

《シミュレーションの世界》

電波ホログラフィ法を用いたパラボラアンテナの
鏡面精度測定シミュレーション

石曾根 孝 之*

ABSTRACT Large reflector antennas have been used for millimeter-wave astronomical observation. Improvements in surface accuracy as well as pointing accuracy of these antennas are one of the most important technical problems. For this reason, improvements in the accuracy of surface measurements are necessary. Recently, radio holography has been used universally for the surface measurements of large antennas. In this method, surface error is obtained from the measurements of far field patterns. However, pattern measurements are influenced by system noise and propagation phenomena such as atmospheric phase fluctuation and clutter from the ground. In order to estimate the influence of pattern measurement errors on antenna surface measurements, a simulation method using a radio holographic technique is often used. In the first part of this paper, the principle of radio holography is presented. In the second part, simulation examples of radio holographic technique are demonstrated, and the influence of pattern measurement errors on determination of aperture field distribution is explained.

1. はじめに

現在、電波の利用がミリ波、サブミリ波と高い周波数へと移行しつつあり、このような高い周波数に於いては一般的にパラボラアンテナが送受信アンテナとして使用されている。特に電波天文に於いては微弱な宇宙電波を受信するために、直径10m以上の高精度な大口径パラボラアンテナが不可欠であり、高い感度と角度分解能を実現するためには十分な鏡面（パラボラ面のこと）精度と指向精度が要求される。鏡面精度の向上にはアンテナ構造そのものの高精度化と共に、高精度の鏡面測定技術の確立が必要である。

アンテナ鏡面の測定には、小口径アンテナでは専用のゲージを使った測定、大口径アンテナではレーザ光による測距測角儀を使った測定など機械的な測定方法が用いられてきたが、最近、大口径アンテナに対して高精度で簡便な電波ホログラフィ法による測定が主流となっている¹⁾⁵⁾。

電波ホログラフィ法はベクトル指向性を測定することから始まるが、この測定には長時間を要し、この間

の測定環境の変化が測定結果に影響を及ぼすことが考えられる⁶⁾⁷⁾。ここで取り上げたパラボラアンテナは多くのパネルから構成された大口径アンテナで、各パネルの背後に設置された駆動系を使ってコンピュータ制御により全体として正確な放物面を形成するようにしたものである。ここでは、測定環境が変化する状況において、これらのパネルの一部がズレた場合、このズレがホログラフィ法を使うとどのように検出されるかということについてシミュレーションしている⁸⁾。

なお、現在使われている電波ホログラフィ法は干渉縞の形を記録するものではなく、アンテナの振幅と位相を直接記録するもので、厳密な意味ではホログラフィではないが、ホログラフィ的方法という意味でこの言葉が一般に使われている。

2. 鏡面誤差測定原理

ホログラフィの技術は、光学の分野で確立された技術であるが、電波ホログラフィ法はマイクロ波に適応したもので、パラボラアンテナの指向性を参照アンテナに対する振幅および位相として測定し、そのデータをフーリエ変換することにより鏡面開口の電界分布を算出し、その位相分布のズレから鏡面誤差を測る方法である。

電波ホログラフィ法の測定原理について、図1に示

Simulation of Antenna Surface Measurements Using Radio Holography. By Takayuki Ishizone (Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Toyo University).

*東洋大学工学部電気電子工学科

すような1次元モデルで記述してみる。鏡面開口の基準平面上の電界分布を $E(x)$ とすると、アンテナ開口に比べて十分遠方の ψ 方向の基準化された指向性 $D(\psi)$ は、

$$D(\psi) = \int_{-\infty}^{\infty} E(x) \exp(j2\pi/\lambda)x \sin \psi dx \quad (1)$$

