

超広帯域 VLBI 技術の幕開け

岳藤 一宏*

近藤 哲朗、氏原 秀樹、関戸 衛 (情報通信研究機構)

The beginning of a new age of broadband VLBI techniques

Kazuhiro Takefuji*, Tetsuro Kondo,
Hideki Ujihara, Mamoru Sekido, (NICT)

We have developing a super broadband VLBI technique near 10GHz bandwidth.

We will report an 8GHz bandwidth observation between Kashima and Ishioka baseline.

キーワード: アンテナ, 広帯域, 高速サンプリング, バンド幅合成, VLBI, フーリエ変換

(Antenna, Broadband, Bandwidth synthesis, VLBI, Fourier transform)

1. 序論

光格子時計の開発により、 10^{-18} 乗に到達するような超高精度かつ高確度の時計が報告されている(1)。そこで新たな秒の再定義のため、数千 km 離れた国際研究機関同士の時計を高い精度で周波数比較する技術が必要となっている。数百 km 程度の短距離であれば光ファイバが最もよい比較方法であるが(2)、数千 km にもなる長距離では衛星双方向(3)、GPS のように衛星を仲介するなどなんらかの宇宙空間を経由する方法しかない。

そこで、われわれは超長基線干渉計 (Very long baseline interferometer, VLBI) のように電波星からの信号を利用する周波数比較を検討している。これは、同時にひとつの電波星を受信して、干渉処理することで、電波星に対する受信時刻の差を測定する。仮に片方のアンテナの基準となる時計がゆれると、電波星からの電波を受信するタイミングがずれる。これをさまざまな方向の星を観測することで、時計以外の外因を抑え、時計の周波数差を計測するアイデアである。

実際、VLBI による周波数比較実験のため、小型アンテナを開発している(4)。この小型アンテナは日本の時系を有する NICT 本部 (東京都小金井市) と産業総合研究所 (茨城県つくば市) の屋上に設置している。小型アンテナは 1.5m サイズの主鏡のため感度が著しく低い。そこで、十分な感度で星の電波を干渉させるために、30m クラスの大型アンテナが仲介する。さらに感度を上げるため広帯域化が必須である。

一方、International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) は次世代の VLBI 規格として VLBI Global

Observing System (以下 VGOS) を打ち出している。を打ち出している。これはアンテナの位置決定精度を 1mm の目標にしており、2GHz から 14GHz の広い周波数から 1GHz 幅の帯域を 4 つ同時に受信する挑戦的なものである。また大気による遅延を効率よく計測するため 5 度/秒というきわめて高速に駆動するアンテナを規定している。そこで VGOS など国際的な貢献と周波数比較技術開発のため、我々はアンテナの広帯域化開発を 2012 年頃からスタートしている。本研究会ではこの VLBI 広帯域技術開発状況と広帯域 VLBI 実験について報告する。

2. VLBI で計測する群遅延

従来行われている測地 VLBI は S/X バンド (2GHz と 8GHz) から 4MHz~32MHz 幅のチャンネルを最大 16 個使い、星からの電波を記録する。S バンドは電離層による遅延の計測に使われ、実際の測定精度は X バンドの群遅延計測による。相関処理ではバンド幅合成処理とよばれる S バンド、X バンドの周波数チャンネルをひとつにまとめる処理がおこなわれる。群遅延の計測精度 σ_τ は以下の数式に従う(5)。ここで、SNR (signal to noise ratio) は感度を表し、 σ_f は周波数帯域の標準偏差である。

$$\sigma_\tau = \frac{1}{2\pi\sigma_f SNR} \quad (1)$$

現在では、半導体の微細化などでより高速のコンピュータや高速デジタルサンプリングが開発され、S バンドや X バンドを細かく分割することなく、一度にデジタルサンプリングすることが可能になってきた。当時はそのような高速サンプリングがないため、狭帯域のバンドを合成する技術がもちいられた(6)。

