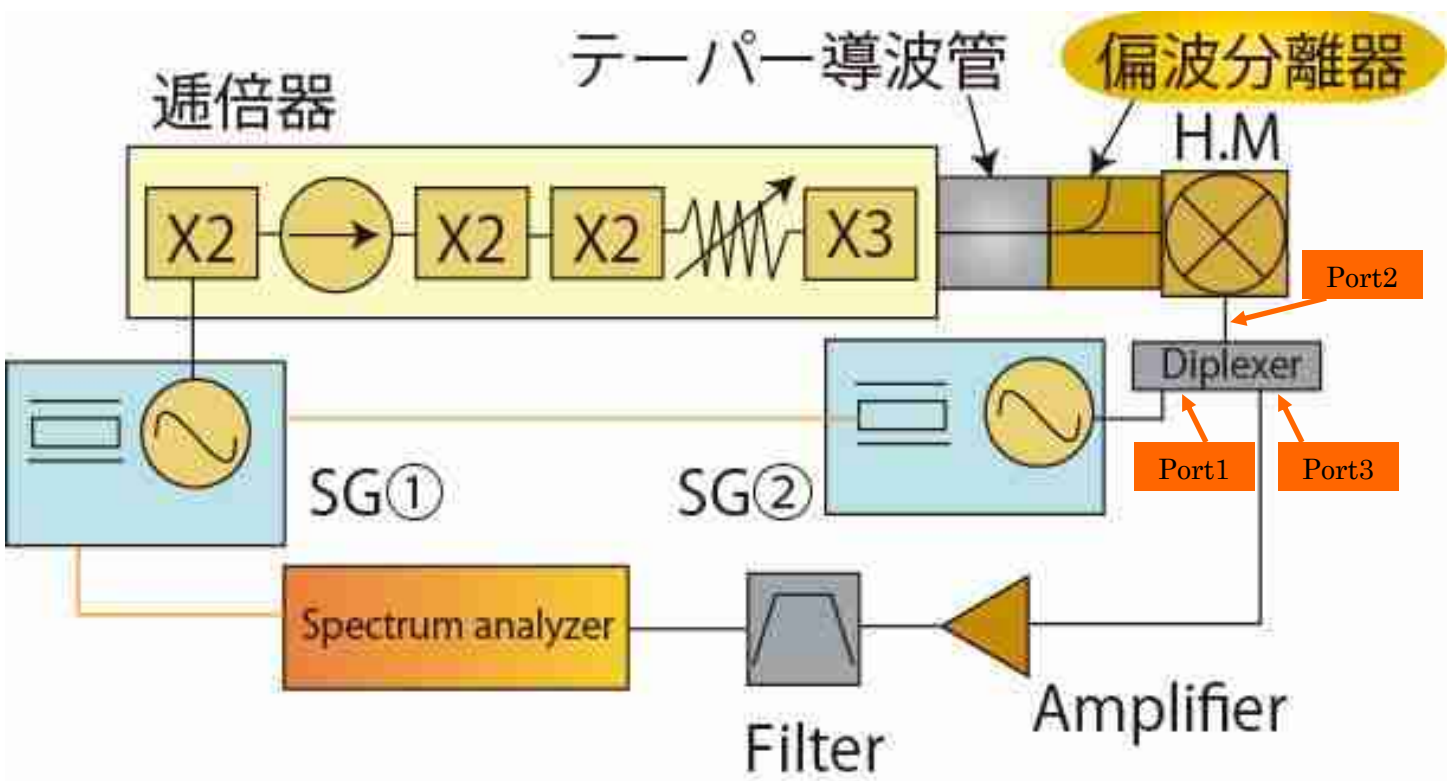
実際に偏波分離器を用いて挿入損失と偏波分離特性の測定を行うことにした。345GHz 帯の信号を発振させるために ASTE に使われている LO 系 (図(3.5)) を用い、評価系の構築を行った。図(3.6)に構築した評価系の実際写真を示し、図(3.7)に評価系をブロックダイアグラムにしたものを示す。