で表すことができる。ここで λ は波長であり、積分範囲はアンテナの存在する範囲である。ここで、 $x/\lambda = X$, $\sin \psi = \phi$ とくと

$$D(\phi) = \int_{-\infty}^{\infty} E(X) \exp(j2\pi\phi X) dX \quad (2)$$

で表されフーリエ逆変換の形になる。したがって、開口基準面の電界は

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} D(\phi) \exp(-j2\pi\phi X) d\phi \quad (3)$$

とフーリエ変換の形で表される。すなわち、 $D(\phi)$ と $E(X)$ はフーリエ変換対の関係にあることが分かる。ただし、積分範囲は ψ で $-\pi/2$ から $\pi/2$ に限られる。

これにより、アンテナ指向性 $D(\phi)$ を測定すれば鏡面開口の基準平面上の電界分布 $E(X)$ が分かる。ここで、パラボラアンテナの鏡面が理想的な（鏡面誤差が無い）場合は、電界分布の位相は一定になるはずであるから、位相にズレがあれば、それがアンテナ鏡面の凹凸（鏡面誤差）として求めることができる。すなわち、何らかの方法でパラボラアンテナのベクトル指向性（複素電界指向性）を測定すると鏡面誤差を推定することができる。これが電波ホログラフィ法の原理である。

実際にはアンテナ鏡面前方での基準平面は2次元であるので、指向性も2次元で測定することになる。指向性を連続的に測定することを走査（スキャン）と呼んでいるが、図2のように直角座標系で走査する場合（ZスキャンとかNスキャンと呼ばれている）、 ϕ と X に対応して直行方向を θ と Y で表せば、次のようになる。

$$D(\phi, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(X, Y) \exp(j2\pi(\phi X + \theta Y)) dX dY \quad (4)$$

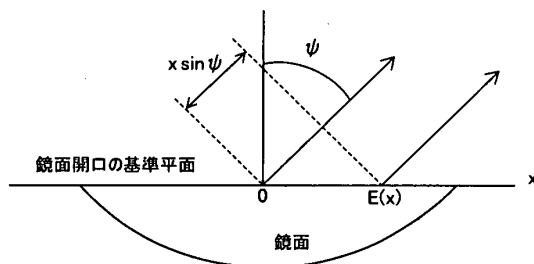


図1 鏡面開口の基準平面上の電界分布と指向性

$$E(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(\phi, \theta) \exp(-j2\pi(\phi X + \theta Y)) d\phi d\theta \quad (5)$$

実際の指向性の測定は有限の角度範囲に限られ離散的に行われている。1次元モデルで説明すると、指向性 $D(\phi)$ の測定を標本化して測定した場合、鏡面開口の電界分布 $E(X)$ も標本化して求められることになる。 ϕ および X 領域での標本化の間隔をそれぞれ ϕ_0 , X_0 とし、標本の数を M , N （偶数）とすると、離散フーリエ変換対は次式で表すことができる。

$$D(n\phi_0) = X_0 \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} E(mX_0) \exp(j2\pi n m \phi_0 X_0) \quad (6)$$

$$E(mX_0) = \phi_0 \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} D(n\phi_0) \exp(-j2\pi n m \phi_0 X_0) \quad (7)$$

ここで、 $\phi_0 = 1/(MX_0)$, $X_0 = 1/(N\phi_0)$ の関係にあるので、 $M=N$ となる。これらのことから明らかなように、 X 領域の画面の大きさにより測定ステップ ϕ_0 が決まり、測定の角度範囲を大きくとるほど X 領域の分解能は高くなる。2次元においても同様な離散フーリエ変換を行うことができる。

3. シミュレーションの概略⁸⁾

ここでは、シミュレーションの大まかな流れを説明する。まず、開口面電界分布の振幅を仮定し、位相は一定であるが凹凸状にズレたパネルに相当する場所にはズレの程度に相応した鏡面位相誤差を与えたものを作成する。この状態でベクトル指向性（複素電界指向性）を離散逆フーリエ変換で算出し、指向性の振幅値と位相値を求める。次に、測定の際に生ずる誤差を正規乱数で発生させ、これを先に求めた指向性の振幅値、位相値あるいは両方に加える。最後に、この変形されたベクトル指向性を離散フーリエ変換して開口面の電界分布を算出し、パラボラアンテナ部分のみを取り出して位相分布を求める。測定の際に生ずる誤差として位相誤差、振幅誤差、両者の複合誤差の3タイプについて調べている。

