

4-5 e-VLBI による UT1 の実時間決定

4-5 Real-time Determination of UT1 by Means of e-VLBI

Thomas Hobiger 小山泰弘 関戸 衛 近藤哲朗

Thomas Hobiger, KOYAMA Yasuhiro, SEKIDO Mamoru, and KONDO Tetsuro

要旨

地球の自転により定義される世界時 UT1 は、協定世界時 UTC に対して不規則に日々変動しているため、UT1 と UTC の差 UT1-UTC は主として超長基線電波干渉法 (VLBI: Very Long Baseline Interferometry) によって定常的に測定することが必要である。この UT1 測定のための専用 VLBI 観測のデータを処理するためには、かつては 7 日以上、最近に至っても 1 日以上を必要としていた。この所要時間を短縮するために、VLBI 観測データを高速ネットワークによってリアルタイムに伝送するシステムを開発し、またデータの処理と解析の一連のプロセスをすべて自動化した。本論文では、この目的のために開発したシステムの詳細について報告する。さらに、一連の自動化プロセスを完全に無人化するためには、自動分析アルゴリズムを適用することが有効であることを述べる。

Very Long Baseline Interferometry allows to measure universal time UT1 directly among all space geodetic techniques. In order to decrease the turn-around time of dedicated UT1 sessions an automated real-time processing chain has been set-up which provides real-time measurements of UT1. Within this paper, we are going to discuss the details of this processing chain, including the data-transfer over high-speed networks, called e-VLBI. Moreover, we demonstrate the effectiveness of an automated analysis algorithm, for completely unattended operation and provision of results.

[キーワード]

超長基線電波干渉計, VLBI, 世界時, UT1, 地球姿勢パラメタ

Very Long Baseline Interferometry, VLBI, Universal Time, UT1, Earth orientation parameters

1 序論

現在、超長基線電波干渉法 (VLBI) は、宇宙空間における地球の自転を記述する地球姿勢パラメタ全てを高精度に決定できる唯一の宇宙測地技術である。地球姿勢パラメタには、天球基準座標系の中で地球の自転軸の方向を示す歳差・章動、地球の自転軸が固体地球の表面を通過する位置を示す極運動、それに地球の自転の位相を示す UT1 とがある。その中で、UT1 は、その複雑な物理的性質のために正確に予測することができない最も変化しやすい量である。1980 年代前半から、この変動の大きな UT1 を決定するため、世界中に広く分布している VLBI 観測局を利用して定期的に国際実験が行われてきた。現在では、参加する VLBI 観測局の組み合わせによって R1 及び R4 と

呼ばれる 24 時間の国際 VLBI 実験のセッションが 1 週間に 1 回の頻度で定期的実施されており、5 つの地球姿勢パラメタ全てが高精度に推定されている。これらの 24 時間セッションを数年に渡って数多く積み重ねることで、高精度な地球基準座標系と天球基準座標系がともに構築されている。また、近年では、1 週間に 2 回だけ行われる R1 と R4 の 24 時間セッションを補って高い時間分解能で UT1 を推定することと、短時間で観測データの処理と解析を行って迅速な推定結果を提供することを目的として、UT1 の推定専用 1 時間の単基線セッションが週に最大 7 回実施されている。この短時間の単基線セッションは、使用する基線及びセッションをコーディネートする機関によって Intensive 1 (INT1)、Intensive 2 (INT2)、及び Intensive 3 (INT3) という 3 つの異なる観測プロ

