

測地 VLBI での広帯域バンド幅合成

近藤哲朗、岳藤一宏

情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター

1 はじめに

従来の測地 VLBI システムでは受信周波数帯は 2GHz 帯 (S バンド) および 8GHz 帯 (X バンド) であるが、VGOS と呼ばれる次世代 VLBI システムや NICT で開発中の広帯域 VLBI システム Gala-V では受信帯域が 10GHz 以上にも跨る超広帯域 VLBI 観測が計画されている。従来のシステムでは AD 変換器のサンプリング周波数の制限からチャンネルあたりせいぜい数 10MHz 帯域幅のデータしか扱えなかった。そのため例えば X バンド中に 8 チャンネルの異なった周波数チャンネルを設定し、それらを合成することにより等価帯域幅を増やす処理を行っておりこの処理をバンド幅合成と呼んでいる。近年 AD 変換器の性能が著しく向上し、1 GHz や 2GHz といった広帯域の信号を直接 AD 変換できるようになってきた。そこで、従来システムのような帯域幅が高々 1GHz 程度の帯域幅合成ではなく数 GHz から 10GHz にも及ぶ帯域幅合成 (広帯域バンド幅合成と呼ぶ) が可能となってきた。

本報告では位相校正 (PCAL) 信号を使用しない (つまりシステムが安定であると仮定した) 広帯域バンド幅合成処理に関して、その処理の流れと実際の処理結果を示す (処理の詳細については文献 [1] を参照されたい)。

2 処理の流れ

図 1 は広帯域バンド幅合成の処理フローを示している。具体的に記述すると以下ようになる。

- 1) 参照スキンの決定: セッション (一連の観測) の中で強度の強い電波星のスキン (観測) を 1 つ決めて処理の参照に使用する。
- 2) バンド間補正データの作成: 参照スキンデータを用いてバンド内位相補正は行なわずにバンド # n の遅延残差 $\Delta\tau_n$ を決定し、更にこの遅延残差を補正したクロススペクトルを求める。またバンド毎の $\Delta\tau_n$ から一番低い周波数バンドを基準としたバンド間遅延補正データ $\Delta\tau_n - \Delta\tau_1$ を作成する。
- 3) バンド内位相補正データの作成: 2) で得られたクロススペクトルの位相をバンド毎に多項式 (4 次または 5 次) で近似し、バンド # n の位相補正データを $\Delta\phi_n(f)$ を得る。
- 4) 全スキンの処理: 2), 3) で得られた「バンド内位相補正データ」および「バンド間遅延補正データ」を使用してすべてスキンデータのバンド幅合成処理を行う。更にバンド幅合成処理で得られた遅延残差を補正した広帯域クロススペクトル (バンド幅合成後のクロススペクトル) を求める。
- 5) 電離層補正処理: 4) で得られた広帯域クロススペクトルを用いて電離層全電子数の補正量 ΔTEC を求め、この ΔTEC を使って広帯域クロススペクトルの位相補正を行なった後、再度広帯域バンド幅合成処理を行う。

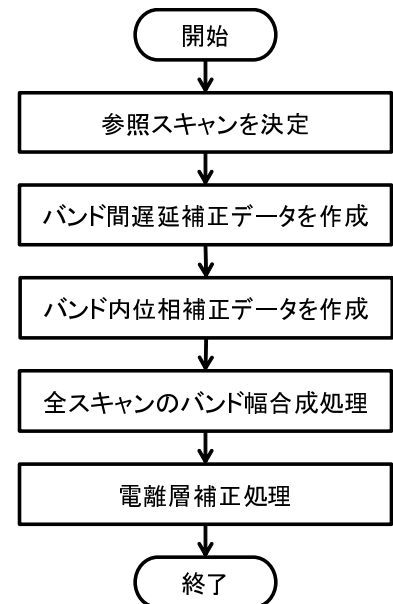


図 1. 広帯域バンド幅合成の処理フロー。

3 実際の処理結果

3.1 使用したデータ

2015年1月16日に鹿島 - 石岡基線 (図2) で実施した広帯域 VLBI 観測データを使用して実際に広帯域バンド幅合成を行なった。

観測周波数を表1に示す。それぞれのバンドは帯域幅が1024 MHzであり #4と#5は340 MHzのオーバーラップがあるがオーバーラップ領域ではバンド#5を優先(上書き)している。なおバンド#1~#4はダイレクトサンプリング(1台のAD変換素子でサンプリングした)データなのでまとめて1つのバンドとして処理を行うことができる(バンド合成にあたり特別な工夫は必要なくクロススペクトルを周波数方向に並べるだけで位相が周波数方向につながる)。

