

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

鹿島支所 第三宇宙通信研究室
近藤 哲朗、木内 等

1. はじめに

VLBIでは地球上の少なくとも2局で電波星からの電波を受信するが、これらの受信電波は地球が自転することによるドップラーシフトを受けており、その大きさは各局ごとに異なる。これらの信号から2局への電波の到達時間差を知るためにはドップラーシフトの補正が必要であり、現行のVLBIでは相関処理時にフリンジストップピングと称してこの補正を行っている。しかし、ドップラーシフトの補正は電波受信時に行うことも可能であり、その方法はカナダのVLBIグループにより「ウェーブ・フロント・クロック法」と呼ばれている[1]。この方法の原理の簡単な紹介と、カナダ方式と鹿島方式[2]との相違点および現在、新たに考えている相関処理方法について報告する。

2. ウェーブ・フロント・クロック(波面時計)法の原理

まず、ウェーブ・フロント・クロック(wave front clock)とは何だろうか。

今、水面を進行する波を考えてみよう(波の形が変化することなく進行していくと考える)。この波の形を記録するには、例えばある時刻毎にある一点で波の高さを測り、横軸に時間軸をとり、縦軸に波の高さをプロットすればよい。このようにプロットされた波上の一点は時刻を指定すれば一意に定まるし、逆に波上の一点はある時刻を表わす。つまり波上の位置と時刻は一対一に対応しており、これは波に時刻が刻まれているとも表現できる。言い換えれば、波に時刻マークがついており、そのマークから逆に時刻が分かり、波そのものが時計として使えることになる。ここで波の高さを測る場合の時刻を決める時計は逆行さえしなければどんな時計でも構わない。つまり波の上にはそれぞれの時計に応じたマークがついていると考えることもできる。この波に刻まれた時刻のことをウェーブ・フロント・クロック(波面時計)と呼んでいる。

さて、Aという地点の時計の時刻が刻まれた波を考えよう。いまAからボートに乗って波がやって来る方向に進んだ場合、このボート上の点Bで波はどのように観測されるだろうか(ここでは波によってボートが動かされるというようなことは考えずに、例えばボートが波に比べて十分に大きく、ボートに対する変位として波を観測できるとする)。A点と同じ歩度の時計を使ってこの波を観測(サンプリング)すると、あたかも波が時間軸方向に縮まったかのように(波の周期が短くなったかのように)観測される。これがドップラーシフトである。それでは今度は波に刻まれているA点の時刻(ウェーブ・フロント・クロック)を読み出しそれをボートの時計(時刻)とした場合を考えてみよう。このとき、ボートの時計はA地点の時計に比べてどん

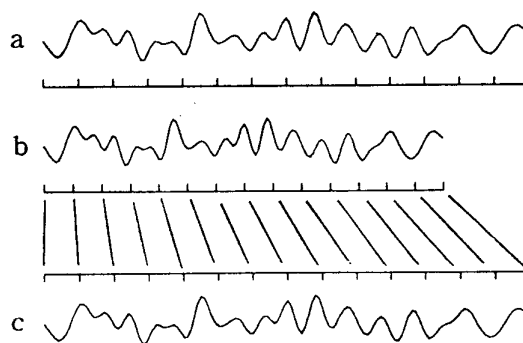


図1. ウェーブ・フロント・クロック法の原理。aの波形を時間軸方向に縮めるとbの波形になるが、同様に歩度が縮まった時計を用いてサンプリングするとcの波形となる。これはaの波形と同じである。

どん進んで行くことになる。なぜならば、ボートの進行と共にA点にとってはより未来の時刻を読み出すことになるからである。さて、この時計を用いて観測（サンプリング）される波は言うまでもなくA点で観測される波と同じになる。つまりB点で波を観測する場合に、波に刻まれたA点のウェーブ・フロント・クロックを使用すれば、A-B点間のドップラーシフトは生じないのである。これがウェーブ・フロント・クロック法の原理である（図1）。

電波星から放射された電波に対しても同じ原理が適用できる。A点で受信した電波とB点で受信した電波の相関を検出しようというのが、まさにVLBIそのものであるが、両者で同じ歩度の時計を用いると、受信した電波には地球回転によるドップラーシフトが生じており、相関を検出するには何らかの方法でこのドップラーシフトを補正しなければならない。ところで、B点で受信する場合の時計として電波に刻まれているA点の時刻（ウェーブ・フロント・クロック）を用いればA点に対するドップラーシフトが自然に補正されてしまう。当然のことながら第3の点Cで電波を受信する場合にA点のウェーブ・フロント・クロックを用いれば、B点、C点間のドップラーシフトも生じない。A点として任意の場所を考慮することができるが、地球中心としそこでの時計はUTCとするのが一般的であろう。この場合を単にウェーブ・フロント・クロックと呼ぶことにする。

