

野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載予定の
6-12.5 GHz 帯受信機の成立検討と
光学系設計

野呂愛翔

物理学コース 21S2028T

指導教員 米倉 覚則 百瀬 宗武

目次

- 1.はじめに
 - 2.ターゲット周波数観測の成立検討
 - 3.副鏡エッジレベル
 - 4.各周波数帯でのビーム伝送
 - 5.追加光学系の検討
 - 6.追加楕円鏡の検討と展望
 - 7.結論
- 謝辞
- 引用文献

1.はじめに

長野県南佐久郡南牧村の国立天文台野辺山宇宙電波観測所に設置されている、野辺山 45 m 電波望遠鏡は、30-300 GHz 帯の、ミリ波と呼ばれる電波を観測できる電波望遠鏡では世界最大級であり、特に 100 GHz 帯では世界最高クラスの観測性能を持ち高い感度を誇っている。だが、より長い波長をもつ低周波数を観測できる光学系と、受信機が備わっていない。そこで、6.5-12.5 GHz 帯の低周波数帯を観測できる受信機と光学系の設計を行うに至った。また、この研究では成立検討と光学系の設計に重きを置いているため、主鏡、副鏡のエッジレベルの最適化は行わないものとする。

なお、ここでの光学系とは、宇宙からの電波を反射させ受信機へと導く、楕円鏡や平面鏡の総称のことを指す。

2.ターゲット周波数観測の成立検討

まず、光学系検討の条件として、既存の鏡面のみを用い、以下の条件を考える必要がある。前提として、6.5~12.5 GHz を見られるようになることが要求されている目標であるが、その成立を検討するためと、可能ならより広い周波数を見られるかの可否を調べるために、条件を拡張する。

- ・ターゲット周波数は 6-25 GHz
- ・ 6.5 GHz において副鏡にエッジレベルを 2 dB から 20 dB の間で変化させた電波を入射させ、受信機までの伝送を計算する
- ・ 副鏡によるエッジレベル決定後、6-25 GHz の電波の伝送を計算し、必要があればレンズや楕円鏡など、追加の光学系の検討を行う。
- ・ 副鏡以外の既設のミラーサイズにおいて、スピルオーバーが生じてないかを確認するため、エッジレベル 30 dB のビームが各ミラーに収まっているかを確認する。

また、新受信機の搭載予定場所は小さな空間になるので、十分な性能を持ちながら、よりコンパクトにしていくことが求められる。

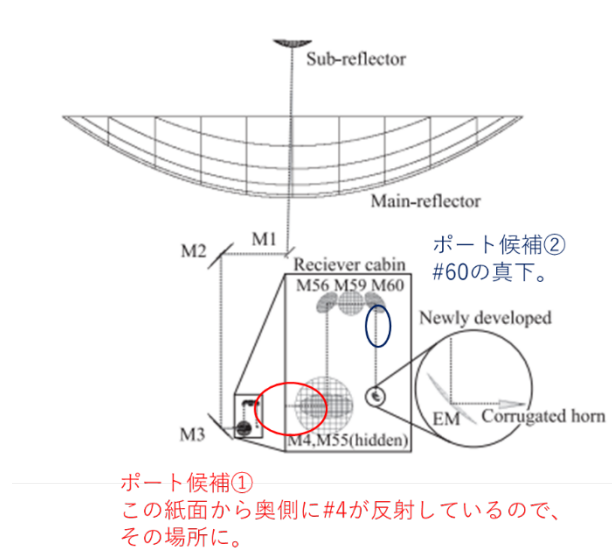


図 1:野辺山 45 m 電波望遠鏡の伝送系の全体像
(Nakajima et al. 2008 を改変)

また、追加光学系の搭載候補場所は、①#4 の後、②#60 の後かの 2 パターンが考えられている。(図 1))だが、#4 の後に設置する場合は 10m 程度の大きいホーンを作る必要があり大きな予算が必要となってしまう。また、#60 後に使用可能なスペースがありコンパクトにすることができれば、低予算でこれを達成できるので、このパターンを採用する。

#60 の後にホーンを設置する際の選択鏡の振る舞いは以下のようにになっている。(図 2)

