

Wave-Front Clockを用いたVLBI国際実験

木内 等、近藤 哲朗
関東支所 第3宇宙通信研究室

Josef Popelar
Energy, Mines and Resources Canada

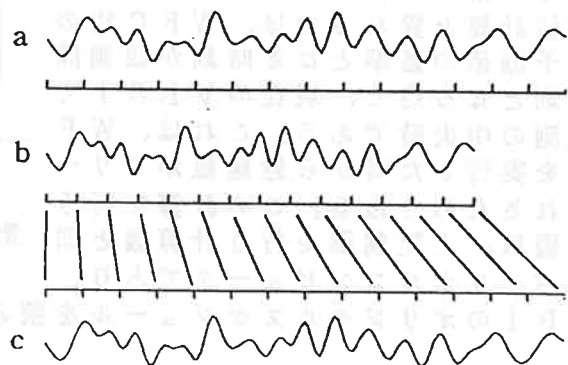
1. はじめに

超長基線電波干渉計(VLBI)は、電波星からの電波を2局で同時に受信して、受信波面と2局の位置によって構成される幾何学的遅延量から基線ベクトルを求め、この時、地球回転によるドップラシフトの補正がVLBI成功の鍵となる。地球回転によりドップラシフトの影響を補正しなければ積分操作中に位相の回転が生じ相関を得ることができない。この量は、電波星と2局の幾何学的な位置関係により得られた τ_g の時間微分 $d(\tau_g)/dt$ として表される(フリッジローテーションと呼ばれる量)。現在のVLBIシステムでは、原子周波数標準器からの基準周波数を固定的なものとして周波数変換・サンプリングを行っているためドップラシフトの影響がデータ中に残る。そのためデータの相関処理時にドップラシフトの補正を行う必要がある。しかし、受信時にドップラシフトの補正を行うことも可能であり、その方式は、受信波面同期時計(Wave-Front Clock 以下 WFC)法と呼ばれている。今回は、WFC法システムの開発を行い、国内基線においてWFC法を用いた測地VLBIの可能性を示すと同時に、最も地球回転の影響が顕著に表れる東西基線の鹿島とカナダ(アルゴンキン)の間でWFC法を用いたVLBI試験観測を実施し、初の大陸間基線でのWFC法の有効性を確かめた。また、カナダ側で独自に開発しているWFC法と基礎部分での比較を行い、今後考えられる国際間でのWFC法を用いたVLBI実験の基礎データとする。この手法では、データの相関処理を従来のVLBI手法と比べ格段に簡単に行うことが可能となる。また、この方式は、1995年打ち上げ予定の宇宙空間(SPACELINK)VLBIなどへの応用の可能性もあり、地球直径を越えたVLBI技術に貢献することが期待される。

2. WFC法とは

2局で受信した電波は各々地球回転により受けるドップラ周波数が異なる(第1図)。

各々の信号をa, bとする。bの波形は、aの波形を時間軸上で伸縮したものである。今2局のドップラ分を補正した歩度(rate)を持った時計を考えこれを用いてbの波形をサンプリングしてみる。結果はcのようになりaと等価な波形が得られる。この考え方は、信号の波面に乗った時計を用いているのと等価でありWFC法と呼ばれる。本来のWFC法は、受信時に信号を地球中心で受信したかのごとく変換する方法で相関処理時にフリッジの回転の必要を生じない。



