

## V-10. 衛星—衛星間 VLBI

河野 宣之\*

### VLBI BETWEEN GEOSTATIONARY SATELLITES

By

Nobuyuki KAWANO

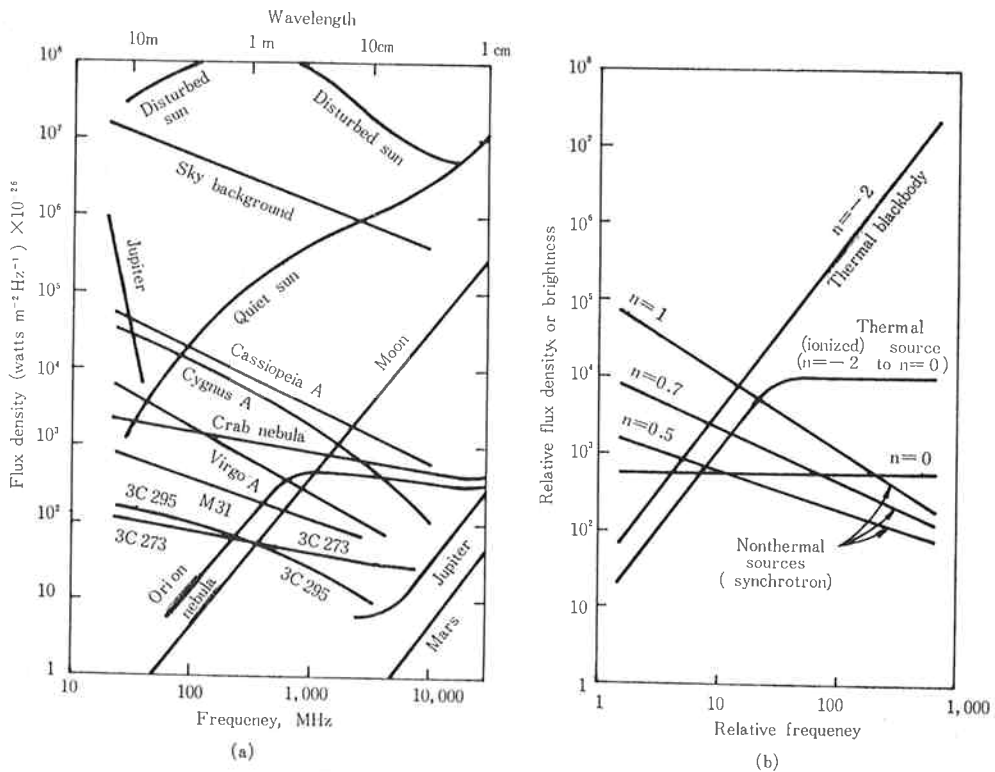
#### 1. ま え が き

この提案は、電離層にさえぎられて地上で観測できないヘクトメートル波帯の電波観測を高分解能で行うために、二つの静止衛星にVLBI装置を搭載し、二つの衛星間でVLBIを行おうというものである。VLBI装置を衛星に搭載しようとする、地上では容易に実現できたこともかなり困難になる。例えば、高安定な周波数源や二つの衛星間の距離の変動の精密測定、地上へのデータ伝送等がまず考えられる。また、受信周波数が数メ

ガヘルツであることにより、伝搬路における太陽風の電子密度変化が位相シンチレーションを生じ、VLBIにおける相関の積分時間を長くとれなくなる。このように、衛星—衛星間は基本的でかつ困難な問題をもっている。ここでは予想される問題点について、個々に調査し、実現の可能性について検討する。

#### 2. ヘクトメートル波帯の主な電波源

静止衛星の位置（地球中心より、およそ4万4千km）で観測されうると予想される主な電波源について、第1



第1図 (a) 代表的な電波源のスペクトル (b) 理論値、ただし、フラックス  $F$  と周波数  $f$  の関係を  $F \propto f^{-n}$  で表す。(Kraus, J.D., Radio Astronomy, McGraw-Hill Book Co., 1966)

