

# RF ダイレクトサンプリング法による VLBI 技術開発

--概念実証実験結果--

## Technical development of RF-direct sampling VLBI

-- Results of proof-of-concept experiment --

#近藤哲朗<sup>1</sup>, 岳藤一宏<sup>1</sup>, 市川隆一<sup>1</sup>, 栗原 忍<sup>2</sup>, 小門研亮<sup>2</sup>, 川畑亮二<sup>2</sup>

1: 情報通信研究機構; 2: 国土地理院

Tetsuro Kondo<sup>1</sup>, Kazuhiro Takefuji<sup>1</sup>, Ryuichi Ichikawa<sup>1</sup>,  
Shinobu Kurihara<sup>2</sup>, Kensuke Kokado<sup>2</sup>, and Ryoji Kawabata<sup>2</sup>

1: National Institute of Information and Communications Technology;

2: Geospatial Information Authority of Japan

### 1. はじめに

測地VLBIではキューサーからの電波をS/Xバンドで受信し、最終的に0~数10MHzの信号(ビデオ信号またはベースバンド信号と呼ぶ)に変換した後、A/D変換器(サンプラー)によりデジタル信号に変換する。RF信号をベースバンド信号に変換する周波数変換器はアナログ機器であり、かつアンテナから観測室までは伝送ケーブル(同軸ケーブルまたは光ファイバーケーブル)を経て信号が伝送されることから、温度等環境変動による影響を大きく受ける。こうした変動を取り除くため、位相校正信号と呼ばれる1MHzまたは5MHzおきのコムトーン波をRF信号に重畳させている。ところで、アンテナで受信した直後のRF信号を直接デジタル信号に変換することができれば、周波数変換器や伝送ケーブルに起因する変動は生じない。また周波数変換器も不要となりシステムの低コスト化と高安定化に資することが期待される。NICTが開発した高速サンプラーADS3000+は入力周波数帯域が最大2GHzであり、Xバンド(8GHz帯)の信号を直接サンプリングすることはできなかった。今回入力帯域が10GHz以上の広帯域高速サンプラー(エレックス工業製ADX-831)をテストする機会を得たので、XバンドのRF信号を直接サンプリングする方式でVLBI観測が可能かどうかの評価実験を行った。その結果を報告する。