第1図 WFC概念

今回は、WFC装置を2局分制作することができなかったため地球中心で受信したのではなくWFC装置を持たないRemote局で受信したかのごとく変換を行なった。

3. 研究方法

WFC法として我々独自の基準周波数そのものを制御する方式を採用した。この

方式では、従来からあるVLBI装置をそのまま使用でき、同時にWFC法の利点を享受することができる。今回は、

- 基準周波数を制御するハードウェア
- 地球回転によるドップラ周波数の予測値計算ソフトウェア
- 計算機による相関処理ソフトウェア

の開発を行い基礎的なシステムを確立した。その後、以下の実験を行った

- 国内基線における相関検出実験
- バンド幅合成実験（広帯域化・高精度化）
- 世界初の大陸間WFC法を用いた日加VLBI相関検出実験

以上の手続きを踏んでWFC法の有効性を証明する。

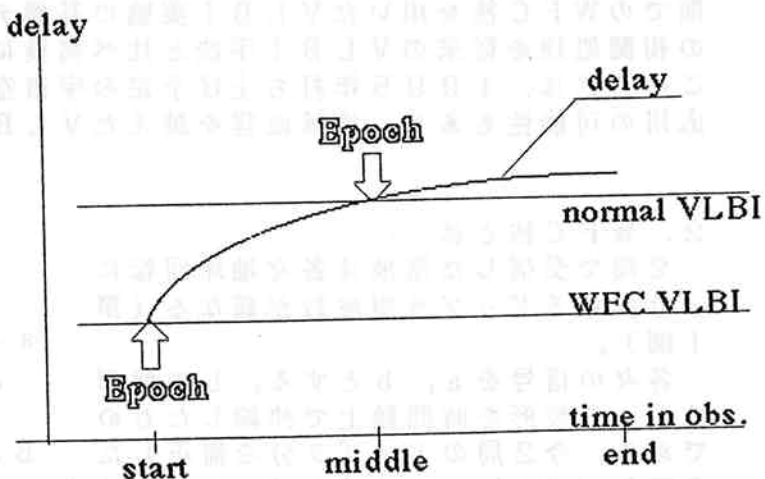
4. 成果

• 基準周波数を制御するハードウェア

予測値計算ソフトウェアによって計算されたドップラ周波数を基準周波数に換算し、ドップラ偏移量をキャンセルするように基準周波数を発生するVCXOを制御する位相同期ループを制作した。周波数制御は、 7×10^{-13} の分解能で行う事が可能である。この分解能はコヒレンスロスを下げて抑えるのに有効である。ドップラ補正を基準周波数そのものを変化させることで行うので全ての周波数の補正が同時に行える。さらに、基準周波数以外は現在のシステムをそのまま使用できるので局内における周波數位相関係を保つことができ遅延校正信号なども変更の必要がない。

• 地球回転によるドップラ周波数の予測値計算ソフトウェア

このソフトウェアは、現在VLBIの相関処理時に用いられている予測値の計算方式と同様のアルゴリズムで計算を行っている。予測遅延量を10秒毎に計算し、多項式近似からその時間微分近似式を求め、基準周波数を制御するハードウェアに渡している。この計算には地球回転パラメータ、光行差などの補正が含まれている。現在の予測値計算と異なるのは、WFC法の場合予測値の基準となる時刻が観測開始時刻となる点で、現在のVLBIでは観測の中央時である。これは、WFC法を実行した時から遅延量がフリーズされるためである。この計算を行う計算機は、上記制御を行う計算機と同一のパーソナルコンピュータであり、VLBIのオリジナルスケジュールを読み込み予測値計算を行う。



第2図 WFCと通常VLBIのエポックの違い

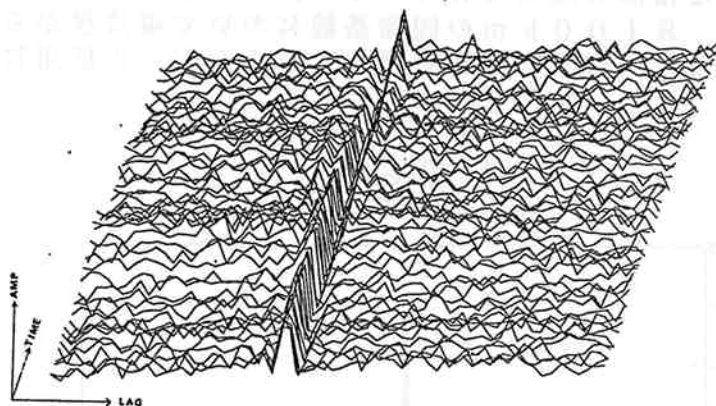
• 計算機による相関処理ソフトウェア

カナダ側で当初、米国よりMark-IIIシステムを借りる予定であったが、これが1990年夏以降にずれ込んでしまった。また、鹿島で開発したK-4システムは南極実験用に搬出する必要があり今回使用はできない。そこでデータの記録は計算機のDISC上に行なった。この場合、相関器その他のVLBIデータ処理装置を使用する事ができない。そこで計算機による相関処理の必要が生じた。このソフトウェアは、CCC (Cross Correlation in Computer) という名で近藤氏によって開発されたものであり、鹿島の解析計算機上で動く。