\*鹿島支所 第三宇宙通信研究室

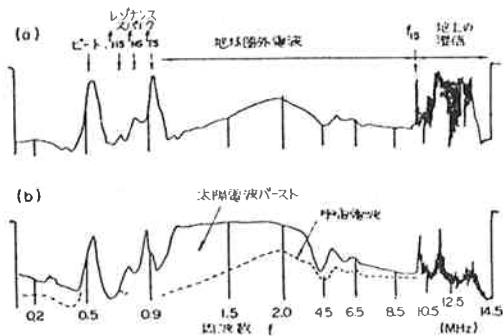
図<sup>(1)</sup>に示す。ヘクトメートル波帯の電波観測は太陽電波と銀河背景雑音を除き、ほとんど行われていないので、第1図に示される各電波源について、外挿してこの周波数帯の電波強度を予想せざるを得ない。第1図より、ヘクトメートル波帯では木星が最も強く、次いで強い銀河背景雑音のフラックス密度に比べて数オーダも大きい。太陽はバースト等が生じた場合は、背景雑音と同程度か少し弱い程度であろう。背景雑音を除き太陽系外で最も強い電波源はカシオペア A であるが、背景雑音に比べて、およそ2オーダ弱い。第2図<sup>(2)</sup>は、電離層観測衛星 Alouette II による外来雑音強度を示し、図中地球圏外電波の強度が明らかにされている。第3図<sup>(3)</sup>は、この結果

得られた背景雑音の輝度スペクトルを示す。数メガヘルツ以下で弱くなるのは、銀河内の free-free 吸収によるものと考えられ、第4図に示されるように、銀河中心方向でむしろ強度は小さくなっていることから明らかである。このようにヘクトメートル波帯で受信される電波は、木星によるものが最も強く、次いで数オーダ弱いが、背景雑音とバーストが生じたときの太陽、更に、2~3オーダ弱く、カシオペアAやシグナスAによるものが続く。

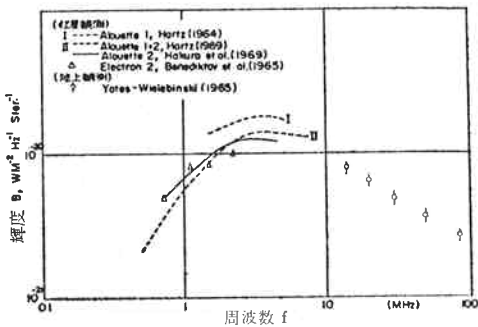
3. 太陽風による位相シンチレーション

ヘクトメートル波を受信して、相関をとる際に太陽風による位相シンチレーションが問題になる。I-2. VLBIの原理で述べた  $\gamma_y - \gamma_x$  なる伝搬路の媒質による遅延時間、位相の変化は一般に予想できず、この変化が速く、しかも大きいと、相関値を積分できる時間はそれだけ短くなり、したがって、弱い電波源の観測は不可能になる。太陽風の電子密度変化は、人工惑星により克明に調べられている。第5図は、この結果から得られた地球公転軌道付近の磁場の変化の“パワースペクトル”である<sup>(3)</sup>。電子から磁場に凍結されている場合は磁場の変化は、電子密度の変化にほぼ等しいと考えてよい。第6図は同じく、S/Xバンド2周波の位相差<sup>(4)</sup>、IPS (Interplanetary Scintillation)<sup>(5)</sup>、マリナー10号のスペース・プローブから得られた<sup>(6)</sup>電子密度の変化の“パワースペクトル”を示している。電子密度の変化と位相の変化の関係は<sup>(3)</sup>、

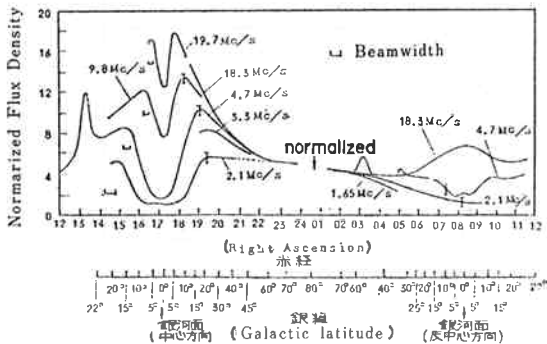
$$\phi_0^2 = \frac{\epsilon^2}{2 \omega^2 c^2} \int_R^\infty \omega_p^4 L (r^2 - R^2)^{-\frac{1}{2}} r dr \dots (1)$$