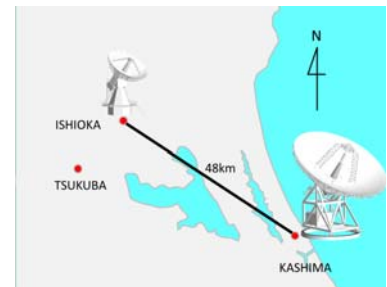


図2. 鹿島 - 石岡基線

表1. 観測周波数

バンド	#1	#2	#3	#4	#5	#6
周波数 (MHz)	6144 - 7168	7168 - 8192	8192 - 9216	9216 - 10240	9900 - 10924	13100 - 14124

3.2 バンド幅合成結果 (電離層補正なし)

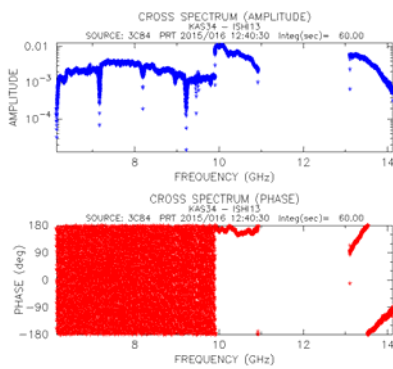


図3. 6つのバンドをただ単に周波数方向に配置しサーチ関数を計算して遅延を決定後のクロススペクトル。上段は強度、下段は位相。

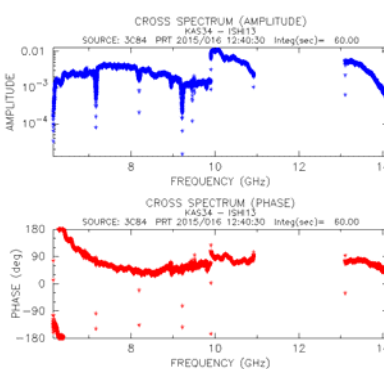


図4. バンド間遅延補正後のクロススペクトル。位相の周波数特性が残っている。

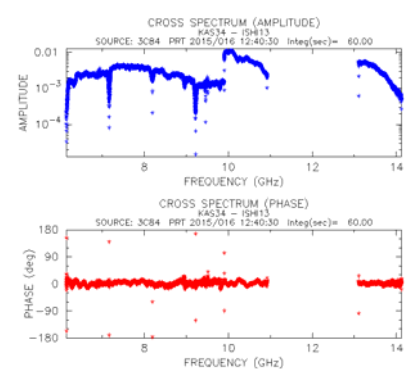


図5. バンド内位相差も補正した後のクロススペクトル。位相が揃っておりバンド幅合成に成功している。

図3は6つのバンドのデータをただ単にそれぞれの周波数位置に並べてサーチ関数を計算し遅延残差を決定した後のクロススペクトルを示す。クロススペクトルの位相が周波数方向に揃っていればバンド幅合成が成功していることになるが図に示されるようにバンド#1~#4では位相がぐるぐると廻っておりバンド幅合成は失敗していることが分かる。図4はバンド間遅延補正を施しサーチ関数を計算した後のクロススペクトルである。バンド間の位相接続に成功しているが、位相の周波数特性が残っている。図5は更にバンド内位相差補正を施しサーチ関数を計算した後のクロススペクトルである。位相スペクトルの位相が揃っておりバンド幅合成が成功したことが分かる。図6は参照スキャンの補正データを使って他のスキャンのバンド幅合成を行なった結果であるが、位相スペクトルの位相が揃っており他のスキャンでもバンド幅合成に成功していることが分かる。なおこの結果は基線長が短いため電離層の影響を受けていないことをも意味している。

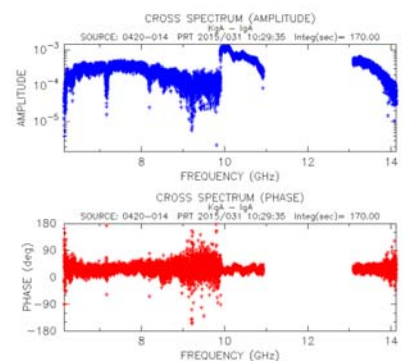


図6. 他のスキャンの処理例。位相が揃っておりバンド幅合成に成功していることが分かる。

3.3 電離層補正

図 6 に見られるように実データには電離層の影響が顕著には現れていない。そこで、シミュレーションにより電離層の影響を被った相関データを生成し、そのデータを処理することにより電離層補正方法の評価を行なった。具体的には参照スキンの相関データに対して電離層全電子数の差 ΔTEC によって生じる位相遅延差を加えることによって擬似相関データの生成を行なう。この相関データを実処理の流れに従って処理し、与えた ΔTEC が電離層補正量として推定されるかどうかを検証した。