実際問題として波に時刻マークがついているわけではないので、各地点での時計の歩度とオフセットを変えることによつてウェーブ・フロント・クロックを実現することになる。例えば波の時刻マーク12時10分に相当する点を受信したときに12時10分、12時20分に相当する点を受信したときに12時20分を指す歩度とオフセットの時計を用意すればこれがウェーブ・フロント・クロックである。当然のことながら、各地点でのウェーブ・フロント・クロックの歩度とオフセットは地点毎に異なっており、また電波星毎にも異なってくる。

3. フリンジ回転とは?

VLBIというフリンジ回転とは何であろうか。またドップラーシフトとの関係はどうなるのか。

電波星に対して静止している2局への電波の伝播遅延を τ_e とし受信角周波数を ω とすると両局の受信電波の位相差は $\phi = \omega \tau_e$ と表わされこの ϕ のことをフリンジ位相と呼ぶ。この地球上の2局の場合、遅延時間は地球回転に伴ってどんどん変化していくことになる。それに伴ってフリンジ位相はどんどん変化するが、この変化のことをフリンジ回転と呼ぶ。つまり ϕ の時間微分 $\dot{\phi}$ がフリンジ回転である。式で表わせば、

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= d\phi / dt \\ &= \omega \dot{\tau}_e\end{aligned}$$

である。ところで、刻々と変化していく τ_e は

$$\tau_e = \tau_0 + \dot{\tau}_e t + \dots$$

と表わせるから、いま時間の1次の項までとれば、

$$\phi = \omega \dot{\tau}_e t$$

と表わされる。 $\dot{\tau}_e$ のことを遅延時間変化率と呼ぶと、注目する（角）周波数に遅延時間変化率を掛けたものがフリンジ回転（（角）周波数）となる。今、2局をX、Yとすると、X局を基準としたY局の角周波数 ω の電波には余分な位相（フリンジ位相 ϕ ）が加わっており、この位相が $\dot{\phi} (= \omega \dot{\tau}_e)$ で変化していることになる。言い換えると角周波数 ω が、

$$\omega \rightarrow \omega + \dot{\phi} = \omega + \omega \dot{\tau}_e$$

に変化していることに相当する。ここで、すでに述べた時間軸の伸び縮みがドップラーシフトであるという表現を用いると、

$$\omega t \rightarrow \omega \cdot \alpha t$$

と表わせるから $\alpha = 1 + \beta$ と書き換えると、

$$\omega \cdot \alpha t = (\omega + \omega \beta) t$$

となる。したがって、ドップラーシフトによる周波数の変化分 $\omega \beta$ が、フリンジ回転 $\omega \dot{\tau}_e$ に相当している。つまりVLBIというフリンジ回転と、ドップラーシフトは同じ現象を別の表現で表わしているに過ぎないのである。

4. フリンジストッピングとは？

フリンジ回転（ドップラーシフト）を伴っているY局の信号とX局の信号（それぞれ、データレコーダーに記録するためにビデオ帯にまで周波数変換された信号を考える）の相関を取るとどうなるだろうか。この場合の相関関数は、その形はフリンジ位相に応じて変化し、かつピーク的位置は時間軸方向にもずれていく（詳細は次章にて式で表わしている）ことになる。したがってフリンジ位相の変化が小さい範囲の積分時間であれば、相関が出るが、積分時間が長くなるとフリンジ位相回転のために相関は失われてしまう。その積分時間とは大体フリンジ回転の周期の数分の1程度と考えればよい。大陸間基線ではフリンジ周波数はXバンド（8GHz帯）では20kHzにも達し、その場合の許される積分時間は僅か数10μsecでしかない。このように短い積分時間では、通常の遅延時間測定に必要なS/N比を得る為に必要な数十秒から数百秒の積分を実行する為のデータセットの数が膨大となり（例えば10μsecの積分単位で100secの積分に必要なデータセットの数は1千万）、処理に超高速で大容量の計算機が必要であり、実用的とは言えない。そこで、単位の積分時間を延ばすために、フリンジ回転を補正する必要があり、現在のVLIでは相関処理時にY局のデータの位相をフリンジ回転に応じて逆回転している。この操作をフリンジストッピングと呼ぶ。さらに、時間毎に変化していく遅延も吸収（遅延追跡：ディレイトラッキングと呼ぶ）しなければならない。これらの操作のお陰で積分の単位を数秒まで延ばす事ができるのであるが、逆にこれらの操作を行うために相関処理装置が複雑で高価な物になっている。（フリンジ周波数が受信周波数毎に異なっており、受信するch数だけ、フリンジ逆回転装置（フリンジローテーターと呼ぶがこれを実現するためには相関関数の実部のみならず虚部も必要）が必要であり、また各chのデータを独立に取り扱うためには、遅延追跡機能もch数だけ必要である。ちなみに現行の測地目的VLIでは14chの受信を行う。）

