

## V-7. 位相シンチレーションの測定

河野宣之\*, 尾嶋武之\*\*

### MEASUREMENTS OF PHASE SCINTILLATION

By

Nobuyuki KAWANO and Takeyuki OJIMA

#### 1. ま え が き

人工衛星や天体電波源から輻射されるマイクロ波やミリ波は、伝搬路の屈折率の不均一性やゆらぎによって、入射角が変動したり、マルチパスとなってアンテナに入射する。特に、ミリ波では大気の詳細な屈折率の変化や降雨、雲の影響を受け、入射角や位相変動を生じる。マルチパスによる入射角の広がり、あるいは位相差の分布の広がりを受信電界強度を弱め、その変動はアンテナ追尾精度を劣化させる。また、入射角の広がりや速い変動は実質的にアンテナ利得を低下させることに等しく、ミリ波帯のアンテナの設計上、考慮しなければならないし、アンテナの最適な追尾を行うために検討しなければならない。一方、ミリ波帯でVLBIを行う場合には、位相変動(位相シンチレーション)は、特に重要である。電波星を観測対象にすると、広がり小さい電波星の多くは、シンクロトロン輻射をしていると考えられており、その強度は、 $f^{-\alpha}$  ( $f$  は観測周波数)に比例するので、ミリ波帯では急激に弱くなる。したがって、通常の電波星を、VLBIで観測する場合は数秒以上の積分時間を必要とする。位相シンチレーションは、その性質上予測が不可能であるから、数秒間に大きな位相変動を生じると、もはや電波星の検出は不可能となる。このように位相シンチレーションや位相差の変動(入射角については一定の仮定のもとに位相量から導出できる)は、マイクロ波あるいはミリ波を受信し、利用する際に重要となる。また、これらの量は、記述されるパラメータの値によって著しく異なるために、ある特定の状態、特定の条件下で求められるだけでは現象の把握は十分できない。したがって、長期間でしかも実際の構成(衛星通信や電波星の観測を目的とする場合には大気圏を横切る伝

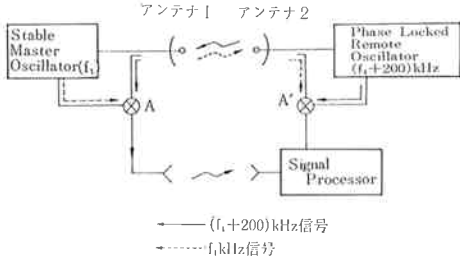
搬路)で測定しなければならない。

#### 2. 位相シンチレーションの観測方法

位相の測定は、当然ではあるが、基準となる信号と受信した信号の位相差を求めることであるから、基準となる信号をそのまま送信点から受信点に、いかにして送るかが問題となる。基準信号を同軸ケーブルで送ると、ケーブルの温度変化等によって位相変動を受けて、受信波の伝搬媒質による位相変動と、ケーブルの変化によるそれとの和を求めることになり、目的とする伝搬媒質の位相変動を正確に測定することはできない。(これがVLBIを生む発端となった)。地表数10kmではケーブルによる変動は小さいが、衛星-地上間ではこの方法は不可能となる。そこで、極めて安定な原振を送受信点の両方に置き、受信信号と原振から作られる信号とを位相比較すれば、理想的な位相の測定が可能となる。しかし、この方法も衛星-地上間については、衛星に極めて安定な原振を搭載しなければならず容易には行えない。このような理由から、従来、位相の測定に次の方法がよく用いられた。すなわち、互いにコヒーレントな多周波を同時に送信し、受信点では基準とする周波数の受信信号にPLLを通して他の周波数を作り、受信信号と位相比較を行う<sup>(1),(2)</sup>。この方法は、いわば周波数に対する微分位相変動を測定するのであって、直接的でない。特に、周波数が近いと伝搬媒質の影響を等しく受け、周波数が離れると、それぞれ異った原因による位相変動を受けることになる<sup>(3)</sup>。一方、空間的に受信点を離して、相互の位相差を求める方法<sup>(4),(5),(6)</sup>も考えられている。この方法は位相変動の空間的な相関を求めるものであるから、位相変動の絶対量は得られない。地上で伝搬距離が比較的短いときには、第1図に示されるシステム<sup>(7)</sup>で位相変動を測定できる。アンテナ1側とアンテナ2側の発振器の周波数をわずか(例えば200kHz程度)にずらしておい

