

広帯域 VLBI システムの開発

関戸衛¹, 岳藤一宏¹, 氏原秀樹¹, 近藤哲朗¹, 宮内結花¹, 堤正則¹, 川合栄治¹, 長谷川新吾¹, 瀧口博士¹, 市川隆一¹, 花土ゆう子¹, 小山泰弘¹, 小室純一¹, 寺田健次郎¹, 難波邦考¹, 高橋留美¹, 岡本慶大¹, 青木哲郎¹, 池田貴俊¹, 渡部謙一², 鈴山智也²

1: 情報通信研究機構、 2: 産業技術総合研究所

1 目的

時間・周波数の計量標準の分野では、現在の1秒の時間の定義として使用されているセシウム原子の遷移周波数に替わる、光の領域のエネルギー遷移を利用した周波数標準器の開発が進められている。時間の定義を更新するには、世界各国の研究機関で開発されている光周波数標準器の周波数が同一であることを比較・検証することが必要であり、大陸間距離の周波数比較技術が求められている。時刻周波数比較の方法として、衛星の双方向通信を使った比較、GNSSを観測する方法などが実用化されているが、VLBI技術による周波数比較は通信衛星やGNSS衛星の軌道情報に依存しないという特徴がある。VLBI観測の場合、天体の電波を受信する必要からある程度の規模のパラボラアンテナを必要とする弱点があったが、超広帯域の観測を行うことができれば、小型・可搬型の比較的安価なアンテナでもVLBI観測観測が成立し、超広帯域の精密な群遅延計測が出来る。このことを実証し、VLBIを使った周波数比較を実用化するため、NICTでは小型広帯域のVLBI観測システムを開発を進めている。

一方、IVS(国際 VLBI 事業:International VLBI Service for Geodesy and Astrometry)は次世代の測地 VLBI 技術として VGOS(VLBI Global Observing System)[1]の開発を推進しており、米国 MIT Haystack 観測所を筆頭に、世界各国でアンテナの設置が進められている。我々のシステムも、将来のVGOSシステムとの共同観測を念頭に、共通の広帯域観測仕様でシステムの開発を進めている。

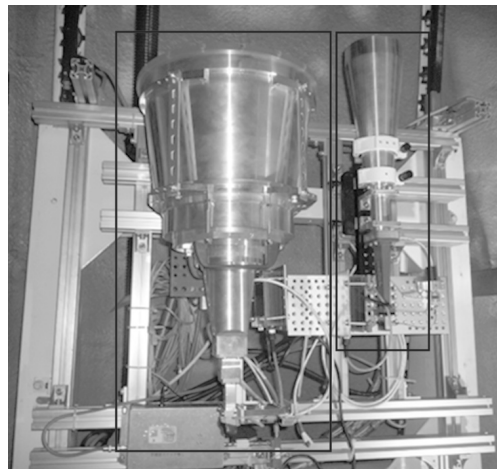


図 1: 34m アンテナに搭載した NINJA Feed(左側)と IGUANA-H フィード(右)。常温の LNA を使用している。

2 広帯域受信システム

世界各国の主な VGOS のアンテナは、広帯域の信号を受信するためのフィードとして、Eleven Feed または QRFH Feed を採用し、これを搭載するためにこれらの広いビーム幅に合わせた特殊な光学系 (Ring Focus) のアンテナが新規に建設されている。我々は、新しいアンテナを作るのではなく、既存のカセグレンアンテナにを広帯域観測可能にするフィードを独自設計で開発した [2]。この広い帯域にわたって狭いビーム幅を持つ特殊なフィードを鹿島 34m アンテナに搭載して VGOS 仕様の広い周波数域を観測可能なアンテナを実現した (図 1, 図 2)。偏波は、広帯域の 90 度位相器が存在しないことから従来の VLBI 観測で使用されている円偏波 (RHCP/LHCP) でなく、直線偏波 (V/H) を受信する。アンテナ内で周波数変換は行わず、18GHz までの信号を伝送できる光信号伝送装置 (E18000) を使って観測室まで信号を伝送し、データを取得する。