ウェーブ・フロント・クロック法を用いると相関処理時のフリンジストッピングやディレイトラッキングが不必要となり、相関処理装置が実部のみ簡単な物でよくなる。それでは、ウェーブ・フロント・クロック法を式を使って説明してみよう。

5. 相関関数からウェーブ・フロント・クロック法の原理を説明すると

X局、Y局で受信した信号（ビデオ帯に変換済み）の相関関数は下式であたえられる[3]。

$$r(\tau) = \rho_0 \cos(\theta + \omega_0 \tau + \pi B(\tau + \tau_0)) \sin \pi B(\tau + \tau_0) / \pi B(\tau + \tau_0)$$

$$\text{ここで、 } \theta = \phi_y - \phi_x + (\omega_y - \omega_x)t$$

$$\omega_0 = \omega_x$$

ω_x, ω_y : X, Y局のローカル角周波数

ϕ_x, ϕ_y : X, Y局のローカル付加位相

B : ビデオ帯域幅

刻々と変化していく遅延 τ_0 に対して、上式で表わされる相関関数が変化しない範囲で積分が可能である。 $(\tau + \tau_0)$ の項は時間軸方向の移動を表わすが、 τ_0 の変化に見合った量だけ τ を変化すれば τ_0 の変化を吸収できる。これは、ウェーブ・フロント・クロックを用いてのサンプリングに他ならない。 $\omega_0 \tau_0$ （フリンジ位相）の項の変化を押えるには、2通りの方法がある。 $\omega_0 \tau_0$ の変化を θ で吸収することを考えると、

$$\theta = \omega_0 \tau_0$$

したがって、

$$\phi_y - \phi_x + (\omega_y - \omega_x)t = \omega_0(\tau_0 + \dot{\tau}t + \dots)$$

tに関して一次の項を取ると、

$$(\omega_y - \omega_x)t = \omega_0 \dot{\tau}t$$

したがって、

$$\omega_y - \omega_x = \omega_0 \dot{\tau}$$

という条件を充たせば、フリンジ位相の変化を押えられることになる。これは、X局のローカル周波数にフリンジ周波数分だけオフセットを加えた周波数をY局のローカル周波数とすれば良いことを意味している。これが1つの方法（方法Aと呼ぶ

ことにする)である。

今、 $\omega_y = \alpha \omega_x$ とおき、上式に代入すると、

$$\omega_x(\alpha - 1) = \omega_0 \dot{\tau}$$

であるから、

$$\alpha - 1 = \dot{\tau}$$

という条件を充たせば、やはりフリッジ位相の変化を押えることができる。これは、Y局のローカル周波数を作り出している基準の時計の歩度を α 倍することに相当し、これが2つ目の方法(方法Bと呼ぶことにする)である。この方法はウェーブ・フロント・クロックを基準に用いて、ローカル信号を作り出すことに他ならない。

以上が相関関数から説明したウェーブ・フロント・クロック法を用いたVLBIの原理である。カナダ方式と鹿島方式の違いは、方法Aと方法Bの違いに起因する。

6. カナダ方式と鹿島方式

カナダ方式[1]はビデオ帯までの周波数変換に方法Aを用い、ビデオ帯の信号のサンプリングにのみ、ウェーブ・フロント・クロックを用いている(図2)。一方、鹿島方式[2]ではビデオ帯までの周波数変換に方法Bを用い、さらにビデオ帯の信号のサンプリングにもウェーブ・フロント・クロックを用いている(図3)。つまり、鹿島方式では電波星からの電波はすべてウェーブ・フロント・クロックを基準として処理される。方法Aと方法Bを比べた場合、方法Aではフリッジ周波数が受