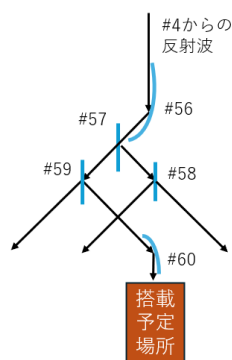


図 2:選択鏡の伝送図と設置予定場所

また、電波伝送を計算していく手法として、計電磁波を単一のガウス波に近似させてその伝搬を考える、「ガウシアン光学」を用いる。

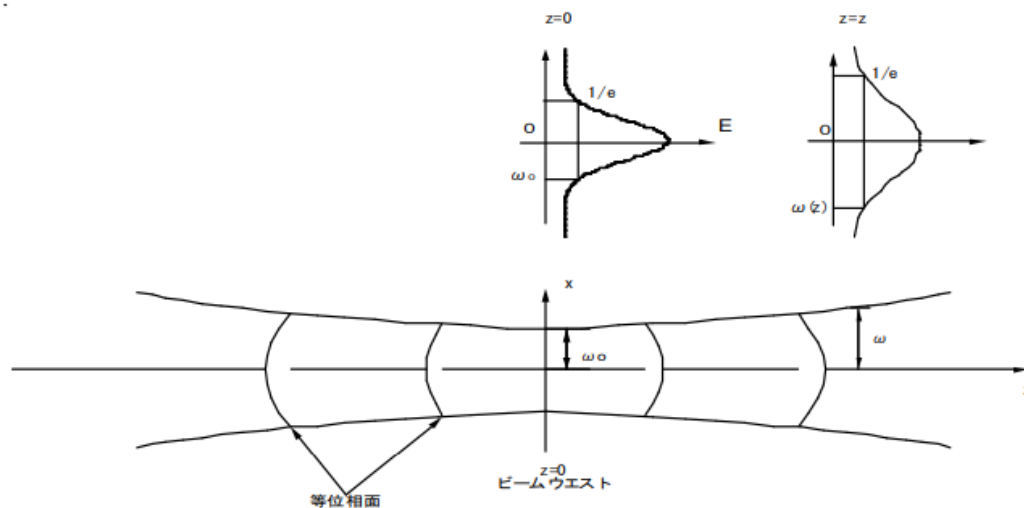


図 3: ガウス波に近似したガウシアンビームの概形

主に使うパラメータは 4 つである。

- ・ ビームサイズ ω … ビームがある位置 z での半径の大きさ
- ・ ビームウェスト ω_0 … ビームが最も小さくなる点での半径の大きさ
- ・ 曲率半径 R … ビームウェストから、等しい位相の曲面までの距離
- ・ ウェストの位置 z … ビームウェストの位置

また、この 4 つは以下のようにあらわされる。

$$\omega(z) = \omega_0 \left\{ 1 + \left(\frac{2z}{k\omega_0^2} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\left[1 + \left(\frac{k\omega^2}{2R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

$$R(z) = z \left\{ 1 + \left(\frac{k\omega_0^2}{2z} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

$$z = \frac{R}{1 + \left(\frac{2R}{k\omega^2}\right)^2} \quad (4)$$

ここで、 ω と R 、 ω_0 と z は対応関係となっており、どちらかのペアがわかれば、芋づる方式でもう片方が判明するようになっている。

ここで、本光学系において、ビーズサイズをそのまま実サイズとして反映させてはならない。ここで必要な補正を以下に記す。

エッジテイパーとビームサイズの大きさの関係について

ガウシアン光学で計算されたビームサイズはその時点でエッジテイパーがかかっている。例えば、ガウシアン光学で計算されたビームサイズは $\frac{r_e}{w}$ が1.0 となり、エッジテイパーは8.7 dB。これは、計算されたビームサイズを $\frac{r_e}{w}$ 倍すると、エッジテイパーが(T_e) dB のビームサイズに補正できる。

式は

$$\frac{r_e}{w} = 0.3393(T_e(dB))^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

今回は、既知のミラーサイズに対して、スピルオーバーがどの程度かを考える必要がある。野辺山 45 m は、ビーム伝送系のエッジレベルは-30 dB 程度でビーム伝送系は設計されている。よって、以降の計算では 30dB 落ちの直径を考えて、スピルオーバーをするかを評価するため、ガウシアン光学で計算されたビームサイズを以下のように補正する。

$$\frac{r_e}{w}(30\text{ dB}) = 0.3393(30)^{\frac{1}{2}} \approx 1.86 \quad (6)$$

よって、求まったサイズを1.86 倍することで30 dB 落ちのビームサイズとすることができる。

実鏡面サイズとビーム伝送路での鏡面空間面積の関係

ミラーのサイズは実際のサイズであるため、ビーム伝送路の空間面積として投影される

サイズに変更する必要がある。変更の方法は、実際のミラーの垂線と、入射電波とのなす角度について以下のように算出する。

$$\text{実サイズ} * \cos(\text{角度}) = \text{投影サイズ}$$

#1～#55 までは、ビームはミラーで 90 度でまげられ、#56 以降は 60 度でまげられるので、対応関係は以下になる。

	実半径(mm)	投影半径(mm)
#2	2524	1784.95
#3	2524	1784.95
#55	912.1	645
#56	410	355.1
#60	410	355.1

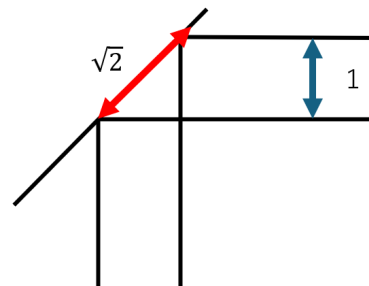


表 1:各楕円鏡の実サイズと投影されたサイズの表

図 4:実サイズと投影されたサイズの概形図

3.副鏡エッジレベル

まず、光学系の伝送を考えるにあたり、副鏡でのエッジレベルを考えないといけない。エッジレベルとは、理論上は無限に広がり続けるビームについて、現実ではある一点でそれを切断する必要がある。その切断した面のパワー密度を、ビーム中心のパワー密度で割った値である。このレベルが高いほど、ガウス波として情報が多く損失しているということだ。

まず最初に、ターゲット周波数の中で最も低く、サイズが大きくなると予想される 6.5 GHz 帯に着目して、2~20 dB の範囲で副鏡におけるエッジレベルを変化させた。