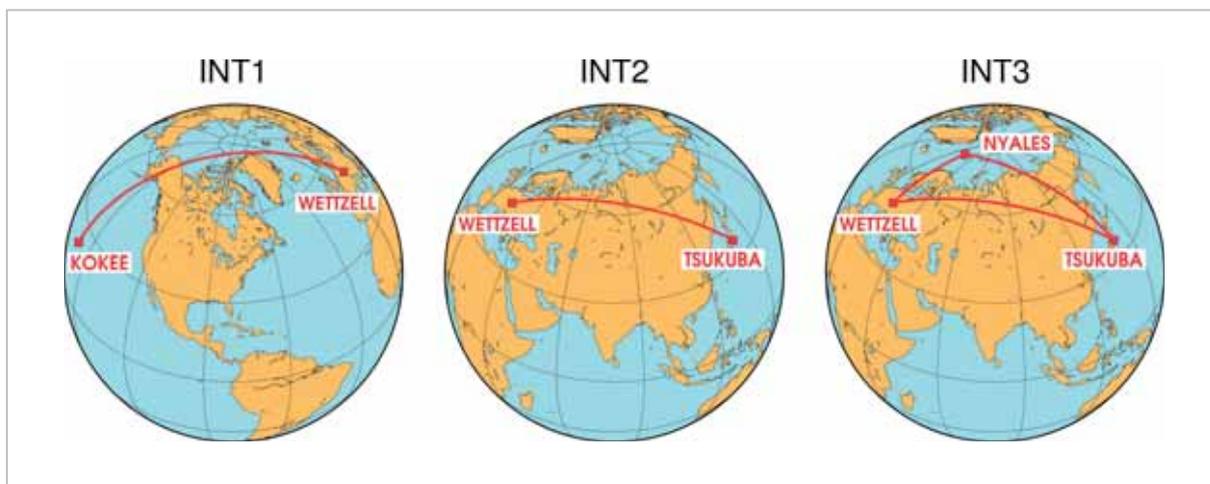


図1 3つのUT1専用VLBI実験の基線

INT1とINT2は単基線セッションとして運用され、一方、INT3は3ヶ所の観測局で運用されている。ここに示されているINT3の観測局ネットワークは、1つまたは2つのサイトをKOKEEまたはSVETLOEで置き換えることで時々変化させることがある。

グラムとして区分されている(図1)。これらの短時間単基線セッションの観測データを処理し、解析するために必要な時間はさまざまな努力が払われてきた結果、ここ数年で大幅に改善されてきたが、それでも処理及び解析の一連のプロセスにはまだ観測終了後から数時間以上の時間を要していた。そのため、解析結果が国際地球回転基準座標系事業(IERS: International Earth Rotation and Reference Systems Service)の予測センターに届くまでにはさらに遅れておおよそ12時間から3日程度の遅れがあった。そこで、我々は、日本国内と欧州にある観測局の間を高速な研究開発用高速ネットワークに接続し、高速にデータ伝送を実現することと同時に、UT1の値をリアルタイムに測定できるようにするために必要なデータ伝送から処理、解析までの一連のプロセスを完全に自動化する自動VLBI処理システムを開発し、その試験と検証を行うための国内外での共同研究をスタートした。

2 VLBIによるUT1の測定

2.1 UT1の測定におけるVLBIの必要性

地球姿勢パラメータ(EOP: Earth Orientation Parameters)は、宇宙空間に固定された天球基準座標系に対して、固体地球とともに回転する地球基準座標系の関係を記述するパラメータである。例

えば、全地球航法衛星システム(GNSS: Global Navigation Satellite Systems)は、全部で3種類、5つあるEOPのうちの1種類の2つ、つまり極運動のパラメータ X_p と Y_p を測定することができる。それに対して、VLBIは、慣性天球基準座標系を実現しているクェーサーの電波を直接観測して測定を行うため、GNSSでは測定することができない歳差・章動の2パラメータ、及びUT1を計測することができる。ここで、天球基準座標系と地球基準座標系との間の変換は、IERS Conventions[1]において次式で定義されている。

$$x_{TRF} = R_2(-X_p) * R_1(-Y_p) * R_3(s) * R_3(\theta) * PN * x_{CRF} \quad (1)$$

上式で、 s は瞬時の極軸の方向の微小変化がもたらす赤道上の非回転原点の移動量、 PN は歳差と章動を表す回転行列である。 θ はUT1から次式によって与えられる。

$$\theta = 2\pi(0.779057273264 + 1.00273781191135448(UT1-UT10))[\text{rad}] \quad (2)$$

電波源の位置と観測局の座標は予め分かっており、極運動についても精度よく予測することができるため、UT1測定専用のセッションでは、UT1以外のこれらのパラメータは固定してUT1のみを推定する。このとき、VLBIによって得られる観測量(図2)を変化させるのはUT1の変動のほか、