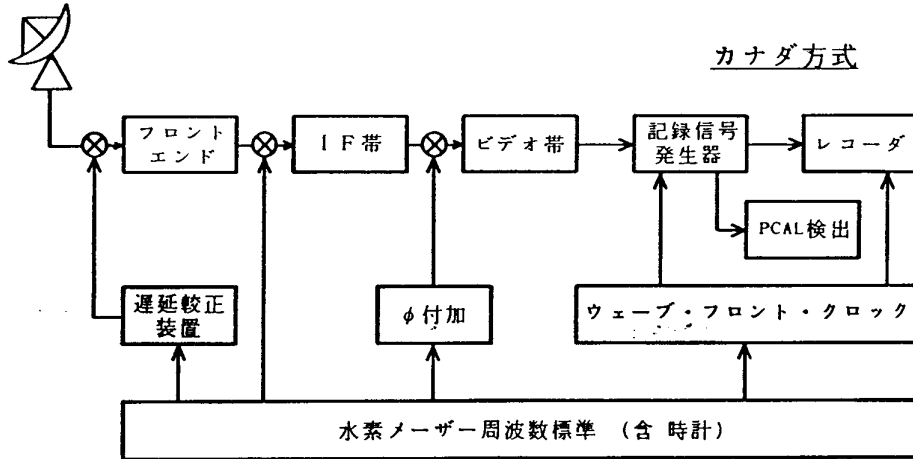


図2. ウェーブ・フロント・クロック法を用いたVLBIシステム—カナダ方式。

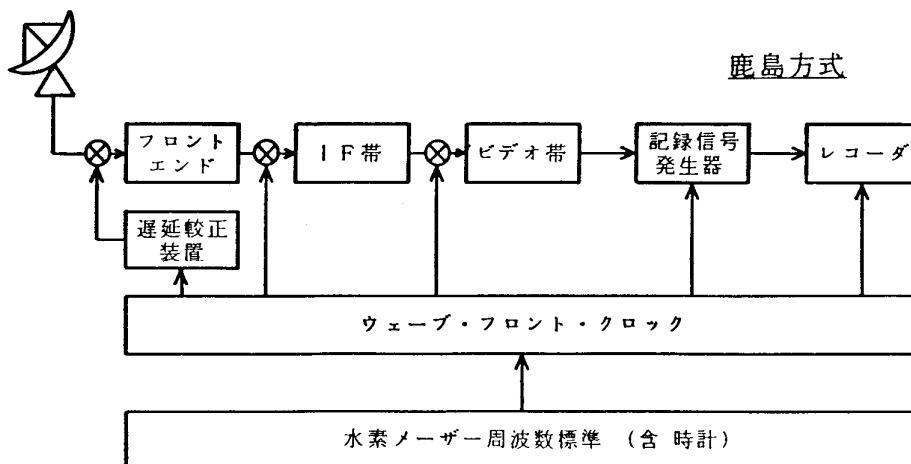


図3. ウェーブ・フロント・クロック法を用いたVLBIシステム—鹿島方式。

信周波数に依存するため、ch毎に独立した周波数オフセットを与える必要があるが、方法Bでは単に基準とする時計の歩度を変えるのみであり、方法Bの方がよりシンプルと言える。したがって、鹿島方式の方がよりシンプルなシステムだと言える。

では、どうしてカナダ方式はより複雑な方法Aを選んだのだろうか？ 想像するに、局内での遅延を較正するためにフロントエンド部から注入されている信号(PCAL信号と呼ぶ)同士の相関を抑制するためではないかと思われる。鹿島方式では、PCAL信号もウェーブ・フロント・クロックから作り出す(現行の方式(1MHzの高調波としてPCAL信号を発生する)では、X局もY局もビデオ帯でのPCAL周波数が同じとなり、相関を持ってしまう。相関の窓が狭い場合には、電波星からの信号同士の相関とPCAL信号同士の相関を分離することが困難となり、遅延時間の決定精度にも悪影響を及ぼしてしまう。ところが、方法Aでは、ローカル周波数にオフセットを与えるという操作によって、PCAL信号同士の可干渉性が失われてしまうため、電波星からの信号同士の相関に悪影響を及ぼさなくなる。恐らく、これがカナダ方式で方法Aを採用している理由と思われる。ちなみにカナダ方式では、観測時に各局でPCAL信号の位相データの取得を行い、相関処理時のPCAL信号の位相検出は考えてないようである。

それでは、鹿島方式でPCAL信号の問題にどう対処していくかを述べよう。

7. 鹿島方式で考えている相関処理

PCAL信号同士の相関は、精密時刻比較のためのゼロ基線長干渉計実験[4]の際にも問題となったが、現在のK-3相関処理装置[5]では、各局毎のPCAL信号の位相を検出しているために、その結果を用いて相関関数からPCAL信号同士の相関を計算により差し引くことができた[6]。当面の間、鹿島方式で取得したデータの処理にK-3相関処理装置を使うならば、ゼロ基線長干渉計実験データの処理と同じ手法を用いてPCAL信号同士の相関の影響を取り除くことができる。

