

長基線電波干渉計の測地・位置天文学的利用 (I)

土屋 淳・松波直幸・中嶋浩一*

1. まえがき

長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometer—以下 VLBI と略記する) が、天文学者の話題になり始めて久しい。それより前、電波天文学の誕生後、間もなく、電波干渉計が実用化された。

これによって、太陽電波の活動領域の位置決定、電波星の座標決定と、光学的観測とのつき合わせ、輝度分布の測定とめざましい活躍をする。そして、当然の帰結として、分解能を愈々高く要求されることになって来た。

分解能は、一般に、光学系の大きさと波長の比として与えられ、これは電波に対しても全く同じである。光の波長と、電波のそれとの比は、1万倍から1000万倍、乃至それ以上ともなるから、極く小さい望遠鏡と同等の分解能ですら、電波で得ることは容易でない。

その為に、電波干渉計の基線の長さに対する要求は、遂に、ケーブル等で結ぶことが困難な位にもなって来た。

そこで、ある時期には、電波干渉計を構成する二つのアンテナを、超短波中継する試みがなされた事もある。又、比較的最近にも、マイクロ中継回線の利用も行なわれた。全く異なる考え方にもとづく、強度干渉計では夫々のアンテナの直下で、ビデオ (乃至可聴周波) に変換し、別々に、テープ録音することによって、大きな基線長がとれると提案されたりもした。

しかし、これらの方法では、技術的に複雑になったり経常費が著るしく大きいとか、SN 比が悪いとか、欠点が多かった。

一方、電波分光学の発展から、メーザが発明され、原子周波数標準が実用化され、それまで、時刻保持を担って来た水晶を王座から蹴落すことになる。これは、水晶時代にも気付かれ始めていた、地球自転の不均一さを、一挙に白日の下に曝し、地球自転が、時刻、時間の基準としての地位を失なう事につながって行った。

この超高安定発振器を、電波干渉計の両腕の受信機の局部発振器として使い、ビデオ中間周波を磁気記録する方法が考えられて、今日の VLBI 実用化を迎えることになる。

従って、VLBI とは、“独立な局部発振器をもつ干渉計システム”と定義されてよい。基線の長さは、定義に

は本質的に無関係である。

始め、VLBI は、微小な電波星 (準星など) の大きさや、輝度分布の測定に用いられた。これは、干渉プリンジの見え方から求めるもので、マイケルソンが1910年代に可視光域で行なった実験と全く同じ考え方である。

しかし、独立な局部発振器同志の位相関係を知ることが出来ない為に、このままでは、VLBI は、位置天文学乃至測地学に利用することは出来ない。

受信系に多かれ少なかれ、必ずついて回る、有限な帯域幅によって、可干渉性が生ずることを利用して、VLBI は、測角能力を持つことになる。技術的には、多チャンネル受信機を用いて、帯域合成することにより、今や、最高精度の子午環、PZT に匹敵し、上回る精度を持つ様になって来た。

その結果、地球自転、極運動の観測、基準座標系の確立、大陸移動の検出、測地原点の確立、等に VLBI が大きな役割を果たす可能性が、現実のものとなろうとしている。これは、天文学のみでなく、我々の立っている地球自身の事柄、即ち、測地学、地球物理学等に関連する。従って、測地的な VLBI の利用は、世界的に各地で協同観測を続けてこそその真価が発揮される。

VLBI に匹敵する能力を持つ観測手段は、現在の所、月レーザ測距位であろう。後者は、設備の経費、運用の簡易さに於て、VLBI に勝っているが、天候に支配されやすい欠点をもつ。今後、両者は互に競合しつつ、発展してゆくことは疑のない所である。

2. VLBI の技術

天文月報誌上には、VLBI に関する技術的な解説記事は未だなかった様であるので、蛇足ではあるが、基本的な技術上の問題について述べておこう。

1) 電波干渉計の基礎。

電波干渉計は、大別して、加算式と積算式とに分けられる。此処では、VLBI に適用される積算式のみについて述べる。

図1の様な、中間周波で積算をとったスーパーヘテロダイン方式の干渉計を考える。

無限遠から、二つのアンテナ A, B に θ の入射角で入ってくる平面波を考え、夫々のアンテナに誘起する高周波電圧を $a \sin(\omega t - \varphi)$, $a \sin \omega t$ としよう。ここで、 φ は、二つのアンテナの行路差による高周波の位相差で、図1に併記した様に表わされる。

* 東京天文台 A. Tsuchiya, N. Matsunami & K. Nakajima.
Geodetic and Astrometric Use of the VLBI.

