

飛翔体位置決定相対 VLBI 用 Software Baseband Converter の開発

竹内 央、近藤 哲朗、小山 泰弘、木村 守孝(鹿島宇宙通信センター/情報通信研究機構)

1. BBC システム

従来の VLBI バックエンドにおけるアナログ BBC (baseband converter)の模式図を図 1 に示す。図に示されるように多系統のアナログ系が必要であり複雑で高価なシステムが必要になる。また、チャンネル毎に異なる伝送系を通るため、素子毎の

周波数特性の違いや、系統毎に独立な温度変化による遅延量の揺らぎ等が存在し、遅延決定精度を落とす要因になってしまう。これらの点を改善するために、通信総合研究所が 1994 年から運用を始めた KSP system では VLBI システムとしては世界で初めてバックエンドにデジタルフィルタが導入された。その後、EVN,VERA,ALMA 等、様々なシステムでデジタルフィルタを用いたフィルタバンクが採用・検討されているが、これらのシ

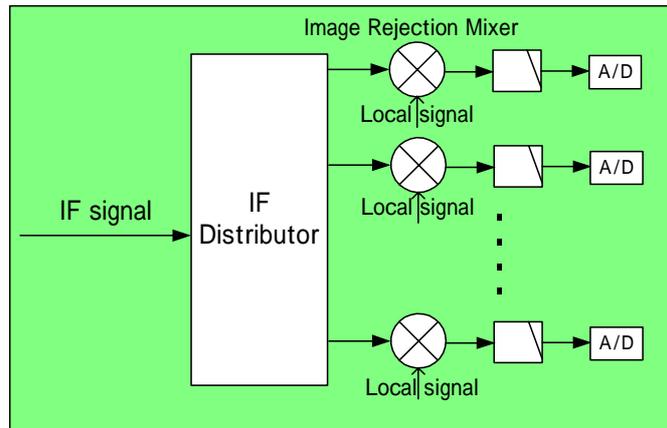


図1:アナログ多チャンネルBBCシステム

ステムでは何れも FPGA や ASIC 等のハードウェア素子によってフィルタ演算を行っている。近年の FPGA は内部にフィルタ向けに特化した DSP 演算ブロックを含むアーキテクチャを採用しており、容易かつ安価にフィルタ設計が行えるようになってきているが、専用のシステムを開発すると、全体としては依然として高い開発費が必要である上に、長期間にわたる予備品確保が保証されないリスクもある。そこで NICT では、汎用 PC を用いてソフトウェアにより BBC を行うシステムの開発を進めている。現在までに動作周波数 3GHz の汎用 PC により、512MHz BW の IF 信号から、PC 1 台当たり 2ch の baseband 信号(2MHz~64MHz)をリアルタイムで取り出す事が可能になっている。汎用の量産 PC の利用により安価にシステムを構築できる上に、タップ数,係数,入出力ビット数等のパラメータ設定自由度が高い、ネットワーク伝送系や記録系と一体化が可能、システムのアップグレードが容易といったメリットがある。以下において、本システムの詳細について紹介する。

2. システムの構成

図 2 にシステムの概要を示す。ギガビットサンプラ(ADS-1000)でサンプルされた広帯域 IF 信号(1.024Gbps/1bit or 512Gbps/2bit)は PC-VSI card を通じて PC のメモリに DMA 転送される。転送さ

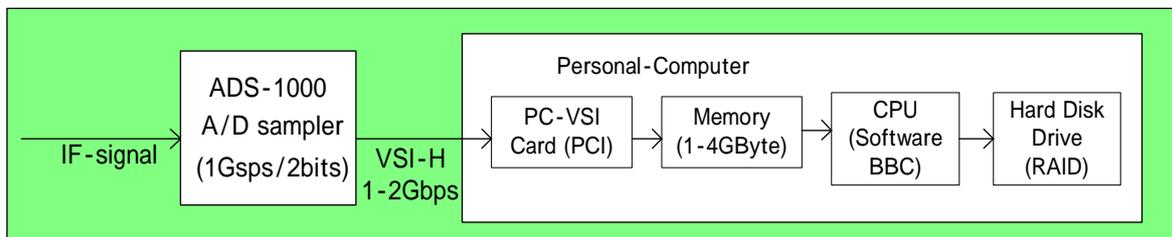


図2:K5-VSI システムによるソフトウェア BBC 実行時のデータフロー

れたデータは通常はそのまま RAID HDD に書き込まれるが、BBC が必要な時はソフトウェアによる band-pass filtering 処理を行った後に HDD へ書き込まれる(必要ならばネットワークに伝送する)。FIR band-pass filter のタップ数は、ベースバンド信号の帯域幅によって可変であり、127(baseband 64MHz BW の時) ~ 4095(2MHz BW の時)の値をとる。また出力信号の USB/LSB 選択が可能である。