表 1 測地 VLBI 実験 JD1501 の周波数割り当て

Table 1. The frequency allocation of JD1501 session

番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
周波数 [MHz]	8201	8205	8215	8245	8305	8415	8495	8545	8565	8561
サイドバンド	LSB	USB	USB	USB	USB	USB	USB	USB	USB	LSB

図表説明: JD1501 の周波数設定、帯域は 4MHz (8 MHz のサンプリングスピード) である。ここでサイドバンドの LSB は Lower sideband, (周波数が反転)。USB は Upper sideband (周波数反転なし) を意味する。

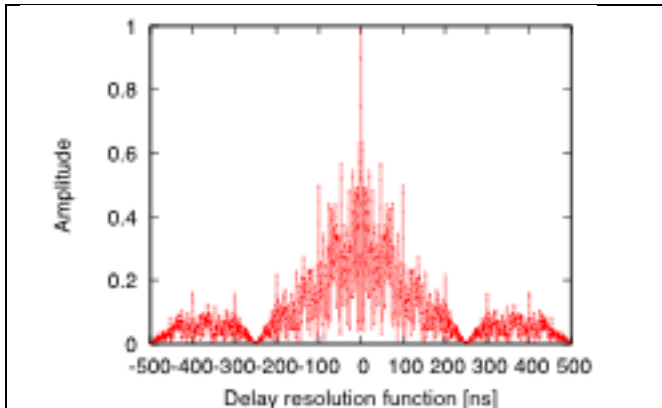


図 1 JD1501 で得られる遅延分解関数

Fig. 1. Estimated delay resolution function in JD1501 session.

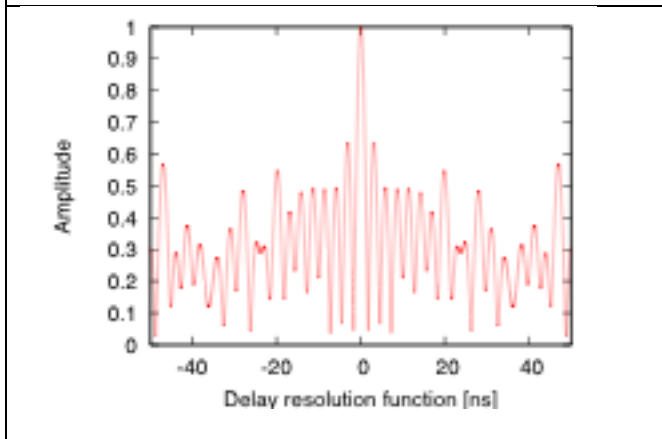


図 2 JD1501 で得られる遅延分解関数 (拡大図)

Fig. 2. Enlarged estimated delay resolution function in JD1501 session.

〈2-1〉 従来の VLBI

2015年1月22日の実験(コード番号JD1501ⁱⁱ)を例にとると、周波数割り当て(Xバンドのみ記述)は表1のように割り当てられている。各チャンネルはたかだか4MHzであるが、これらを合成すると遅延決定精度はこれらチャンネルの逆フーリエ変換となり、図1のようになる(またはその拡大した図2)。

図2の遅延分解関数のピーク幅は表1の周波数配列の標準偏差の逆数に比例する。表1の標準偏差 σ_f は149.1MHzとなり、4MHz幅の10chでも高い遅延決定精度を得られる。

〈2-2〉 これからの広帯域 VLBI

現在我々が目指している広帯域化は3GHzから14GHzを第一目標としている。この中でVGOSと同じように4つの1GHz幅を取る場合、1:3:2の比率をとる周波数差とすると遅延分解関数のサイドローブレベルをおさえ、なおかつ高い決定精度を得られる。この周波数レンジでは周波数配列は3.2GHz、4.8GHz、9.6GHz、12.8GHzを取ると最適となり、周波数標準偏差 σ_f は3815.8MHzとなる。結果的に広帯域化を行い、周波数配列だけで優に10倍高い決定精度が得られる。JD1501と比較では25.6倍精度が上がる(図3にバンド幅合成のJD1501との比較結果参照)。数式(1)によると遅延決定精度は周波数幅に依存する σ_f だけでなく、SNRにもよるため、デジタル記録される帯域幅が広がるほど遅延決定精度は向上する。JD1501とのSNRは4MHzが10チャンネルにたいして、1GHz幅の4チャンネルではさらに10倍(= $\sqrt{4 \times 10 / (1024 \times 4)}$)の向上が予想される。他のバンド幅の広い観測(32MHz*10ch)でも3倍以上向上すると予想している。