図(3.5) ASTE で用いられている LO 系



図(3.6) 構築した評価系



図(3.7) 評価系のブロックダイアグラム

評価系について説明する。

- (1) SG①(SG : Signal Generator)からの信号が逡倍器に入力されると、逡倍器により周波数が 24 逡倍されて出力される。この信号がテーパ導波管を通った後、偏波分離機に入力される。その後偏波分離機を通過した信号は Hermonix Mixer(図(3.7)中の H.M)に入力される。
- (2) SG②からの信号は Diplexer の Port1 から入力され Port2 から出力された後、Hermonix Mixer に入力される。SG②からの信号は Hermonix Mixer 内で様々な逡倍次数で逡倍される。
- (3) Hermonix Mixer に入力された SG①・SG②からのそれぞれの信号の差周波をもつ信号が Diplexer の Port3 から出力され、アンプ・フィルタを通過した後 Spectrum analyzer に入力される。

* Diplexer の Port1・Port3 にはそれぞれ High Pass Filter と Low Pass Filter がついているため、SG②からの信号が Port3 から出力されたり、Hermonix Mixer からの信号が Port1 から出力されるといった事は生じない。

* SG①・SG②・Spectrum analyzer は 10MHz の信号によりリファレンスがとられている (図(3.7)の橙色の線)。これにより、安定した周波数の信号を取り出すことが出来る。

3-2-2 測定

・SG の周波数の設定

今回の実験ではスペアナで見る信号の周波数(IF 周波数)を 300MHz とした。したがって、Hermonix Mixer から出力される信号も 300MHz となるように SG の出力する信号の周波数を調整する必要がある。

SG が出力することの出来る周波数 (0~20GHz) と評価を行う周波数帯(340~350 GHz)の関係から今回 Hermonix Mixer から取り出す信号の逡倍次数は 20 に決定し、SG①・SG②それぞれから出力すべき周波数の決定を行った。

それぞれの SG から出力する信号の周波数と逡倍した後の周波数とをまとめたものを表(3.2)に示す。表(3.2)を見ると確かに逡倍後の周波数の差は 300MHz となっている。

表(3.2)測定を行うにあたり設定したそれぞれの SG の値

SG①からの信号 の周波数「[GHz]	24 通倍した後 の周波数[GHz]		SG②からの信号 の周波数[GHz]	20 通倍した後 の周波数[GHz]
14.200	340.80		17.0250	340.5
14.225	341.40		17.0550	341.1
14.250	342.00		17.0850	341.7
14.275	342.60		17.1150	342.3
14.300	343.20		17.1450	342.9
14.325	343.80		17.1750	343.5
14.350	344.40		17.2050	344.1
14.375	345.00		17.2350	344.7
14.400	345.60		17.2650	345.3
14.425	346.20		17.2950	345.9
14.450	346.80		17.3250	346.5
14.475	347.40		17.3550	347.1
14.500	348.00		17.3850	347.7
14.525	348.60		17.4150	348.3
14.550	349.20		17.4450	348.9
14.575	349.80		17.4750	349.5
14.600	350.40		17.5050	350.1

H.M 通倍次数 : 20 通倍

IF 周波数 : 300MHz

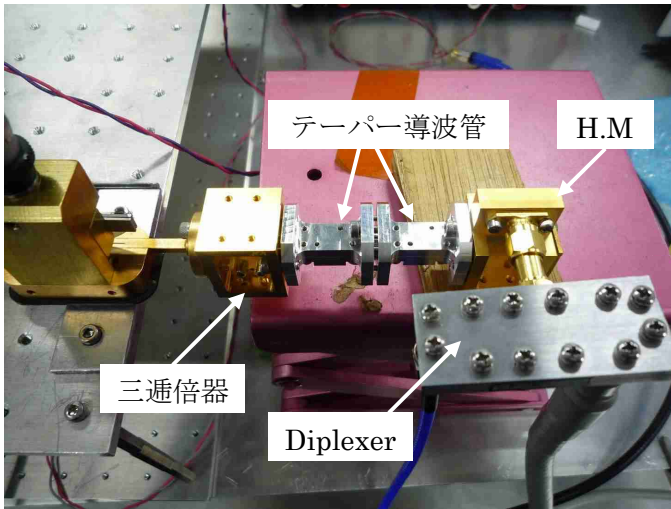
・ 偏波分離器の挿入損失の測定

① まずテーパー導波管の挿入損失を測定するために、図(3.8)のようにテーパー導波管を二つ繋ぎ、表(3.2)で決めたとおりに周波数を変化させ、出力値を Spectrum analyzer で読み取った。