2. 章で示した通り、ガウシアン光学で副鏡からの情報をもとに#60 までのビーム伝送を計算すると、以下の通りになった。

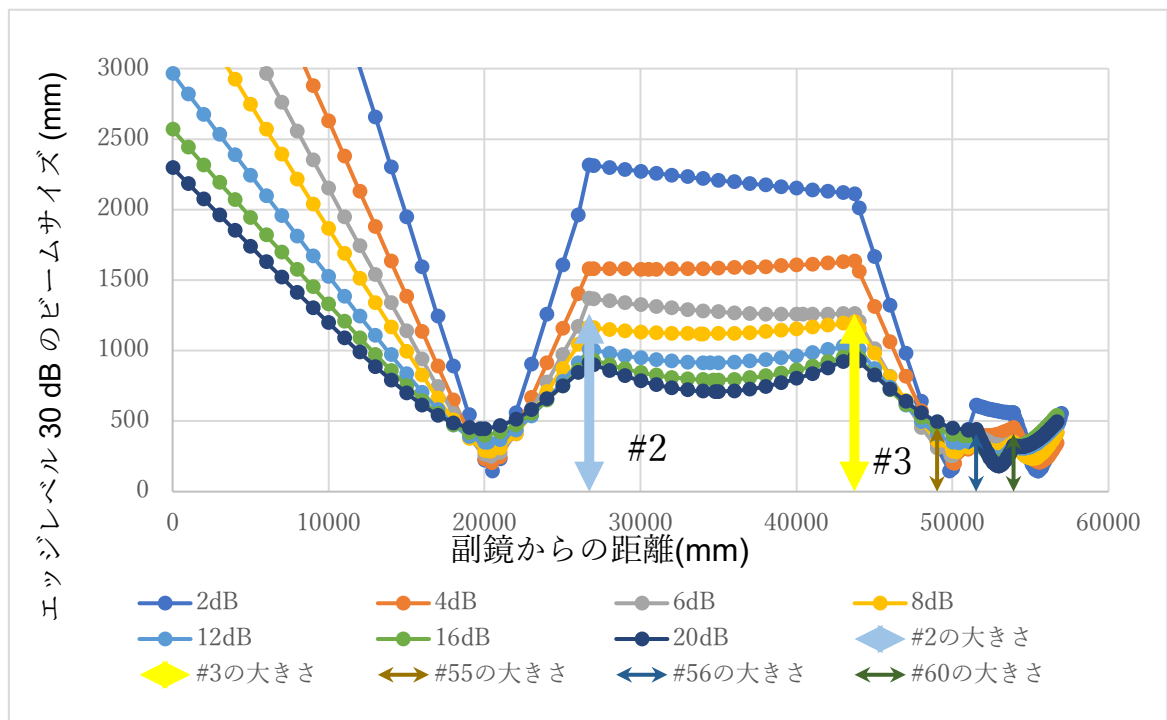


図 5:ビーム伝送系ビームサイズと鏡面サイズ

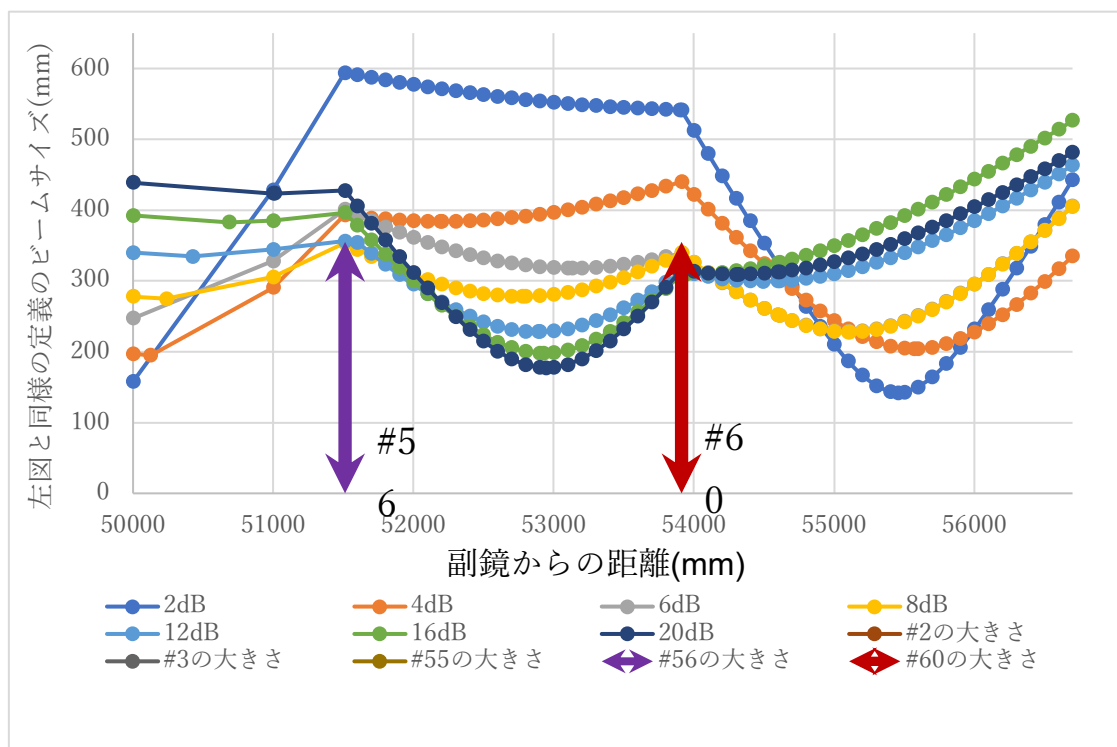


図 6:ビーム伝送系ビームサイズと鏡面サイズ(#56 以降の拡大図)

また、ここでのビームサイズは、算出されたものを 30dB の強度にしてあるので、そのまま野辺山 45 m 電波望遠鏡のビーム伝送内の壁をスピルオーバーしないかを判断できる。

結果、副鏡エッジレベルが、-8,-12 dB では問題なく、各楕円鏡のサイズを超える、つまりスピルオーバーをすることなく伝送している。だが、エッジレベルを-2,-4,-6,-16,-20 dB とした際にはビームサイズが大きすぎスピルオーバーが生じるため、採用が不可能であることが分かった。

4.各周波数帯でのビーム伝送

野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載されているすべての受信機は、副鏡でのエッジレベルが-12~-14 dB 程度で設計されているため、3. 章で適していると判明したエッジレベル -8,-12 dB のうち、最も一般的とされているエッジレベル-12 dB を採用し、各周波数の電波の伝送成立計算をビーム選択鏡(#60)地点まで行った。

