

VERA6.7GHz帯用多モードホーン的设计

(2008 VERAUM/15)

氏原秀樹、本間希樹(国立天文台)、木村公洋、小川英夫(大阪府立大学)

1. 多モードホーンの原理と構造

- 通常のユニコルホーン、コルゲートホーンは基本モードのみで励振されているが、多モードホーンでは管内のテーパ角を多段に変化させて高次モードを発生させ、開口面で合成して望ましいビーム形状を得る(図1)。
- コルゲートホーンに比べると比帯域は狭いが、内壁に溝がないので外形が小さくなり、GFRP等の軽量で断熱性の良い素材で外装を作ることが容易になる。また、多段テーパを利用して軸長削減が可能である。

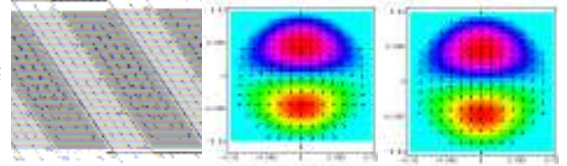
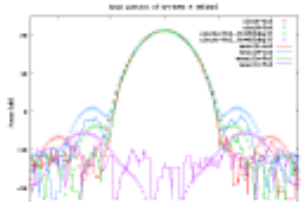


図1 導波管内の電界分布の例。左はTE11モード、基本モードであり、円錐ホーンでの開口面電界分布中はTE11モード、一つの高次モードで、これとTE11モードをうまく合成すると、右図のような電界分布となり、交差偏波成分が減少する。

VSOP2の場合、比帯域10%で低交差偏波で小型・軽量のホーンが求められていた。多モードホーンを提案した。また、寸法用件の厳しいVERAの20mアンテナ用6.7GHzフィードにも提案した。VSOP2用は43GHz、22GHz、8GHz帯で、VERA用は6.7GHz帯で昨年4本を試作し、評価を行った。今年度は効率を向上させ、細身で他バンドのビームへの影響低減が期待される2本を製作する予定。

2. 設計手法

- 基本モードのみで励振される場合、ゲインとエッジレベルからホーン形状が十分に決まるが、多モードホーンではビーム合成に使用する高次モードの振幅比と位相差、開口面での波面曲率がビーム形状を決めるパラメータである。これらはホーンの内壁形状に依存するので設計パラメータが非常に多く、数値計算による設計・評価が不可欠である。効率よく設計するために、ホーンを高次モード発生部とビーム幅調整部に分けて設計し、これらを合成して最適化することとした。高次モード発生部から開口部へは極力滑らかに接続して意図せぬ高次モードの発生を抑制し、開口付近の角折れ部分で微調整を行う構造とした(図4)。
- 初期においてはgeneralized telegraphist's equations[1]によるプログラムを作成し、ホーン管内での高次モードの発生を確認に利用したが、実際の設計段階においては実績のある、軸対称ホーン向けの設計ソフトのChampを用いた。Champを呼び出して、形状設定ファイルから数値的に高次モード発生部の形状最適化を行い、結果を可視化し、CAD用のdxfファイルを作成するプログラムを作成して、設計作業を効率化した。



- VSOP-2/ASTRO-G衛星の観測周波数帯は8GHz、22GHz、43GHz、光学系は共用するのでホーンのビーム幅は同じだが、導波管と波長の比は若干異なる。そこで、大きさと加工精度の点で製作が容易な22GHz帯で基本設計を行い、これをもとに他の周波数用のホーンを設計した。
- VSOP2用とVERA用ホーンは交互に設計・評価を行ったので、それぞれから相互に設計手法にフィードバックを行えた。

なお、Champでは、ホーンを短い直線導波管に分割し、それらの境界で電磁界が連続になるように電磁界分布の展開係数を決める。展開基底は直線導波管の基本モードと高次モードなので、多モードホーンであれ、コルゲートホーンであれ、ストレートホーンであれ、管内の電磁界分布は全て高次モード展開され、最終的なビームパターンはそれぞれのモードからの放射の合成として表現される。一方、ビームの振る舞いを考える上では、テーパ導波管でのモード関数、つまり、波面曲率のあるモードで展開したほうがわかりやすい。