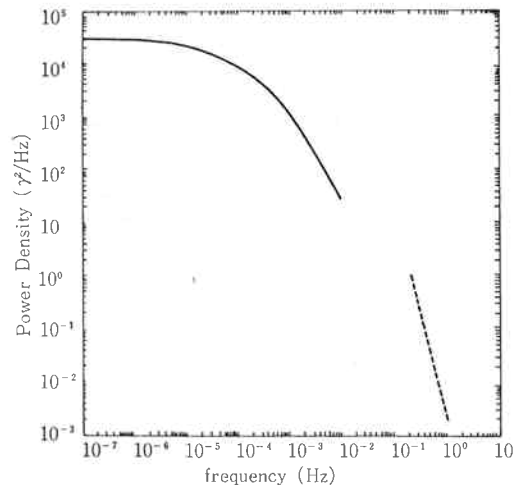
第2図 Alouette で受信した外来雑音強度



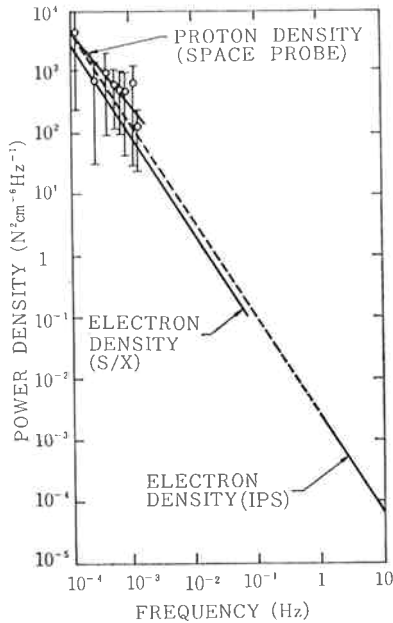
第3図 銀河系雑音の輝度スペクトル



第4図 赤緯-37°における銀河電波雑音フラックス密度の赤経(銀緯)分布 (Ellis-Hamilton, 1966).



第5図 太陽風磁場のパワースペクトル



第6図 太陽風電子密度のパワースペクトル

である。ここで  $\phi_0$  は位相の変化の rms,  $\varepsilon$  は電子密度の変化率,  $\omega$  は受信周波数,  $c$  は光速,  $\omega_p$  はプラズマ周波数,  $R$  は伝搬路の太陽からの距離,  $L$  は実際の correlation length である。  $L$  を  $5 \times 10^3$  km にとれば,

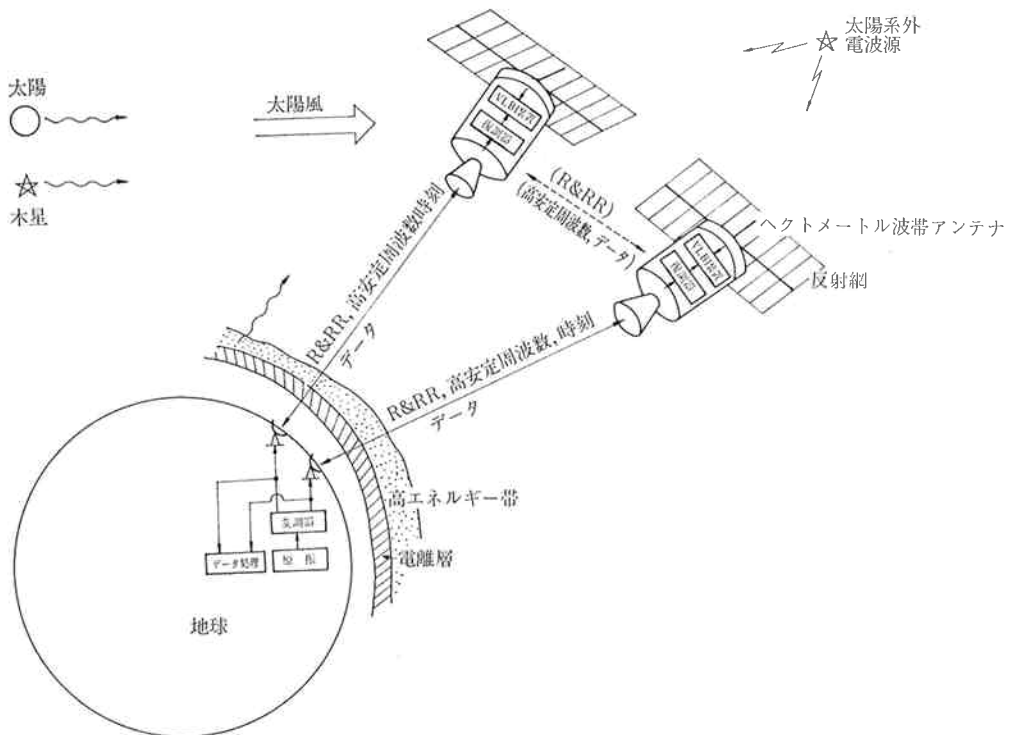
$$\phi_0 = 7 \times 10^3 \times \varepsilon \times \rho^{-\frac{3}{2}} / f_{100} \dots (2)$$