3. アルゴリズム

ここでは1.024Gbps/1bitの入力信号(512MHz帯域)から 64MHz帯域のbaseband信号を切り出す場合を例にとり、ソフトウェアBBCのアルゴリズムについて論じる。CPUの並列演算機能を有効に利用するためには、ハードウェアで実現する場合とは異なるアルゴリズムが必要となる。図3にデータフローを示す。64n ~ 64(n+1)MHz(nは0 n < 8を満たす整数)の帯域を切り出すバンドパスフィルタに信号を入力し、出力データを 1/8に間引く事によりベースバンド変換を行う。その後必要に応じてUSB LSB変換を行う。1bitの入力時系列データを $x(n)$, 間引き済みの出力データを $y(n)$, 127 tapのfilter係数を $c(i)$ ($0 < i < 128, c(127)=0$) とすると、 $y(n) = \sum_{i=0}^{127} x(8n-i)c(i)$ と書ける。入力データを8つずつ区切り、 $x(8n) \sim x(8n+7)$ の8つの1bit値からなる1byteの整数(0-255)を $X(n)$ で表す。同様にフィルタ係数も8つずつ16個の part に分割し、取りうる全ての $X(0 \sim 255), j(0 \sim 15)$ に対して $T(X, j) = \sum_{i=0}^7 x(i)c(8j+i)$ の値を予め計算し

結果をメモリに浮動小数点で保存しておく。実際のフィルタ演算においては入力時系列データから1バイトずつ取り出す(図3参照)。取り出した値が Z であるとする、メモリ上で連続する $T(Z, 0)$ から $T(Z, 15)$ の16個のデータを Accumulator 1 ~ 16 に加算していく事によりフィルタ演算を行う事ができる。メモリ上で連続した領域にアクセスするためCPUの1次キャッシュを有効に利用する事ができ、高速に演算でき

