

NICT の eVLBI 開発と VLBI Data Interchange Format (VDIF)

関戸 衛¹、木村守孝¹、小山泰弘¹、近藤哲朗^{1,2}、瀧口博士¹、トーマス・ホビガー¹、川合栄治¹、市川隆一¹、堤正則¹、岳藤一宏¹、石井敦利^{3,1,4}

1: 情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター

2: 亜州大学, 韓国

3: 国土地理院

4: (株) エイ・イー・エス

概要

NICT では、eVLBI と呼ばれるコンピュータネットワークを使った VLBI 観測とデータ処理に関する研究開発を進めている。これまで、北欧のフィンランド、スウェーデンの局と鹿島 34m、国土地理院のつくば 32m アンテナと協力して eVLBI による UT1 の迅速推定を行う観測を進めてきた。また、2008 年 6 月の国際 eVLBI ワークショップにおけるオーストラリアとの eVLBI 実験や、2009 年 1 月に予定されている JIVE との eVLBI 観測に参加するなど、K5 の国際的な互換性を向上させるためのソフトウェア開発を行っている。また、eVLBI により各国の観測システム間の互換性が大きく改善しつつあり、世界共通のデータフォーマットとして、VLBI Data Exchange Format (VDIF) の仕様検討がすすめられている。VDIF の現在の仕様案について紹介する。

1 はじめに

コンピュータとネットワークを使って VLBI 観測を行う技術は eVLBI と呼ばれている。

eVLBI の従来の VLBI 観測になかった特徴として挙げられる点は、(a) 観測から結果を得るまでの時間が大幅に短縮されるという点だけでなく、ソフトウェアで VLBI データが処理できるようになったことで (b) データ変換が容易になり、ネットワークという共通の高速通信媒体が存在することによって、各国の VLBI データ取得システム (DAS: Data Acquisition System) 間の互換性が大幅に改善したこと、更に (c) ハードウェアでは困難であった高い周波数分解能の VLBI 解析や、宇宙探査機の軌道決定観測に代表される特殊なデータ処理に容易に対応できるようになったこと、などがある。特に (b) の互換性の改善は、共同観測を前提とする VLBI にとって本質的で極めて重要である。

この報告では、2008 年に行った NICT の eVLBI 技術開発に関する報告と、新しく提案されている eVLBI 時代の共通データフォーマット VDIF (VLBI Data Interchange Format) について紹介する。

2 NICT の eVLBI 開発と活動

2.1 eVLBI による迅速 UT1 計測

UT1-UTC は、クエーサを基準とする宇宙空間の慣性座標系に対する地球の自転角を表すパラメータで

あり、現在の技術では正確な予測が困難であるため、観測的に決定する必要がある。VLBI はこの UT1-UTC を長期にあたって安定に計測することができる唯一の宇宙観測手段である。自転角 (UT1-UTC) を含めた地球回転パラメータは、地球の宇宙空間における姿勢を表し、深宇宙探査機の軌道決定などにとって、精度の高い現在値及び将来の予測値が必要とされている。IERS は、eVLBI や GPS などの宇宙測地技術の迅速な測定値を使って、現在及び近未来の予測精度を向上させるための努力を行っている [1]。

我々は、シャルマー大学 Onsala 20m、ヘルシンキ工科大学 Metsähovi 14m、国土地理院つくば 32m と協力し、鹿島 34m アンテナを使って、eVLBI による迅速 UT1 計測の実証実験を行っている。処理を迅速に行うため、関連処理を複数の PC にタスク分割して並行処理する環境を構築し、処理の迅速化を行ってきた [2, 3]。今年度はさらに、処理結果から Mk3 データベースの自動作成 [4] と、解析ソフト OCCAM を使って UT1 を自動推定する仕組みを T.Hobiger 氏が作成し、迅速性を向上させてきた。その結果 2008 年 2 月には、観測後 4 分以内に UT1 の計測結果を得るという、UT1 計測の最速記録を達成した。この観測は観測データレート 256Mbps での観測であったが、更にこれを 512Mbps へ上げることによって、更なる観測精度の向上が期待される。現在の課題は、512Mbps の Mark5 データを K5 データへ変換する作業において、データ変換の速度がデータ生成レートに追いついておらず、