\*鹿島支所 第三宇宙通信研究室

\*\*衛星研究部 通信衛星研究室



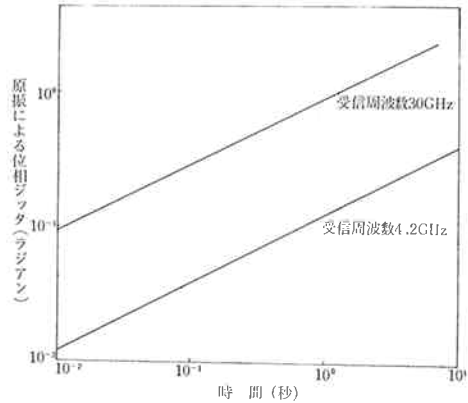
第1図 位相シンチレーション測定システムの1例

て相互に送り合い、ミキサA、A'でこのビートをとり、別のアンテナでビート信号を送って位相比較する。このシステムに必要な周波数安定度は、伝搬時間内のそれであるから有利である。

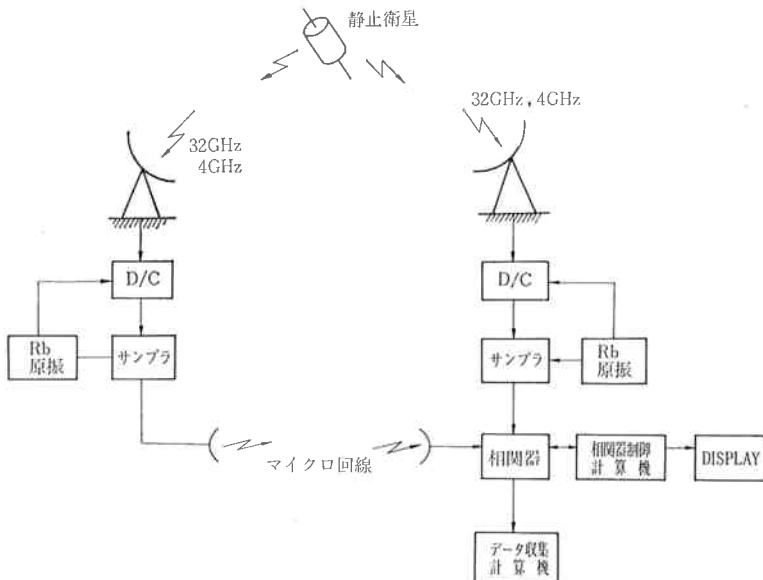
我々はこのような方法とは異り、VLBIシステムを利用して、伝搬遅延時間及び位相を測定する計画を進めている。この方法は、アンテナを遠く離れた2地点で同時に観測するのであるから、各々の伝搬路で受ける位相変動は独立と考えられる。一方の伝搬路で降雨や雲等が発生すると、その影響を受けて位相変動が変わり、両方に発生した場合は、屈折率のゆらぎが等しければ位相変動の分散の2乗は、2倍になると予想される。VLBIを利用する方法の最大の欠点は、原振の位相ジッタのために、比較的長周期の変動を求めることができないことである。受信点における位相変動を直接求めるのではなく、2受信点間の位相差の変動を求める点については、統計的にはほとんど問題はないであろう。

### 3. VLBI を利用した衛星—地上間 位相シンチレーションの測定

我々の計画しているVLBIを利用した衛星—地上間位相シンチレーション測定システムを、第2図に示す。この方法の特徴は、衛星から送信される雑音を、帯域幅2MHzで受信し相互相関スペクトルから各周波数の位相差を求めるので、信号対雑音比が大きくなり、1msから10msの積分時間で数度の位相差を検出できる。したがって、これまで得られていない1Hzから100Hzまでの高い周波数の位相シンチレーションを知ることができる。しかし、既に述べたように、両局原振の周波数安定度に従って、両局の原振から生ずる予測できない位相