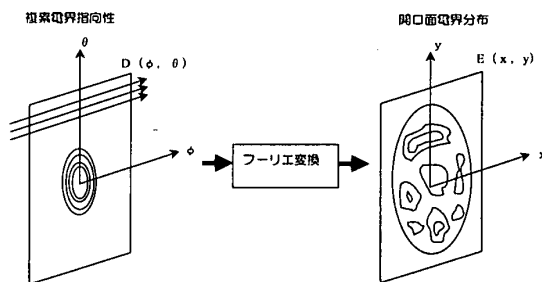


図2 電波ホログラフィ法の原理⁴⁾

4. シミュレーション例

ここでシミュレーションしたパラボラアンテナは開口径 $D=4\text{m}$ 、波長 $\lambda=13.5\text{mm}$ 、標本化数 $M \times M=64 \times 64$ 、標本間隔はそれぞれ $\phi_0=0.15$ 度、 $X_0\lambda=8\text{cm}$ である。また、開口面電界の振幅は一様分布と仮定し、パネルの鏡面位相誤差は30度 (1.125mmのズレ) としている。

図3、4は測定の際に生ずる誤差を位相誤差としたときの結果で、正規乱数の分散が0度、30度、60度の場合について計算している。図3は開口面の位相分布を等位相線表示したもので間隔は15度である。図4は開口面標本点位相の正規化度数分布である。パネル部の度数分布とパネル部外の度数分布が重なるようになると鏡面誤差を起こしている場所が判別できなくなる。ここで、鏡面誤差の無いときの開口面の位相を180度としている。

図5、6は測定の際に生ずる誤差を振幅誤差としたときの結果で、正規乱数の分散がビーム方向の放射電力に対して-50dB、-45dB、-40dBの場合について計算している。

図7は測定の際に振幅誤差と位相誤差の両方が存在したときの結果で、振幅の正規乱数分散が-50dB、位相の正規乱数分散が30度の場合について計算している。

以上のシミュレーションは直角座標系で指向性の測定を行う場合であるが、指向性の測定を極座標系で、すなわち、径方向に走査し、方位角を変えながら同じことを繰り返し行う場合 (ラジアルスキャンと呼ばれ