また相関処理の速度も 256Mbps に比べて格段に遅くなることが確認されている。今後、データ変換及び相関処理ソフトウェアの改良を行う必要がある。

今後、eVLBI による UT1 計測を IVS(International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) の定常観測に導入することが期待されているが、現在 UT1 の定常観測を行っている Wettell 局に VSIB[5] を使った DAS がないため、我々が Onsala や Metsähovi 局と行っている手法をそのまま Wettzell 局に技術導入することができない。一つの対策として、Mark5B データを NICT の eVLBI 技術を使って伝送する方向を検討している。このために、我々は Wettzell に NICT の PC-VSI ボードを設置しており、Mark5B のデータを K5/VSI で PC に取得し、ネットワーク経由で伝送する試験を個なう予定である。この場合、データ変換にかかる負荷はほとんどなく、相関処理ソフトウェアとして高速な GICO3[6] を導入すれば、上に述べた処理速度の問題が解決するものと期待している。

2.2 ATNF との初のリアルタイム eVLBI 実験の成功

2008 年 6 月に上海天文台で開催された国際 eVLBI ワークショップにおいて、オーストラリアの ATNF が中心となり、鹿島 34m、上海 25m のほか、オーストラリアの Mopra 22m、ATCA 22m、Parks 64m を使ったアジア・オセアニア地域初のリアルタイム eVLBI 観測が実現した(図 1 上)。鹿島 34m 局では ADS-2000 と PC-VSI を組み合わせたシステムでデータを取得し、これに Mark5B ヘッドを付けて UDP パケットにより送信するソフトウェアを作成し、ATNF 本部のあるシドニーに伝送した。このデータ伝送プロトコルは、UDP パケットに 64 ビットのシーケンシャル番号を付け、Mark5B のデータを一定のデータフレーム長に区切ったデータを伝送するという簡単なものであるが、VLBI データの伝送としては十分な性能を発揮している。ATNF では、鹿島、上海などの局から送られてくる Mark5B フォーマット [7] のデータストリームを受け取り、ソフトウェア相関器 DiFX[8] を使ってリアルタイムにデータが処理された。

NICT では、Mark5B エミュレーションのできるこのデータ伝送ソフトウェアをさらに改良し、TCP/IP で外部から送信レートや送信の開始/停止をリモート制御できるサーバソフトウェアを開発した。これを使っ

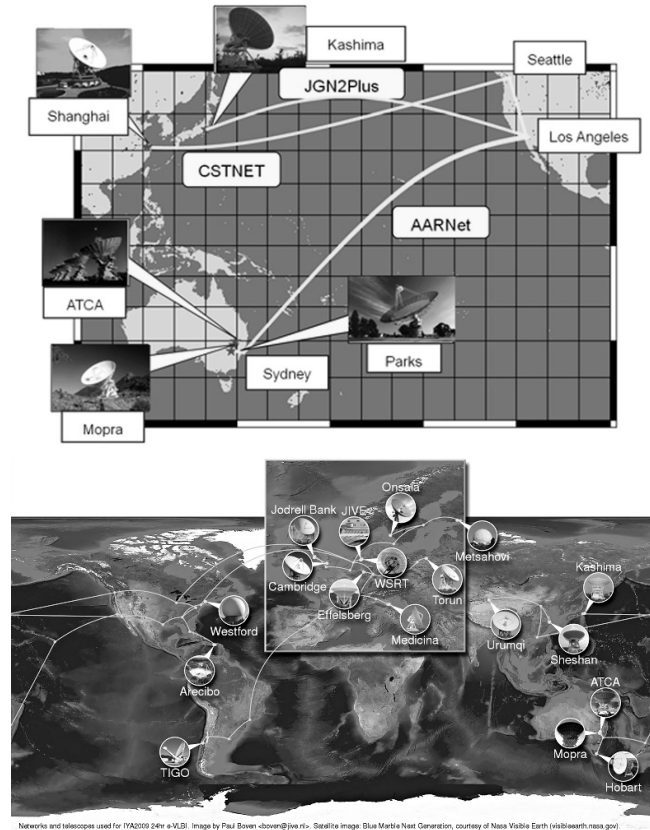


図 1: 2008 年 6 月に成功した、アジア・オセアニア地域初のリアルタイム eVLBI 観測(上図)。各観測局で取得した 32Msps/2bit/8ch=512Mbps のデータが、相関処理センターの置かれたオーストラリアのシドニーに伝送された。2009 年 1 月 15-16 日に世界天文年を記念して実施される eVLBI 観測の参加局(下図)