ここで,  $\rho$  は伝搬路の太陽半径を単位とする太陽中心からの距離,  $f_{100}$  は 100 MHz を単位とした周波数である。

(1), (2) 式から静止衛星間の距離を 5000 km, 受信周波数を 2 MHz, 伝搬路の  $\rho$  を 200, すなわち地球の公転軌道を取り,  $\varepsilon$  を第4図又は第5図から求めると,  $\phi_0$  が 1 より小さくなるのは, 周波数 1 Hz から 0.1 Hz の間である。すなわち, 100 ms から 1 sec の積分しかできないことになる。しかし, この値は, 二つの衛星が全く異った電子雲の中に入った場合を仮定すると, 太陽風の correlation scale は  $2 \times 10^6$  km といわれているから, 実際には,  $\phi_0$  は大きなドリフトに重畳した高い周波数成分になる。したがって, 観測する方向によっては, 更に短い積分時間しかとれないことも考えられる。

#### 4. 高安定な周波数の供給と時刻同期

例えば, 受信周波数を 2 MHz, 帯域幅を 500 kHz にとるとサンプリング周波数を 1 MHz 以上にしなければならない。このときまず周波数をダウンコンバートするための 1.5 MHz の高安定な周波数源を必要とし, 次に, 1 MHz でサンプルするための高安定な 1 MHz の周波数源を必要とする。したがって, これらの原振に用いる発振器の周



第7図 衛星-衛星間 VLBI の模式図

波数安定度は  $10^{-8}$  から  $10^{-10}$  程度でなければならないが、現在、衛星に搭載されている原振（水晶発振器）は  $10^{-5}$  から  $10^{-7}$  である。水晶発振器の周波数安定度は、一般に温度の  $\frac{1}{2}$  乗に比例して悪化する<sup>(7)</sup>。したがって、高安定にするには、発振器の温度を制御しなければならないが、衛星で使用する電力及びその重量を軽減するために装着していない。

高安定な周波数を供給する方法としては二つの方法が考えられる。まず、従来から行われている衛星に搭載する原振（水晶発振器）を高安定なものにすること。もう一つは地上から送信することである。前者の場合は、前に述べたように電力及び重量の増加を見込む必要がある。後者については、更に詳しい検討が必要であろう。第7図は、地上局から衛星に高安定な周波数を送る際の概略図である。静止衛星は地球の自転と完全には同期していないから、地上局と衛星間の距離は絶えず変動している。したがって、地上から高安定な周波数を送信する際には、地上局と衛星間の距離の変化に伴うドップラを補正して受信しなければならない。NASA 応用技術衛星 ATS-1 における距離 ( $R$ ) と距離変化率 ( $RR$ ) 及び、電波研究所の開発した“SSRR 拡散変調方式による測距装置”を用いて  $R$  &  $RR$  の測定を行ったときの測定誤差を、第1表に示す<sup>(8)</sup>。第1表から明らかなように 2 MHz の周波数を送信する場合、最大 1 Hz 以上のドップラの補正を行う必要がある。第6図の変調器は、中性大気や電離層の影響による位相シンチレーションを避けるために、マイクロ波帯のキャリアを選び変調するだけでなく、ベースバンドの 2 MHz 自身の周波数も変える機能をもつ装置である。一方衛星に搭載されている復調器の出力は、そのままその衛星内の標準周波数として用いる。このほかに一つの衛星から同様の方法で他の衛星に高安定な周波数を供給する方法も考えられる。第7図の点線はこの方法を示す。

次に二つの衛星の時刻同期について考える。地上局と二つの衛星間の距離が等しい場合には、同期信号として、例えば秒パルスを送信すればよいが、多くの場合等しくないで、上で述べた  $R$  &  $RR$  の測定を行いながら、地上局から近い衛星には距離差に相当する時間だけ、遅らせて送信しなければならない。