今回開発したWFC装置を用いて、国内実験およびカナダ側と協議の上、国際実験を行い以下の成果を得た。

・国内基線における相関検出実験

WFC法を用いた基礎実験を鹿島-筑波基線(55km)を用いて行った。電波源としては3C273Bを用い、鹿島、筑波共に現用システムをそのまま用いた。WFC法は、鹿島局のみで行い鹿島での受信信号を地球中心ではなく筑波で受信したかのごとく基準周波数の補正を行った。相関処理はK-3相関器を用いて行われた。相関器に与えられるパラメータは、観測開始時の τ_g のみで他は全てゼロに固定した。結果を第3図に示す。その結果、良好なフリンジが止まって得られた。この図において



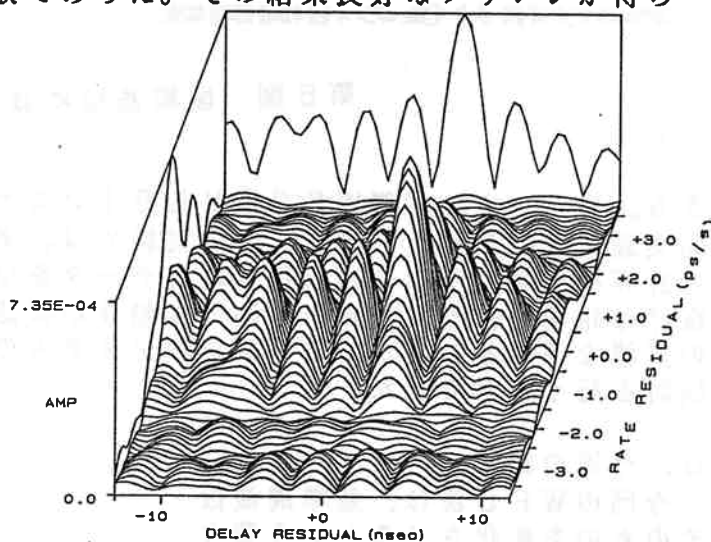
第3図 相関検出実験

ゆっくりとしたフリンジの回転がみられるがこれは両局の水素メーザの周波数の差にほぼ一致することが別途計られたデータより確かめられた。

この実験は、我々の考案したWFC法(基準周波数そのものを原子周波数標準器の段階で変化させる方法)の最初の実験であった。その結果良好なフリンジが得られWFC法の実現の可能性が得られた。

・バンド幅合成実験(広帯域化)

鹿島・父島(1000km)VLBI実験時にWFC法を用いての初のバンド幅合成実験を行ない、バンド幅合成に成功した。バンド幅合成とは、受信等価帯域を飛躍的に広帯域化する技術で高精度測位には欠くことのできない技術である。今回開発したWFC法では、遅延校正信号は従来どおり10kHz信号として検出される。このことは相関処理において諸刃の剣となっている。従来通りの相関器を使用できる反面、遅延校正信号どおしの相関が問題となる。今回は、遅延校正信号のON



第4図 バンド幅合成実験

OFFでこの影響から逃れたが、他にも周波数を変更する・変調するなど幾つか方法が考えられる。これによりWFC法を用いた高精度VLBI測位の目処が立った。

・世界初の大陸間WFC法を用いた日加VLBI相関検出実験

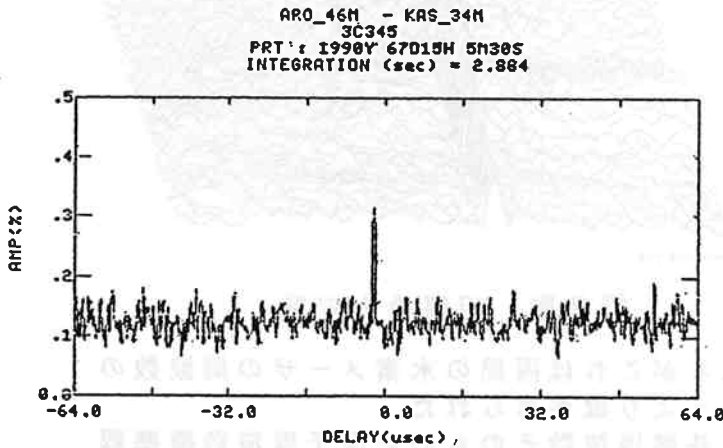
日本で開発したシステムをカナダ側に持ち込み、アルゴンキンのアンテナ(直径46m)と鹿島(34m)との間で、世界初の9100kmを越えた大陸間WFC法VLBI実験を行った。大陸間のVLBI相関検出実験は、カナダのエネルギー鉱山資源省地球科学部門と密接な協議を行い、平成2年3月にカナダに今回開発した装置を設置し、カナダのアルゴンキン電波観測所のアンテナを借用して行われた。今回の実験では、