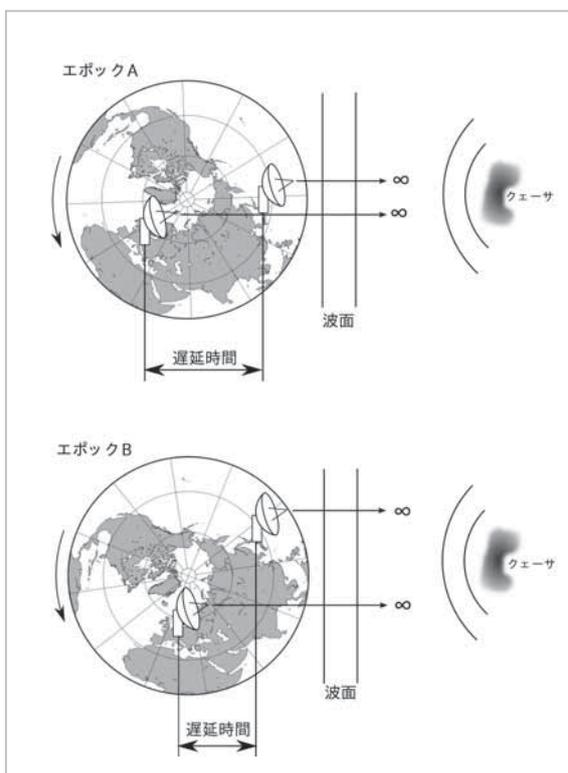


図 2 VLBI の基本原理

2ヶ所以上の VLBI 観測局にある電波望遠鏡が遠く離れたクエーサから放射された電波をそれぞれ独立に受信する。得られた信号の相互相関関数を計算すると、2ヶ所の観測局を通過する波面の間の遅延時間が分かる。遅延時間は、宇宙空間の中での地球姿勢、VLBI 観測局のアンテナの位置、及び電波源の位置によって決まる。後者の2つは十分な精度で分かっており、短時間に大きく変動しないため、ある一定期間に異なる電波源を観測することで地球姿勢パラメータを推定することができる。東西基線を長くすると地球の自転の位相、すなわち UT1-UTC、の変化を測定するための感度が高くなること明らかである。一方、南北基線は UT1-UTC を決定するためには感度がない。

対流圏遅延と観測局のクロック同期差があるが、十分な数の観測量があれば、最小2乗推定によってこれらの不要なパラメータと UT1 を分離してそれぞれの値を推定することができる。

2.2 UT1 の予測値に与える VLBI データ処理に要する時間の影響

UT1 は、地球の自転によって直接定義される時系であるので、原子時計の重みつき平均によって生成される国際原子時にうるう秒の調整を行った協定世界時 UTC とは異なった変動を伴う。したがって、UT1-UTC は地球自転のあらゆる変動と

不規則性を反映した量として計測される。UT1-UTC を正確に知ることは、例えば衛星軌道の測定、深宇宙探査機のような飛翔体の管制や深宇宙通信、天文学と地球物理学の研究、及び衛星重力ミッションのような宇宙測地応用などの多様な用途に非常に重要である。

地球の系は非常に複雑であるので、地球の自転と回転軸の方向に変化をもたらすことが可能なさまざまな構成要素と相互作用が存在する。主な効果には地球と海洋の潮汐、大気との相互作用、核とマントルとの相互作用、及びその他の荷重の効果などがある。そのような効果の時間スケールは2、3時間から数万年の間で変化し、またその影響も1 μ 秒から数千マイクロ秒の範囲に及ぶ[2]。変動の大部分は地球物理学モデルによって説明できるが、小さいながらも重要な部分が依然として予測できないままになっている。

前に述べた時間が重要な全ての応用に対して、IERS の即時サービス予測センターは、UT1-UTC を含む正式な EOP の数値を可能な限りの迅速さで提供している。これには、最新のセッションで観測が行われた後の時間をカバーし、また地球姿勢パラメータのリアルタイムもしくは将来のデータをユーザに提供するための予測を行うことが必要である。そのような予測のため、UT1-UTC で分かっている変化と周期性を全て考慮し、適正なスムージング方法が適用されている。また、短期気象予報から計算される大気角運動量関数を取り入れて、正確な予報に使用している。それでも、図3に示されているように、最後の観測からの時間が長くなると、予測される UT1-UTC の精度は劣化していくことは避けられない。

このような状況を改善するため、現在、週に7回の頻度で1時間だけ国際 VLBI 単基線セッションが UT1-UTC をモニタするために実施されている。これによって、以前よりも UT1-UTC の測定結果を得るまでに必要な時間は大きく短縮され、IERS 即時サービス予測センターが公表する予測値の精度を向上させることに大きく役立っている。ただし、現状ではデータ伝送からデータの処理と解析に至るプロセスの一部にボトルネックがあり、測定結果が利用できるのは、最後の観測が行われてから12時間後から3日後の間になっている。この中で、とくに時間遅れが大きくなるのは、週末

