

NICTにおけるVLBI2010の開発方針

市川隆一¹

¹ 情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター

光・時空標準グループ

要旨 次世代 VLBI 計測標準として提唱された VLBI2010 の具体案は、2005 年 9 月に “VLBI2010 A Vision for Geodetic VLBI” として国際 VLBI 事業 (IVS) によって公表された。NICT も VLBI 開発の中核機関の一つとして、この VLBI2010 の策定に参加したが、これはあくまで技術開発のガイドラインを示すにすぎない。したがって、いかなる要素技術を用いてこれを実現するかは各機関に任されている。本報告では、VLBI2010 を具現化するにあたっての開発方針と現段階でわかっている技術課題について紹介する。

1 はじめに

次世代 VLBI 技術の開発コンセプトとして策定された “VLBI2010” は、2005 年 9 月に “VLBI2010 A Vision for Geodetic VLBI[2]” という形で公表された。その後、今日に至るまで 4 年近くが経つが、残念ながらそのコンセプトを完全に具現化した VLBI システムは、まだどの関連機関においても稼働していない。我が国における測地 VLBI に関する研究は、主として NICT(含む旧 RRL, 及び CRL) が開発した新技術を国土地理院に移転し、その結果国土地理院が JADE や IVS 等の定常観測を高効率・高精度で実施しつつ観測現場での要請を NICT にフィードバックするという、いわば車の両輪で行われてきた。NICT では、VLBI2010 についても、同様の関係を維持しつつ、開発・実現を進めたいと考えている。具体的には、平成 23 年度より 5 カ年計画で実施予定の第 3 期中期計画に VLBI2010 関連の研究開発を盛り込むべく検討を進めているところである。一方で、VLBI2010 は極めて野心的な内容も含んでおり、一朝一夕には実現が難しい。本稿では、VLBI2010 に準拠した主な研究開発とその課題について概説する。

2 VLBI2010 と NICT 第 3 期中期計画

NICT では、光・時空標準グループ次世代時空計測プロジェクトが主体として、現在の第 2 期中期計画 (平成 18 年度 [2006 年度]-H22[2010 年度]) のもとで VLBI 技術開発研究を推進してきている。第 2 期中期計画が終盤に差し掛かっていることから、次期第 3 期中期計画での研究内容を具体化する作業を今年度より本格的に始めている。我々は、VLBI2010 を第 3 期中期計画での主たる柱の一つと位置付けるべく検討を進めている。既に、高島 [3] により紹介するように、VLBI2010 の設定目標は、

- 測位精度：3 次元的に 1mm
- 局位置、及び地球姿勢*時系列の連続観測
- 観測後 24 時間以内の解析結果算出
- かつ、この仕様の計測を可能な限り長期にわたって継続することが重要

で、これらを実現するために必要とされる技術要件は、

- 口径 12m クラスのアンテナの利用 ~ 同タイプアンテナ利用による低コスト化、重力 & 熱変形の影響軽減、高速駆動、開口効率 60%以上
 - 単一鏡なら AZ 方向に 12 度/秒、ツインアンテナ方式[†]なら 5 度/秒
- 広帯域信号の受信可能なフロントエンド
 - 周波数帯：2.2-14GHz(18GHz、及び将来的には 32GHz の利用も考慮)
 - 受信機の冷却による雑音低減
 - 2 成分直線偏波受信可能な広帯域フィードの利用
- 位相遅延量の利用
- e-VLBI：高速データ伝送とソフトウェア相関処理
- 記録速度：8-16Gbps(ないしは 32Gbps)
- 自動運用必須

*Earth Orientation Paramete[EOP]/地球の自転速度変動、及び極運動を示すパラメータ

[†]大気遅延などの誤差要因相殺を目的として、同形式のアンテナ二式を隣接して配備する方式。ドイツの Wettzell 局で検討されている。

となっている。また、今年3月にドイツ Wetzell で開催された “IVS VLBI 2010 Workshop on Future Radio Frequencies and Feeds” において、“VLBI2010 準拠のシステムによる完全な実験を 2012 年初頭までに実施すべき”、及び“現行の S/X 帯の観測から広帯域観測への移行計画を策定すること”との提言が IVS 評議員会から出された。これらを受けて、NICT が第 3 期中期計画において取り組むことを検討している項目は、

- 広帯域受信機システムを用いた観測周波数と帯域幅の拡充
- 位相遅延計測技術の確立
- 高速デジタルバックエンドの利用による観測ハードウェアの低コスト・高機能化
- 高速アンテナ駆動による観測データ数の向上