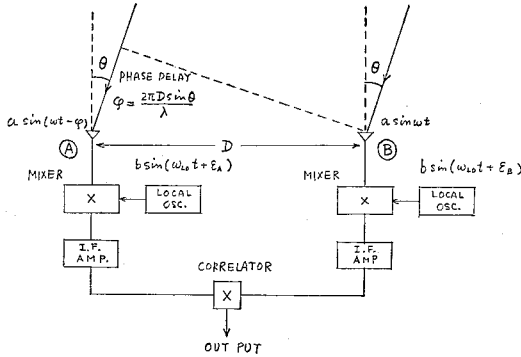


図1 スーパーヘテロダイン式の積算式干渉計

夫々のアンテナの所で、 $b \sin(\omega_{Lo}t + \epsilon_A)$ 、 $b \sin(\omega_{Lo}t + \epsilon_B)$ の様な局部発振器によって、中間周波に変換する。周波数変換回路、いわゆるミキサーは積算器と考えるとよいので、夫々の中間周波は次の様になる。

先ず、A の腕では

$$a \sin(\omega t - \varphi) \times b \sin(\omega_{Lo}t + \epsilon_A)$$

$$= \frac{ab}{2} \{ \cos(\omega - \omega_{Lo}t - \varphi - \epsilon_A) - \cos(\omega + \omega_{Lo}t - \varphi + \epsilon_A) \}$$

通常、中間周波数としては、差周波数の方をとる。それは、アンテナに入ってくる信号は、一般に、超高周波であり、それをそのまま増幅することは、技術的に困難なので、より増幅の容易な低い周波数にする必要がある。従って、上の式の第一項の成分のみが使われる。即ち、A の腕の中間周波は、 $\omega - \omega_{Lo} = \omega_{IF}$ とかくと

$$\frac{ab}{2} \cos(\omega_{IF}t - \varphi - \epsilon_A)$$

となる。ここで、アンテナに誘起した高周波の位相角 φ が、符号を別にして、そのまま中間周波に残ることを留意しておこう。但し、局部発振の位相 ϵ_A も、全く同等に残っていることも注目しておこう。

同様に、B の腕の中間周波は

$$\frac{ab}{2} \cos(\omega_{IF}t - \epsilon_B)$$

となる。

両方の腕からの中間周波は、積算器によって積をとられる。即ち、

$$\frac{ab}{2} \cos(\omega_{IF}t - \varphi - \epsilon_A) \times \frac{ab}{2} \cos(\omega_{IF}t - \epsilon_B)$$

$$= \frac{a^2 b^2}{8} \{ \cos(\varphi + \epsilon_A - \epsilon_B) + \cos(2\omega_{IF}t - \varphi - \epsilon_A - \epsilon_B) \}$$

となる。積算器の出力の時間平均 \bar{I} は、従って

$$\bar{I} = \frac{a^2 b^2}{8} \cos(\varphi + \epsilon_A - \epsilon_B) \quad (1)$$

である。

通常の、ケーブル等で結ばれた干渉計では、夫々の局部発振器の位相差 $\epsilon_A - \epsilon_B$ は、0 になる様に調整されるか、少くも既知である。

φ は、図1に示してある様に、電波の入射方向 θ の関数であるから、相手が電波星の場合、その日周運動に従って、 \bar{I} は余弦的に変化する。このことから星の位置を知ることができるが、一般にはこれは多価函数である。

この様な出力変化を、干渉パターン、又はフリンジと云う。

フリンジは、(1)で示される様に、 φ に対して周期的に変化するから、その1ピッチの変化を生ずるのに、星の方向 θ がどの位、変ればよいか、と云うことが、干渉計の分解能となる。これは、 φ と θ の関係式で示される様に、波長 λ と、基線の長 D の比で決まる。

具体的な数値例として、東西方向に配列された干渉計を、 $\delta=0$ の星が南中(基線の真正面を通過)するときのフリンジの間隔と、それを1山通過するに要する時間を表1に示す。