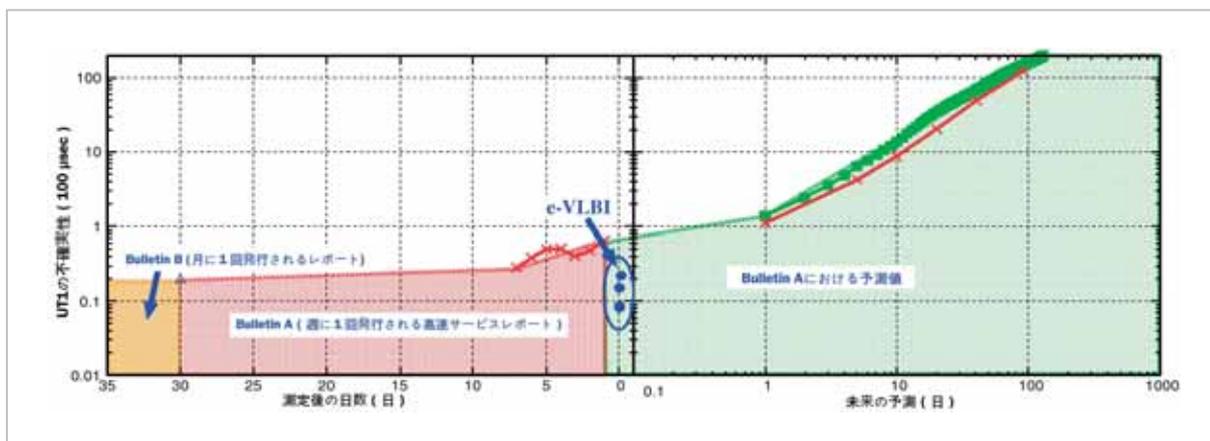


図3 IERS が公表する UT 1 の不確実性

水平軸は現在の前後の時間を示す。翌日の予測には 100 μsec を超える不確実性があり、10 日を超える期間の予測ではミリ秒のレベルを超えることが分かる。黒点は超高速 e-VLBI 実験の形式上の誤差を表し、IERS が毎週公表している高速サービスより大きさがほぼ 1 桁良好である。

や休日など、データを解析して IERS に提供する解析者の勤務日などの環境要因が大きく影響を与えた場合となっている。

2.3 UT1 の計測精度

Whitney ほか[3]によれば、VLBI 観測によって得られる帯域幅合成を行ったあとの精遅延測定精度は、次式で示される。

$$\sigma_r = \frac{1}{2\pi SNR B_{eff}} \quad (3)$$

ここで、 B_{eff} は有効帯域幅であり、観測チャンネルがどの程度広がった周波数領域に分布しているのかで決まる。さらに、信号対ノイズ比 (SNR) は次式で定義される。

$$SNR = \rho \sqrt{BT} \quad (4)$$

B_{eff} を大きくすることには限界があり、また相互相関振幅 ρ は観測システムの性能と観測対象の電波源の強さによって決まるため、観測量である精決定遅延時間の決定精度を高める唯一の方法は、1 つの観測チャンネルあたりの周波数帯域幅 B を広げるか、または積分時間 T を長くすることである。後者は、単位時間あたりの観測数を小さくしてしまうことにつながるため、測定精度を改善して UT1 のより正確な推定値を得るためには、1 つの観測チャンネルあたりの周波数帯域幅 B を拡大す

ることが唯一有効である。

3 e-VLBI 実験

3.1 e-VLBI の経緯

観測帯域幅 B が広がると、VLBI 観測局からデータ処理を行う相関器に送信されるデータ量も同じ割合で増加する。したがって、高精度で処理に必要な時間の短い UT1 実験は、高速ネットワークがすべての VLBI 観測局に接続されてはじめて実現できる。ネットワーク技術や高速ネットワークの社会基盤が急速に進展し、整備されつつあることを背景として、実時間または準実時間 VLBI[4]に VLBI 観測データを伝送するため、光ファイバネットワークによって接続した VLBI が実現可能になってきた。この技術は e-VLBI と名付けられ、光ファイバネットワークで接続された電波望遠鏡の数は 2000 年以降増加を続けている。計測結果を迅速に得ることを実現するための重要な要素の 1 つは、高度なデータ転送プロトコルの選択である。2.3 で述べたように、観測帯域幅 B を広げるとデータ転送速度が増加することと同時に、計測精度も向上する。現在、観測データをいったんハードディスクに記録し、記録したハードディスクを輸送することで実施している通常の VLBI 観測と同等の計測精度を得るためには、毎秒 256 Mbit (Mbps) 以上のデータ伝送速度が必要である。その結果、のべ観測時間が 8.7 時間に