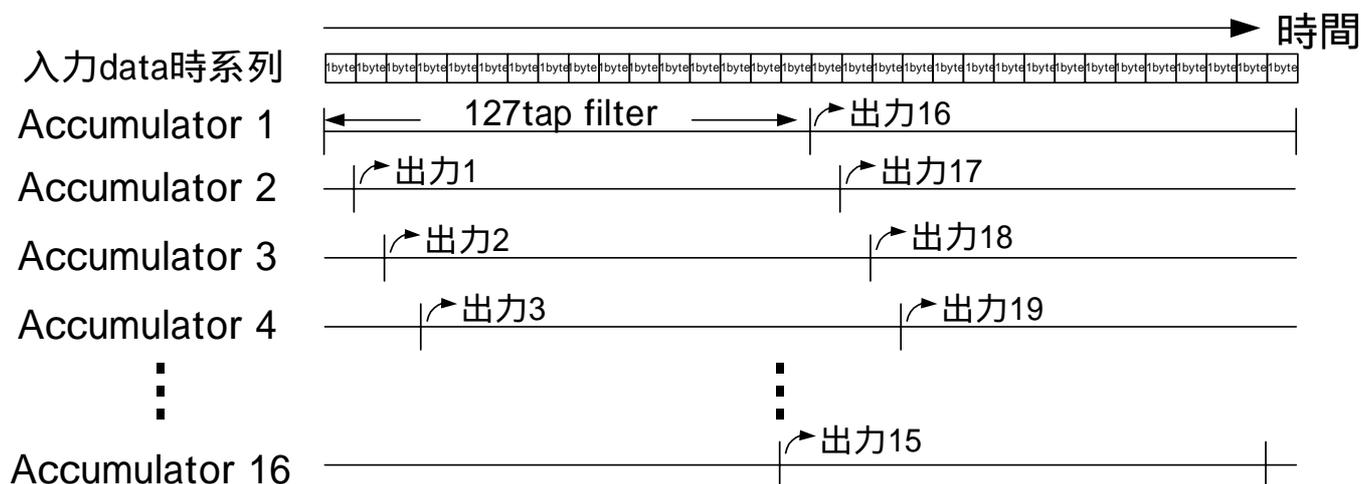


図3:ソフトウェアBBCのアルゴリズム(Band-pass サンプリング法)概念図。1Gbps/1bit入力信号から 64MHz帯域のbaseband信号を切り出す場合の例。バンドパスフィルタの出力データはdecimationによりレートが落とされるので、入力信号を 1bit ずつシフトして filter処理する必要は無く1byteずつシフトさせて処理する事でき、高速処理が可能になる。

る。Accumulatorにはベクトル演算用レジスタを用いる事により、Pentium III等に備わるSSE命令を利用する事ができ、4つのAccumulatorに対する加算を1回のベクトル加算命令で行える。ここではベースバンド帯域幅64MHzの例を示したが、切り出す帯域幅が狭くなると帯域幅に反比例して必要なフィルタタップ数が増える。その一方でフィルタ後の間引き率も比例して大きくなるので、必要な計算量はベースバンド帯域幅には依存しない。以上のアルゴリズムをアセンブラで実装し Hyper-threading 機能を有効にした dual CPU 上で 8スレッド並列に演算を行う事により1Gbps の入力信号から実時間で 2ch のベースバンド信号を取り出す事が可能になった。アセンブラの使用によりCやC++等の高級言語で記述するのに比べ10倍以上の速度向上が実現した。

4. ソフトウェア BBC システム による観測結果

本システムの検証を行うために鹿島局と Parkes 局(オーストラリア)との間で 2004 年 4 月 18 日に VLBI 実験を行った。オーストラリア局では既存のアナログ BBC によるベースバンドデータを PC-EVN システムにより記録した。鹿島局では 256MHz(512Mps) 2bit のデータから 16MHz(32Mps)のベースバンド信号を切り出して使用した。観測で得られたフリンジを図 4 に示す。従来の BBC システム(K4 video converter)で観測した時と同程度の S/N が得られる事が実証された。この例のように異なるシステム間で容易に観測を行う事ができるのもソフトウェアベースのシステムの利点であると言える。

5. 飛翔体位置決定相対 VLBI での使用

本システムの応用例として、飛翔体の狭帯域ダウンリンク信号と基準電波星の広帯域信号の間の相対 VLBI 観測が挙げられる。基準電波星観測時は IF 帯域全体をサンプリングする事により、選択可能な基準電波星の数が多数確保できる一方、同一サンブラにより飛翔体の狭帯域信号も位相関係を保ちつつサンプル可能であるため、両者の間の相対 VLBI が可能になる。

2005 年 1 月 14 日には ESA の小型探査機ホイヘンスの土星の衛星タイタンへの突入が計画されており、突入時に相対 VLBI によりホイヘンスの位置決定を行いタイタンの大気特性を調査する予定である。ホイヘンスからの信号は通常を受信周波数帯とは異なる周波数帯で送受信されるため、本番の観測前に受信システムの性能を評価する必要があった。そのための試験 VLBI 観測が 2004 年 12 月 14 日に中国上海局との間で行われた。上海局は Mark 5 に記録され、鹿島局は本ソフトウェア