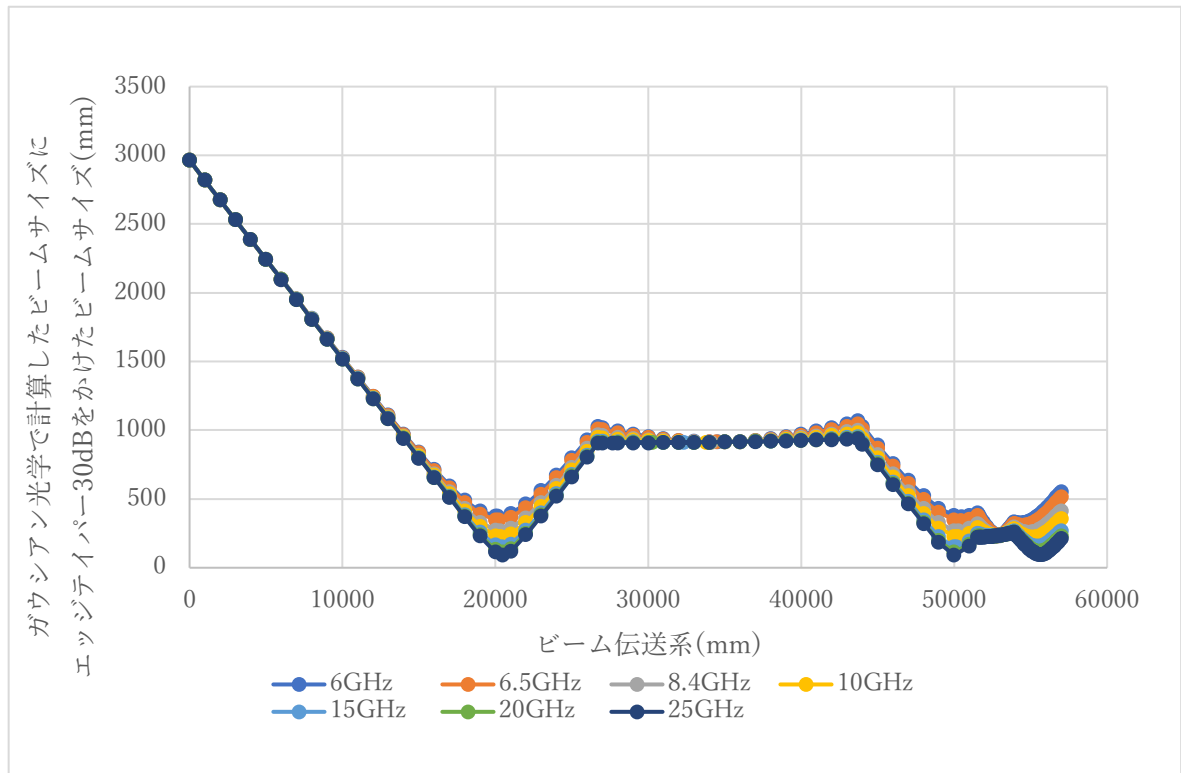


図 7:各周波数に副鏡で-12 dB のエッジテーパーをかけた、ビームサイズの変移

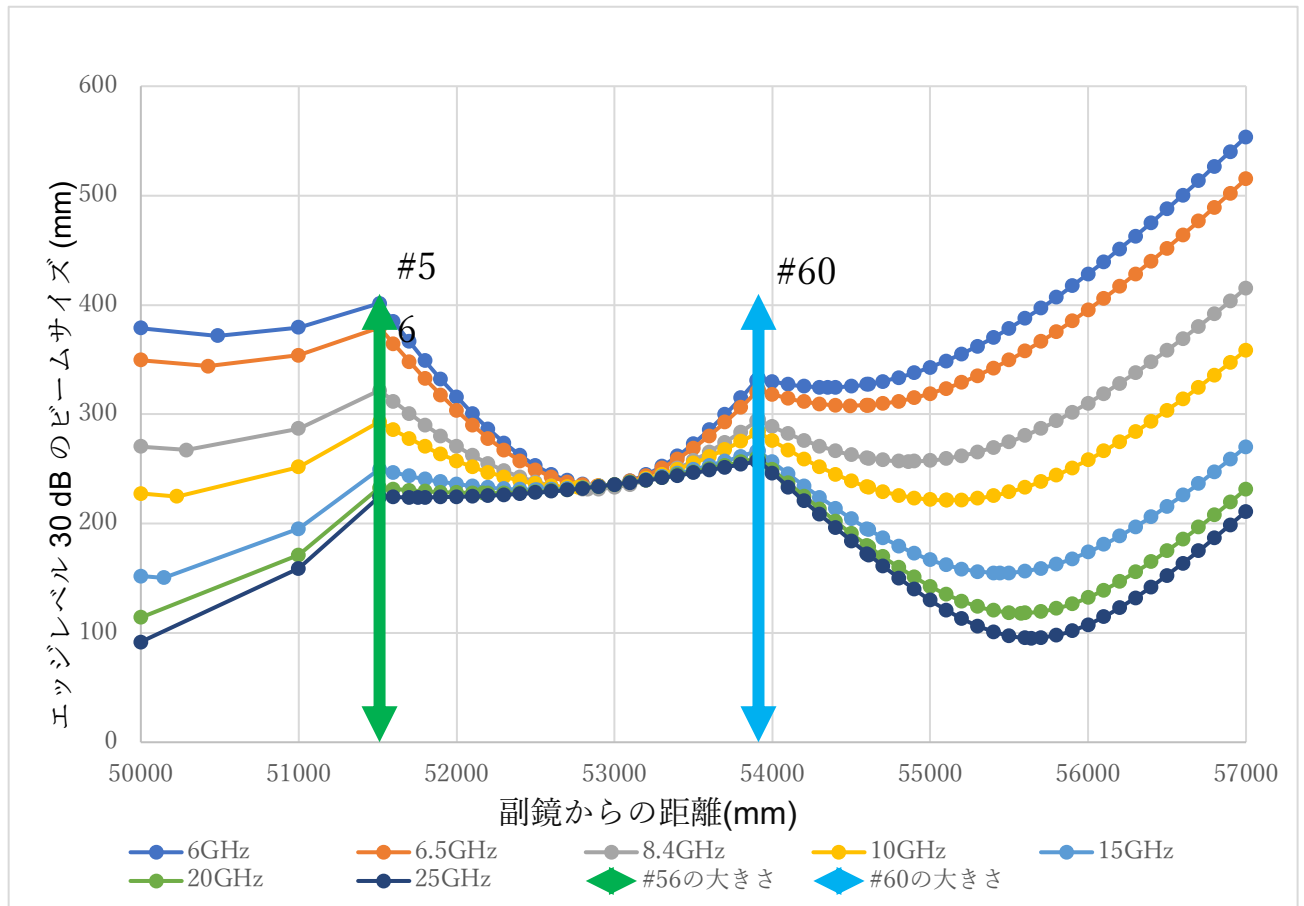


図 8:各周波数に副鏡で-12dB のエッジテーパーをかけた、ビームサイズの変移(#56 からの拡大図)