て、2009 年 1 月 15-16 日に JIVE(Joint Institute for VLBI in Europe) が企画している国際天文年オープニングイベントでの eVLBI デモンストレーション観測に、日本の唯一の電波望遠鏡として参加する(図 1 下)¹。

2.3 初の Mark5A-K5/VSI 混合リアルタイム相関の実現@ SC08

高速計算機とネットワークに関する展示会 Super-Computing 2008 が米国テキサス州 Austin で 2008 年 11 月 15-21 日の日程で開催された。我々は JGN2plus や宇宙天気予報のグループと共に NICT としてブースを

¹実際に、2009 世界天文年のオープニングセレモニーでの eVLBI 実験に参加し、鹿島のデータについてもフリッジが検出され、デモ観測は成功した。

出展した。VLBI グループは 鹿島 34m-Metsähovi 14m アンテナの基線を使って K5/VSI と Mark5A/Tsunami の混合相関処理を、リアルタイムで行うデモを行った。このイベントに向けて Tsunami プロトコルで送られてくる Mark5A のデータストリームをリアルタイムに K5/VSI 型に変換する中継サーバを作成し、GICO3 を使って相関処理を行った。

3 VLBI Data Interchange Format(VDIF) について

2008 年 6 月に上海天文台で開催された eVLBI ワークショップをきっかけに、eVLBI の国際的な共通フォーマットに関する議論が開始されている。同会議において、A.Whitney(MIT), M.Kettenis(JIVE), C.Philips(ATNF), 及び筆者 (NICT) が共通のフォーマットの仕様案を作るための TaskForce メンバとして選ばれ、主にメールを通じた議論を行ってきた。4 人のメンバは各地域を代表しており、筆者はアジア地域の代表として、中国、韓国の担当者、及び日本の国立天文台で光結合型 VLBI システムの開発を進めている川口氏に、議論の途中経過と各段階の仕様ドラフト案を連絡して意見を求めながら、議論を進めてきた。

VLBI のデータ収集システム (DAS) のデータフォーマットの共通化は長い間待ち望まれた懸案であった。2000 年頃から、ハードウェア (VSI-H) や、制御部分のソフトウェア (VSI-S) の標準仕様が提案され、これに沿った DAS システムが NICT や天文台、MIT などで開発され、ハードウェアの互換性向上に一定の成果を上げてきた。更にネットワークを介してデータ伝送を行う eVLBI においても、MIT の D.Lapsley 氏により VSI-E というデータ伝送プロトコルに関する仕様が提案されたが、その仕様の複雑さから普及が進んでいなかった。eVLBI では、ネットワークという共通のデータ交換媒体を共有しており、(1) データフォーマット、(2) データ交換プロトコル、という二つの仕様を規定することが鍵となる。

現在議論されている VDIF は (1) のデータフォーマットに関する仕様であり、(2) と独立した仕様として、データ伝送については更なる技術開発のために、高い自由度を残してある。つまりデータ伝送には、TCP/IP, UDP/IP, その他いかなる伝送方法でも構わないし、コンピュータのファイルとして記録されたデータであっ

てもよい。VDIF の構造は、ヘッダ部とデータ部が繰り返されるフレーム構造であり、フレームサイズはヘッダに記述できるサイズであれば、任意の大きさでよい。ネットワーク伝送においては、フレームサイズをパケットサイズに適應させて伝送することを想定している。図 2 にヘッダ部のフォーマット仕様を示す。ヘッダ部には、あるエポック原点 (現在案は 2000 年 1 月 1 日) から 6ヶ月を単位とするカウント数 (RefEpoch) で基準エポックを示し、その基準エポックからの総秒数で観測時刻を表す。前例のない時刻の記述方法であるが、これにより、DAS の時刻設定や閏秒を挟んだ観測などにおいて観測局が閏秒を気にしなくてもよい仕組みとなっている。ひとつのデータストリームを Thread と呼び、この Thread に含まれるサンプリングビット数、チャンネル数がヘッダに書かれている。この Thread を区別するために ThreadID が設けられており、ひとつの観測局から複数の Thread(データストリーム) を送出することができる。使い方の例を幾つか示すと、例 1) K5/VSSP で 4ch をセットとする 4 つの Thread、例 2) VERA や SKA、VLA など複数のアンテナを持つ局において受信機ごとに分けた Thread、例 3) 各 thread に 1ch のデータを格納し、チャンネルごとに異なる宛先にデータを送信する、といった使い方ができる。EDV と Extended User Data (EUD) はユーザが書き込むことができる未定義領域で、ユーザが必要とするデータを格納できる自由度がある。EUD の使い方の仕様をユーザが定めて、そのバージョン番号を EDV に書くことにより、ユーザがヘッダ領域に情報を追加して使用することができる。そのようにして開発した仕様を国際的に使用する場合、EDV に世界でユニークな番号を振るための調整機関を持つことが想定されている。データ部のフォーマットは Mark5B[7] を踏襲しており、K5/VSI とほとんど同じで、アドレスの小さい方から同一時刻の各 channel のデータを並べ、それを繰り返すというものである。