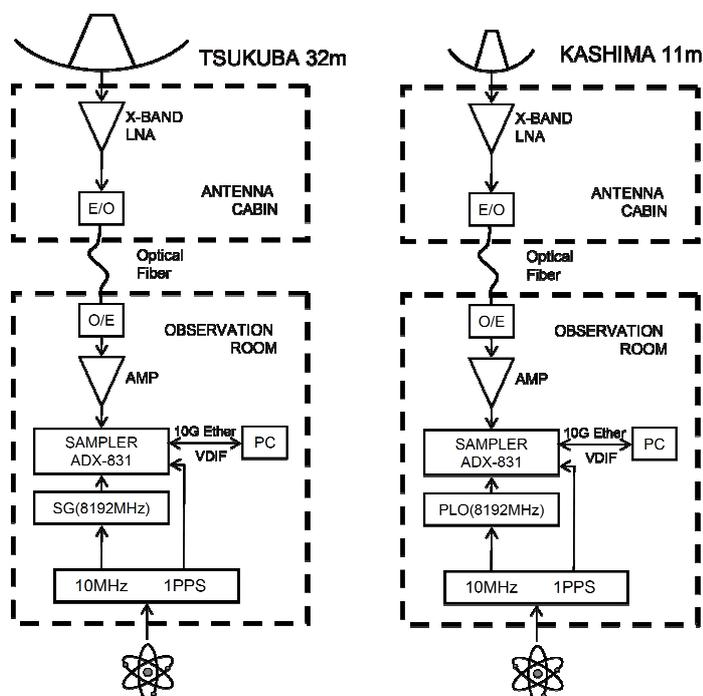


図 1. RF ダイレクトサンプリング方式による VLBI 実験システムブロック図。

### 2. 直接サンプリング法の原理

サンプリング周波数が対象とするRF周波数に比べて低い場合でも、サンプ

ラーの入力帯域が対象とするRF周波数まで伸びている場合は、RF信号の直接AD変換が可能である。ただし、図2に示すようにサンプリングによりAD変換と周波数変換が同時に行われることになる。例えばサンプリング周波数を1GHz、RF周波数の帯域を8-8.5GHzとすると、サンプリングにより、RF信号は帯域0-0.5GHzのベースバンド信号に変換される。こうして得られたデジタル信号は、アナログ機器によってベースバンド信号に変換された信号をAD変換されて得られる信号とまったく同じ性質のデジタル信号である。したがって、従来のVLBIデータと同様な相関処理を行うことができる。その際のフリンジストッピングに使用するRF周波数はベースバンドに相当するRF周波数で図2の場合は $8f_s$ となる。

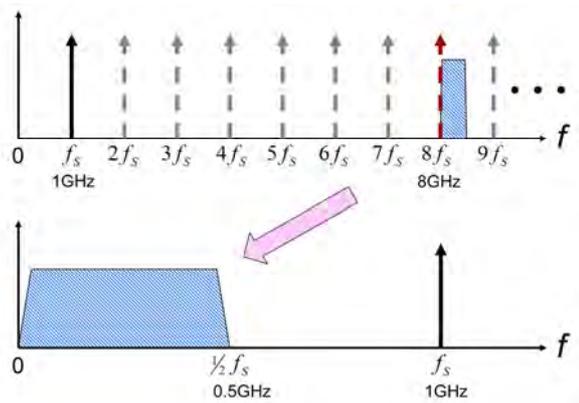


図2. RF ダイレクトサンプリングの原理。上図はサンプリング周波数 $f_s$ とRF信号(周波数： $8f_s \sim (8 + 1/2)f_s$ )の関係を示し、下図はサンプリング後の信号を示す。

### 3. 評価実験

最初の評価実験は2010年11月26日にNICT鹿島内の34mアンテナと11mアンテナを使用して実施した。この実験時は使用できる広帯域高速サンプラー(ADX-831)が1台しかなかったため、11mアンテナでRFダイレクトサンプリング法によるサンプリングを行い、34mアンテナでは中間周波数帯信号を通常の高速サンプラー(ADS1000を使用)でサンプリングするという変則的な実験であった。観測データはNICTのソフトウェア相関器で相関処理された。その結果フリンジ検出に成功した。

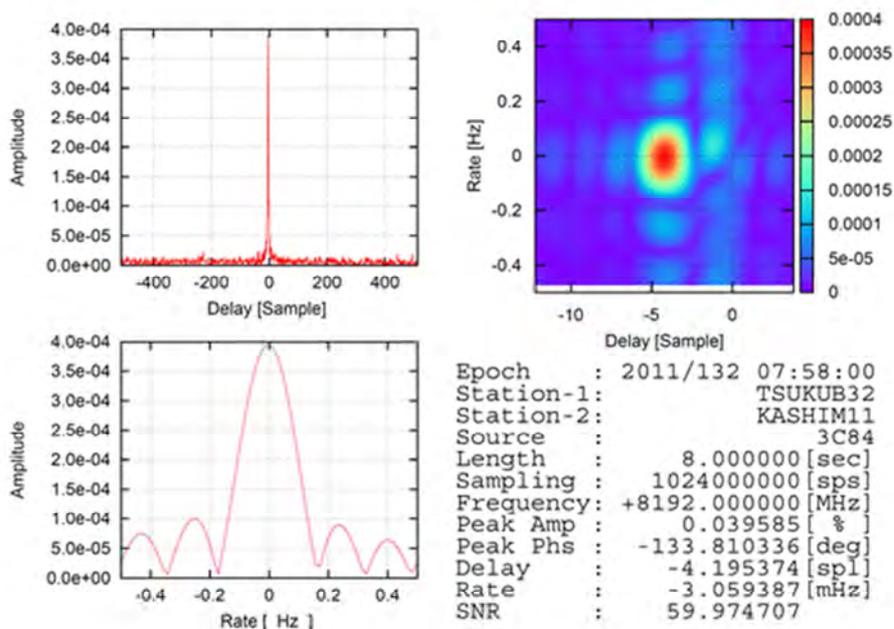


図3. XバンドのRFダイレクトサンプリング方式によるVLBI観測で得られたフリンジ。サンプリングモードは2bit×1024MHz。相関処理パラメータ:RF周波数8192MHz(=8×1024MHz)、USB。