結果、ここでは、# 56 と # 60 の短い焦点距離の影響より、# 60 以後は、周波数特性が顕著に表れた。特にビームウェスト位置のずれが大きいため、#60 以降で、追加の光学系無しでは、広帯域をカバーする、設置予定場所に収まるようなコンパクト(1m 未満程度)な光学系の設計は困難であることがわかった。

5.追加光学系の検討

#60 以降で集光するためには、レンズか楕円鏡かどちらかを設置する方法が考えられる。それぞれにはメリット、デメリットがあり

- ・レンズ…光軸上にホーンが配置できる。開発は容易だが、ビーム損失が大きい

・楕円鏡…ビーム損失が低くて低コストだが、制作が難しく、サイズが大きい。

それぞれの条件はトレードオフとなっているが、今回、レンズは国立天文台の山崎氏を筆頭に検討が進んでいるので、本研究では楕円鏡を用いた集光を考えることにした。楕円鏡はその大きさがネックとなるが、先の計算から、ビーム半径が約 300(mm)であったため、大きく見積もっても 直径約 840(mm)の楕円鏡を作成すればよい。

設置場所については、予定場所を採寸したところ、#60 鏡から 3.8m 程度の範囲を使えるので、その区間内で集光可能なサイズ感の楕円鏡を設計する。

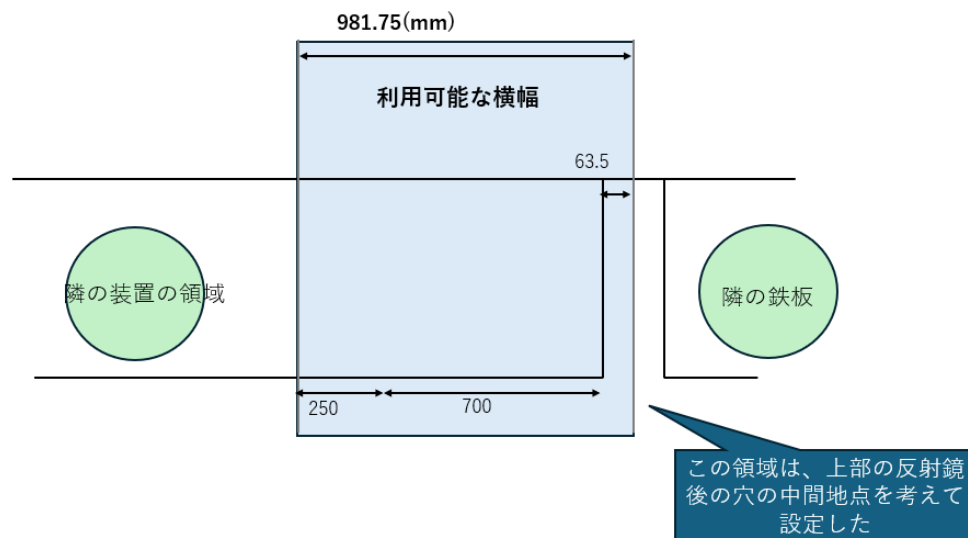


図 9:搭載予定場所の横幅

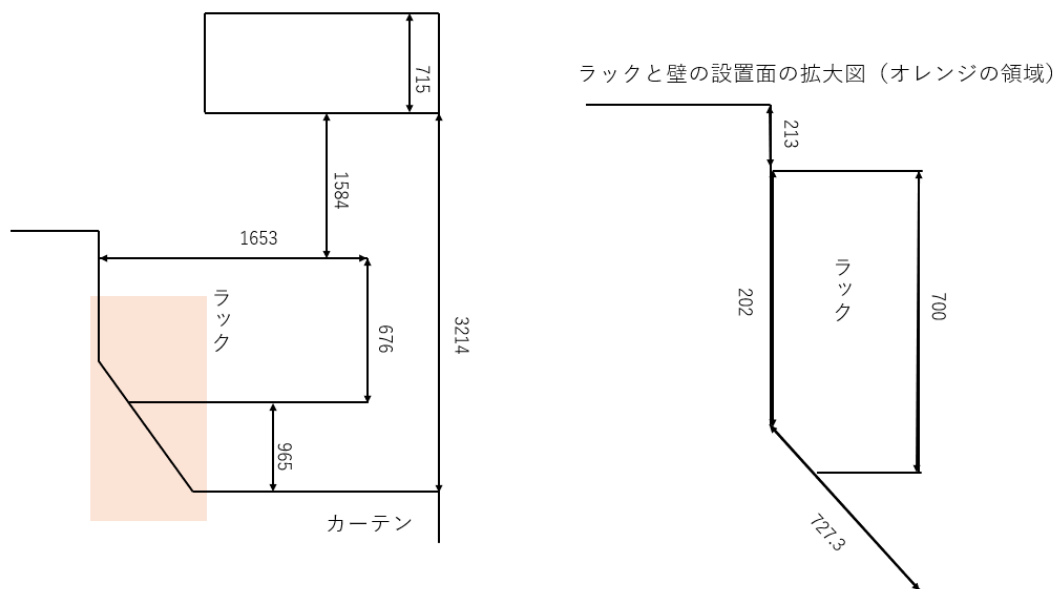


図 10:搭載予定場所の縦幅

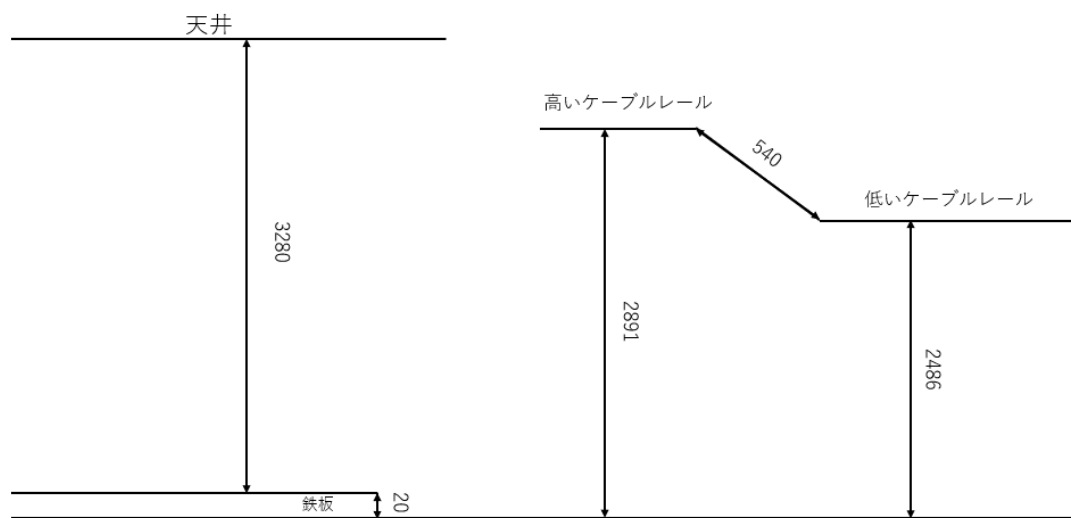


図 11:搭載予定場所の上幅

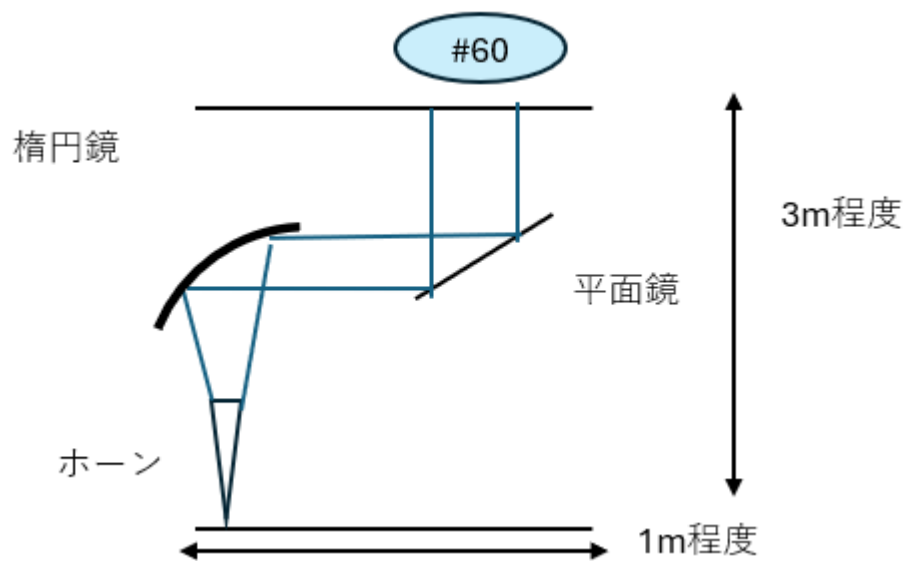


図 12:楕円鏡設置の外形図

4. 章の計算で、6 GHz から 25GHz の電波ウェスト位置の副鏡からの距離の差は 1144.93 (mm)と求められたので、距離の差をこれよりも小さくする楕円鏡の焦点距離と、その設置位置を検討する。集約する幅とホーンを置くスペースを考え、副鏡からの距離 54500(mm) 以降に楕円鏡を設置する条件で解を探した所、[1]55500(mm)[2]56000(mm)が見つかった。

