

資料

1. VLBI システムに要求されるアンテナの諸特性に関する一考察

鈴木 良 昭*

(昭和 54 年 9 月 22 日受理)

1. ま え が き

VLBI システムで用いられている周波数帯は深宇宙探査用周波数及び電波天文用の周波数であり、1 GHz 以上のマイクロ波帯が主である。マイクロ波帯では主に開口面アンテナが広く用いられているので、ここでは開口面アンテナを VLBI システムに用いる場合について考察することとし、はじめに大型開口面アンテナの現状について述べ、次に VLBI システムで得られる基本的な測定量の測定精度との関連で開口面アンテナの特性とその測定について述べる。

2. 大型開口面アンテナの現状

開口面アンテナの基本的特性としては、利得及びアンテナパターンがまず挙げられようが、これらは VLBI にかぎらず一般の電波天文用アンテナにも重要な特性である。利得は受信機特性(主に雑音温度)とも関連して検知可能な電波源の最小放射強度を決定する。詳しくは 3. で述べるが、VLBI システムにおいてはアンテナを含む受信系の基本的パラメータである G/T (G ; アンテナ利得, T ; システム雑音温度) が最も基本的な測定量の一つである遅延時間の測定精度を決定する。一方、アンテナパターンから求められるアンテナの電力半値幅 (HPBW) は一般の電波望遠鏡の角度分解能を決定するが、VLBI のようにインタフェロメータとして使用される場合、ベースラインと電波源を含む面内の角度分解能はベースラインの長さ和使用周波数で決まってくるので、アンテナパターンは VLBI の場合、利得に比べれば第二義的になるであろう。しかし、依然として目的の電波源を天空から選択するために重要な特性であり、メインビームの幅が広ければ、そのビーム内の不要電波源からの雑音を受け、また、サイドローブレベルが高ければ同様に不要電波を受けることになる。

利得、ビーム幅のいずれの面でも大口径のアンテナが望まれるわけであるが、任意に大きなアンテナを作るわ

けにはいかず、そこには実際上の限界がある。限界の根本的要因は経済的なものにあり、十分な時間と資金さえあれば打ち破ることはできるが、建設に要する費用は、作るアンテナの大きさの増加に比べ急速に増えてしまう(製造費用はアンテナ開口径の 8/3 乗に比例するというパラボラアンテナに対する簡単な解析例がある)。アンテナを大きくすることを困難としている要因としては以下のものが挙げられている⁽¹⁾。

(1) 機械的限界

重力、慣性力による歪み

(2) 環境条件

材質の熱膨張、風による歪み

(3) 鏡面精度

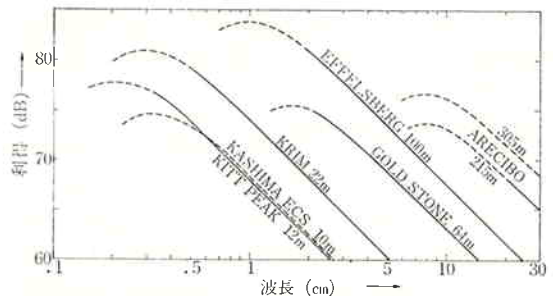
○ランダム誤差 工作精度で決まるランダム誤差であり、これによる利得の低下、サイドローブレベルの増加が問題になる。

○測定限界 長さの測定精度の問題であり、例えば、スチールテープによる測定の場合精度は $1/10^5$ 程度であるが、アンテナ構造が大きくなる程誤差は波長のオーダーに近づき問題になる。

(4) 指向誤差

アンテナが大口径となりビーム幅が狭くなると目標電波源に正確にアンテナを指向させることが困難になるため利得が下がるのと等価になる。

第 1 図に現在電波天文に使用されている幾つかのアンテナの利得を示す⁽²⁾。



第 1 図 大型開口面アンテナの利得の例

* 鹿島支所 第一宇宙通信研究室

開口径の大きいアンテナほど、高周波での利得が伸びないが、これは鏡面精度によるものであり、大型アンテナほど、鏡面精度をいかに小さくするかが問題になるわけである。

鏡面精度の劣化による利得の低下は良く知られているように次式で示される⁽³⁾。

$$G = \eta(\pi D/\lambda)^2 \exp[-(4\pi\sigma/\lambda)^2]$$

η ; 開口能率, D ; 開口径

σ ; 理想鏡面からの鏡面の偏移量の rms 値

第1図中の破線は上式を用いて外挿して求めたものである。

VLBI システムで使用されているアンテナの例を以下に示す。

設置地名	開口径	観測対象
ペアブロッサム	2.5 mφ	ALSEP (月面上電波機器)
パロスバード	"	
アラスカフェアバンクス	26 mφ	電波天体
ハワイ・カウアイ	9 mφ	
ゴールドストーン	64 mφ	
ヘイスタック	37 mφ	
カナダ・アルゴンキン		電波天体
アメリカ・NRAO		
ドミニオン		