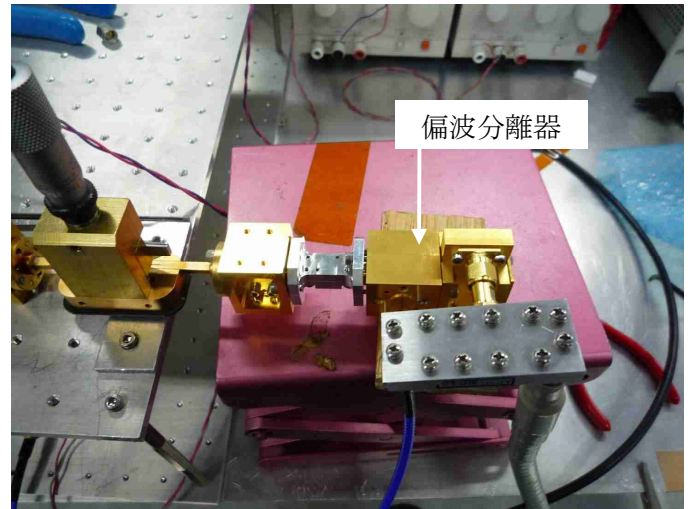
* ここで読み取った値はテーパー導波管二つ分の挿入損失であるので、一つあたりの挿入損失を知るためには得られた値を 2 で割る必要がある。

② 次にテーパー導波管と偏波分離器を図(3.9)のように繋ぎ、①と同様に Spectrum analyzer で出力値を読み取った。このとき偏波分離機の Port3 に H.M を繋いだ。

* ここで読み取った値は偏波分離機の損失とテーパー導波管一つの損失との合計にあたる。したがって、偏波分離器のみの損失を求めるには、ここで読み取った値から、①で得られたテーパー導波管一つあたりの損失を取り除く必要がある。



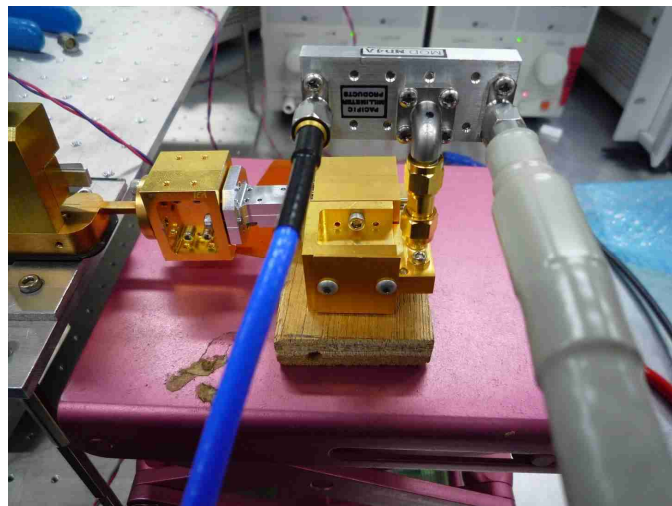
図(3.8) テーパー導波管の測定



図(3.9) 挿入損失の測定

・ 偏波分離機特性の測定

- ① テーパー導波管と偏波分離機を図(3.10)のように繋ぎ、偏波分離機の挿入損失の測定のと看と同様に Spectrum analyzer で出力値を読み取った。このとき偏波分離機の Port2 に H.M を繋いだ。
- * 偏波分離機の挿入損失の測定のと看と同様に、ここでもテーパー導波管一つ分の損失を考慮する必要がある。