である。NICT では、現中期計画において国土地理院と共同で比較基線場検定用の距離基準超小型 VLBI システム (図 1) の開発を進めており、その中では一部 VLBI2010 を先取りした内容も含んでいる。次節で、これも含めて簡単に紹介する。



図 1: 超小型 VLBI システム初号機

3 NICT における主な VLBI2010 技術開発 (現在検討中の案)

3.1 広帯域受信機システム

これまでの一般的な測地 VLBI では、以下に示す式 (1)、及び (2) にあるように、受信信号の帯域と信号対雑音比 (SNR) は比例関係に、さらに SNR と遅延時間決定精度とは反比例の関係にある。

$$SNR = \frac{2}{\pi} \sqrt{2BT} \frac{S}{2\kappa_B} \sqrt{\frac{\eta_1 \eta_2 A_1 A_2}{T_{sys1} T_{sys2}}} \quad (1)$$

(B : 観測周波数帯域 [Hz]、 T : 積分時間 [sec]、 S : 電波天体のフラックス密度 [$W/m^2/Hz$]、 κ_B : ボルツマン定数 $1.38 \times 10^{-23} [J/K]$ 、 η_1 : 観測局 X のアンテナ開口効率、 η_2 : 観測局 Y のアンテナ開口効率、 A_1 : 観測局 X の開口面積 [m^2]、 A_2 : 観測局 Y の開口面積 [m^2]、 T_{sys1} : 観測局 X のシステム雑音温度 [K]、 T_{sys2} : 観測局 Y のシステム雑音温度 [K]、ただし振幅量子化が 1bit の場合とする)

$$\sigma_\tau = \frac{1}{2\pi \Delta f_{rms} \cdot SNR} \quad (2)$$

ここで、 Δf_{rms} は観測周波数帯域幅 B の分散の平方根であり、

$$(\Delta f_{rms})^2 = \frac{1}{B} \int_{-B/2}^{B/2} f^2 df = \frac{B^2}{12} \quad (3)$$

と表される (ただし、単チャンネル観測の場合)。

したがって、極めて単純化すれば、広帯域であるほど測位精度の向上が期待できる。現在の多くの測地 VLBI 観測では、X 帯で合計 256MHz 程度の帯域の信号を 10 程度のチャンネルで切り出して、これらの信号をバンド幅合成することにより等価的に広帯域信号として処理する手法が取られてきた。

一方 VLBI2010 では、一度に 10GHz 以上の広帯域を受信可能なアンテナを用い、各チャンネルそれぞれも少なくとも 1GHz の帯域を確保した上で受信信号の高速サンプリングによる感度向上が提唱された。例えば、図 2 に示すように、2GHz から 12GHz に至る帯域の中から 4 チャンネルを切り出す案などが議論されている。

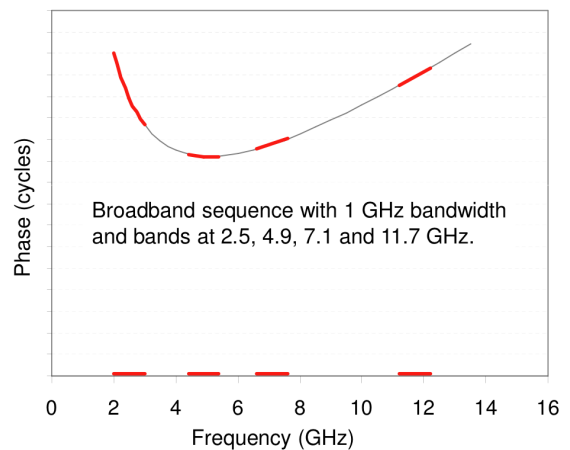


図 2: 広帯域観測でのチャンネル割り当ての例 [4]

このアンテナの例としては、現在、国土地理院と共同で開発中の距離基準超小型 VLBI システム (図 1) に組み込ん

だ広帯域クワッドリッジホーンアンテナ (quad-ridged horn antenna/以後 QRHA と略す) がある。QRHA は図 3 に示すような形状をしており、これ一式で 2-18GHz という極めて広い周波数帯の信号を受信可能である。既に鹿島 34m、あるいはつくば 32m との間で、このアンテナを用いた VLBI 実験に成功しており、測地精度についても現在評価中である。