3. VLBI で得られる測定量の精度と G/T

VLBI から得られる測定量には位相差, 遅延時間及びコヒーレンス等があるが, それらの測定精度はアンテナ, 受信系及び天空雑音から決まる S/N で関係づけられる。

S/N は良く知られている次式で表される⁽⁴⁾。

$$S/N = [(T_{ax} \cdot T_{ay} / T_{sx} \cdot T_{sy}) BT]^{1/2}$$

T_{ax}, T_{ay} ; X, Y 2局のアンテナに入る目標電波源からの雑音

T_{sx}, T_{sy} ; X, Y 2局のシステム雑音温度

B ; 受信帯域幅

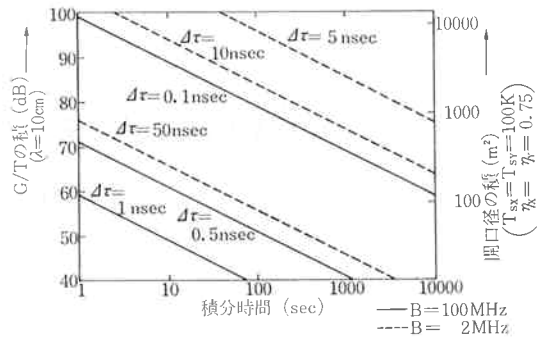
T ; 積分時間

ここでは測地, 地殻変動測定等使用上重要な遅延時間(これからベースラインの長さが決定できる)の測定精度 $\Delta\tau$ に着目し検討してみる。

$\Delta\tau$ は S/N と次式で関係づけられる。

$$\Delta\tau \approx 1/(2\pi B \sqrt{S/N})$$

アンテナを含む受信システムの性能として, ここでは通常の衛星通信における地球局の最も基本的パラメータである G/T を用いることにすると, 以上の2式より次の関係式が求まる。



第2図 G/T の積と積分時間

$$(G/T)_X (G/T)_Y = \frac{4k^2}{\pi^2 \lambda^4 F^2 B^2 T \Delta\tau}$$

$(G/T)_X, (G/T)_Y$; X, Y 2局の G/T

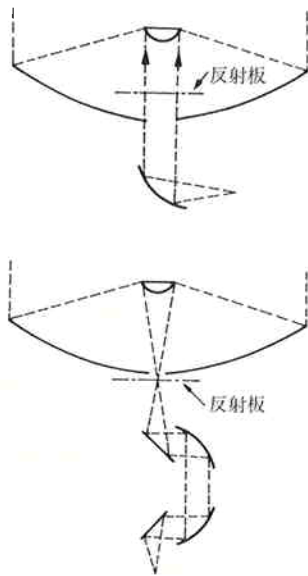
λ ; 波長 F ; 目標電波源のフラックス密度

k ; ボルツマン定数

上式より各パラメータが与えられれば所要の G/T が求まる。1例として第2図に, $\lambda=10$ cm の場合について算出した例を示す。受信帯域幅 B として, MARK II システムの 2 MHz の場合と将来のバンド幅合成技術等を用いた超広帯域 VLBI システムを想定して 100 MHz の場合について計算してある。また, 目標電波源のフラックス密度としては主な天体電波源の観測が可能で 1 flux unit ($=10^{-26}$ W/m²) を用いた (1 flux unit 以上の天体電波源は約 100 個程度存在している)。図から例えば, インテルサット標準地球局の性能である $G/T=40$ dB 程度の2局で VLBI システムを構成し, $B=2$ MHz とした場合約 200 秒程度の積分時間で $\Delta\tau=10$ nsec の測定精度を得ることができるとわかる。第2図右側縦軸に二つの局のシステム雑音温度が 100° K でアンテナの開口能率が 75% の場合について G/T 積を開口径の積で示しているが, これより, 将来の超広帯域 VLBI システムでは, 直径 5 m 程度の開口面アンテナでも 20 秒程度の積分時間で遅延時間を 1 nsec の精度で決定することができる。5 mφ 程度以下であれば移動可能であり, 今後, 移動型で高精度の VLBI システムが実現されるであろう。積分時間, 帯域幅を大きく取れば, アンテナ径は更に小さくすることが可能であるが, その限界については後章で検討されるのでここでは触れないことにする。

4. アンテナ系の遅延時間

VLBI で求められる測定量に与えるアンテナの諸特性の測定誤差の影響を考えた場合, 一般に測定されている利得, アンテナパターン等の測定誤差は, 電波源の放射強度を測定する場合以外はほとんど問題にはならない。



第 3 図

しかし、前節でも検討した VLBI で測定する遅延時間を考えた場合、新たに給電系も含めたアンテナ系のアンテナ開口面から給電部出口までの遅延時間の測定が必要になってくるとともにその測定誤差は直接、VLBI 測定量の誤差となると考えられている。

給電部ホーン位相中心からアンテナ開口面までの遅延時間は幾何光学的に取扱いのできる範囲であり、また給電系における群遅延時間も各種導波路について理論化されており、アンテナ系全体としての遅延時間を計算によって求めることができる。しかし実際には、給電部、アンテナ構造部の寸法の測定誤差等があり、理論計算による誤差は明らかではないので実測することが望ましい。