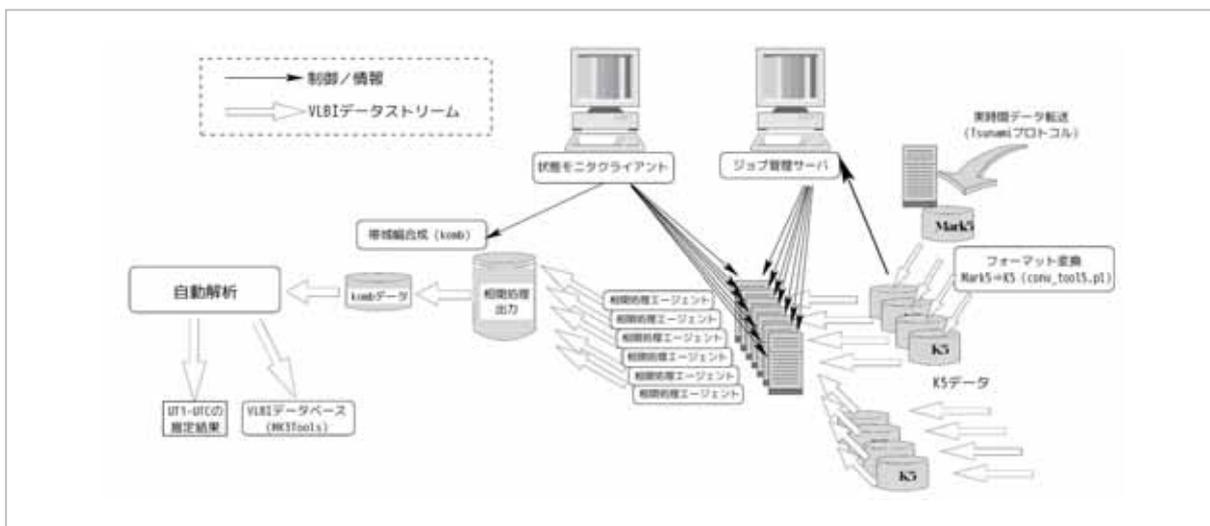


図4 分散コンピューティング環境を利用した自動データ処理

ソフトウェア相関器とデータフォーマット変換プログラムが直列につながり、VLBI データを途切れなく円滑に処理することができる。

ただでさえ1つの観測局あたりのデータ量は1TBを超えてしまう。したがって、持続的にe-VLBI観測を行うには、観測地点から相関処理局への高速データ転送は、サンプリングされたデータ速度以上の速度である必要がある。TCP/IPはネットワークでの信頼性の高いデータ転送を保証するプロトコルであり、正確なデータ転送を必要とする用途に広く使用されている。ただし、TCP/IPの難点の1つは、距離が長くなるとデータ転送が遅くなることである。Hirabaruほか[5]により、次式から理論的限界を理解できる。

$$rate[bps] = \frac{8WS[byte]}{RTT[sec]} \quad (5)$$

ここで、WSはウィンドウサイズ、RTTはネットワーク両端間の往復時間を表す。上式は、転送速度がRTTに反比例して低下することを意味している。基本的に、この限界はTCP/IPに固有の正確で適正なパケット転送を保証する確認応答メカニズムから生じるものである。この限界を乗り越えるため、UDP/IPをベースとする「Tsunami」と名付けられた長距離高速ネットワークファイル転送プロトコルがインディアナ大学の高度ネットワーク管理研究所によって開発された[6]。米国、フィンランド、及びNICTのグループが、VLBI観測用の高速インターフェイスボードから

入力した高速なデータをグローバルなネットワークを経て送信するため、初めてこのプロトコルを利用した。その結果、数千kmの距離で600Mbps以上のデータ転送速度を1Gbpsのネットワーク上で達成することに成功した。標準のTCP/IPプロトコルでデータを送信したときの伝送速度は32Mbpsにしかならなかったので、Tsunamiプロトコルによる効果は約20倍のデータ伝送速度の向上という形で現れたと言える。

3.2 データ処理と解析の自動化

高速インターネット接続によるデータ転送と高度転送プロトコルの使用は、観測データをVLBI観測局から相関処理局に届けることは可能にするが、伝送されたデータを手作業で処理して解析をしているかぎり、処理結果を得るために必要な時間を短縮するには限界がある。したがって、自動化されたスクリプトが伝送されてきたデータストリームを読み取り、それらを適正な処理プロセスへと送ることが重要である。国際的なVLBI実験において、相関器が対応できるデータフォーマットとVLBI観測局から伝送されるデータのデータフォーマットが異なる場合、相関処理局でフォーマット変換を行ってからでなければ処理をすることができない。そこで、我々は、まずデータ受信から相関処理及びその後の解析に至る

全ての段階で円滑に処理をする自動処理・解析プログラムとして自動プロセスチェーンを開発した[7]。

図4に示されているように、処理を行う観測データは、複数のCPUを使用していくつかのタスクを並列で実行することが可能な分散コンピューティング環境で処理される。そのため、サーバはまず入力データを変換クライアントに割り当て、相関器に供給するために変換されたデータパケットを受け取る。相関器自体も分散コンピューティングによって実現されている。ネットワークの故障中やハードウェアクラッシュの際に自動プロセスチェーンが機能停止しないようにするため、処理状況を管理するプログラムは利用可能なコンピューティングリソースを動的に割り当てるように設計されている。また、モニタクライアントは、相関処理を行うCPUを連係させ、ユーザが処理段階をチェックできるようにしている。これら相関器からの出力はハードディスクに蓄積され、1回のスキャンの全チャネルの相関が行われると直ちに帯域幅合成処理が行われ、測地観測量、すなわち位相、振幅、遅延、及び遅延率が専用フォーマット(KOMBと名付けられている)に書き込まれる。その後、結果の後処理である解析を開始することができる。システム全体は分散コンピューティング環境を基本としているため、システム全体の性能はCPUパワーをさらに増強するか、または古いCPUを最新のハードウェアと置き換えることで容易に向上させることができる。さらに、このシステムには既成品のハードウェア部品を使用できるため、初期コストとランニングコストが削減され、メンテナンスとアップグレードは非常に容易になっている。