- ・カナダ側にMark-III VLBIシステムがない
- ・カナダのHメーザがメンテナンス中なのでルビジウムを使用した
- ・レシーバは、Lバンドのみ

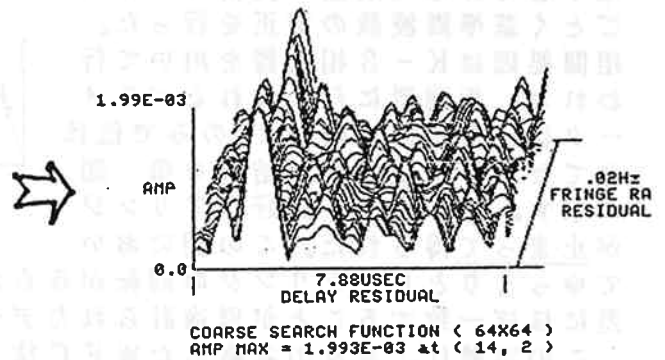
に限定され、試験観測のみで測位実験までには至らなかった。鹿島から搬出できる機材は、WFCシステムの他はK-3フォーマッタ、デコーダのみでデコーダ内の1Mbitバッファメモリを用いてデータを取得し、これを計算機ハードディスク上に記

録した。相関処理は、計算機上で1bitづつ行った。取得データは、数秒間分であり極端に少ない量である。またこのデータは、バーストサンプリング、つまり時間的に不連続なデータとなっており、この点でも通常のVLBIと異なるものである。この実験では、WFC法により得られた相関と通常のVLBIの手法により得られた相関の比較を行うために、両手法のデータが同一条件で取得された。

9100kmの国際基線において電波星からの信号の相関検出に成功することにより、将来の宇宙空間VLBIなどへの応用に向けての第一歩を踏み出すことがで



約3秒積分後の相関関数



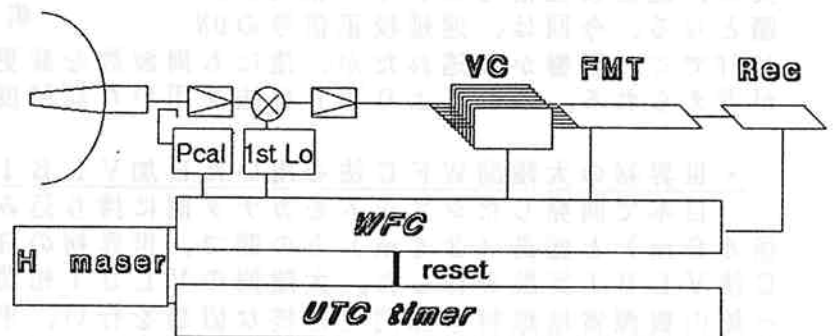
フリンジサーチ関数

第5図 国際基線におけるWFC実験結果

きる。また、カナダ側WFC法VLBIシステムと基礎部分での比較を行い国際共同実験の基礎データとする。この実験では、データレコーダを運搬できなかったの計算機で時間不連続に収集されたデータをソフトウェアで相関処理し、その結果良好な相関を検出できWFC法の有効性が確認できた。また、カナダ側の研究者との交流を深めることができお互いのシステムの持つ問題点や特徴、今後の計画など検討を行う事ができた。