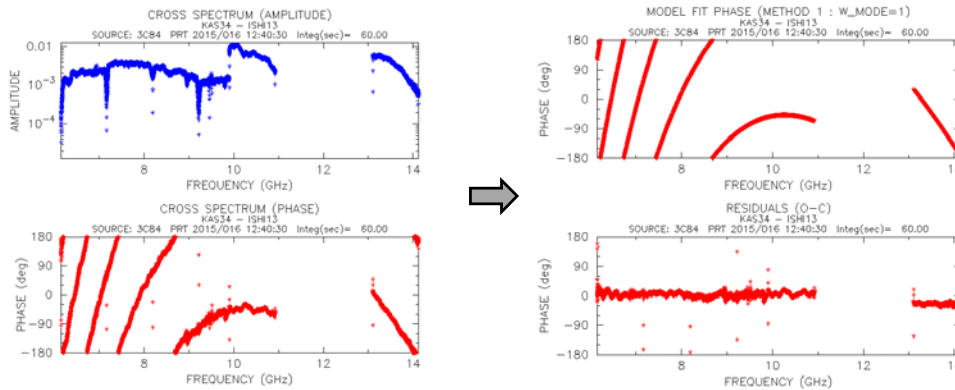


図 7. 左図: $\Delta TEC = 100$ TECU で生成した相関データのバンド幅合成 (電離層補正無し) 後のクロススペクトル (上は強度、下は位相)。右図: ΔTEC 推定後 (上は推定されたモデル位相、下は電離層補正後のクロススペクトル位相)。位相が揃っており電離層補正に成功している。

図 7 左は $\Delta TEC = 100$ TECU (通常頻繁に起こるであろう値である) で生成した相関データを用いてバンド幅合成 (電離層補正無し) を行なった後のクロススペクトルを示す。電離層の影響のため位相が廻っていることが分かる。このデータから ΔTEC を推定した結果が右図である。右図の上は推定された位相モデルであり、右図下はこの位相を補正つまり電離層補正後のクロススペクトルの位相である。位相が揃っており電離層補正に成功していることが分かる。また得られた値は ΔTEC の値は 100.4 とデータ生成に使用した値と 1% 以下の誤差で一致した。

図 8 は相関データに位相ノイズを加えた時の SNR と推定される ΔTEC の関係を示すが SNR の低い場合も精度良く ΔTEC が得られている。

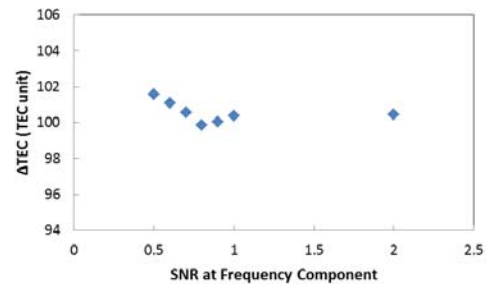


図 8. 加える位相ノイズと推定される ΔTEC の関係。ただし、シミュレーション時の $\Delta TEC = 100$ TECU である。SNR の低い場合も精度良く ΔTEC が得られている。

4 おわりに

以上述べてきたように、PCAL 信号を使わない広帯域バンド幅合成の実用的手法をほぼ確立した。電離層補正手法の検証はシミュレーションデータを用いて行なったが、今後、大陸間基線等の長距離基線観測を通しての検証を進めて行きたい。なお、今回の検証に使用したデータは国土地理院の協力の下に石岡局と鹿島局の間で実施した広帯域 VLBI 観測によって得られたデータである。観測にご尽力いただいた国土地理院の VLBI グループの皆様へ感謝します。

参考文献

- [1] Kondo, T. and K. Takefuji, On a wide-band bandwidth synthesis II, IVS NICT-TDC News, No.35, pp.4-6, 2015. (http://www2.nict.go.jp/aeri/sts/stmg/ivstdc/news_35/tdc_news35.pdf)