星の大きさを知らうとするとき、このフリンジの見え方 (fringe visibility) をしらべる。その考え方は、図2に示す様に、丁度同じ強さの星が、或る距離をおいて2個あった場合を考える。今、干渉計によって、1の星によって、実線の様なフリンジが出るとする。そして、たまたま、2の星によって、点線の様なフリンジになったとすると、干渉計の出力では、二つのフリンジが打消し合って、何も現われない。この時、干渉計の基線の長さを変えてやると、1と2の星によるフリンジの位相関係が変わって、合成のフリンジが現われるであろう。極端な場合、基線を充分短かくとってやると、1と2によるフリンジは、実質的に同じになって、二つが加え合って、大きなフリンジが現われる。

表1 $\delta=0$ の星が、東西干渉計を南中するときのフリンジのピッチと、それを通過するに要する時間

基線の長さ D	100 km		1,000 km		10,000 km	
	ピッチ	時間	ピッチ	時間	ピッチ	時間
周波数 (波長)						
1 GHz (30 cm)	0.6"	40ms	0.06"	4ms	0.006"	400 μ s
3 GHz (10 cm)	0.2	13	0.02	1.3	0.002	130
10 GHz (3 cm)	0.06	4	0.006	0.4	0.0006	40

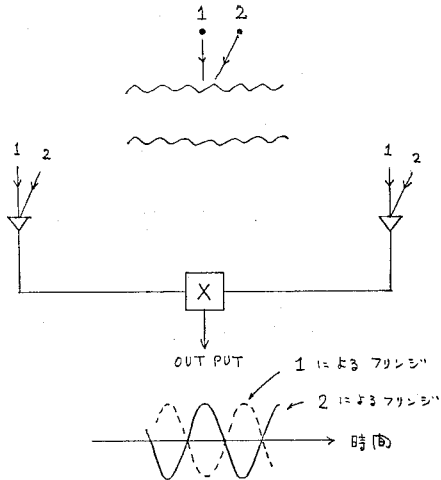


図2 二重星によるフリンジの重なり

このことは、例に示した様な二重星の場合でなくて、1と2の間が連続的に埋まっている様な、ひろがりを持つた天体の場合でも、全く同様である。

数学的な言い方をすると、星の形を現わす関数を、干渉計の波長と基線の長さできまる、フリンジ周期によって、フーリエ変換することになる。

従って、いろいろな長さの基線を使って、同じ星を観測して、逆変換すれば、星の形がわかる。これを**口径合成法 (Aperture Synthesis)**と云って、干渉計観測の一つの重要なテーマになっているが、VLBIでは、厳密な意味では、口径合成は出来ない。次節で述べることであるが、VLBIでは一般に、 $\epsilon_A - \epsilon_B$ がどうなっているか知ることができない。

つまりフリンジの位相がわからない。即ち、フーリエ成分の振幅は測定できるが、その位相がわからない為に逆変換の際に或る仮定(例えば、星の形は対称であると云う様な)を設けて解かなければならない。

2) 独立な局部発振器をもつ VLBI に伴う問題。

表1では、基線の長さとして100km以上と云う例を示してあるが、これは、明らかに、ケーブル等で結び合わされうる長さの限界を越えている。

そこで、本題のVLBI、即ち、独立な局部発振器をもった干渉計が必要となってくる。その際、中間周波の相関は、始めに述べた様に、ビデオ帯に変換し、磁気記録し、オフラインで処理する。

独立な局部発振器となると、(1)式の $\epsilon_A - \epsilon_B$ は、もはや、既知ではなくなる。これが既知でなくても、フリンジは見えるから、星の形の研究には事欠かない。先ず初めに、VLBIが、星の大きさの側定に用いられたゆえんである。

しかし、フリンジの位置を空間的に定義できないから、

表1に示した様な、驚くべき分解能は、星の座標決定には、全く役立たない。

VLBIをどの様にして、位置天文学に使うかを論ずる前に、二つの局部発振器同志の位相差 $\epsilon_A - \epsilon_B$ のふるまいについてしらべよう。

VLBIでは、局部発振器として、原子周波数標準を使う。それが、如何に高安定度であっても、二台の発振器の位相関係、云いかえれば、“歩み”が、時間の経過と共に、全く乱れないと云う筈はない。