図 3: クワッドリッジホーンアンテナ

しかしながら、現状の QRHA を使用するだけでは、目的の遅延時間決定精度の達成は難しい。式 (1) で示されるように、アンテナ開口効率や面積、あるいはシステム雑音温度も重要な要素である。これらのうち、VLBI2010 ではアンテナ口径が 12m 程度とされており、面積に関して考慮の余地はほとんどない。一方、システム雑音については、受信機を冷却することにより個々のアンテナで 1 桁程度軽減させることが可能であり、SNR の大幅な向上が見込める。例えば、MIT の Haystack Observatory では先の QRHA を、またスウェーデンの Chalmers 工科大学の Kildal は、彼らが開発した “Eleven Feed アンテナ”(図 4) を冷却することを前提として受信機系の開発を進めている。今後、NICT における開発でも、冷却機能を組み込んだ受信機開発が不可欠と考えている。

3.2 位相遅延計測

前項の広帯域観測に加えて、VLBI2010 での測位精度 1mm を達成する鍵を握るのが位相遅延量の計測である。先の、図 2 で示した 4 チャンネル広帯域観測では、各チャンネルの位相をすべて結合し、これにより非常に広帯域での位相遅延計測を行うことが提唱されている。この手法はまったく新しい物であり、現在 “NASA Broadband Delay Proof-of-Concept System” として検証が進められている [6]。NICT としても、この手法の可能性を考慮に入れつつ広帯域信号の受信システム開発を進める予定である。

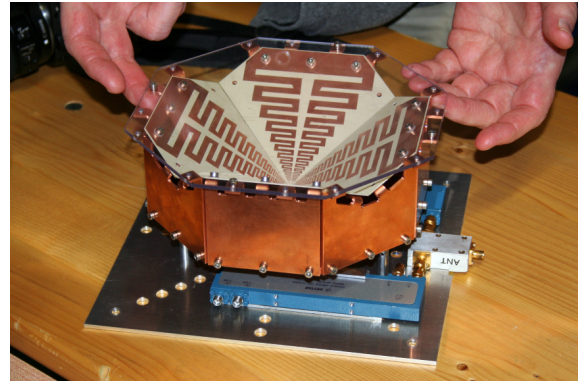


図 4: Kildal による “Eleven Feed アンテナ” [5]

3.3 デジタルバックエンドシステム

2-14GHz、あるいは 32GHz にも及ぶ高周波信号をそのまま A/D サンプリングすることは難しいため、VLBI では一般に各チャンネルの信号位相情報を保持したままで取り扱いきやすい周波数の信号に変換し、その上で A/D サンプリングを行う。この一連の処理を行うために、従来はビデオ変換器と呼ばれるハードウェアを用いてきた。このビデオ変換器は、VLBI のデータ取得を担う、いわゆるバックエンドシステムの要の一つでもある。しかしながら、ビデオ変換器上で個々の観測の要求に応じて帯域やチャンネル数を柔軟に変えるのは容易ではなく、またこのハードウェアがかなり高額という欠点もある。そこで、FPGA(Field Programmable Gate Array[‡]) を用いた “Digital Base Band Converter (DBBC)” の開発が求められ、VLBI2010 でも主要テーマの一つとなっている。

NICT では、これまでの 1-4Gsp/s の高速サンプリング可能な AD サンプラを各種開発してきた経験を持つ。これを生かして、現在我々は、DBBC 処理を実現するための第一歩として、FPGA チップを 2 式と 5Gsp/s 可能な高速 AD サンプラチップを搭載した “ADS3000+” の開発を進めている。既に 2 チャンネルの入力が可能な試作機が完成しており、将来的には VLBI2010 に対応した 4 チャンネル入力とし、各チャンネルの信号を高速 AD サンプリングした後に FPGA によるデジタル信号処理により従来のビデオ変換器と同等の機能実現を目指している。



図 5: NICT が開発中の AD サンプラ “ADS3000+”

[‡] 目的に応じて利用者が内部の回路を再書き換え可能な集積回路 (LSI)

3.4 VLBI2010 と距離基準超小型 VLBI システム

図 1 で紹介した距離基準超小型 VLBI システムは、その使用目的から可搬性を重視してアンテナ口径が極めて小さい。この場合、超小型アンテナ間でのフリッジ検出は困難であるため、NICT では 30m クラスの大型アンテナを介在させたシステム (これを “MARBLE”[§] システムと称する) として解析手法の確立を目指している [7]。しかしながら、先に述べたように VLBI2010 は 12m 口径のアンテナを推奨しており、将来の VLBI システムの主力が大型アンテナから VLBI2010 に移行することを踏まえた MARBLE システムの検討も行う必要がある。