この条件では、6.0 GHz から 25.0 GHz の電波のウェスト位置の副鏡からの距離の差を 各々 220 mm 程度、310 mm 程度にする事ができた。

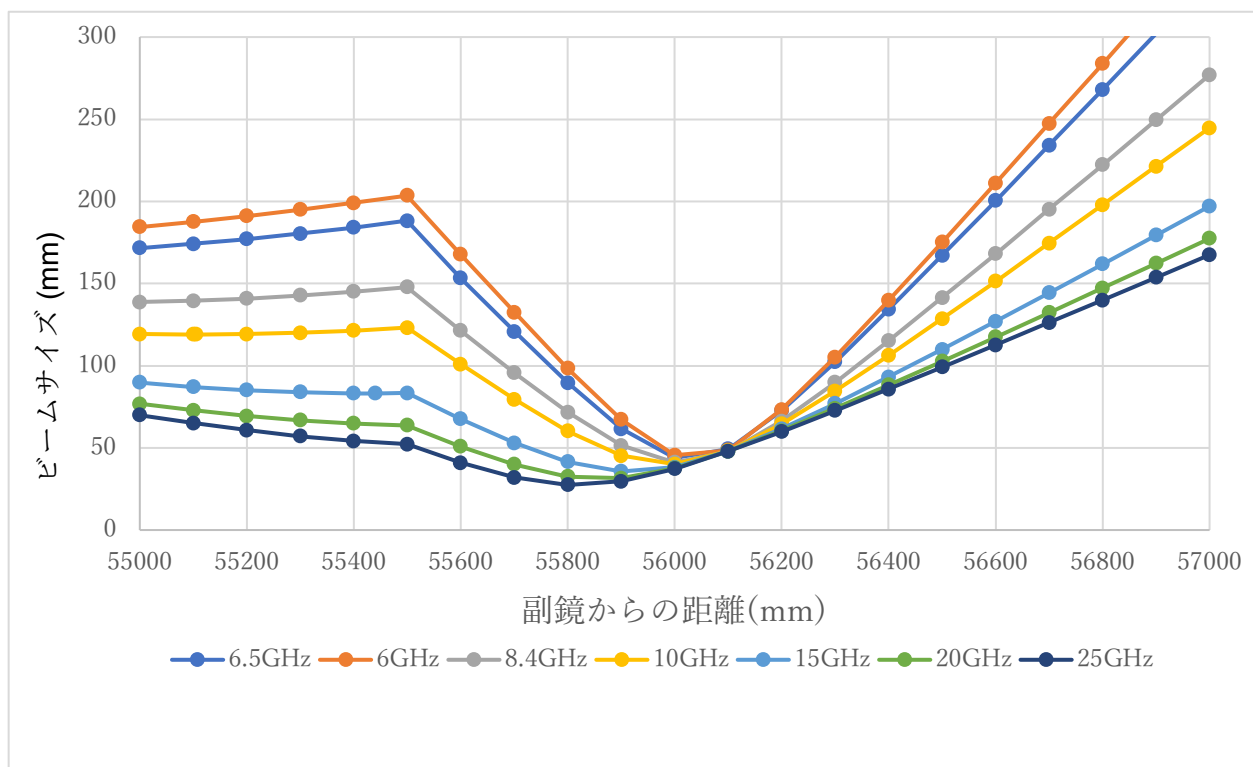


図 13:副鏡から 55500(mm)距離に、焦点距離 500(mm)の楕円鏡を設置したときのビームサイズ

周波数(GHz)	ウェスト(mm)	ウェストの位置
6	43.12	56039.65
6.5	42.78	56029.14
8.4	40.97	56012
10	39.99	55988.1
15	35.44	55920.1
20	31.08	55862.62
25	27.29	55818.79

表 2:[1]での各周波数のウェストとその位置

この場合は、設置予定場所に収まるように適した焦点距離は、500(mm)の楕円鏡と仮定した。ここで、ウェストの大きさの差は 15.83(mm)ウェストの位置の差は 220.86(mm)であり、上述した位置の差としては十分であると判断できる。

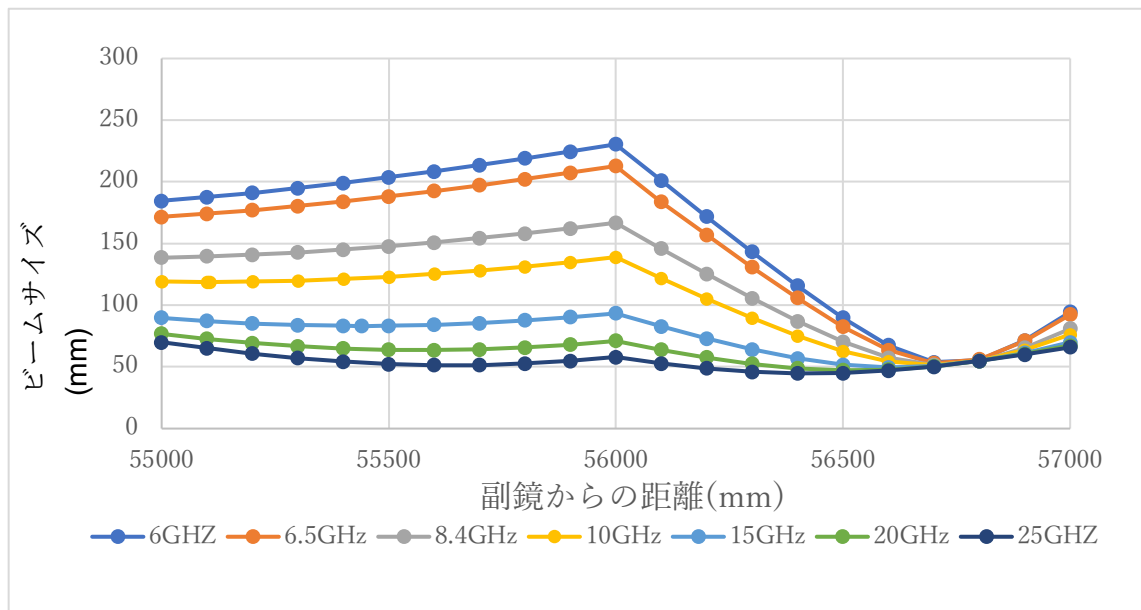


図 14:副鏡から 56000(mm)の距離に、焦点距離 650(mm)の楕円鏡を設置したときのビームサイズ

周波数(GHz)	ウェスト(mm)	ウェストの位置
6	52.48	56740.34
6.5	52.38	56728.16
8.4	51.33	56717.13
10	51.42	56695.68
15	49.53	56617.99
20	47.2	56526.36
25	44.64	56430.68

表 3:[2]での各周波数のウェストとその位置

この場合は、設置予定場所に収まるように適した焦点距離は、650(mm)の楕円鏡と仮定した。ウェストの大きさの差は 7.84(mm)ウェストの位置の差は 309.66(mm)であり、上述した位置の差としては十分であると判断できる。

6.追加楕円鏡の設計と展望

追加楕円鏡の設計にあたり、前章にて、搭載する楕円鏡の焦点距離とその位置が決定できた。よって、それを受け取る光学系を設計し、入射ビームと反射ビームのそれぞれがスピルオーバーをしないかを確認して設計をしないといけない。