第3図 原振による位相ジッタ



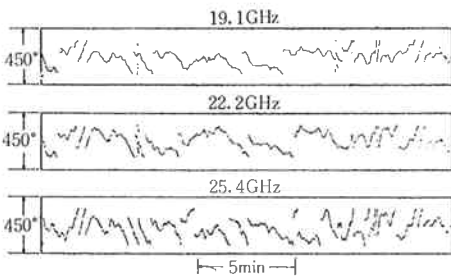
第2図 位相シンチレーション測定システムの概要

差が時間に比例して大きくなるので、長時間にわたる位相変動を求めることができない。第3図は、両局の原振として \$R\_0\$ 周波数標準器を選んだ場合の、原振による位相差の r.m.s. を示している。連続したデータとして扱える時間の基準として原振による位相ジッタが1ラジアンに達する時間に選ぶと、受信周波数が30 GHz のときは約1秒、また、4.2 GHz の場合は約1分である。しかし、実際には位相ジッタはランダムに変化するものであり、一方向に増加するのではないから、更に長時間可能になると予想される。

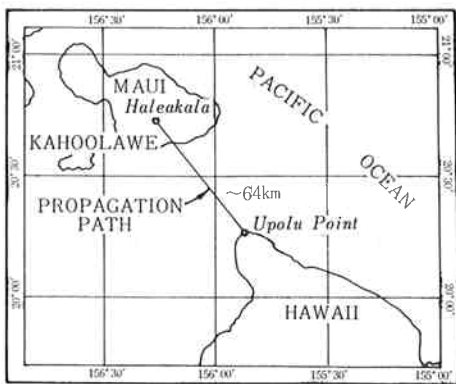
4. 測定する量と観測例

位相シンチレーションの数値的な検討は Tatarski<sup>(6)</sup>, Wheelon<sup>(9)</sup>, Muchmore 等<sup>(4)</sup> や Ishimaru<sup>(10)</sup> らによってなされているので、ここでは詳細に述べず、測定する量と観測例を示すことにする。

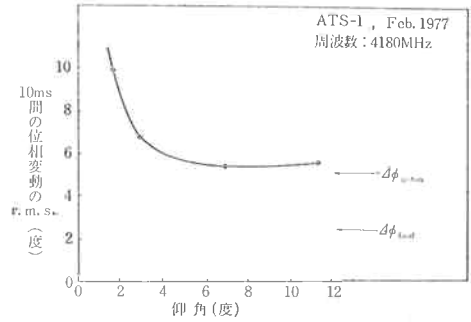
位相変動は、アンテナビーム方向における屈折率のゆらぎによるもので、その変動の速さは、空間的な相関関数のスケールと移動速度によって決まる。第4図(a)は三つの周波数で同時に位相シンチレーションを観測した結果<sup>(11)</sup> であり、同図(b)はその伝搬路を示している。いずれの周波数でも、1分で \$4\pi\$ ラジアン以上も変動している場合もあり数秒の変動も見られる。第5図、は鹿島一横



第4図 (a)位相シンチレーションの観測例



第4図 (b)伝搬路の概略



第5図 低仰角における衛星電波の位相シンチレーション

須時間で行ったV L B Iの観測結果である。静止衛星ATS-1は両アンテナに対して仰角11度から1.7度まで変る。各仰角における約10ms間の位相変動量のr.m.s.は、第5図に示されるように仰角の減少により急激に変動量が大きくなる。仰角が低くなるとシンチレーションが増加するのは、乱れの激しい地上数kmの伝搬路が長くなることで理解できる。ここでは測定数が少ないので、詳細な検討はできないが、データ処理が進めば数値的に検討することが可能になるであろう。