4 まとめ

NICT の開発した K5/VSSP, K5/VSI は米国の Mark5 との互換性を備え、UT1 計測に代表される国際 VLBI 観測を行っている。オーストラリアや欧州との eVLBI 観測に参加し、国際的互換性を更に高めている。また、NICT は eVLBI 時代の世界共通の VLBI

	Bit 31	Bit 0
Word 0	I ₁ x ₁	Seconds from reference epoch ₃₀
Word 1	Ref Epoch ₆	Data Frame # within second ₂₆
Word 2	V ₃ bits/sample-1 ₅	Data Frame length - 1 (units of 8 bytes) ₂₄
Word 3	L ₁ log ₂ (#chans) ₅	Thread ID ₁₀ Station ID ₁₆
Word 4	EDV ₈	Extended User Data ₂₄
Word 5	Extended User Data ₃₂	
Word 6	Extended User Data ₃₂	
Word 7	Extended User Data ₃₂	

図 2: VDIF のヘッダフォーマット案。図の中の記号は、上から順に以下のとおり。I:Valid Flag,V:Version Number,L:Legacy 互換モードフラグ (廃止予定)、ThreadID:本文参照、StationID:2 文字の局 ID、EDV : Extended Data Version, Extended User Data:未定義 (ユーザ領域)。

データフォーマットとして VDIF 仕様案の策定に積極的に参加している。世界各地の多くの電波望遠鏡が共同観測することが重要な VLBI にとって、eVLBI の登場は、互換性の問題を解決して世界中でのアンテナでも共同観測できるようになるための画期的な契機である。NICT は情報通信の研究機関として、今後も高速ネットワークを使った eVLBI 技術の開発を活発に進め、VLBI の発展に貢献していきたい。

5 謝辞

高速ネットワークを使った迅速 UT1 計測実験の実現は、スウェーデンのオンサラ宇宙観測所 Rüdiger Haas 氏、フィンランドのメツアホビ電波観測所 Jouko Ritakari 氏、Jan Wanger 氏、Ari Mujunen 氏、国土地理院の栗原氏、小門氏、谷本氏、町田氏の協力のおかげである。ここに感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] Johnson, T., et al., "Rapid Service / Prediction Centre", *IERS Annual Report 2005*,57-66, 2005.
- [2] Sekido. M., et al., Ultra-rapid UT1 measurement by e-VLBI, *Earth Planets and Space*, Vol.60, pp,865-870, 2008
- [3] 関戸 他,e-VLBI による迅速 UT1 計測 - 観測から 30 分で可能になった UT1 -, 2007 年度 VLBI 懇談会シンポジウム集録,pp.65-68,2008.
- [4] Hobiger, T. et al., MK3TOOLS & NetCDF - storing VLBI data in a machine independent array oriented data format-, Proc. of 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) Working Meeting April 12, 2007, Vienna, Austria, <http://mars.hg.tuwien.ac.at/evga/>, P03, 2007.
- [5] Ritakari, J., and A. Mujunen, "Gbit/s VLBI and eVLBI with Off-The-Shelf Components", *Proc. of IVS 2004 General Meeting(eds. Nancy R. Vandenberg & Karen D. Baver)*, NASA/CP-2004-212255, pp.182-185, 2004.
- [6] 木村 他, PC-VLBI システムを用いた VERA 用 相関処理系の構築 3, 2007 年度 VLBI 懇談会シンポジウム集録,pp.85-88,2008.
- [7] Whitney, A. R., Mark 5B design specifications, Mark5 Memo Serie, <http://www.haystack.mit.edu/tech/vlbi/mark5/memo.html>, No.19, 2004.
- [8] Deller, A. T., et al., DiFX: A Software Correlator for Very Long Baseline Interferometry Using Multiprocessor Computing Environments, *PASP* ,Vol.119, pp. 318-336., 2007.