しかし、何よりもウェーブ・フロント・クロック法のメリットは相関処理装置が簡単な物になることである。そこで、新しく相関処理装置を考えるとすれば、次のような物を提案する。それは16ビットラグ程度(K-3相関処理装置では8ビットラグ)をカバーする実部のみの相関を実行し、現行のK-3相関処理装置で持っているPCAL信号位相検出器は特別には設けない。その代わりにビデオ帯でのPCAL信号周波数を現行の10kHzから1MHzに上げ、16ビットラグの相関関数からPCAL信号の位相差も検出してしまおう。ビデオ帯域の2倍をサンプリング周波数とすると、測地目的のVLBIで使用する電波星からの白色雑音の信号の相関関数は、せいぜい3~5ビットにまたがる程度である。そこで16ビットラグ幅の残りの部分からPCAL信号の相関を検出し、さらに、電波星信号の相関関数からその結果を差し引くことにより、遅延も精度よく決定しようと考えている(図4)。ただ、この方法では各局のPCAL信号の位相を独立には検出できないので、2局しか参加しない場合には局毎の性能の比較が困難となる。したがって、例えば受信時にPCAL信号をモニターするなど、別途考慮する必要がある。

しかしながら、ビデオ帯でのPCAL信号周波数を1MHzにできると、受信時のローカル信号周波数を1MHzの整数倍に選ぶことができ、現行のVLBIシステムで用いているような・・・99MHzというような1MHz以下の端数が必要なく、ローカル発振器に要求される仕様がより簡単なものとなる。

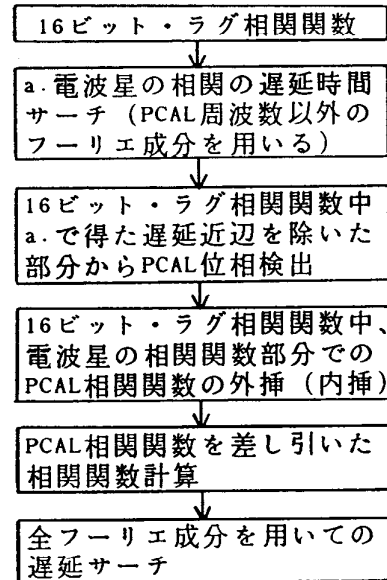


図4. 相関処理の流れ。

8. さいごに

以上、ウェーブ・フロント・クロック法を用いたVLBI実験の原理、カナダ方式と鹿島方式の違いについて述べた。鹿島方式での最大の弱点はシステム内での遅延を較正するための位相較正(PCAL)信号同士の相関が相関関数に含まれてしまうことであるが、この影響を取り除く相関処理方法についても述べた。PCAL信号の影響を取り除くには、ここで述べた方法以外に例えば、PCAL信号同士の相関を生じさせないようにPCAL信号を各局固有の符号で拡散する方法も可能であり、この方法についても検討中である。またここでは触れなかったが、相関関数に悪影響を及ぼすものとしてサンプリング後のデータに付加されているヘッダー部がある。K-3型のフォーマットの場合、1フレーム20,000ビットのデータ中160ビットがヘッダーとして使われているため125観測に1回の確率でヘッダー部分同士の相関が生じる。測地目的の実験では1日に百数十観測を行うので、せいぜい1日で数観測が影響を受ける程度であり、深刻な事態ではないが、相関処理装置で単にヘッダー部での相関を抑制するのみで、この問題は解決できる。

参考文献

- [1] Cannon, W.H. and J.L.Yen, "Development of a long baseline interferometer for monitoring the earth's rotation - phase II", final report for contract 23SU-23235-1-0872, 1983.
- [2] 木内 等、川口 則幸、雨谷 純、「Wave Front Clock法によるVLBI実験」、第392回研究談話会資料、1988、7月。
- [3] 近藤 哲朗、国森 裕生、「バンド幅合成ソフトウェア(KOMB)」、電波季、Vol.30、特1、pp.199-216、1984。
- [4] 浜 真一、木内 等、高橋 幸雄、雨谷 純、高橋 富士信、「局内遅延差を求め
るためのゼロ基線干渉計実験」、第352回研究談話会資料、1986、6月。
- [5] 杉本 裕二、浜 真一、「相関処理装置」、電波季、Vol.30、特1、pp.163-175、1984。
- [6] 近藤 哲朗、雨谷 純、「K-3型VLBIシステムで用いられている位相較正
信号が相関関数に与える影響について」、第348回研究談話会資料、1986、3月。