ビーム幅の広い小型アンテナでは電波干渉 RFI

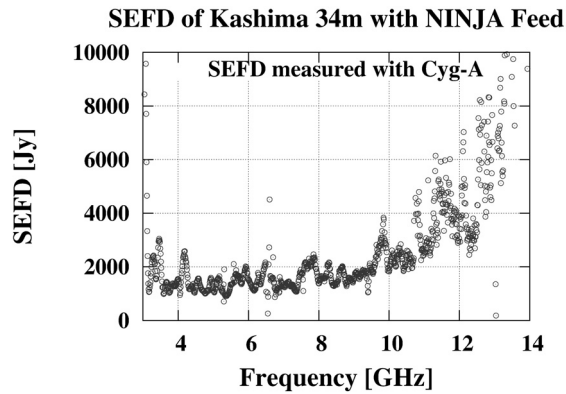


図 2: NINJA-FEED を搭載した 34m アンテナ広帯域受信機 (常温 LNA) の SEFD。

の影響を受けやすい。GALA-V プロジェクトでは、RFI 調査と遅延計測に最適なゼロ冗長配となる周波数配列に留意して選定した周波数帯域 (3.3-4.17 GHz, 4.4-5.0 GHz, 5.5-7.0 GHz, 7.5-9.0 GHz, 9.7-11.2GHz, 12.8-14.4GHz) を受信帯域として選んだ。

広帯域信号の信号を受信・伝送する場合には、従来の電波望遠鏡の受信の場合に比較して、(1) 飽和電力 (P_{1dB}) の大きな広帯域増幅器を使用すること、(2) イコライザなどを用いて帯域全体のレベルを一様に保つことが重要である。小型アンテナの受信機レベル・ブロックダイアグラムを図 3 に示す。

3 ダイレクトサンプリングと広帯域バンド幅合成

GALA-V プロジェクトでは、RF 周波数の信号を周波数変換なしに直接サンプリングし、デジタルフィルタ機能により帯域内の任意の周波数幅の信号を取り出す「ダイレクトサンプリング」方式を採用している (図 4)。ダイレクトサンプリング方式の利点の一つは (1) システムのが大幅に簡素化されることである。米国 NASA/MIT が VGOS の基本設計として提案している UpDown-Converter 方式では、中間周波数 (IF) への周波数変換のために使用されるローカルオシレータ間の位相差・時間変動、バンドパスフィルタの位相特性といった誤差要因があり、これを位相校正信号 (PCAL) システムを使って補正する必要



図 4: ダイレクトサンプラ K6/GALAS。16GHz までの周波数域の中から、任意の 1024MHz 帯域幅を 4 バンド同時に取得し、10GEther-SR のポートから VDIF/VTP プロトコルでデータを出力する。

がある。PCAL システムは、広い帯域に渡って一様で安定なトーン信号を生成する必要があり、製作が困難で、PCAL を駆動する基準信号のアンテナへの伝送も誤差要因となるため、従来これを Delay-Cal として補正していた。ダイレクトサンプリング方式では、これら誤差要因となるアナログ部が大幅に削減され、一度に全帯域の A/D 変換が行われるため、帯域間の位相差が安定しており、これに伴って (2)PCAL システムを必要とせずに広帯域バンド幅合成が可能となる。我々は、GALA-V プロジェクトのアンテナ (鹿島 34m, MARBLE1, MARBLE2) 及び、国土地理院石岡局との 24 時間実験を実施し、ダイレクトサンプラ GALAS を使うことで、広い帯域の位相接続が時間的にも安定に可能であることを実証している。ダイレクトサンプラ使った広帯域バンド幅合成については、本集録の論文 [3] を参考にされたい。

4 鹿島 34m - 石岡 13m の広帯域アンテナを使った精密遅延計測

GALA-V プロジェクトの目的は、遠隔地に置かれた原子時計の間の周波数比較を広帯域 VLBI による遅延計測によって実現することである。VGOS に準拠した広帯域帯域観測が可能で、国土地理院石岡局が 2014 年に完成し、2015 年 1 月、8 月に鹿島 34m アンテナとの間で VLBI 実験を実施した。観測周波数は、4 つの周波数帯: 3.2GHz, 4.6GHz, 8.8GHz, 11.6GHz をバンドの下端とした 1024MHz の帯域幅の信号を 2048Mbit