3.3 データ解析

十分な数の観測データの相関処理が行われた後、データ解析を開始することができ、UT1の最初の推定値が得られる。処理プロセスの進展とともに使用可能なデータ数は増加していき、それとともにUT1の推定値の信頼性が高まって、推定不確かさも小さくなる。

3.4 相関処理出力と外部情報の結合

相関器からの出力の中に、観測データを解析す

るために必要な基本的な情報も含まれているが、実際のデータ解析を開始するには追加の情報も必要である。まず、気圧、温度、及び湿度などの気象データ、及びケーブル遅延の校正データを各観測局で観測プログラムが生成した観測ログファイルから抽出し、観測データの時刻でのデータに補間する。さらに、UT1-UTCの有意な値を導き出すためには、極運動のパラメタ X_p 及び Y_p の予測値が必要である。NothnagelとSchnell[8]が示したように、得られる推定結果に系統的なバイアスを生じないようにするため、章動のパラメタを正確に得ておくことが不可欠である。極運動パラメタは、IERSからの予測とGPSの結果に基づく値とが利用できる。一般的には、後者の精度のほうが前者よりも良いが、UT1の予測に完全に依存しているため、系統的なバイアスが加わっている可能性がある。この問題を克服するためには、2.1で述べたようにVLBIを用いて5つの地球姿勢パラメタを全て推定することが最善の方法である。

3.5 解析ソフトウェアC5++の開発

迅速なUT1推定のために柔軟で堅牢、そして最新の分析ソフトウェアを手にするため、Hobigerほか[9]は、独自のVLBIデータの解析プログラムを開発した。開発におけるベースとしてCONCERTOと呼ばれる既存のソフトウェアパッケージを活用し、そこに新たに分析ソフトウェアを設計して、C5++と名付けた。この宇宙測地データ解析ソフトウェアは、VLBI専用としてだけでなく、衛星レーザー測距(SLR=Satellite Laser Ranging)やGPSの解析にも使用できるように開発を進めている。これら全ての宇宙測地技術でC5++の同じ物理モデルと地球物理学的モデルを共通で利用できるため、それらの技術を横断して一貫性のあるデータ解析を実現できる。そのため、結果は地球測地観測システム(GGOS: Global Geodetic Observing System)が目標としているような、正規方程式レベルかまたは観測量のレベルで結合することができる。NICTが開発したソフトウェア相関器の出力フォーマットをC5++で直接読み取ることができるため、従来から存在している解析ソフトウェアでは必要であった中間的なインターフェースは不要である。独自で開発したプログラムであるが故に、不明確さのある部分は

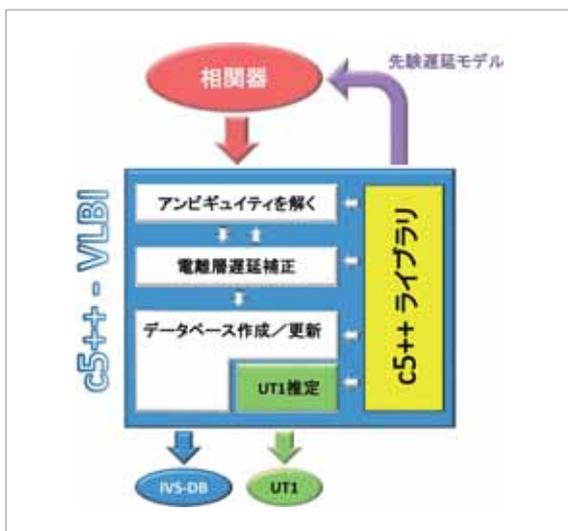


図5 C5++ ライブラリを用いた自動解析と UT1 推定のフローチャート

他のソフトウェアパッケージでは、現在のところ曖昧さを修正するための人による操作を必要とし、プロセスチェーンを減速してしまう。C5++ のルーチンはこの問題を克服し、完全に自動化されたプロセスを実現可能にしている。対象パラメタの UT1-UTC とは別に、曖昧さの無い観測量がデータベースに書き込まれ、他の調査目的や詳細な再解析にも使用できる。

なく、また電離層補正についても C5++ のフレームワークの中で行うことができる。目的とする推定パラメタ UT1 を C5++ で推定するだけでなく、VLBI 研究者コミュニティ向けのデータベースも我々が開発しているソフトウェアで作成することも提案している。図5に示したように、全てのデータ解析段階の間で可能な最高の一貫性を実現するため、それまでに得られている処理データを解析して得られる最も確からしい遅延モデルを相関器にフィードバックすることも可能である。