3. VSOP2衛星光学系のアンテナ開口能率の改善に向けた改良

- 電磁界の変化が急峻なところで数値計算の誤差が生じやすい。すなわち、開口縁や、コルゲートの溝の壁、フレア角度変化の大きなところである。コルゲートホーンに関してはChampは十分な実績があり、フレア角度については、VSOP-2よりも極端な軸長の短縮を図ったVERA用ホーンでは問題なかった(天文学会2007年春季年会)。また、昨年年度は試作、測定した3モードホーンでも問題はなかった(同2007年秋季年会)。
- 前年度、VSOP-2向けに提案し、試作、評価を行った多モードホーンは、性能比較用のコルゲートホーンに比べてコンパクトではあるが、アンテナ開口能率では5%程度劣っていた。外形寸法は開口直径で5波長程度を確保し、軸長にも多少のゆとりがあったので、これらの制限を満たしつつ能率の改善に挑戦した。

3-1. ホーン構造の改善

- アンテナ光学系の開口能率を向上するには、副鏡への総照射電力を増やし、フィードホーンの照射分布を副鏡の中では平坦に近くしつつも縁近傍での減少率を高められればよい。昨年度に試作したホーンでは構造が簡素な反面、自由度が少なく、ビーム形状の制御に限界があった。そこで、これまでの経験を踏まえ、4モードまでの高次モードの利用を試み、設計自由度を増やした。設計時間短縮のために基本設計には昨年試作した3モードホーンをベースに4モード目の発生部を追加し、テーパの変化をさらに滑らかにして、意図せぬ高次モードの抑制を図った。

3-2. 設計手法の改善

- ホーン設計とシミュレーション、CAD下図面作成は氏原、アンテナ光学性能のシミュレーションと加工図面は木村が担当している。ホーンの寸法パラメータを調整して10本程度を計算し、有望そうなものの形状データを大阪府大に送る。府大側ではGRASPを使い、アンテナ開口能率と最適焦点位置を計算する。その結果をホーン的设计者にフィードバックする。
- 設計自由度が増えるパラメータサーチの範囲が広がるので、全体の作業時間を増やさないためには府大にホーンデータを渡す前に「アンテナ能率向上の見込みの薄い解を効率よく捨てる」手段が必要である。ホーンのシミュレーションよりもGRASPのほうが評価に時間がかかるので、作業ハイラインが詰まりやすい。そこで、Champでの計算結果から任意角度内の照射電力を概算するソフトを作成(計算例は図2)し、能率向上の見込みの薄い解をGRASPでの評価前に捨て、設計効率を向上した。

最終的に12本をGRASPで評価したので、ホーン単体の計算総本数は43GHz帯用の設計で100本程度、そこから22GHz、8GHzへのアレンジでそれぞれ10本程度。昨年度検討のもの、VERA用のものなどを含めると、200本は越えている。これらの改善の結果、昨年度よりもホーン構造が複雑になったにもかかわらず、同程度の時間で能率を向上させた解を複数みつけることができた。反射損については-20dBを若干割り込む領域が出て来たが、これが帯域端となるようにホーン形状を微調整した。VERA向けはVSOP2用設計を元にして、能率低下と引き換えに軸長短縮をはかった3本をGRASPで評価した(図5)。

4. VSOP2用試作と測定結果、VERAへの応用

- 観測帯域中心において比較用のコルゲートホーンよりも1%、能率が良い解があり、これのビームパターンを図2に示す。これについてのみ、検証のための43GHz、22GHz帯で試作とビームの測定を行った。理想鏡面での開口能率の計算値は75.7%である(木村)。外形を図3に示す。開口直径は観測帯域中心で約4波長、軸長は若干伸びたが受信機容器にはギリギリ収まる。開口径が小さくなったことで、43GHzホーン縁から見た22GHzホーン縁の見込み角度は26度から56度へ大きくなったので、隣接ホーンによるビームの変形が小さくなる期待できる。ビームの測定は京大生存圏研究所(METLAB)の電波暗室で遠方界測定を行った。43GHz帯でのシミュレーション値との比較を図に示す。開口直径が3.2波長となる37GHzにおいてもほぼ計算どおりのビーム形状だった(図2)。