少くも100km以上を離れた、VLBI観測局同志で、夫々の局部発振器の位相関係を、干渉計に必要な精度で比較する方法は、殆んど無いが、あっても、非現実的な位の手間と経費を必要とする。

そこで、この位相関係は、確率的に推定する以外に手段がない。即ち、(1)式で示される様に、星の日周運動による φ の変化によって、フリンジを測定しようとすると、少くも、その測定中は $\epsilon_A - \epsilon_B$ が一定であってこれなければならない。実際は、或る程度の数のフリンジを取って、統計処理する必要上、相当長い間、 $\epsilon_A - \epsilon_B$ が一定でないと、VLBIシステムは使えない。

今、二台の発振器の位相差を次の様に表わそう。

$$\epsilon_A - \epsilon_B = p + qt + rt^2 + R(t) \quad (2)$$

ここで、 p は、或る時刻原点での位相差、 q は二台の発振器の周波数差、 r は周波数のドリフト、そして $R(t)$ はふらつきを表わす。始めの三つは、無いに越した事はないが、何れにしてもフリンジの位置は決まらないのだから、あっても困らない。つまり、フリンジの位相原点とフリンジ周期が変わるだけである。

困るのは $R(t)$ の分である。これは、ふらつきと書いたが、実は、或る中心値のまわりをふらついている様なものではない。丁度、液体の上に浮いた花粉のブラウン運動の様に、時間の経過と共に何処かへ行ってしまふ様な性質のものである。

これは、確率理論の、乱歩の問題 (Random Walk) の手法によって解析できる。

二台の発振器の一方の他に対する安定度を σ とする。乱歩の理論によって、 t だけ経過した時、二台の発振器によって駆動される時計面のズレは、確率的に $\sigma\sqrt{t}$ である事が最もありうるとされる。従って次式が成立つ。

$$R(t) \sim \sigma\sqrt{t} \cdot \omega_{LO} \quad (3)$$

(2)式で、 p と q はあっても困らない量だから、仮にそれらは共に0とすると、 $\epsilon_A - \epsilon_B$ は(3)式で決まることになる。

$\epsilon_A - \epsilon_B$ が、完全に一定不変と云う条件を入れると、有限の σ では t は0になってしまう。即ち、VLBIは働かなくなると云うことになる。

実際は、 $\epsilon_A - \epsilon_B$ が完全に一定でなくても、変化量が

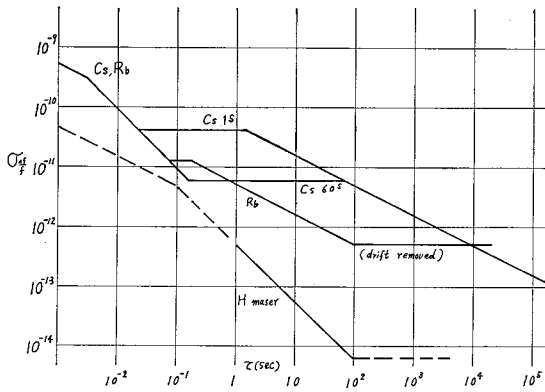


図3 横軸は動作時間

表2 位相誤差 36° を許したときの、周波数安定度とVLBIの動作可能時間の関係

f_{LO} \ σ	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}
1 GHz	1^s	10^2^s	10^4^s	10^6^s
10 GHz		1	10^2	10^4

或る範囲内なら差支えない。経験的に、それは、例えば 36° 以内 ($\lambda/10$) なら、一応データは充分使用に耐える。この様な条件で、 σ と、VLBI の動作可能時間 t の関係を表2に示す。

表2でわかる様に、局部発振器の周波数が低い程、換言すれば、VLBI の動作周波数が低い程、或る動作時間を確保するのに、低い安定度の発振器で間に合う。

初期の頃の VLBI では、400 MHz とか、1.6 GHz を使用し、発振器の安定度も 11^{-11} から 10^{-12} の間位であった。この時期には、中間周波の磁気記録に 720 K·Bit/sec の速度を用い、一卷の磁気テープを数分間で巻き切る位のテープ速度で記録したが、これは、システムの動作許容時間とよくバランスの取れた値であったわけである。