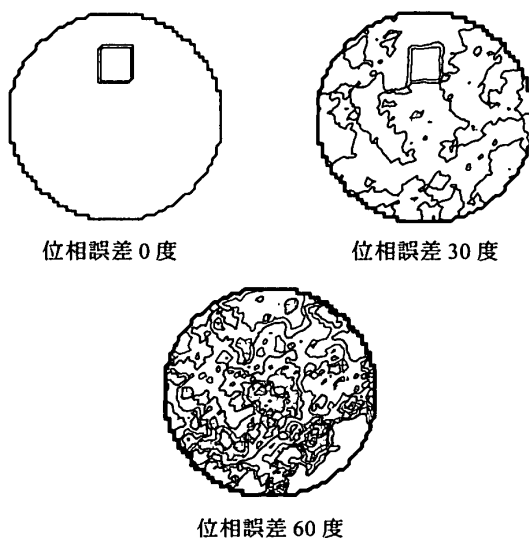


図3 位相誤差の影響を受けた開口面の等位相線
パネルの鏡面位相誤差30度
等位相線の間隔15度

ている) には、式 (4)、(5) のフーリエ変換対に代わるものとして次のフーリエ変換対が成り立つ。

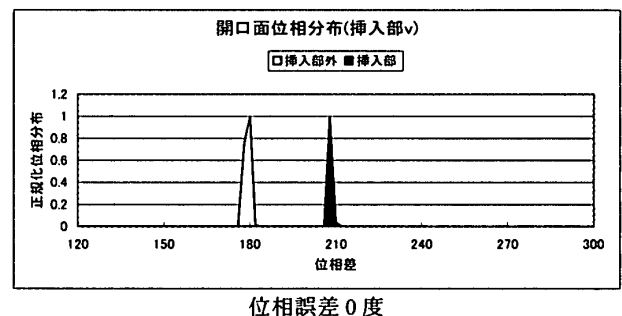
$$D(r, \phi) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} E(R, \theta) \exp(j2\pi r R \cos(\theta - \phi)) R |dR d\theta \quad (8)$$

$$E(R, \theta) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} D(r, \phi) \exp(-j2\pi r R \cos(\theta - \phi)) r |dr d\phi \quad (9)$$

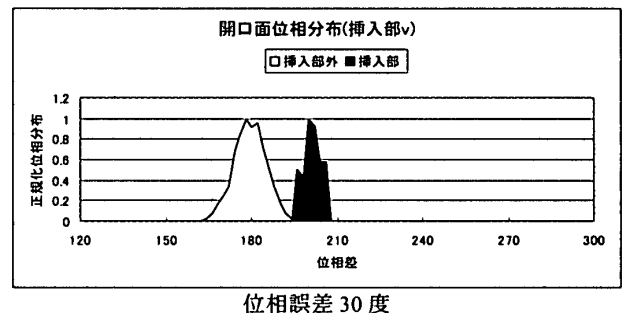
ここで、 R 、 r は径方向の変数、 θ 、 ϕ は方位角方向の変数である。図8は測定の際に振幅誤差と位相誤差の両方が存在したときのシミュレーション結果で、図7と同じ条件、すなわち、振幅の正規乱数分散が-50dB、位相の正規乱数分散が30度の場合について計算している。

5. おわりに

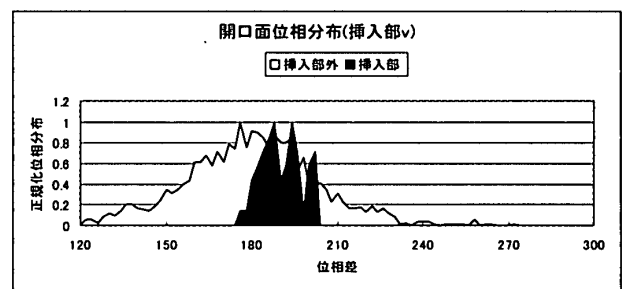
ここでは鏡面位相誤差30度 (パネルのズレは1.125mm) の場合を例にしてシミュレーションを行い、電波ホログラフィ法が鏡面誤差測定に使える手段であることが理解できたと思う。この方法を使って、国内