この成功を受けて2011年5月12日には鹿島(11m)ーつくば(32m) 基線にて2局ともにXバンドのRFダイレクトサンプリング方式を適用しての実験を行った。この実験ではアンチエイリアシングフィルターは使用しなかった。通常のAD変換ではエイリアシングによる目的外周波数の信号の漏れこみを防ぐために、アンチエイリアシングフィルターを使用して信号の周波数帯域をサンプリング周波数の半分の帯域に制限する。アンチエイリアシングフィルターを使用しない場合は、システムノイズの増加と等価となりVLBI観測においては相関強度の低下を来す。しかしながら、電波星の強度が強ければ十分に相関を検出することができるだろうと考え、RFダイレクトサンプリング法の概念を実証する目的のためにはアンチエイリアシングフィルターは不要と判断した。実際の実験では目論見通りフリッジを検出することができた(図3)。更に、相関処理時のパラメータを変更することにより、同じデータから異なる周波数帯域でのフリッジ検出にも成功した。更に連続した広帯域データを合成するバンド幅合成にも成功した(図4)。

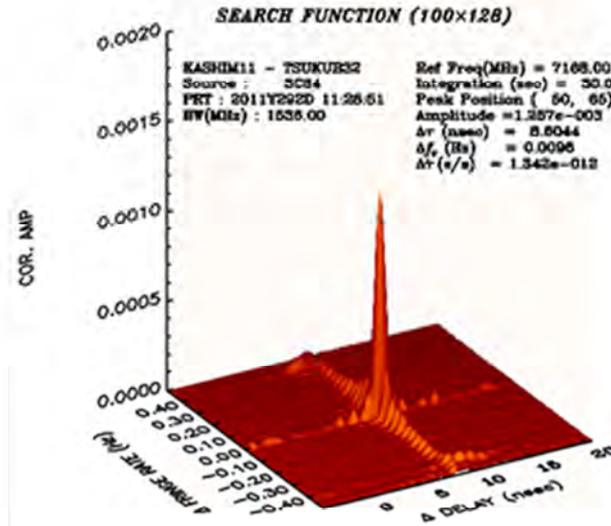


図4. RFダイレクトサンプリングデータの3帯域(512MHz×3)を合成(バンド幅合成)したサーチ関数。

#### 4. RFダイレクトサンプリング法とバンド幅合成(SNRの劣化を帯域でカバー)

我々のRFダイレクトサンプリング法ではアンチエイリアシングフィルターは使用せず、相関処理時のパラメータ変更で異なる帯域の相関データを得る。こうして得られる連続した複数帯域の相関データを合成し、遅延決定精度の向上を図る。RFサンプリング法の原理上、異なる帯域を合成する際に位相オフセットを考慮する必要はない。しかしながらアンチエイリアシングフィルターを使用していないため、それぞれの帯域のデータには目的帯域以外の信号がノイズとして混入している。したがってそれぞれの帯域での信号対雑音比(SNR)はアンチエイリアシングフィルター使用時に比べると劣化しているために、帯域ごとの遅延決定精度は劣化するが、複数の帯域を合成することによりSNRの劣化が相殺され遅延決定精度としてはアンチエイリアシングフィルターを1帯域にのみ使用した場合と同じとなる。簡単のため2帯域のみについて説明すると以下のようなになる。図5は帯域 $f_0 - B \sim f_0 + B$ の信号を、 $f_0 \sim f_0 + B$ の帯域に制限した場合(CASE A)とそうでない場合(CASE B)についてサンプリング後のデータ、更に相関処理後のデータのSNRと帯域がどうなるかを模式的に示した図である。CASE Aでは目的信号の帯域がそのまま相関処理後まで受け継がれる。CASE Bではサンプリング後の帯域は半分になってしまい、なおかつ目的外の信号の混入によりSNRは半分に劣化する。しかしVLBIデータに関してはフリッジストップングという操作により、それぞれの帯域ごとに独立に相関処理を行うことができるため、相関処理後の帯域情報は倍となる。遅延決定誤差は(帯域幅)×(SNR)に反比例するため、帯域幅が広いほど、SNRが高いほど遅延決定精度がよくなる。したがって、CASE BにおいてSNRが半分に劣化するが帯域が倍にな