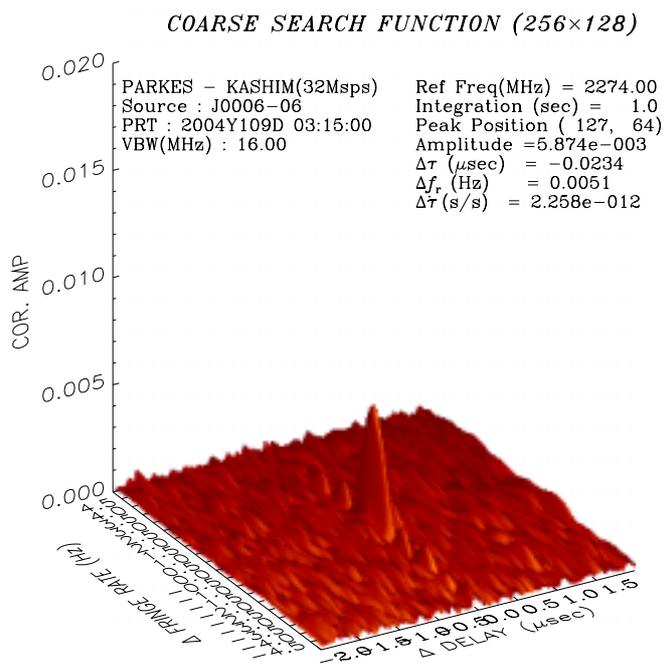


図4:Parkes局(豪州)のPC-EVNシステムと鹿島局ソフトウェアBBCシステムの間で得られたフリンジ

BBC システムが使用された。観測の結果、ホイヘンスからの送信周波数帯におけるクェーサの相関振幅は通常の通過帯における相関振幅に比べ強度が 1/4 程度に低下するものの、同周波数帯においても両局の受信システムが一定の感度を持つ事が確認された。本ソフトウェア BBC システムはホイヘンスのタイタン突入時にも全く同じ構成で観測に使用される。

6 今後の予定

今後フィルタリング時のコヒーレントロスの実測値と理論値との比較を行う予定である。現状では A/D 入力の前段にアナログフィルタを設置しオーバーサンプリングを行いコヒーレントロスを軽減させる事によりアナログ BBC と同等の性能を達成している。ソフトウェア BBC への入力ビット数,出力ビット数,decimation 率,オーバーサンプリング率等のファクターを変化させた時のコヒーレントロスの理論値を計算し、実測値と比較すると共に、現在開発中の次世代 A/D サンプラの出力ビット数に反

映させる予定である。また本方式は band-pass サンプリング法を採用しているため、baseband 周波数として選択できる周波数に制限がある。今後 DDS, digital mixer と組み合わせ任意の周波数をベースバンド周波数として指定できる BBC を FPGA により作成する予定である。ベースバンド周波数として設定可能な周波数を 1MHz 程度に離散化するのを許容すれば本ソフトウェアと同じ PC のソフトウェアによる方法でも実現できる見通しである。今後ソフトウェアによる方法とハードウェアによる方法の、精度及び速度面での比較も行う予定である。

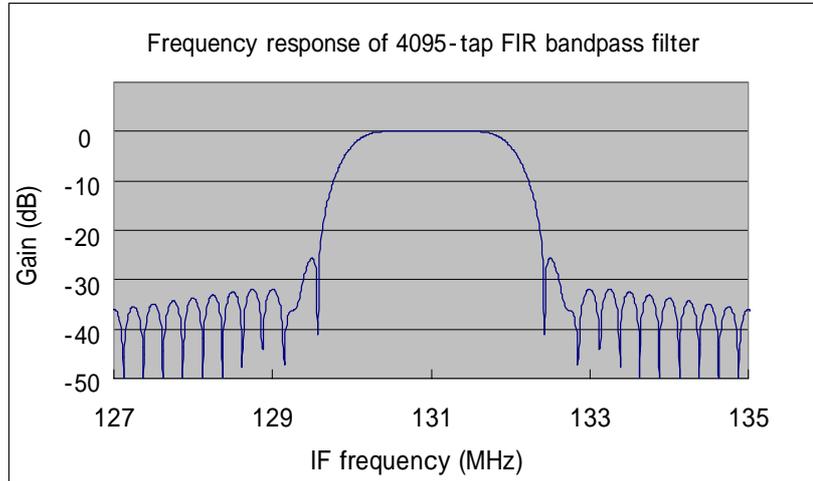


図5: 512-MHz IF 信号から2MHz BW のベースバンド信号を抽出する4095-tap FIR band-pass filter(ハニング窓使用)の周波数特性

7.謝辞

本システムの実証観測は Australia Parks 局の皆様の多大なご協力により実施できた。また、ホイヘンス探査機のリハーサル観測は、上海天文台余山 VLBI 局及び JIVE の皆様の多大な協力により実施された。ここに謝辞を申し上げる。