

ウェーブ・フロント・クロック法を用いたVLBI実験
— 必要とされる予測値の精度と
相関処理データの整合性について

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

地球回転によって生じるドップラーシフトを観測時に補正してしまうウェーブ・フロント・クロック法を用いたVLBI実験の原理については第396回研究談話会で報告した[1]。今回はウェーブ・フロント・クロック法（以下WFC法と呼ぶ）を用いたVLBI実験で必要とされる予測値（主に遅延時間変化率）の精度について報告する。さらにWFCを制御する時計の時刻オフセットが観測量に及ぼす影響についても考察する。また現在のVLBI一次処理ソフトウェア（相関処理及び相関処理結果から遅延時間、遅延時間変化率を求めるソフトウェア）をWFC法を用いたVLBI実験データに対して整合を取る方法についても触れる。

2. 必要とされる予測値の精度と許される局位置の誤差

必要とされる予測値の精度は相関処理時の単位の積分時間で許されるコヒーレンスロスで規定される。単位の積分時間内のコヒーレンスロスは遅延時間変化率($\dot{\tau}$)の予測値との残差($\Delta \dot{\tau}$)によるフリッジ位相回転で生じる。この位相回転量を ϕ とすると、コヒーレンスロス L_c は

$$L_c = 1 - 2 \sin(\phi/2) / \phi \quad (1)$$

で与えられる[2]。図1は8GHzでのコヒーレンスロスと $\Delta \dot{\tau}$ の関係を単位の積分

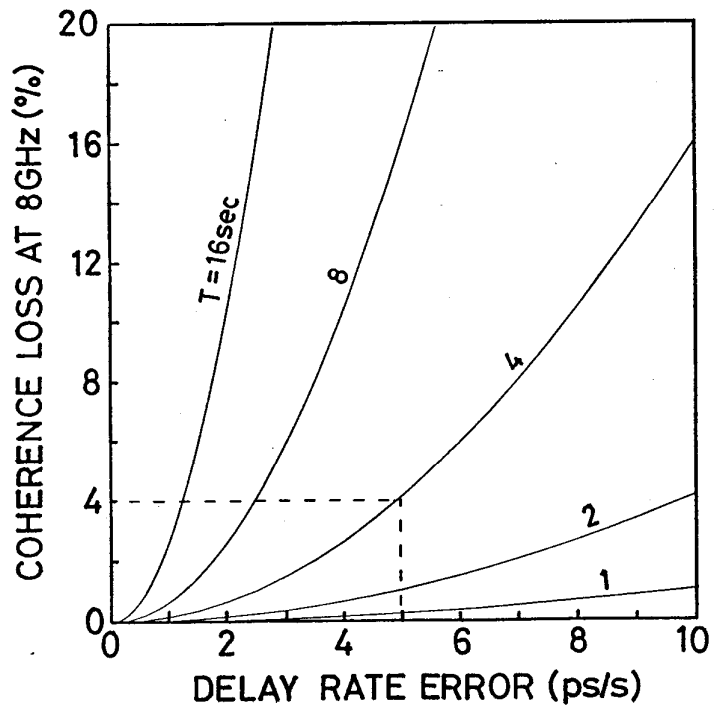


図1. 8GHzでのコヒーレンスロスと遅延変化率の誤差の関係。積分時間を1、2、4、8、16秒とした場合の遅延時間変化率の誤差とコヒーレンスロスの関係を示す。

時間をパラメータとして示す。現行のVLBIデータの相関処理に習って4秒を単位の積分時間とすると5 psec/sの差でコヒーレンスロスに4%程度に押えることができる。そこで必要とされる $\dot{\tau}$ の予測値の精度としては5 psec/sを目安と考えることにする。ちなみにWFCのハードウェアとしては0.7 psec/sの分解能でセットすることができ[3]、この部分の量子化で生じるロスは十分に小さく問題ない。

それでは次に、 $\dot{\tau}$ を誤差5 psec/sで求めるために必要な局位置の誤差について述べる。地球上の2点を観測局とするVLBI観測では局位置(基線ベクトルといつてもよい)のZ成分(自転軸方向成分)の誤差は $\dot{\tau}$ の誤差とはならず、X, Y成分(赤道面に投影した成分)のみが $\dot{\tau}$ の誤差に寄与する。式で表わすと、

$$\Delta \dot{\tau} = \frac{\partial \dot{\tau}}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial \dot{\tau}}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial \dot{\tau}}{\partial Z} \Delta Z \quad (2)$$

$$\text{ここで } \frac{\partial \dot{\tau}}{\partial X} = \omega_E / C \cdot \cos \delta_* \sin(\theta - \alpha_*)$$

$$\frac{\partial \dot{\tau}}{\partial Y} = \omega_E / C \cdot \cos \delta_* \cos(\theta - \alpha_*)$$

$$\frac{\partial \dot{\tau}}{\partial Z} = 0$$

ω_E : 地球回転角速度 ($=7.27 \times 10^{-5}$ rad/s)