そこで、VLBI2010 で提案された冷却受信機を開発し、これを現行の距離基準超小型 VLBI システムに搭載することを想定した簡単なシミュレーションを行った。相手局は 12m 口径と仮定している。図 6 には、(1)1.6m+常温受信機、(2)1.6m+冷却受信機、及び (3)2.4m+冷却受信機の 3 通りで SNR を計算した結果を示した。ここで、要求精度を満たす測地 VLBI 観測の実現可能な SNR の値を 20 とすると、(2) の例で 55 秒、(3) の例で 25 秒の積分時間を確保すれば群遅延決定精度 1ps 以下が達成できることがわかった。

NICT では、次期中期計画で距離基準超小型 VLBI システムを本格的に時刻比較に応用することを検討中だが、その意味でも VLBI2010 準拠のシステムと距離基準超小型 VLBI システムの組み合わせでも高精度の観測が可能との示唆を得たのは重要である。今後、Feasibility Study として、鹿島、及び小金井の 11m アンテナと距離基準超小型 VLBI システム、さらにこれに ADS3000+ による広帯域データ取得を組み合わせた評価実験を進め、技術開発項目のより具体的な洗い出しを行う予定である。

4 おわりに

VLBI2010 の実現に向けた NICT での取り組みについて概説してきた。我々としては、国土地理院との協力に基づいて進めてきた測地 VLBI 技術開発の流れを、VLBI2010 開発でも継続したいと考えている。その一方で、VLBI2010 は具体化まで道のりはまだ遠く、世界の関係機関とも情報交換しながら検討が必要である。加えて、NICT 次期中期計画の枠組みで時刻比較に VLBI を応用する際には、高安定度の時間・周波数信号の遠隔地への供給技術も実現する必要がある。この分野については、時間・周波数と空間計測分野を網羅する我々の特質を生かした技術開発を推進する予定だが、これもより簡便な測地 VLBI の運用に繋がる技術であり、引き続きのご支援をお願いしたい。

[§]Multiple Antenna Radio-interferometry for Baseline Length Evaluation/基線場検定用多点長基線干渉計

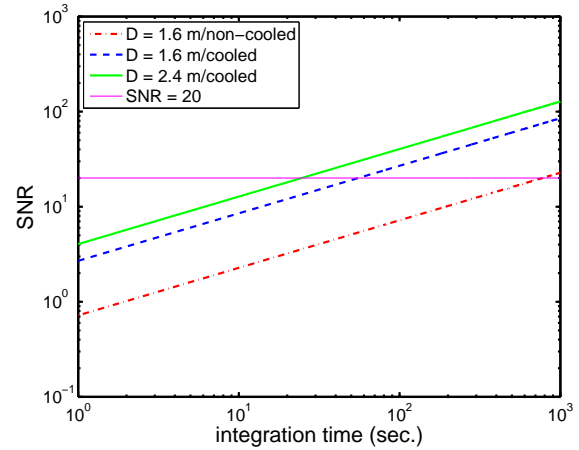


図 6: 異なるフロントエンドシステム毎の SNR と積分時間の関係 (石井 [2009] 私信)

参考文献

- [1] Ishii, A., Ichikawa R., Takiguchi H., Kuboki H., Kondo T., Koyama Y., Machida M., and Kurihara S., Current Status of a Compact VLBI System for Providing over 10-km Baseline Calibration, *IVS NICT-TDC News No.29*, pp.19–22, October 2008.
- [2] VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems, Report of Working Group 3 to the IVS Directing Board, http://ivs.nict.go.jp/mirror/about/wg/wg3/IVS-WG3_report_050916.pdf, 2005.
- [3] 高島和宏、次世代 VLBI 仕様「VLBI2010」とその世界動向, 2009[本談話会講演].
- [4] Petrachenko, B., Broadband Delay Tutorial, FRFF workshop, Wettzell, Germany, March 18, 2009
- [5] Kildal, P-S., Progress report on developing Eleven feed for VLBI2010 and SKA frequency bands. Fifth IVS General Meeting, March 3-6, 2008, St. Petersburg, Russia (VLBI2010), 2008.
- [6] Petrachenko et al., Design Aspects of the VLBI2010 System. -Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee-, 2009.
- [7] Ishii, A., Ichikawa R., Takiguchi H., Kuboki H., Kondo T., Koyama Y., Machida M., and Kurihara S., Current Status of a Compact VLBI System for Providing over 10 km Baseline Calibration, *IVS NICT-TDC News No.29*, pp.19–22, October 2008.