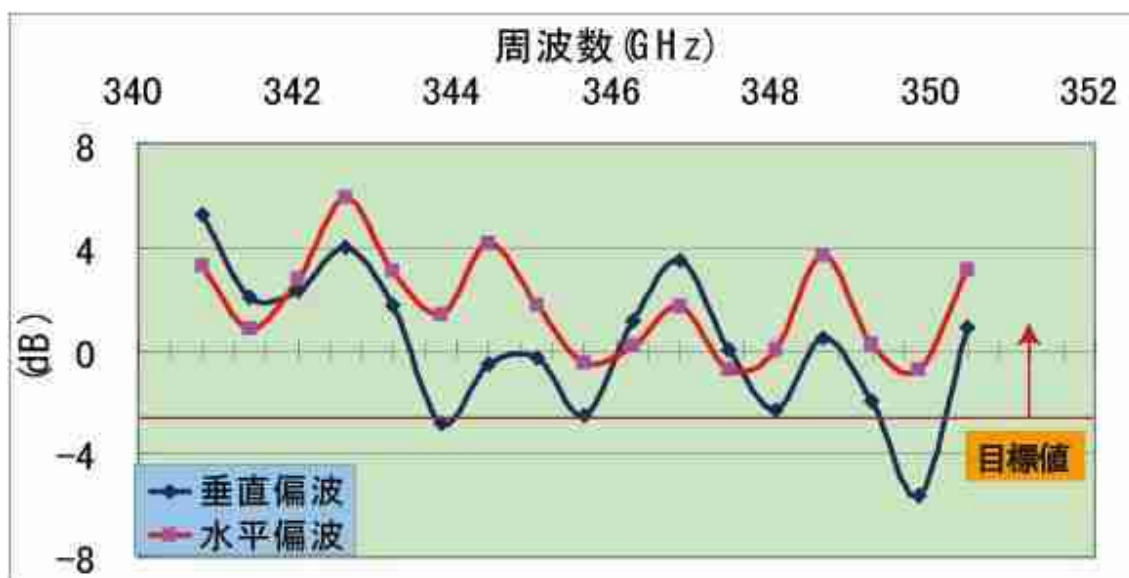


図(3.10) 偏波分離特性の測定

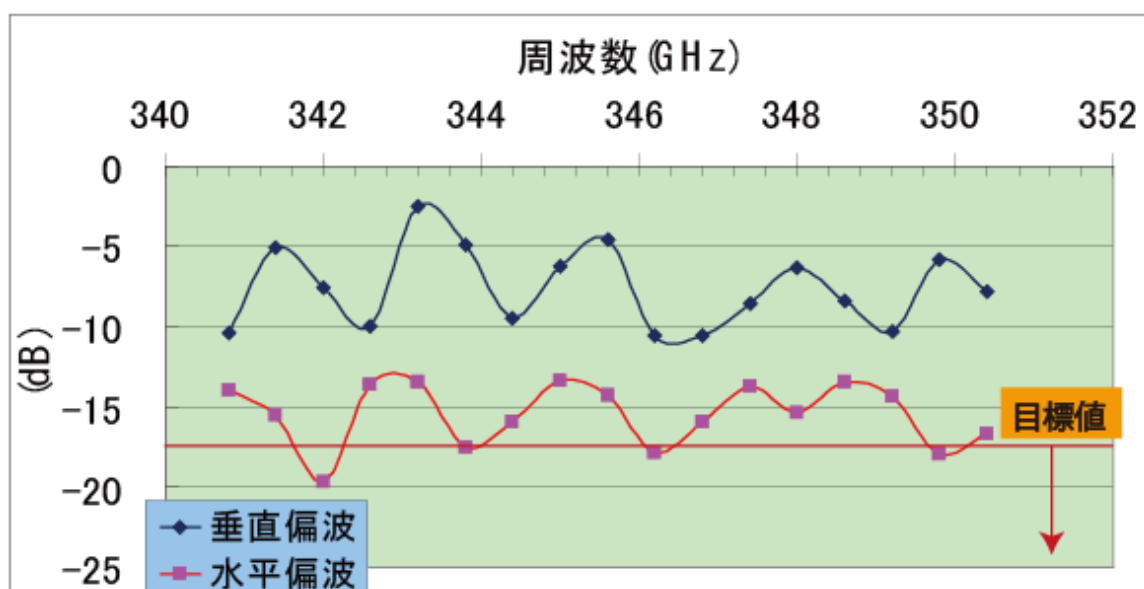
以上の測定を、偏波分離機の取り付け方を変えることで水平偏波と垂直偏波に関して行った。