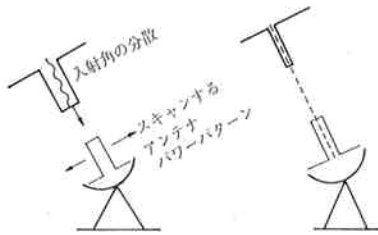
位相差の変動からそれが生じた位置とアンテナまでの距離がわかれば、到来波の入射角の変動を求めることができる。上に述べた10msから100ms程度の速い入射角の変動は、アンテナの駆動速度と関係して重要である。一般に大型アンテナは10Hzから100Hz以上の速い駆動は不可能であるから、入射角の変動が大きい場合は、追尾誤差が大きくなり、実質的にアンテナの利得は低下してしまう。これは、次に述べる位相差の分散とも関連して、アンテナの直径の限界を与える。

次に、位相差の分散について述べる。これまでは位相差の平均値の変動について、実際の観測例を示したが、アンテナに入射する電波は、雨、雲や大気屈折率の空間的な不均一性により種々の方向から到来している。位相差の分散、あるいは入射角の分散はアンテナの利得を低下させる。Weelon と Muchmore<sup>(9)</sup> とは散乱による位相差の分散とアンテナ入射角の分散及びこれらから受信信号強度の低下を理論的に求めている。すなわち、入射角の分散 \$\sigma\_\theta\$ は、

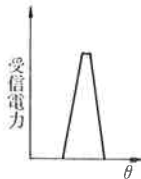
$$\sigma_\theta^2 \sim \sqrt{\pi} \cdot \left| \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_0} \right|^2 \cdot \frac{L}{l_0} \dots\dots(1)$$

である。ここで \$\epsilon\_0\$ は屈折率の平均値、\$\Delta \epsilon\$ は平均値からの差、\$L\$ は散乱を受ける領域の長さ、\$l\_0\$ は乱れのスケールとしている。\$\Delta \epsilon / \epsilon\_0\$ を \$10^{-6}\$、\$L\$ を100km、\$l\_0\$ を100mと仮定すると、\$\sqrt{\sigma\_\theta^2}\$ はおよそ \$2 \times 10^{-3}\$ 度となる。

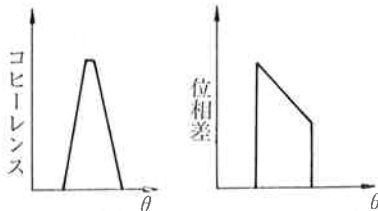
入射角の分散の測定は、アンテナのビーム幅が大きい場合には非常に困難となる。しかし、原理的には可能



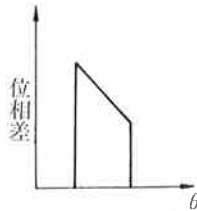
第6図 (a)入射角の分散とアンテナパワーパターン



第6図 (b)アンテナをスキャンしたときの受信電力



第6図 (c)アンテナをスキャンしたときのコヒーレンス



第6図 (d)アンテナをスキャンしたときの位相差

で、散乱領域が生じたときのアンテナビーム幅の広がりから得られる。すなわち、伝搬路上に散乱領域がないときのアンテナパワーパターンを  $P(\theta)$ 、発生したときの到来波の入射角に対する電力分布を  $S(\theta)$  とすると、発生したときのアンテナパワーパターン  $P'(\theta)$  は、

$$P'(\theta) = \int S(\theta') \cdot P(\theta' + \theta) d\theta' \quad \dots\dots(2)$$

となるから  $P'(\theta)$  及び  $P(\theta)$  より  $S(\theta)$  を求めることができる。この測定はアンテナを電波源に対してスキャンすることに等しい。しかし実際には減衰等により乱されることが予想される。次に、(2)式の  $P'(\theta)$  及び  $P(\theta)$  を直接測定するのではなく、VLBIを利用して、二つのアンテナで受信する信号のコヒーレンスと位相差が、アンテナビーム方向に対してどのような性質をもつか検討してみることにする。第6図(a)に示されるように、アンテナ1に対する伝搬路上にはマルチパスを生ずる領域は無く、アンテナ2に対してこのような領域がある場合、アンテナについて電波の入射角の中心から微小角  $\theta$  だけ異った方向で受信した場合のコヒーレンスと、位相差、すなわち、 $C(\theta)$  及び  $D(\theta)$  を測定する。 $C(\theta)$  をアンテナコヒーレンス・パターン、 $D(\theta)$  をアンテナ