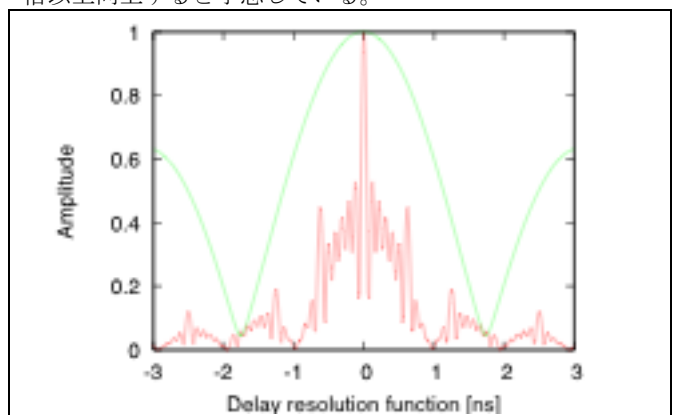


図 3 広帯域 VLBI (赤) と JD1501 (緑) の遅延分解関数比較。

Fig. 3. Comparison between JD1501(green) and Broad band VLBI(red).

3. NICT/Kashima で実現した広帯域システム

鹿島 3.4 m 及び、VLBI 用の 1.5m クラスの小型アンテナの広帯域化をおこなった。図 4 は NICT/Kashima で開発した広帯域フィードである。現在 VGOS の仕様を満たすような広帯域アンテナはすべてビーム幅の広いものが採用されており、通常のカセグレンタイプの大型アンテナが広帯域化されるのは世界初である。フィードで集光後、常温 LNA(4GHz-14GHz)で増幅されたのち、信号は周波数変換されること無く、観測室まで光ファイバで伝送される。観測室では AD 変換器（もしくはデジタルサンプラ）によってアナログ信号からデジタル信号に変換される。途中でアナログ周波数変換などが存在しないため非常にシンプルなシステムである。図 5 は 20GHz 程度まで感度のある AD 変換器で、16GHz のスピードかつ 3bit の量子化でデジタル信号に変換される。内部では FPGA により高速で周波数変換され、任意の 1GHz 幅を出力することができる。

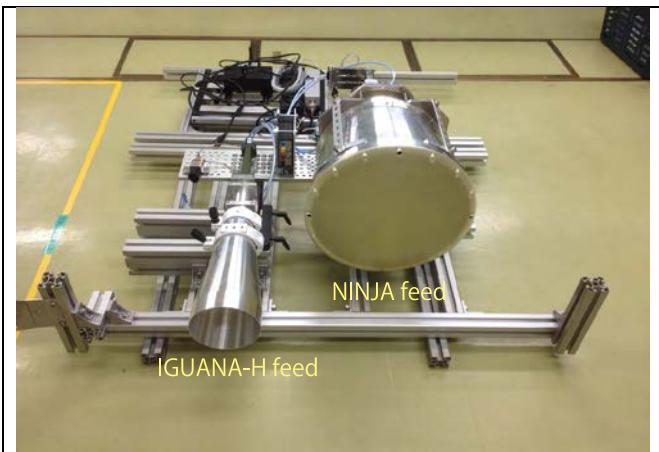


図 4 鹿島 3.4 m 電波望遠鏡に配備した広帯域フィード。NINJA (右) は 3.2~14GHz、IGUANA-H(左)は 6.5GHz-15GHz に対応
Fig. 4. Broadband feed Iguana-H 6.5GHz to 15 GHz (left) and NINJA 3.2 GHz to 14 GHz (right)