## 5. 衛星間距離の測定

地上の VLBI システムでは地殻の変動はあるにせよ、観測時間内でのアンテナ間の基線は変化しないと仮定しても差し支えないが、衛星で行う場合、時々刻々基線が変化すると考えなければならない。その速度は、第

第1表 静止衛星ATS-1のR&RR及び測定精度

$R$	$4.18 \times 10^4 \text{ km}$	$\pm 60 \text{ cm}$
$RR_{\max} = \dot{R}_{\max}$	$300 \text{ m/s}$	$\pm 15 \text{ cm/s}$

1表に示した  $RR (= \dot{R})$  と同程度と考えてよい。衛星の距離の測定は一つの衛星に、現在地上局に設置されている測距装置を搭載することが望ましく、この場合は第1表で示す精度が得られ、観測周波数が  $2 \times 10^6 \text{ Hz}$  である VLBI に対しては、十分であろう。しかし、現実的には重量、電力の面から、現在のシステムを衛星に搭載するのはほとんど不可能であるので、更に小型で消費電力の少ない測距装置の開発を行うか、主要なデータ処理部分を分離して地上に置く必要がある。

衛星間距離を 5,000 km、観測周波数を 2 MHz にしたときの最大遅延時間とフリンジレートを求めてみる。

$$\tau_{g \max} = \frac{R}{C} = 16.7 \text{ ms},$$

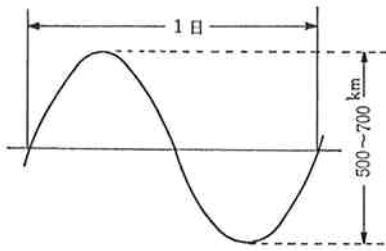
$$F_{r \max} = \omega \cdot \frac{R}{C} \dot{\theta} + \omega \cdot \frac{\dot{R}}{C}$$

$$= 15.2 \text{ ラジアン/秒} + 0.04 \times \dot{R}$$

ここでは  $\dot{\theta}$  地球の自転速度、 $\omega$  は角周波数 (2 MHz を仮定)  $C$  は光速、 $R$  は衛星間の距離、 $\dot{R}$  はその変化を m/s で表している。第1表のように  $\dot{R}$  が 300 m/s に等しいとすると、これによるフリンジレートは 12 ラジアン/秒となり、かなり大きい。また、距離の予測誤差によるフリンジレートの違いはたとえ、数十 km あっても 1 ラジアン/秒以下である。一方、遅延時間については、予測誤差は 3 m につき 10 ns の誤差を生ずる。このように電波源の輻射する電波を受信して、電波源の分解、移動速度、あるいは伝搬路で生じる位相シンチレーション等を求めようとする場合は、衛星間距離及び距離変化率の精密測定が必要であり、地上局で行われる測距でもある程度可能といえる。しかし、遅延時間等を精密に測定する場合には、地上測距データだけでは不十分である。ここで述べている  $R$  &  $RR$  は地上—衛星間の測定であるから、衛星間の距離の精度になると、更に悪くなる<sup>(9)</sup>ことが十分予想される。

## 6. 角度分解能と信号対雑音比

静止衛星で VLBI を行う場合、基線長の変化を、第8図に示す<sup>(8)</sup>。ここで例に上げている ATS-1 は、静止衛星としてはかなり移動する方で、現在打ち上げられている静止衛星のほとんどは、ATS-1 の 10 分の 1 から 100 分の 1 の移動である。したがって、I-2 VLBI



第8図 ATS-1 の距離の日変化

の原理, ③式で述べた角度分解能には距離変化は影響しない。観測周波数 2 MHz, 衛星間距離を 5,000 km にとると角度分解能は, 上記③式から, およそ 3 秒角となる。また, この高分解能は逆に, この程度以上の広がりのある電波源を観測しても相関がでないという欠陥にもつながらる。