5. 今後の課題

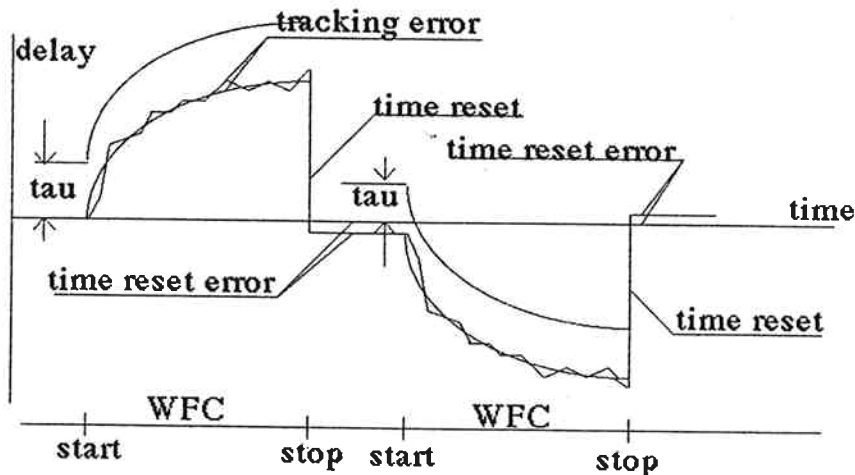
今回のWFC法は、基準周波数そのものを変化させるという我々の独自の方法であり、WFCシステムの付加のみで現システムをそのまま使用することができる。WFC法は、受信時に信号を地球中心で受信したかのごとく変換する方法で相関処理時にフリッジの回転の必要を生じない。しかしながら積極的に周波数を変化させるWFC法では、UTC時系の維持ができないので各観測間での時系の連結ができない。これを行うには正確な遅延トラッキング回路を検討しなければならない。そこで我々は、第2の回路系を設けUTC時系の維持を行うシステムを検討している。この場合、WFC時系およびUTC両時系は同一の



第6図 UTC時系維持回路を付加したWFCシステム

周波数標準を基に作成される。このため、水素メーザに跳びがあった場合でも両者の関係は矛盾なく保たれ、解析時にこの影響を容易に除くことができる。

レートトラッキングが鋸波状であり、制御時刻が計算機の時刻で行われている。このため誤差を生じる。これを正確に行うためにはよりデジタル化を推し進める必要がある。

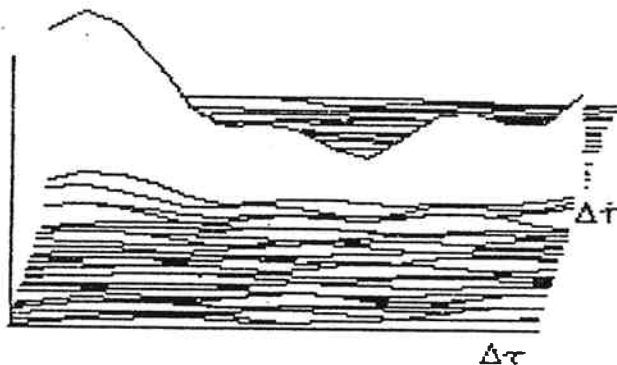


第7図 WFC誤差要因

この方法が確立された場合相関器は、EXORとcounterのみの簡単なロジックとなり、相関処理の形態を一新できる可能性がある。またSpace VLBIや高い周波数を用いたVLBIなどのような高速なドップラ周波数補正にも応用可能であると思われる。

現在までの実験では、UTC時系を維持する回路が未完成であり1観測以上の時系の結合が不可能であった。今後は、この部分を製作し、24時間実験を行うことにより現在の方式との比較を行いたい。

今回試作した装置は、WFC法の基本性能を確認するための装置でしかなく本格的な国際測地実験には運用が難しい。また、遅延校正信号どうしの相関の影響、記録信号発生器のサンプラーのDCオフセットの影響など従来のVLBIとは異なった問題も解決しなければならない。カナダ側のシステムとの整合チェックなども行われ、これらを反映したシステムの拡充が望まれる。



第8図 遅延校正信号どうしの相関の影響及びDCオフセットがある場合の影響

謝辞

今回の実験では、建設省国土地理院のVLBI関係各位に大変お世話になりました。ここに感謝致します。

参考文献

- ・木内、川口、雨谷；"Wave Front Clock法によるVLBI実験"、第392回研談資 1988.7
- ・近藤、木内；"ウェーブ・フロント・クロック法を用いたVLBI実験の原理とその相関処理について"、第396回研談資、1988.7
- ・近藤、木内；"ウェーブ・フロント・クロック法を用いたVLBI実験"、第398回研談資、1988.11
- ・木内、近藤；"Wave-Front Clockを用いたVLBI"、次世代VLBIワークショップ 1989年
- ・雨谷、近藤、木内、国森、徳丸；"電話回線を用いた準リアルタイムVLBIフリンジテスト(鹿島-宮崎)"、昭和62年信学大全