実際に測定する方法としては開口面上にプローブを置き給電部入力よりの遅延時間を直接測定する方法、アンテナ系の内部の適当な位置に反射板を置き給電部入力から入った波が反射して戻るまでの時間を計りアンテナ系の一部を測定する方法等が考えられている。このとき、給電部の内部に反射板を置くことを考えた場合、給電部の取りはずしが必要となり、給電部の構造によっては問題であるが、カセグレンアンテナの場合は給電部ホーンから副反射鏡の間に反射板を置くことができ比較的容易に測定が可能な場合がある。この場合、反射波の ray の方向が入射波の ray と一致するような位置に置くことが反射波の給電部への整合及び不要な反射点からの波の影響を避けるために望ましいと考えられるので、平面反射板を用いる場合、入射波が平面波になっている部分、又は入射波のビームウェスト (ray が交差する点) 部に反射板を置くのが良いであろう (第 3 図)。

また、アンテナ系の遅延時間が不変とはかぎらないことには注意を要する。例えば、アンテナ基準点が Az , EI の値によって変動する場合である。 $Az-EI$ の直交点がアンテナの基準点となっていればよいが、直交しない場合には、アンテナの指向方向によって基準点がずれるので補正を必要とする。また、先に述べたように一般にはホーン部から開口面までのアンテナ部は計算によって求まるものであるが、カセグレンアンテナの場合、副反射鏡が変位すると、微小の変位でも数 nsec 程度の遅延時間の変動があるという計算例があり⁽⁵⁾、アンテナが完全剛体ではない以上、仰角の値によって副反射鏡の重力による変位は異なるので、この影響は無視できないと思われる。一方、周囲温度の変化による遅延量の変動も考えられるが、給電系の構成材質の熱膨張係数を 10^{-5} 程度と考え 50 m の給電部長 20° の温度変化を想定すれば 1 cm 程度の変化であり、 $4\tau=0.1$ nsec の精度を要求した場合の電気長 3 cm の誤差に比べれば小さいと考えられる。

5. アンテナ駆動タイプ

アンテナ駆動タイプは次の二つに分けることができる。

○ 2次元駆動型 ($X-Y$, $Az-EI$, 赤道儀タイプ)

○ 1次元駆動型 (子午儀タイプ)

アンテナ開口径は 2次元の方が大きくすることができる (地上に固定する部分が増えるだけ支持がしやすく重力の影響を受けにくい。駆動機構が単純) ので有利であるが、VLBI の場合二つのアンテナで同時観測を行う必要があり、2次元駆動の方が望ましい。1次元駆動は赤緯方向に駆動可能で赤経方向は地球の自転を利用するタイプであるが、VLBI の場合二つのアンテナが同じ赤経方向に向いている必要があると同時に片方のアンテナが 2次元駆動であっても観測時間が赤経方向の HWPB によって限定され、積分時間が長くとれない欠点がある。

2次元駆動型については、マウントタイプは $X-Y$ 型、 $Az-EI$ 型、赤道儀型と分かれるが、電波天文では人工衛星のように天頂方向で速く動く電波源を追わないので、 $X-Y$ 型は使用されていない。また赤道儀型は支持構造が $Az-EI$ 型より複雑であり大型のアンテナには不向きで、あまり使用されている例は見られない。しかし、移動型の小型アンテナでは天体を追尾する場合、駆動を赤経方向だけにできるため複雑なプログラム追尾の必要がない点で有利であろう。

6. おわりに

大型開口面アンテナの現状と VLBI システムに用いた場合の測定された遅延時間の誤差と G/T の関係について前半で述べたが、これらは以後の章で述べられるシステムと密接な関係にあり、これらシステムの発展により将来は可搬型の小さいアンテナでも十分精度の測定が可能になるであろう。アンテナシステムの局内遅延とアンテナ駆動タイプについて後半述べたが、一般的な話になってしまい深い検討はできなかった。今後問題点をしぼって検討していきたい。

最後にこの発表の機会を与えて頂いた川尻第三宇宙通信研究室長、高橋富士信技官、林第一衛星通信研究室長、生島鹿島支所長に感謝いたします。また、有益な助言、資料を提供していただいた、手代木主任研究官、吉

野技官、川口技官に感謝いたします。

参考文献

- (1) Collin, R. E. & Zucker, F. J., *Antenna Theory, Part II*, McGraw Hill, 1969.
- (2) Love, A. W., *Radio Science*, **11**, No. 8, 9, pp. 671—684, 1976.
- (3) Ruze, J., *Proc IEEE*, **54**, No. 4, pp. 633—640, 1966.
- (4) Ramasastry, J., *et al.*, NASA/GSFC X—553—72—290, 1972.
- (5) Cha. A. G., Rusch, W. V. T. & Ocoshi, T. Y., *IEEE Trans*, **AP-6**, No. 6, pp. 860—865, 1978.
- (6) 吉野泰造, 尾嶋武之; 電波研季報, **24**, No. 130, pp. 506—509, 1978.