C : 光速 ($=3 \times 10^8$ m/s)

θ : グリニッチ視恒星時

δ_* : 星の赤緯

α_* : 星の赤経

となる(ただし、極運動については省略した)。偏微分係数は星位置、時刻により異なるが、今最大値のみを考えると

$$\omega_E / C \sim 2.4 \times 10^{-13} \text{ m}^{-1}$$

であるから、5 psec/s以内に $\dot{\tau}$ の誤差を押えるには、赤道面に投影した局位置(基線ベクトル)成分が誤差20 m以内で定まっていなければならない。参考のため、図2に局位置を水平成分と垂直成分に分けた場合の許容される誤差を緯度の関数として示す。

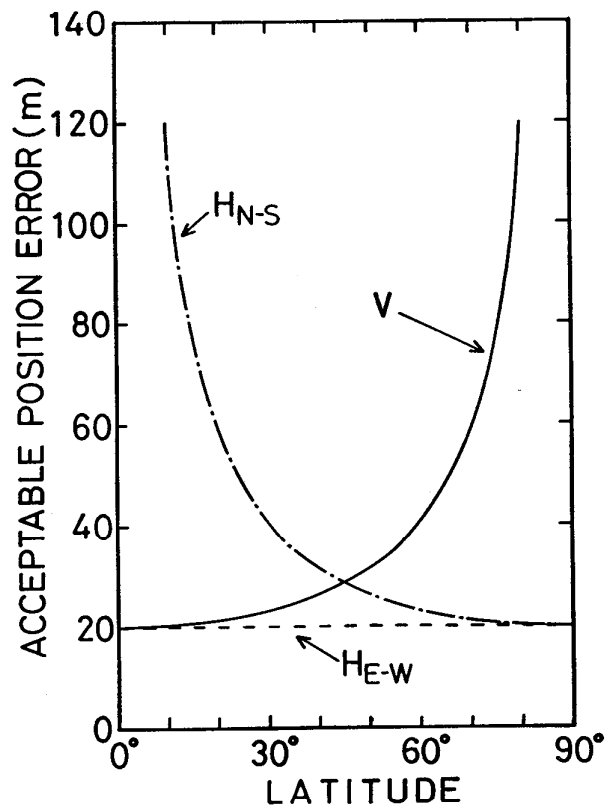


図2. 許容される局位置の誤差と緯度の関係。遅延時間変化率での誤差を5 psec/sとした場合の許される局位置の誤差を水平(H)成分(東西E-Wおよび南北N-S)および垂直(V)成分に分けて示している。

3. WFCを制御する時計の時刻オフセットが観測量に及ぼす影響

2局参加のWFC法によるVLBI実験では、1局のみの周波数標準の歩度をコントロールするのが簡単である。この場合について考えてみよう。歩度はその予測値に対して図3に示されるようにステップ状にコントロールされる。各観測開始時

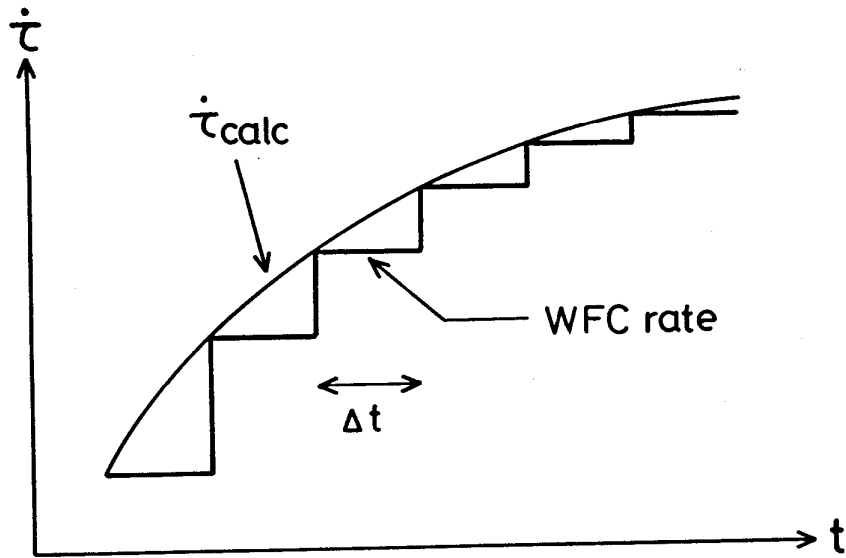


図3. WFCのレートのコントロール方法。観測開始から Δt 毎に $\dot{\tau}$ が計算され、その値を 0.7psec/s で量子化した値でWFCのレートをコントロールする。 Δt の区間内ではレートは一定に保たれる。