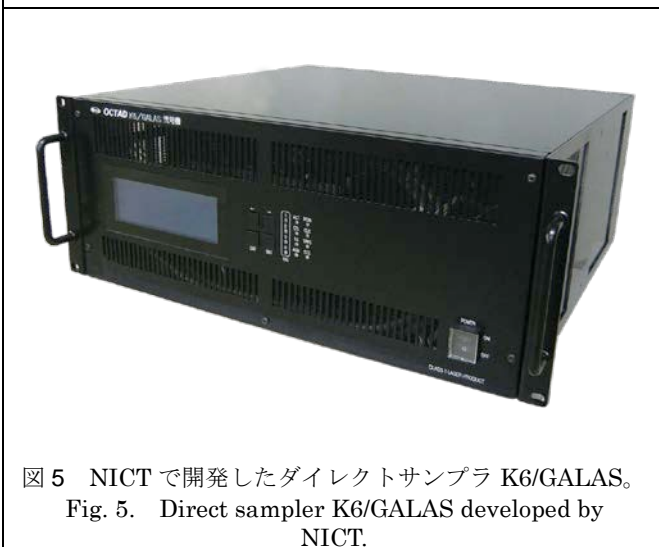


図 5 NICT で開発したダイレクトサンプラ K6/GALAS。
Fig. 5. Direct sampler K6/GALAS developed by NICT.

4. 世界記録の 8GHz 幅のバンド幅合成実験

2014 年 12 月から 2015 年 1 月にかけて国土地理院の石岡局と広帯域化した鹿島 34m との 50km 基線長で VLBI 実験をおこなった。石岡局は VGOS 対応の高速で駆動する 13m アンテナで 2014 年 10 月に開局している。この実験時は広帯域実験が可能な Eleven feed を装備していた。NICT/鹿島から AD 変換器、データ記録サーバーなどのバックエンドを持ち込んで実験に望んだ。ダイレクトサンプラ Galas と従来型の高速度サンプラ ADS3000+ をもちいて、6GHz、7GHz、8GHz、9GHz (Galas)、10GHz と 13GHz (ADS3000+) の 6 つのチャンネル (それぞれ 1024MHz 周波数幅) を記録した。実験ではフリンジとよばれる干渉縞を無事に得ることができた。図 6 と図 7 はすべての帯域の位相情報をコヒーレントに合成した超高精度のフリンジである。計算上、60 秒積分でこのフリンジの遅延決定精度は 27 フェムト秒である (一秒積分で 210 フェムト秒)。

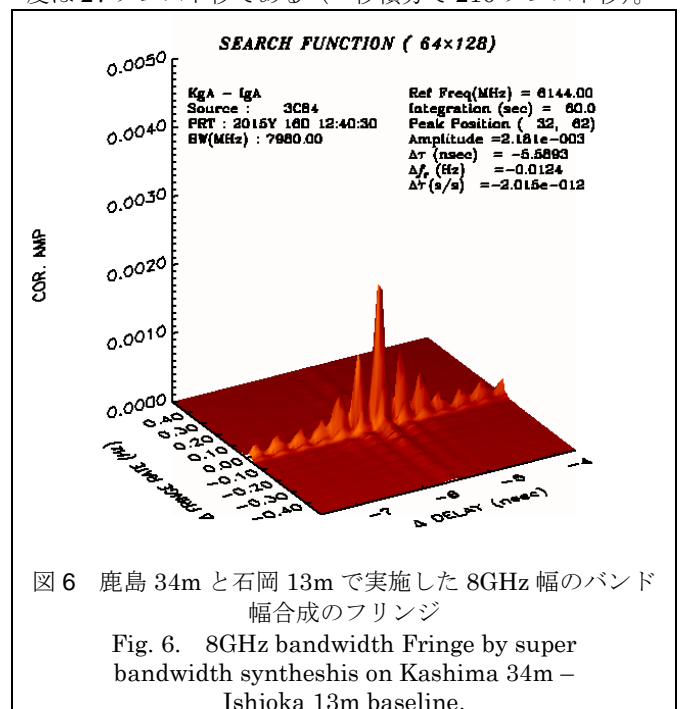


図 6 鹿島 34m と石岡 13m で実施した 8GHz 幅のバンド幅合成のフリンジ
Fig. 6. 8GHz bandwidth Fringe by super bandwidth synthesis on Kashima 34m - Ishioka 13m baseline.