るということは、遅延決定精度としてはCASE Aの場合と同じであるということになる。帯域が2倍以上の場合についても同様に考えると、すべての帯域成分について合成してやれば、アンチエイリアシングフィルターを1帯域にのみ使用した場合と同じ遅延決定精度が得られることが分かる。ただし、同じデータに対して複数回の相関処理が必要となる。複数の帯域ごとにアンチエイリアシングフィルターを用意すれば最良の遅延決定精度が得られるが、サンプラーは帯域数分必要となり、帯域ごとのデータ合成時の位相オフセットは別途補償しなければならないなど、システムは複雑となる。

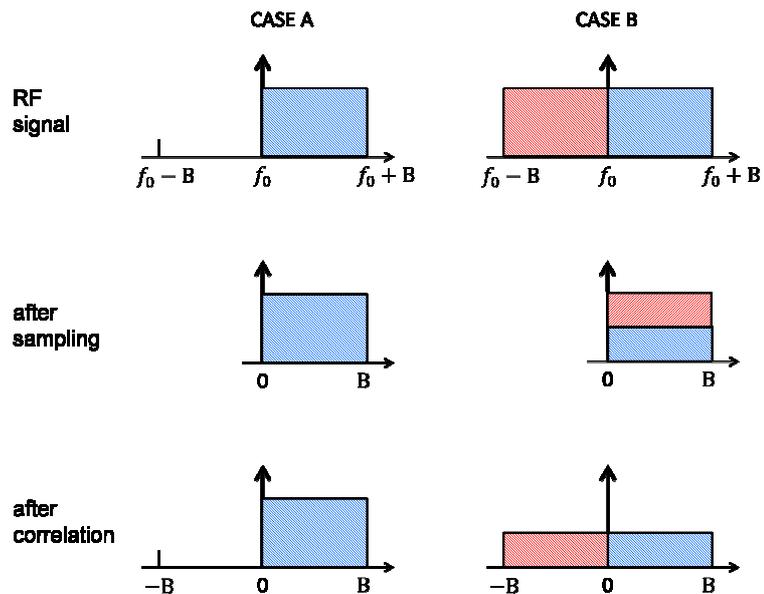


図5. SNR劣化と遅延決定精度。CASE Aは帯域を $f_0 \sim f_0 + B$ に制限したアンチエイリアシングフィルター使用時、CASE Bは帯域 $f_0 - B \sim f_0 + B$ の信号そのままの場合。サンプリング後はCASE Bではエイリアシングにより目的外の信号が混入してきてSNRは劣化するが、帯域ごとに相関処理することにより、CASE Aに比べて倍の帯域の情報を得ることができる。

### 3. まとめ

広帯域高速サンプラー(エレックス工業製ADX-831)を用いてのXバンドでのRFダイレクトサンプリングVLBIに成功した。今回の成功により高安定化と低コスト化につながるVLBIシステムフロントエンド部の簡素化の可能性を示すことができた。またアンチエイリアシングフィルターを使用しないシステムでもアンチエイリアシングフィルターを1帯域にのみ使用した場合と等価な遅延決定精度が得られる可能性を示した。我々は測地VLBIに限定すればアンチエイリアシングフィルターは不要と考えるが、今後、測地VLBI実験結果の詳細な解析を行い総合的評価を行っていききたい。今回の実験は東陽テクニカ、エレックス工業、富士通エフ・アイ・ピー、および日本通信機の各社の協力のもとで実施しました。ここに感謝いたします。