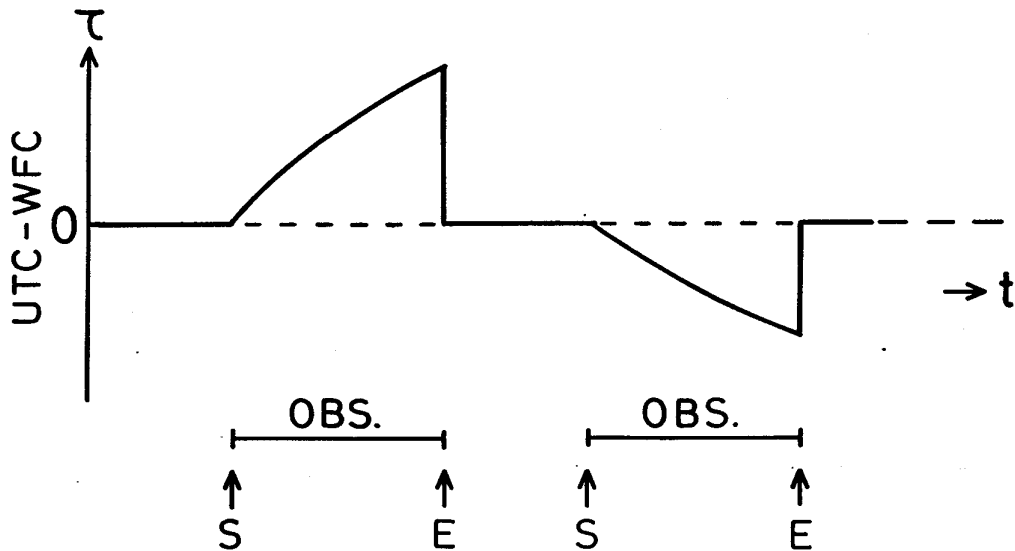


図4. 観測時におけるUTCとWFCの差。各観測の開始時 (S) ではUTCとWFCは一致している。

刻では周波数標準は、局の時系（UTC）を維持する時計とのオフセットが0であり、歩度がその時の値（0.7psec/sで量子化された値）にセットされる。以降、 Δt ごとに歩度が切り換えられる。その結果、UTC-WFCは図4のごとく変化することになる。今年8月に実施した鹿島-筑波基線実験では1秒ごとに切り換えられたが、このタイミングは制御用のパソコンの内部時計で与えられる。したがって、周波数標準制御のタイミングはかなり大きな（最大1秒程度）のオフセットを用うる。このオフセットと図2のようなコントロールに起因するオフセットを合わせて ΔTe とすると、受信信号に与えられた実際的な $\dot{\tau}$ は時間軸方向に ΔTe ずれたもの、すなわち、

$$\dot{\tau} = \dot{\tau} (t - \Delta Te)$$

と考えられる。この $\dot{\tau}$ のズレによって、 τ にも時間軸方向に ΔTe のズレを生じる。すなわち、

$$\begin{aligned} \tau &= \int \dot{\tau} (t - \Delta Te) dt \\ &= \tau (t - \Delta Te) + \text{Const.} \\ &= \tau (t) - \dot{\tau} \Delta Te + \text{Const.} \end{aligned}$$