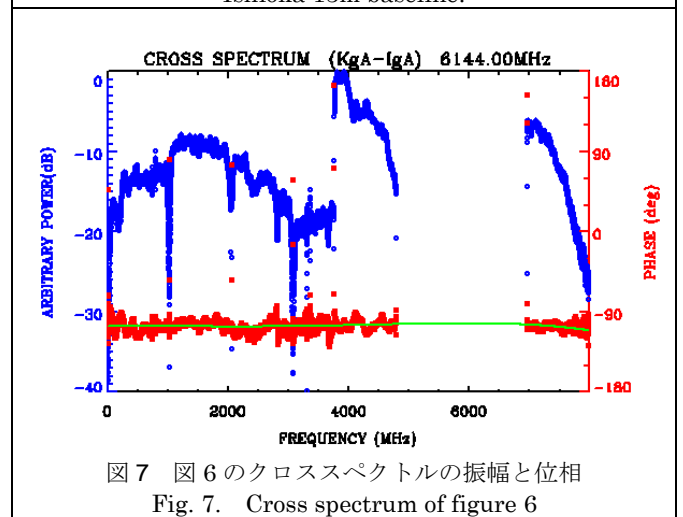


図 7 図 6 のクロススペクトルの振幅と位相
Fig. 7. Cross spectrum of figure 6

5. 謝辞

鹿島-石岡 VLBI 実験は国土地理院の関係者、特に福崎氏のサポートによって実験を行うことができました。また、広帯域化は国立天文台の共同開発研究のサポート（2013年度、2014年度）を受けていました（PI:山口大学の藤澤教授、課題名：鹿島34m用超広帯域受信システムの開発）

文 献

-
- (1) B. J. Bloom, T. L. Nicholson, J. R. Williams, S. L. Campbell, M. Bishof, X. Zhang, W. Zhang, S. L. Bromley, and J. Ye, Nature 506, 71 (2014).
 - (2) A. Yamaguchi, M. Fujieda, M. Kumagai, H. Hachisu, S. Nagano, Y. Li, T. Ido, T. Takano, M. Takamoto, and H. Katori: "Direct Comparison of Distant Optical Lattice Clocks at the 10⁻¹⁶ Uncertainty" Appl. Phys. Express 4 082203 (2011)
 - (3) H. Hachisu, M. Fujieda, S. Nagano, T. Gotoh, A. Nogami, T. Ido, St. Falke, N. Huntemann, C. Grebing, B. Lipphardt, Ch. Lisdat, and D. Piester "Direct comparison of optical lattice clocks with an intercontinental baseline of 9000 km", Opt. Lett. 39 4072 (2014)
 - (4) Ishii, A., R. Ichikawa, H. Takiguchi, K. Takefuji, H. Ujihara, Y. Koyama, T. Kondo, S. Kurihara, Y. Miura, S. Matsuzaka and D. Tanimoto, Current status of development of a transportable and compact VLBI system by NICT and GSI, IVS NICTTDC News, No. 31, 2-5, 2010
 - (5) 高橋 富士信, 高橋 幸雄, 近藤 哲朗, VLBI 技術 (ウェーブサミット講座), オーム社, 1997
 - (6) Rogers, A. E. E. Very long baseline interferometry with large effective bandwidth for phase-delay measurements, Radio Sci., 5, 1239, 1970

ⁱ web site:

<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/technology/vgos-general.html>

ⁱⁱ web site: <http://lupus.gsfc.nasa.gov/sess/master15.html>