位相誤差 0 度



位相誤差 30 度



位相誤差 60 度

図4 標本点位相の正規化度数分布
パネルの鏡面位相誤差30度

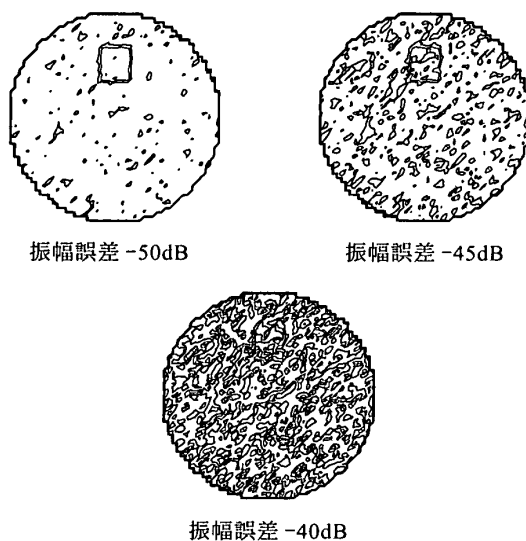
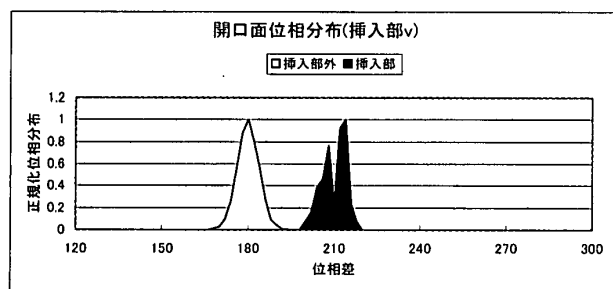
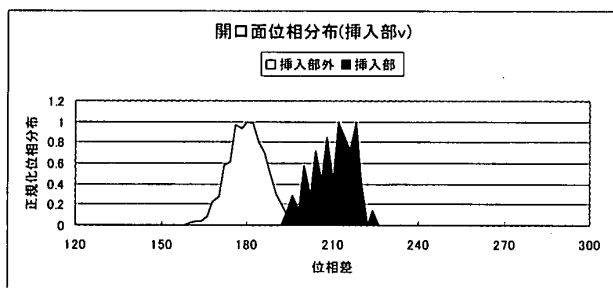


図5 振幅誤差の影響を受けた開口面の位相分布の等位相線

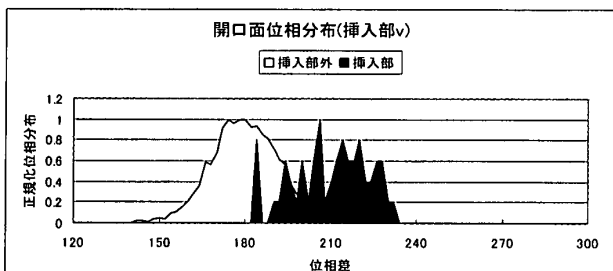
パネルの鏡面位相誤差 30 度
等位相線の間隔 15 度



振幅誤差 -50dB



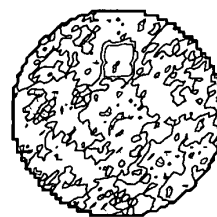
振幅誤差 -45dB



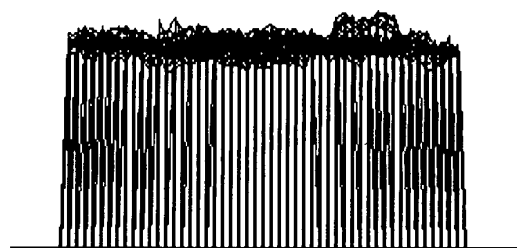
振幅誤差 -40dB

図6 標本点位相の正規化度数分布
パネルの鏡面位相誤差 30 度

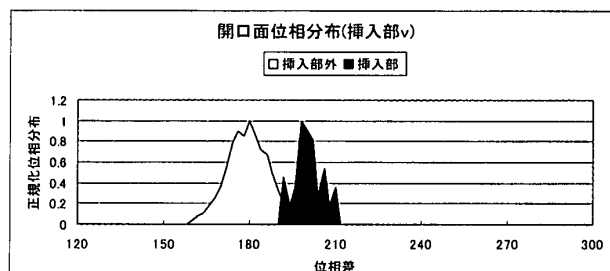
では田中春夫等(1985)により東洋大学4mφパラボラアンテナで実験が行われた³⁾。これは、小型の参照アンテナを被測定アンテナの1次焦点付近である主軸上におき、信号源を地上に置いた実験であった。この結果、信号源を地上に置く場合は、多重反射経路による合成波面の乱れ等が測定誤差に大きく影響を及ぼし、0.1mm (rms) の精度が限界であった。その後、人工衛星を信号源としたシステムが国立天文台野辺山の45mφパラボラアンテナに応用された^{4,5)}。これにより、1991年には65μm (rms) の精度の再現性が達成されている。このように電波ホログラフィ法を使った鏡面測定は実用化されているが、測定精度の限界を決定する要因として、1) 測定時間がかかるために測定環境の変化による影響、2) アンテナのポインティング (ビーム中心) 誤差、3) 大気による位相ゆらぎ、4) システム雑音、が考えられている。したがって、これらの要因を考慮したシミュレーション技術が鏡面誤差測定精度の向上に役立てることができればと思う。