此处で云う発振器の周波数安定度 σ は、周波数標準の長時間安定度をそのまま適用するのは危険な場合がある。つまり、VLBI に使う場合、瞬間々々の位相関係が大切であり、然も、それが可成り、長時間にわたって保持される必要もある。

従って、時計として用いる場合重要視される長時間安定度の優れた発振器が、必ずしも VLBI に向いているとは限らない。事実、最近までのセシウム周波数標準は、長時間安定度は非常によく、世界各国で、原子時の保持に使われているが、短時間では周波数ジッターが他に較べて多く VLBI 用としては必ずしも最適でなかった。

VLBI には、水素メーザが理想であるが、セシウムよ

りは、むしろルビジウムの方がよいとされていた。しかし、これも、最近、ヒューレットパッカード社が発表した、スーパーチューブと云うセシウムビーム管によればかなり事情は変わって来たものと思われる。

何れにしても、現今では、周波数安定度は、VLBI の意味に於て、 10^{-12} 以上に達しており、10 GHz の周波数で充分長いシステム動作時間が確保される様になった。

図3に、いろいろの原子周波数標準の安定度と動作時間の関係を典形例として示しておく。

3) VLBI の測地利用の技術。

独立な局部発振器をもつ VLBI では、その位相関係がわからない為に、フリンジを空間的に定義できない。従って、表1に例として示した、フリンジ分解能は、少くも、絶対測角に関する限り、全く役に立たない。

僅かに、フリンジを測角に使えるのは表2で示した様な、許容動作時間内、つまり局部発振器の位相差が大きくは変わらないと考えられる間に、複数個の星の相対位置を測る場合のみである。

それでは、絶対測角に VLBI をどうやって応用するのであろうか。

一つは、フリンジカウントである。この方法は、結果として、現実的でないので、詳述は避けるが、要するに或る時間内に、フリンジがいくつあるかを数数することである。しかし、必ずしも充分でない SN 比の下で、唯一個のミスカウントも許されないフリンジカウントは、殆んど不可能である。

現在、VLBI によって測角をする方法は、可干渉性を利用するやり方である。それについて述べよう。

この節の1)で干渉計の原理を説明する際、星からの入射波を $\sin(\omega t - \varphi)$ の様な、正弦波として議論を進めて来た。これは、全く正しいのであるが、実は重要な前提条件を必要としている。

星からの電波は、略々白色雑音であると考えられている。完全な白色雑音とは、周波数スペクトルが、完全に平坦なものを云うので、星の様に、或るスペクトル分布をもっているものは、厳密な意味では白色雑音ではない。

白色雑音は、無限に幅のせまい、いろいろの高さのパルス列と考えられている。この様に、無限に沢山あるパルス列では、正弦波の様な、同じ波形のくり返しは何処にも見られないと考える。この性質を非干渉性 (Incoherency) と云う。

この様に、二度と同じ波形をくり返すことのない入射波であるから、簡単な為に、星から、唯一発の無限に幅のせまいパルスが来ると考えよう。

干渉計では、二つのアンテナに入ってくる、このパルスの到達時間差を測ることに帰着する。この様なパルス入力と、干渉計の原理で説明した正弦波との論理のつな

がりを述べる。

今、例として、ひもでおもりを吊った振り子を考えよう。振り子は、始め静止していたとする。その振り子を指でポンと弾いてやったとする。振り子は、その固有周期で振動を始める。しかし、空気の抵抗や、その他の摩擦のために、段々振幅はへってくるのであろう。

ここで例とした振り子は、受信機の中の共振回路であり、指でポンと弾くことは、パルスの電気信号に相当する。共振回路では、パルスを受けてから、回路の抵抗できまるしばらくの間、その共振周波数の電気振動を持続する。この振動は、干渉計の二つの腕で夫々発生して、原理で説明した様な工合に、干渉計としての働かが行なわれる。

今、若し、星の方向が干渉計の基線に対して大きく傾いていて、二つのアンテナへの行路差 $D \sin \theta$ が大きい場合を考えよう。星に近い方の側の受信機には、時間的により早く、電気振動が励起されるが、遠い方の受信機では、おくれで振動が励起される。そこで、遠い方の側の振動が励起されるより以前に、近い方の側の振動が減衰してしまうと、もはや、フリッジは生じない。