以降検討する電波は、ターゲット周波数の中央値である 8 GHz で、エッジテーパー 30 dB のビームが通過するという条件で行う。また、ホーンは従来の設計通り、コルゲートホーンを使用するものとする。

必要な数式として以下の式を用いる。

-

$$l_{slant} = r_H \quad (7)$$

$$l = \sqrt{r_h^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (8)$$

$$d = 2\Omega\omega_H \quad (9)$$

ここで、 Ω はホーンの形状によって決定する定数である。今回用いるコルゲートホーンであれば、 $\Omega = 1.554$ である。これらを用いて、ホーン搭載時の電波から形状を決定する。

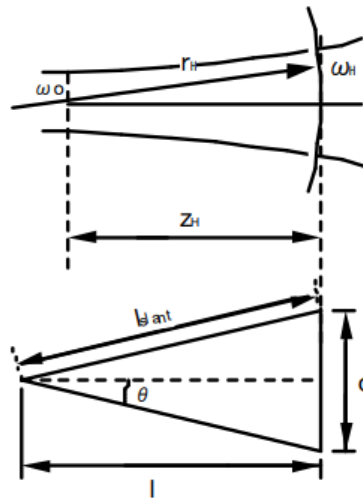


図 15:入射ビームにおけるホーン設計の対応図(辻修論 2006 より)

5章で出た解のうち、①のほうがよりコンパクトに設計ができたので、それを記す。ホーンの形状は以下の通りになった。

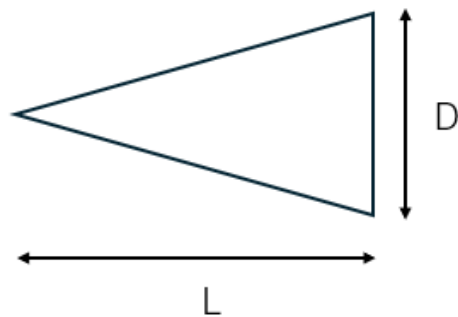


図 16:ホーンのパラメータとその図

周波数	L(mm)	D(mm)
6.5GHz	653.3906	191.4432
8GHz	600.6126	159.7839

表 4:コンパクト化したホーンのパラメータの表

この形状では、天井から使う長さを 2306.04(mm)程度に収めることができ、真下に受信機と計算機を置くスペースを大きく確保することができた。反射ビームについても、ホーンの開口部と楕円鏡の反射ビームの作るウェストを焦点とする楕円の局面に沿う楕円鏡の表面にもなっており、入射と反射のビームがすべてスピルオーバーをしていないことがビーム導線の外形図でもわかる。

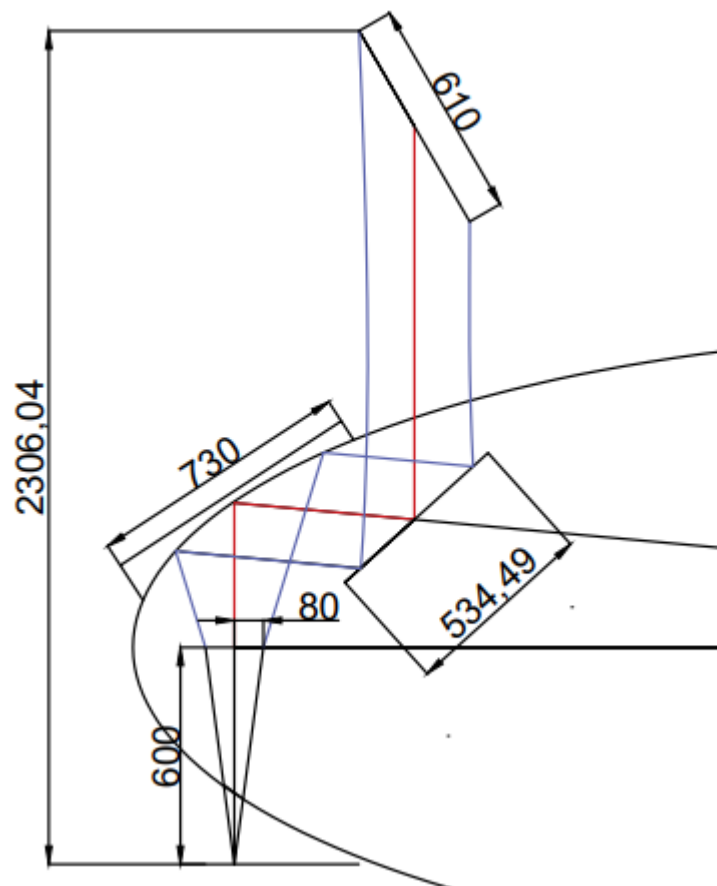


図 17: 設計した光学系の外形図

7. 結論

野辺山 45 m に搭載する 6.5-12.5GHz を観測可能とする新規光学系について、6.5 GHz は問題なく観測が可能な光学系が設計できた。また、現在の概形上では 6 GHz も観測が可能であることがわかり、高周波数であれば、12.5 GHz のみならず 25 GHz までも併せて観測できる光学系であることが分かった。よって、今回のターゲットである周波数とそれ以

上に拡張された周波数も見れることが分かったため、より多くの対象を見れるようになることが望まれる。

謝辞

本研究をするにあたり、多くの方々から、指導、指示をいただきました。多くの指示をいただきました米倉覚則先生と、JAXA の木村公洋さん。発表や資料について教えてくださった研究室の皆様。これまで関わってきた全ての方に、この場を借りて心より感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1]T.Nakajima et al. (2008) A New 100-GHz Band Front-End System with a Waveguide-Type Dual-Polarization Sideband-Separating SIS Receiver for the NRO 45-m Radio Telescope, PASSJ, 60, 435-443
- [2]K.Kimura (2005) 受信機光学系の基礎 光学系設計の方法論
- [3]PAUL F. GOLDSMITH (1998) QUASIOPTICAL SYSTEMS Gaussian Beam Quasioptical Propagation and Applications