ソフトウェアの正確さは IVS ソフトウェア比較^[10]で検証され、理論的な遅延を他の VLBI 分析ソフトウェアパッケージの遅延と比較したときの差は 1 ピコ秒未満になっている。

4 結果の考察

4.1 UT1 の最速測定での世界記録樹立

NICT で開発した自動プロセスチェーンの一部を用いて、Matsuzaka ほか^[11]は UT1 の世界最速決定を報告している。つまり、最後のスキャンが

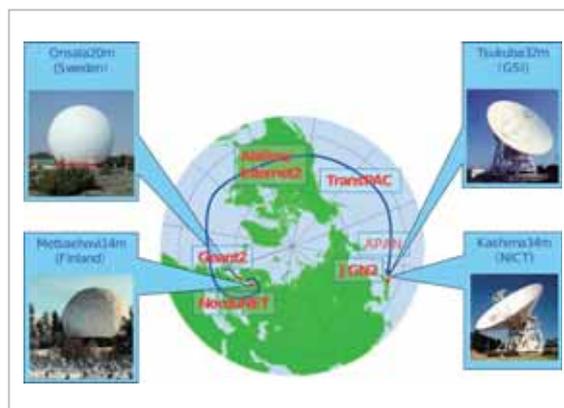


図6 超高速 UT1 測定実験に参加している VLBI 観測局

1 Gbps 以上のネットワーク接続性があれば、この実証実験で構築された自動化プロセスチェーンを定常実験 (図 1) に活用することができる。

観測されてから 3 分 45 秒後である。図6にこのときの実験に参加した観測局と、それらをつなぐ高速ネットワークとを示す。このように、ほとんどリアルタイムで UT1 の計測結果を得ることが示されたことは、関係する研究者の関心を集め始めた。現在定常的に実施されている UT1 専用 VLBI セッションに比べ、超高速 UT1 測定実験の計測結果は最大 100 時間も早く利用できるため、多様な用途への活用が期待されるからである。

4.2 運用での成果と意味合い

過去 3 年間に渡って得られた経験と結果に基づき、この待ち時間の少ない情報を地球姿勢パラメタの毎日の予測に含めるため、IERS は超高速 UT1-UTC の結果への関心を明らかにしている。最初の結果が 2010 年 7 月に提示され、IERS は現在これらのデータを評価中であり、その後でその結果を日常ベースに含めていくことを予定している。超高速での結果は、UT1-UTC の予測誤差を最小限にし、またこの重要なパラメタを多様なアプリケーションに提供することに役立つことが期待される。実時間 GPS がこの成果の恩恵を受けるだけでなく、深宇宙での探査機の管制や深宇宙通信にも正確な UT1 値が活用されるだろう。

現在は、Wettzell (ドイツ) - Tsukuba (日本) 基線のみで定常的な超高速モードの実験を実施し始めたところである。これは、両サイトでの高速ネットワーク接続の環境が優れていることだけが

理由ではなく、我々の開発した自動化プロセスチェーンがこれを可能としているからである。したがって、ごく近い将来には、この基線でのINT2セッションのみがほとんどリアルタイムでUT1の迅速な計測結果を提供すると予想される。さらに、技術オペレータによる費用のかかる夜間勤務と手動によるやりとりは不要となるので、運用コストを大幅に削減するのに役立っている。いずれ、我々の開発した自動化プロセスチェーンを導入することで、ほかの2つのUT1専用セッションのINT1とINT3でも迅速なUT1の計測結果を提供できるようになれば、IERSによるUT1の予測値はさらに信頼性が高く正確なものに改善できるものと期待できるので、そのように働きかけていきたいと考えている。

5 今後の展望

超高速なUT1の計測結果がIERSで利用される体制が確立されたあとは、その他の地球姿勢パラメタの迅速な推定が次の目標となる。極運動はGPSによってほとんどリアルタイムで観測できるが、それらのパラメタはVLBI観測から得られるUT1の推定値に暗黙的に依存している。したがって、3種類5つの地球姿勢パラメタ全てを一貫して得るためには、VLBI実験のデータを使用することが求められる。極運動を高精度に推定しつつ、地球自転の位相であるUT1も同時に推定するためには、少なくとも3ヶ所の観測局のネットワークが必要である。長い東西基線で集中的な実験を行えばUT1モニタリングに対して高い感度が得られるが、どのような極運動パラメタに対しても全く感度は得られない。2つの観測局の1つを南北基線と共有する3番目の観測局を追加することで、3種類5つの地球姿勢パラメタ全てを分離して高精度に推定するための十分な安定性が得られるはずである。INT2の実験の拡張には、南ア