フリッジを生ずる為には、星が、干渉計の基線の真正面を中心とするある範囲に居なければならない。ある範囲とは、行路差 $D \sin \theta$ を電波が走るに要する時間が、受信機内に電気振動が持続している時間よりも短かい様な θ の範囲である。

電気振動が持続する時間は、回路の減衰定数で決まるが、もっと直接的な量として、受信機の帯域幅 B の逆数として与えられる。

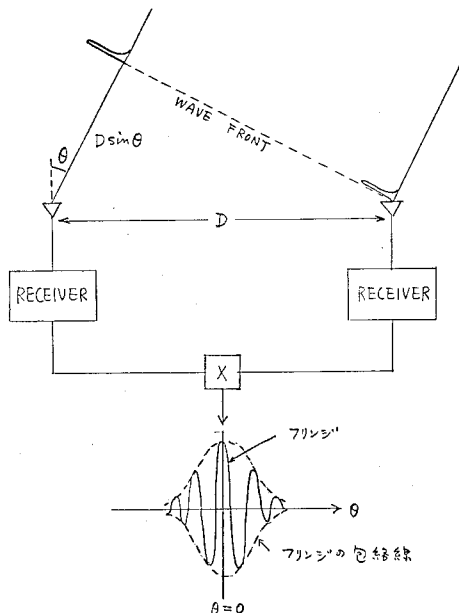


図4 可干渉性によるフリッジ振幅の変化

即ち、フリッジを生ずる条件をもとめると次式で表わされる。

$$\frac{D \sin \theta}{c} \approx \frac{1}{B} \quad (4)$$

VLBI による測角はこの性質を利用して行なう。つまり、星が東から西へ、干渉計の基線の正面を横切る際、行路差は次第に減り、南中後、再び増加する。そのため南中をはさんだ、或る θ の範囲だけに、フリッジが見られる。こうして、星の南中を検出することができる。

VLBI の腕の一方に、信号を電氣的に遅延させる様な素子を入れると、観測は南中以外の場所でも可能となる。実際はこの操作は、データ処理の段階で行なわれ、行路差の変化を刻々測定することができる。

行路差又は行路差による電波の到達おくれ時間 $D \sin \theta / c$ の測定精度は、(4)式でわかる様に、受信機の帯域幅のみによってきまる。

例えば、初期の VLBI が用いていた様な帯域幅の値として、1 MHz を仮定しよう。この時、可干渉な行路差は約 300 m となる。図4に例示してある様に、行路差の変化に伴う、フリッジ振幅の極大の位置は、かなりよくきめられることが経験的に知られていて、上の例の場合でも、行路差測定精度は 10 m 前後までには行くであろう。しかし、この値では位置天文学的には、先ず役に立つとは思えない。

精度を上げるには、帯域幅をひろげればよい。これを少なくとも数十 MHz、できれば数百 MHz にすることである。例えば、100 MHz の帯域幅をとれば、可干渉の行路差は約 3 m となり、フリッジ振幅極大をよく読みとることで数 cm の精度となる。

この様に行路差が求まるならば、例えば、星を VLBI によって、南中と、南中後30分、南中後1時間と云う工合に観測する。南中後30分、1時間等の星の VLBI 基線に対する方位角は充分な精度で計算できるから、夫々の行路差の絶対値から、直ちに、VLBI 基線の絶対値が求められる。計算途中の誤差分配の問題があるにしても、基線の長さを、斯くして、例えば数 cm の精度で求めることが可能となってくる。最も基本的な VLBI の測地的利用がこれである。

この様な測定を、日を置いて、世界各地で行うことによって、大陸移動や地殻変動をはっきりと捉えることが出来るであろう。

所がここで、広い帯域幅をとることに問題がある。と云っても、受信機の電子系統については、今日では、数百 MHz の帯域をとることは、大して困難ではない。問題は、超広帯域の中間周波を磁気記録する方法と、今一つ、厄介なのは、通信電波の混信である。