(a) 振幅誤差と位相誤差の影響を受けた開口面の等位相線

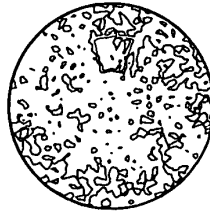


(b) 振幅誤差と位相誤差の影響を受けた開口面の位相分布の3次元表示

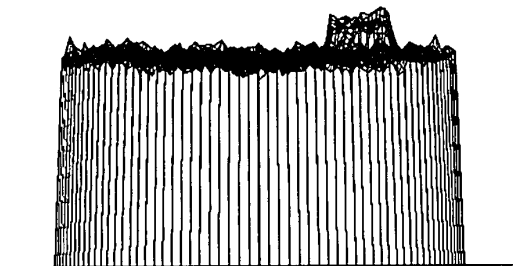


(c) 標本点位相の正規化度数分布

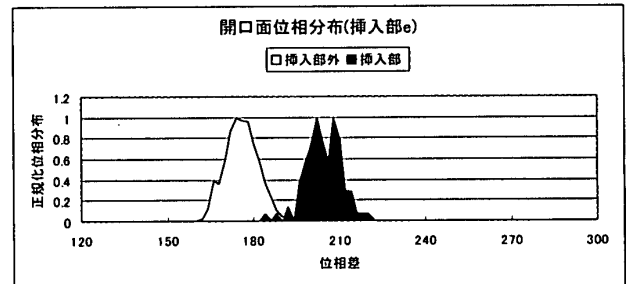
図7 鏡面位相のシミュレーション結果 (直角座標系)
パネルの鏡面位相誤差 30 度
振幅誤差 -50dB 位相誤差 30 度



(a) 振幅誤差と位相誤差の影響を受けた開口面の等位相線



(b) 振幅誤差と位相誤差の影響を受けた開口面の位相分布の3次元表示



(c) 標本点位相の正規化度数分布

図8 鏡面位相のシミュレーション結果(極座標系)
 パネルの鏡面位相誤差 30 度
 振幅誤差 -50dB 位相誤差 30 度.

参 考 文 献

- 1) J.C.Bennett, A.P.Anderson, P.A.McInnes and J.T.Whitaker: Microwave Holographic Metrology of Large Reflector Antennas, IEEE Trans., AP-24, 3, 295/303 (1976)
- 2) C.E.Mayer, J.H.Davis, W.L.Peters and W.J.Vogel: Electromagnetic Measurements of Large Reflector Antennas, IEEE Trans., IM-32, 1, 102/109 (1983)
- 3) 田中春夫, 他: 電波ホログラフィーによる鏡面測定装置の開発, 昭和 59 年度科学研究費補助金試験研究 (I) 研究成果報告書 (1986)
- 4) 石黒正人, 他: 電波ホログラフィ法による高精度鏡面測定の開発, 信学技報, A・P87-28, 67/74 (1987)
- 5) 石黒正人, 他: 電波ホログラフィ法を用いた鏡面精度測定に及ぼす開口照度分布の影響, 信学技報, A・P87-29, 75/80 (1987)
- 6) 春日 隆, 他: ミリ波干渉計で観測される位相の大気による変動とその周波数依存性, 信学技報, A・P89-49, 29/34 (1989)
- 7) 森田 徹, 他: 電波ホログラフィ法による電波干渉計の鏡面精度測定, 信学技報, A・P93-16, 105/110 (1993)
- 8) 石曾根, 他: 開口面分布の測定に及ぼす伝搬位相誤差の影響, 第 18 回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, 2 II 15, 257/260 (1997)