リカ近辺に観測局(Wettzelに対する南北基線)を追加するか、または日本のアンテナとの南北基線を得るためのオーストラリアの望遠鏡を1局追加することが有効である。オーストラリアのVLBI観測局は、その多くが光ファイバネットワークで接続されているため、後者の構成のほうが実現性が高いと考えられる。いずれにせよ、3つのVLBI観測局のデータを相関処理する必要があるため、相関処理局では処理能力を増強することが必要になるが、自動化プロセスチェーンの修正はほとんど不要である。そのような3基線でのe-VLBI実験をINT2の超高速UT1セッションと同様に行うことで全ての地球姿勢パラメタをVLBI観測によって一貫したデータで提供できることが実証されれば、IERSが公表する地球姿勢パラメタの精度も改善していくことと期待され、そのような目標に向け、さらに研究開発を行っていく予定である。

謝辞

観測データを提供していただいた、国際VLBI事業(International VLBI Service for Geodesy and Astrometry)及び国土地理院の関係者に感謝します。また、Wettzell - Tsukuba基線の実時間データ転送試験にご協力いただいた国土地理院の小門氏と栗原氏に深く感謝いたします。国土地理院の農澤氏には、実時間自動化プロセスチェーンの試験を実施していただき、またOnsala電波観測所のグループには超高速実験の実施に協力していただきました。VLBIデータ解析のための多数のモジュール開発は、C5++開発チームが協力して取り組んでおり、また、高速ネットワークの維持運用では連携研究部門テストベッド企画戦略グループとテストベッド研究推進グループのみなさんに多大なご協力をいただいています。ここにあらためて深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1 IERS Conventions. D. D. McCarthy and G. Petit. (IERS Technical Note; 32) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004, 127pp., paperback, ISBN 3-89888-884-3, 2003.

- 2 H. Schuh, R. Dill, H. Greiner-Mai, H. Kutterer, J. Mueller, A. Nothnagel, B. Richter, M. Rothacher, U. Schreiber, and M. Soffel, "Erdrotation und globale dynamische Prozesse," Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (ISSN 1436-3445), 32, 2003.
- 3 A. R. Whitney, A. E. E. Rogers, H. F. Hinteregger, C. A. Knight, J. I. Levine, S. Lippincott, T. A. Clark, I. I. Shapiro, and D. S. Robertson, "A very-long-baseline interferometry system for geodetic applications," Radio Sci., 11, pp. 421–432, 1976.
- 4 A. R. Whitney, "Future directions in VLBI technology," EVN Symposium 2000, Proceedings of the 5th European VLBI Network Symposium held at Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, June 29–July 1, 2000, Eds.: J. E. Conway, A. G. Polatidis, R. S. Booth and Y. M. Pihlström, published by Onsala Space Observatory, p. 233, 2000.
- 5 M. Hirabaru, "Performance Measurement on Large Bandwidth-Delay Product Network," Proceedings of the 3rd International e-VLBI workshop, IVS NICT-TDC News, <http://www2.nict.go.jp/w/w114/stsi/ivstdc/news-index.html>, 25, 11–19, 2004.
- 6 M. R. Meiss, "Tsunami, A High-Speed Rate-Controlled Protocol for File Transfer," <http://steinbeck.ucsf.edu/~mmeiss/papers/tsunami.pdf>, 2004.
- 7 M. Sekido, H. Takiguchi, Y. Koyama, T. Kondo, R. Haas, J. Wagner, J. Ritakari, S. Kurihara, and K. Kokado, "Ultra-rapid UT1 measurement by e-VLBI," Earth Planets Space, 64(8), 865–870, 2008.
- 8 A. Nothnagel and D. Schnell, "The impact of errors in polar motion and nutation on UT1 determinations from VLBI Intensive observations," Journal of Geodesy, DOI: 10.1007/s00190-008-0212-2, 2008.
- 9 T. Hobiger, T. Otsubo, T. Gotoh, T. Kubooka, M. Sekido, H. Takiguchi, and H. Takeuchi, "c5++ Multi-technique Analysis Software for Next Generation Geodetic Instruments," Proceedings of the Sixth IVS General Meeting, in print, 2010.
- 10 L. Plank, "Comparison Campaign of VLBI Data Analysis Software-First Results," Proceedings of the Sixth IVS General Meeting, in print, 2010.
- 11 S. Matsuzaka, H. Shigematsu, S. Kurihara, M. Machida, K. Kokado and D. Tanimoto, "Ultra Rapid UT1 Experiments with e-VLBI," Proceedings of the 5th IVS General Meeting, 64, 68–71, 2008.



Thomas Hobiger

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ研究員
Ph.D.地球物理学、測地学



こやま やすひろ
小山泰弘

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループグループリーダー 博士(学術)
宇宙測地、電波科学



せきど まさる
関戸 衛

総合企画部企画戦略室プランニング
マネージャー 博士(学術)
地球物理学、測地学



こんどう てつろう
近藤哲朗

新世代ワイヤレス研究センター
鹿島宇宙技術センターセンター長
理学博士
地球物理学、測地学