この問題を避ける為に、比較的せまい帯域で、いくつ

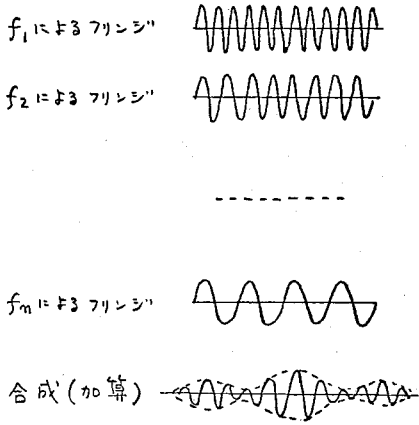


図5 帯域合成の原理

かの受信チャンネルを設け、夫々によるフリンジを合成して、等価的に非常に広い帯域幅を作ることが工夫された。これを帯域合成 (Bandwidth Synthesis) と云う。

図5に原理を説明してあるが、今、 $f_1=f-n\Delta f$, $f_2=f-n-1\Delta f$, ..., $f_{n+1}=f$, ..., $f_{2n+1}=f+n\Delta f$ の様に、中心周波数が f で Δf ずつ離れた $2n+1$ チャンネルで受信し、それぞれのフリンジを合成する場合を考えよう。

$$\begin{aligned} & \cos\left\{\frac{2\pi D}{c}(f-n\Delta f)\sin\theta\right\} \\ & + \cos\left\{\frac{2\pi D}{c}(f-n-1\Delta f)\sin\theta\right\} \\ & + \dots + \cos\left\{\frac{2\pi D}{c}f\sin\theta\right\} + \dots \\ & + \cos\left\{\frac{2\pi D}{c}(f+n\Delta f)\sin\theta\right\} \\ & = \frac{\sin\left\{\frac{(2n+1)\pi D\Delta f\sin\theta}{c}\right\}}{\sin\left\{\frac{\pi D\Delta f\sin\theta}{c}\right\}} \cdot \cos\left\{\frac{2\pi Df\sin\theta}{c}\right\} \end{aligned}$$

表3 各技術の比較。精度は、◎ $\approx 10\text{cm} \approx 0.003$, ○ $\approx 1\text{m} \approx 0.03$, △ $\approx 10\text{m} \approx 0.3$ と考えてよい

技 術	位置天文	測 地	月運動論	衛星運動	観 測 方 法	特 徴
恒星可視光	○	○	△		夜間・晴のみ	} 対象が多い・容易 地球重力場 幾何学的地球 容易 (レーザを除く) 瞬時的・高精度 準星観測・時計比較
衛星可視光	△	△		△	" " "	
衛星ドップラー		○		○	全日・晴雨	
衛星レーザ		◎		◎	全日・晴のみ	
月レーザ		◎	◎		半日・晴のみ	
VLBI	◎	◎	○	○	全日・晴曇	

即ち、中心周波数 f のフリンジが、第一項の分数式で現われる係数で振幅変調をうけた形になり、この第一項は、アレイパターン式の式で図5に示した包絡線である。

実際は、それ程沢山のチャンネルはとれるわけでないが、最低2チャンネルから、5~6チャンネルを使った実例がある。

以上で VLBI の技術の基礎となる考え方を説明した。この他に、重要な技術として、磁気テープ記録のことがあるが、これは、自分で VLBI を“作る”ときには極めて大切なことであるけれども、今の場合は本質的なことではない。

要するに、VLBI の両腕で、ビデオ中間周波を磁気記録して、オフライン処理すると云う図に理解して頂ければよいであろう。更に細かく技術的に知りたい方は、それに関する論文を参照されたい。

3. 他の測地新技術との比較

これまで述べて来たような技術的裏付けを確認した上で、今度は測地学・位置天文学の立場から見た VLBI の問題点、評価、成果、意義などを考えて行くのであるが、これらは次号にまとめることにして、ここでは他の技術との比較検討を試みよう。

表3はそれぞれの技術の利用分野と精度の概略を示したものである。「位置天文」と「測地」の区別は次号で詳述するが、要するに遠方天体の位置を測るか、地球上(または近傍)の点の位置を測るかの相違と考えてよい。

表を見た限りでは、VLBI は位置天文、時計比較、観測可能時間などの点において非常に有効かつ必要な技術であることがわかる。しかしその他の新技術もそれぞれ独自の測地パラメータを観測するのであり、これらの測定値の相互比較の中から新しい事実を見出して行くことが、今後の測地・位置天文学の主題となると予想される。

(以下次号へ続く)