次に, 信号対雑音比について検討する。I-2. VLBI の原理, ④式を用いると,  $T_{ax}$ ,  $T_{ay}$  は観測する電波源のフラックス強度に比例し, ヘクトメートル波帯の受信機では, 受信機から発生する雑音は無視できるので,  $T_{sx}$ ,  $T_{sy}$  は, 他の電波源から到来する電波のフラックス強度に等しいと考えてよい。無指向性アンテナを仮定すると, 第1図(a)に示した電波源の強度比が  $S/N$  に相当する。帯域幅を  $5 \times 10^5$  Hz, 積分時間を 10 ms にすると, 目的の電波源のフラックス密度が  $T_{sx}$  又は  $T_{sy}$  の  $10^{-2}$  以上でなければ  $S/N$  が 1 より大とならない。木星電波や太陽バーストは, 明らかに検出できると思われるが, その他の星は, 木星電波を遮閉しないかぎり, 不可能と思われる。これを行うにはアンテナのビーム幅を狭くすればよいのであるが, ヘクトメートル波帯のアンテナで数十 dB ものアンテナ利得を得ることは困難であるから, 遮蔽網を設けて木星電波を反射させる方がより現実的であろう。もちろん, 遮蔽網と木星の位置関係により, 木星も観測できることは当然である。このように遮蔽網を設け, 同時に観測できる範囲を半分狭くすることにより, 検出できる電波源は急激に増加する。

## 7. あとがき

現在, 電波天文学は短波長領域へ急速な進展をみせているが, 長波長域への挑戦はほとんどみられない。その理由は, 長波長域の自然現象に興味がないのでもなく, まして説明され尽したのでもない。おそらく, 電離層という大きな壁が地球を覆い, 観測するためには, 人工衛星 VLBI にこれを委ねなければならないからであろう。更に困難なことは, アンテナのビーム幅が長波長では非常に広くなり, 角度分解能を上げることができない。こ

こでは, 人工衛星で VLBI を行うことにより, 角度分解能を上げこることを提案した。しかし, これまで述べてきたように, 最近注目されているリモートセンシングとは異なり, 二つの衛星と地上局の者が有機的に結合されて, 初めて実現でき, したがって衛星管制, 測距及び衛星位置決定, 衛星通信, 更にデータ処理の全てが同時に遂行されなければならない。このような方向は, 技術面で人工衛星による観測の, ある意味での最終目標とも言えるであろう。

期待される成果については, これまでに述べてきた困難を克服することによる新しい観測・実験システムの出現そのものであり, それを用いて得られる新しい物理的情報は個々に上げることができないほど多く, 電波天文学の新しい分野を開くことになるであろう。最後に, これまで述べてきていない磁気圏等からの電磁波放射や太陽バーストの移動等正確に追跡でき, パルサーの観測も同じ装置で可能であり, 太陽地球間物理学の分野でも, 新しい観測領域を開くものと期待されることを付け加えておく。

この提案は, 鹿島支所飯田主任研究官が, 既に明らかにしている, 二つの衛星を利用した衛星間の測距や姿勢制御及び通信に関する“双子衛星計画”を参考にした。また, 各方面にわたる議論に参加して頂いた第三宇宙通信研究室の方々や, 衛星研究所尾嶋主任研究官に謝意を表します。

## 参考文献

- (1) Kraus, J. D., Radio Astronomy McGraw-Hill, 1966.
- (2) 羽倉幸雄; “ヘクトメートル波宇宙, 太陽電波の高空観測”, 電波研究所季報, 16, No. 84, pp. 326—331, May 1970.
- (3) Jokipii, J. R. and Hollweg, J. V., “Interplanetary scintillations and the structure of solar-wind fluctuations”, *Astrophys. J.*, 160, pp. 745—753, May 1970.
- (4) Woo, R., Yang, F., 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, December 1976.
- (5) Lovelace, R.V.E., Salpeter, E.E., Sharp, L.E. and Harris, D. E.; “Analysis of observations of interplanetary scintillations”, *Astrophys. J.* 159, pp. 1047—1055, March. 1970.

- (6) Cronyn W.M.; "Density fluctuations in the planetary plasma; agreement between space-probe and radio scattering observations", *Astrophys. J.* **171**, pp. L101—L105, Feb. 1972.
- (7) 周波数精密測定回路委員会, 電気学会技術報告(Ⅱ部)第41号, "周波数安定度とその測定", pp. 122.
- 電気学会, 昭和51年2月
- (8) 山本稔, 小坂克彦, 浦塚誠, 原田喜久男; "SSR 拡散変調方式による測距装置", 電波研季報, **21**, No. 112, pp. 1—7, Jan. 1975.
- (9) 塩見正; "静止衛星の軌道決定精度", 第20回宇宙科学技術連合講演会, 2B14, OCT.