	軸長 [mm]	直径 [mm]
r2.4	433.2	290.0
r4291	454.5	217.9
r4292	445.0	214.1
r4293	405.0	215.2

図4 多モードホーンの形状比較。左はVERA6.7GHz帯用、右はVSOP-2/43GHz帯用。青線は前回試作(r2.4)、緑線(r4.29.1)は、黄色(r4.29.2)は効率比較のみ、赤線(r4.29.3)は今回設計、試作した。

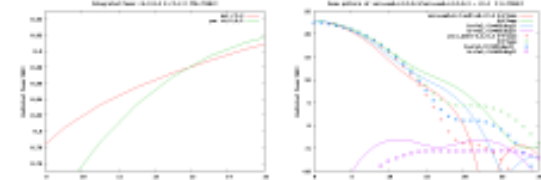
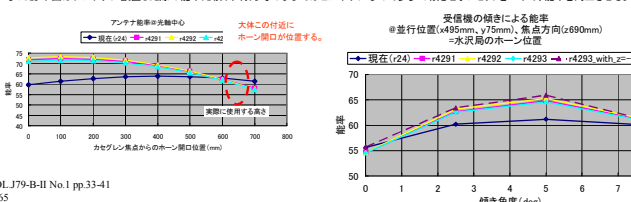


図5 VERA6.7GHzホーンの副鏡照射電力比(左)とビームパターンの比較(右)。左図は照射電力を一定角度内の積算値。赤が今回試作、青が前回試作。右図の実線は前回試作形状、点線は今回試作。

今回試作ホーンは副鏡への照射電力(見込み角11度程度)では4%小さいが、照射分布をより平坦にした結果、アンテナ開口能率では4%大きくなった。下図はアンテナに設置した際の効率比較(木村)。そのままではピンボケになるので多少の傾きとオフセットをつけて、効率を向上させた。



5. 今後の検討課題

- これまでの国内電波天文分野では設計者がいなかった多モードホーン的设计・評価手法をほぼ確立できた。比帯域10%程度であれば、コルゲートホーンを代替できるが、見た目が単純なわりには設計が煩雑。
- アンテナフィードの小型化と性能の両立は難しい課題であるが、とりえず、開口直径が4波長程度までは安全と思える。軸長については、管壁形状を曲線にして軸長を短縮した際の意図せぬ高次モードの抑制は課題である。
- 交差偏波を-25dB程度以下という要求仕様では、高次モード発生部から開口面までの間で生じるモード位相の調整が重要である。これには管軸方向の距離よりも壁面に沿った距離で評価したほうが設計パラメータ間の直交性が良いように見える。できるだけ設計を自動化したい。

(主な参考文献)
[1] "一般的な伝送方程式を用いたフレア形マルチモードホーンへの解析" 出口博之ほか 電子情報通信学会論文誌 VOL J79-B-II No.11 pp.33-41
[2] "高効率多モードホーンアンテナ" 庭井 貴、木本 孝至 電子情報通信学会論文誌,1982, Vol.165-B-II, No.5, pp.664-665
[3] "電波天文用多モードホーンの開発" 氏原秀樹ほか 信学技報 SP82-207-26(2008-03)

図2 43GHz試作多モードホーンのビームパターン(実線)。上から45GHz、43GHz、41GHz、39GHz、37GHz。点線はChampによる計算値。ホーン開口面間距離は6m。



図3 昨年度製作した6.7GHz帯用多モードホーン(左)と、水沢VERA観測所への試験設置の様子(上)。