位相差パターンと呼ぶことにする。そうすれば  $C(\theta)$  は電波の入射角に対する電力分布に関係した量であるから式(2)  $P'(\theta)$  に相当する。一方、 $D(\theta)$  は入射角における伝搬路長の差に等しく、 $\theta$  が小さく、第1図(a)のような入射角の分布、アンテナ・パワーパターンであれば、 $\theta$  に比例して変化する。位相差と入射角から、マルチパスを生ずる領域までの距離が求められる。一方、両方のアンテナを入射角の、ほぼ中心方向に向けて固定した場合、マルチパスを生ずる領域までの距離が与えられれば、位相差から入射角の中心の変動を求めることができる。特に、 $D(\theta)$  の測定は、入射する電波の電界強度の変化による影響を受けない。このように、アンテナ・コヒーレンス・パターンとアンテナ・位相差・パターンという二つの新しい量を導入することにより、位相シンチレーションの興味ある測定が可能となる。

### 5. あとがき

一般に大型アンテナは、衛星や天体電波源を観測する目的で作られているのであるから、位相シンチレーションの測定は、衛星一地上間あるいは天体電波源一地上間の伝搬路で測定しなければ、実用に供さない。我々は位相シンチレーションの新しい測定法として、VLBIを利用することを提案した。地上の伝搬路については、既に種々の周波数で測定されていて、理論的にも詳細に検討されている。しかし、衛星一地上という実際の伝搬路では、どのような位相シンチレーションを生ずるか興味を持たれる。VLBIを利用した測定方法の欠点は、原振の周波数安定度によって、データの連続性が制限されることにある。したがって、長時間の周期のものを得るには、水素メーザ型の原子周波数標準器を原振として用いることが望まれる。

終わりに、本計画を進めるにあたり、多大な御援助を頂く畚野、吉村両主任研究官を初め、CBE本部の方々に感謝の意を表します。

### 参考文献

- (1) Woo, R.; "Multifrequency techniques for studying interplanetary scintillations", Ap. J., 201, pp. 238—248, Oct. 1975.
- (2) Woo, R., Yang, F.C., Yip, K.W. and Kendall, W.B.; "Measurements of large-scale density fluctuations in the solar wind using dual-frequency phase scintillations", Astrophys. J. 210, pp. 568—574, Dec. 1976.
- (3) 藤田正晴, 阿波加純; "技術試験衛星II型(ETS-

- II) 「きく2号」による電波伝搬実験結果の速報”, 電子通信学会, AP-77-85, pp. 23-28, Dec. 1977.
- (4) Muchmore, R.B. and Wheelon, A.D.; “Line-of-sight propagation phenomena I. Ray treatment”, Proc. IRE, 43, pp. 1437-1449, 1955.
- (5) Baars, J.W.M.; “Meteorological influences on radio interferometer phase fluctuations”, IEEE, AP-15, pp. 582-584, July 1967.
- (6) Basart, J.P., Miley, G.K. and Clark, B.G.; “Phase measurements with an interferometer baseline of 11.3km”, IEEE Trans. AP-18, No. 3, pp. 375-379 May 1970.
- (7) Thompson, M.C. and Vetter, M.J.; “Single path phase measuring system for 3 cm radio waves”, Rev. Sci. Instr., 29, pp. 148-150, 1958.
- (8) Tatarski, V. I., Wave propagation in a turbulent medium. McGraw-Hill, New York, 1961.
- (9) Wheelon, A.D. and Muchmore, R. B. ; “Line-of-sight propagation phenomena II. Scattered components”, Proc. IRE 43, pp. 1450-1458, Oct. 1955.
- (10) Ishimaru, A. ; “Fluctuation of a beam wave propagation through a locally homogeneous medium”, Radio Sci., 4, pp. 295-305, 1969.
- (11) Thompson, M. C., Wood, L.E., Janes, H. B. and Smith, D. ; “Phase and amplitude scintillations in 10 to 40 GHz”, IEEE Trans. AP-23, No. 6, Nov. 1975.