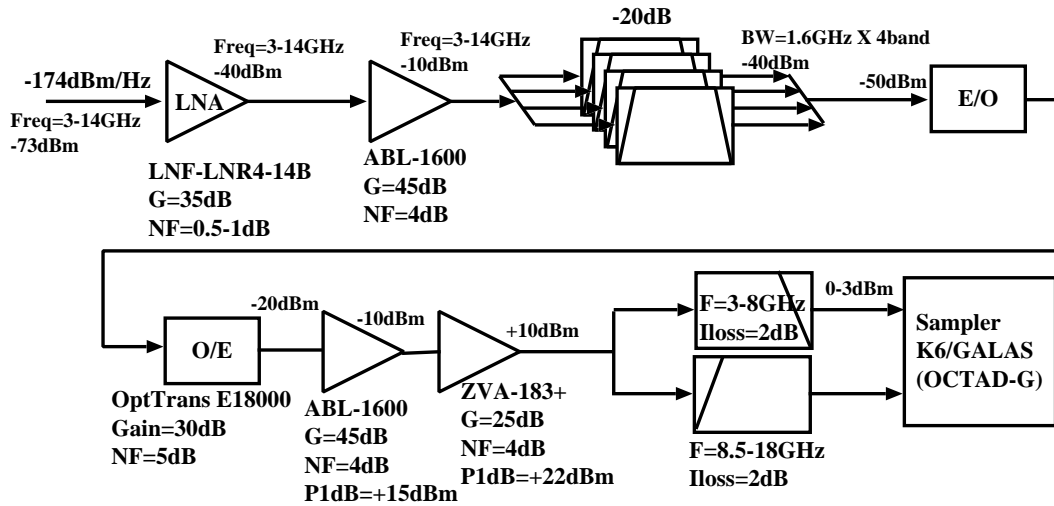


図 3: 小型アンテナ受信機のレベル・ブロックダイアグラム。図中のパワーレベルは概略値である。広帯域の光伝送装置のNFは一般に大きい($\sim 50\text{dB}$)ため、光送信器の前段で出来るだけ増幅しておく必要がある(E18000の場合にもE/O-O/Eの前後に増幅器が内蔵されている)。しかし、広帯域(10GHz幅)の受信では帯域幅による電力利得が100dBにもなり、300K程度の雑音レベルでも2段目のアンプとあわせて-70dB程度増幅すると、トータルパワーは0dBmにもなる。広い受信帯域の中には人工の電波干渉が入る可能性もあり、広帯域観測のためには増幅器の線形動作限界電力パラメータ($P_{1\text{dB}}$)の大きな増幅器を使用することが重要である。

で4バンド取得し、相関処理の後広帯域バンド幅合成により遅延を算出した。3C84を観測した遅延データ(緩やかなトレンドを除いた)を図5に示す。時系列データに見られる100秒スケールで20psec程度変動している遅延の動きは、大気の遅延変動によるものと考えている。アラン分散を計算すると、1秒インターバルの遅延の変化率は0.5psec/secの精度で計測できていることがわかる。衛星双方向の搬送配送を使った比較技術の場合、短期安定度は1秒で0.2psecのオーダーであり、これに近い精度の計測がVLBIで可能であることを実証できた。

参考文献

- [1] Petrachenko, B., et al., "Design Aspects of the VLBI2010 System", NASA-TM2009-214180, 2009.
- [2] 氏原秀樹、ほか、"広帯域フィードの開発", 2015年度VLBI懇談会シンポジウム集録, 2016
- [3] 近藤哲朗、岳藤一宏、"測地VLBIでの広帯域バンド幅合成", 2015年度VLBI懇談会シンポジウム集録, 2016

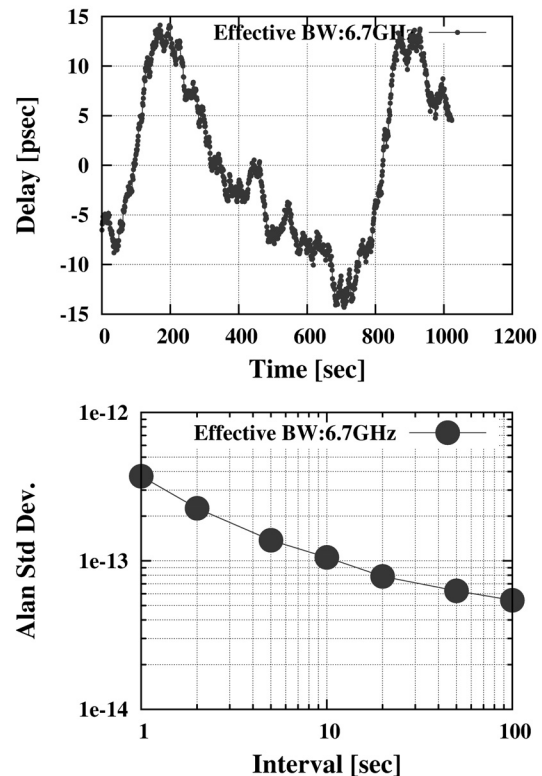


図 5: 鹿島 34m-石岡 13m 基線において、3.2GHz, 4.6GHz, 8.8GHz, 11.6GHz をバンドの下端とした1024MHzの帯域幅の信号を取得し、帯域幅合成により得られた遅延量(緩やかな変動を除いた)の時系列(左)とアラン分散(右)を示す。