3-2-3 測定結果

挿入損失の結果と偏波分離特性の現在までの測定結果を、それぞれ図(3.11)・図(3.12)に示す。



図(3.11) 挿入損失の測定結果



図(3.12) 偏波分離特性の測定結果

3-2-4 考察

実際の偏波分離機の測定での挿入損失と偏波分離特性の目標値を表(3.3)に示す。この目標値を図(3.11)・図(3.12)に褐色の線で表した。

表(3.3) 実際の測定での目標値

挿入損失	-3.0dB~0dB
偏波分離特性	-17dB 以下

表(3.3)の目標値が表(3.1)のシミュレーションでの目標値と異なっていることが分かる。このような違いは、実際に偏波分離器を製作する際に、シミュレーションで指定した偏波分離器の内部構造のパラメータを完全に再現することは不可能であるために生じる。

図(3.11)と図(3.12)を見ると、挿入損失では逆に **gain** が得られている。また、偏波分離特性に関しても目標値を達成できていない。さらにどちらのグラフにも波長にして約 150cm の定在波構造が見受けられる。現在この定在波が生じる原因を特定するための実験を行っている。原因として考えられるのはテーパ導波管や高周波ケーブルであるの影響である。現段階では逡倍器は正しく動作していることが確認できている。

4. まとめと今後

・まとめ

- ① ASTE 搭載用 345GHz 帯両偏波同時観測のための受信機的设计を行った。
- ② 345GHz 帯用の偏波分離器の評価を行った。
 - ・シミュレーションソフトを用いて解析を行い設計に問題がないことを確かめた。
 - ・高周波ネットワークを構築し、現在偏波分離器の評価実験を行っている。

・今後

- ① 引き続き偏波分離器の評価を行う。
 - ・定在波が生じる原因を特定する実験を行う。
- ② 偏波分離器の評価が終わり次第、偏波分離器を受信機に取り付けて、冷却試験を行う。
- ③ 実際に ASTE に製作した受信機を搭載し、観測を行う。

5. 参考文献

- [1] シリーズ現代の天文学 第6巻「星間物質と星形成」
福井康雄・犬塚修一郎・大西利和・中井直正・舞原俊憲・水野亮[編] 日本評論社
- [2] シリーズ現代の天文学 第16巻「宇宙の観測Ⅱ—電波天文学」
中井直正・坪井昌人・福井康雄 [編] 日本評論社
- [3] 「ASTE 搭載用 350GHz 帯サイドバンド分離型受信機の開発」
村岡和幸
東京大学 理学系研究科 天文学専攻 2004 年度 修士論文
- [4] 「電波望遠鏡の開発とそれによる星間分子雲の観測的研究」
川村雅之
大阪府立大学 総合科学部 自然環境科学科 宇宙物理学研究室 2007 年度 卒業論文
- [5] 「一酸化炭素の分子輝線を利用した分子雲の質量推定のための教材開発」
高木知里・土橋一仁・秋里昂・井上舞・柏木雄太・西浦慎悟
地学教育 第63巻 第1号 (通巻324号) pp.1-17,2010年1月
- [6] Hirofumi Inoue et al.: “350 GHz Sideband Separating Receiver for ASTE”,
19th International Symposium on Space Terahertz Technology, Groningen, 28-30
April 2008
- [7] Kazuyuki Muraoka et al.: “ASTE CO (3-2) MAPPING TOWARD THE WHOLE
OPTICAL DISK OF M 83: PROPERTIES OF INTER-ARM GIANT
MOLECULAR-CLOUD ASSOCIATIONS”, The Astrophysical Journal, 706:1213–1225,
2009 December 1
- [8] Shin'ichiro Asayama and Mamoru Kamikura : ” Development of Double-Ridged
Waveguide Orthomode Transducer for the 2 MM Band”, J Infrared Milli Terahz
Waves (2009) 30:573–579DOI 10.1007/s10762-009-9475-9
- [9] G. A. Ediss et al. : ” ALMA Band 6 Prototype Cartridge: Design and Performance”,
Presented at the Int. Symp. on Space THz Tech., Northampton, MA, April 2004