したがって、 τ の予測値には、 $(-\dot{\tau} \Delta Te)$ のズレが含まれることになる（図5）。

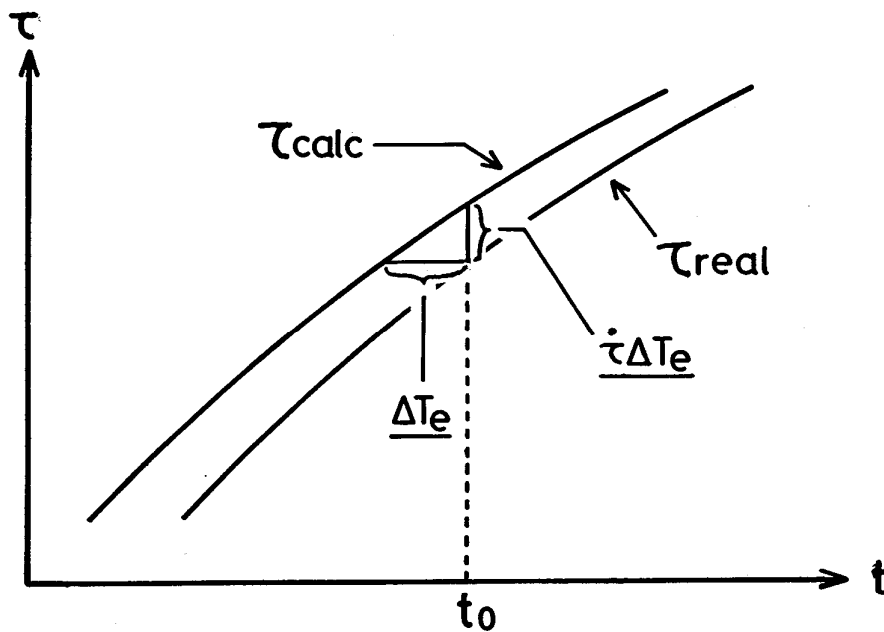


図5. 時刻に誤差がある場合の実際の遅延と予測遅延の関係。データに付加された時刻で時刻 t_0 における予測遅延と実際の遅延との間には時刻オフセット ΔTe によって $\dot{\tau} \Delta Te$ の差が生じる。

このズレは解析において考慮に入れないとすると、誤差となる。例えば、鹿島-筑波基線では $\dot{\tau}$ の最大値は約8 nsec/sであり、通常のVLBI実験で観測される τ のばらつきが0.1 nsec程度であることを考えると、 ΔTe が10msecを超えた場合、解析において考慮が必要となる。

この $(-\dot{\tau} \Delta Te)$ に起因する誤差は、現行のVLBI実験の相関処理時においても発生する。この場合、 ΔTe は相関処理の基準局の時計とUTCのズレを表わすが、通常数10 μ sec以下であり、地球上の2点を取った場合の最大 $\dot{\tau}$ が約3 μ sec/sであることを考えると、十分に小さい。今まで解析の際に考慮に入れられていないが、基準局の時計のズレが大きい場合には要検討である。この誤差はUT1の推定にも影響を及ぼす。

4. VLBI一次処理ソフトウェアとの整合

WFC法によるVLBI実験データを現行の一次処理ソフトウェアで処理する際に考慮に入れなければならない点を述べる。

現行の相関処理ソフトウェア"KROSS"においては観測時間のほぼ中央に処理参照時刻(PRT)を設定して、そこでの τ 、 $\dot{\tau}$ 、 $\ddot{\tau}$ 、 $\ddot{\tau}$ から各単位での積分時間での予測値を求めて相関処理を行っている[2]。相関処理データから観測量としての τ 、 $\dot{\tau}$ を求めるソフトウェア"KOMB"にはPRTにおける予測値が渡される[4]。KOMBではこの予測値にサーチで求めた残差を加えて τ 、 $\dot{\tau}$ の観測量としている。WFC法によるVLBI実験データの相関処理においては、観測開始時の予測遅延のみで、予測 $\dot{\tau}$ は0として相関処理を行うが、正常な $\dot{\tau}$ の観測量を得るためにはWFCとして用いた予測 $\dot{\tau}$ をKOMBに教える必要がある。また、相関処理時の予測 $\dot{\tau}$ が0であるため、部分ビット補正(予測遅延時間をビット数で表わした場合に生じる小数点以下の部分の補正—詳しくは[5]を参照されたし)と呼ぶ補正を相関器内で行うことが不可能であり、KOMBでソフト的にやる必要がある。このための、情報を間違いなくKOMBに伝えなければならない。

5. おわりに

ウェーブ・フロント・クロック法を用いたVLBI実験で必要とされる予測値の精度として遅延時間変化率及び局位置に関して調べた。その結果、遅延時間変化率の精度としては5 psec/sが一つの目安と考えることができた。そのためには、局位置は赤道面に投影した成分で20 m以内の誤差で知っておく必要がある。未知の局の場合、この程度の誤差は十分に起こりうる値であり、未知の局とのWFC法を用いたVLBI実験はむづかしい。したがって、WFC法は局位置の良く判った局間での実験が本質的である。WFC法の特長は相関処理装置が簡単となることであり[1]、例えば位置の良く分かった局間で連続的に実験を行い、それらのデータを多基線同時処理を行うことによって、処理の効率を上げるといった目的に向いているといえる。

参考文献

- [1] 近藤 哲朗、木内 等、「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回研究談話会資料、1988、9月。
- [2] 国森 裕生、浜 真一、「相関器制御・データ収集ソフトウェア(KROSS)」、電波季、Vol.30、特1、pp.185-198、1984。
- [3] 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。
- [4] 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。
- [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。