

VLBI상관서브시스템의 검증을 위한 소프트웨어 시뮬레이터의 개발 및 성능시험
DEVELOPMENT AND PERFORMANCE EVALUATION OF SOFTWARE SIMULATOR FOR
APPROVING OF VLBI CORRELATION SUBSYSTEM

오세진, 노덕규, 염재환, 정현수, 이창훈, 김효령, 김광동, 강용우, 박선엽
한국천문연구원

SE-JIN OH, DUK-GYOO ROH, JAE-HWAN YEOM, HYUN-SOO CHUNG, CHANG-HOON LEE, HYO-RYOUNG KIM,
KWANG-DONG KIM, YONG-WOO KANG, AND SUN-YEOP PARK

Korea Astronomy & Space Science Institute, 61-1 Hwaam, Yuseong, Daejeon 305-348, Korea

Email: sjoh@kasi.re.kr

(Received December 10, 2008; Accepted December 17, 2008)

ABSTRACT

A software simulator is developed for verifying the VLBI Correlation Subsystem (VCS) trial product hardware. This software simulator includes the delay tracking, fringe rotation, bit-jump, FFT analysis, re-quantization, and auto/cross-correlation functions so as to confirm the function of the VCS trial product hardware. To verify the effectiveness of the developed software simulator, we carried out experiments using the simulation data which is a mixed signal with white noise and tone signal generated by software. We confirmed that the performance of this software simulator is similar as that of the hardware system. In case of spectral analysis and re-quantization experiment, a serious problem of the VCS hardware, which is not enough for expressing the data stream of FFT results specified in VCS hardware specification, was found by this software simulator. Through the experiments, the performance of software simulator was verified to be efficient. In future, we will improve and modify the function of software simulator to be used as a software correlator of Korea-Japan Joint VLBI Correlator (KJVC).

Key words : VLBI Correlation Subsystem (VCS), Software Simulator, Re-quantization

1. 서론

한국천문연구원에서 수행중인 한국우주전파관측망(Korean VLBI Network, KVN)은 대기에 의한 전파신호의 위상 흔들림을 효과적으로 보정하기 위해 512 MHz 대역폭을 가지는 신호에 대해 최대 4개까지 동시 관측이 가능한 수신시스템을 세계 최초로 도입할 예정으로 이를 위한 자료획득시스템(Data Acquisition System, DAS)을 도입하였다(김효령 외, 2007). KVN DAS의 경우 4개 주파수를 동시에 처리할 경우 1 GHz 샘플링 속도와 2-bit 양자화를 거치면 최대 8 Gbps 속도로 데이터 처리를 수행할 수 있도록 설계되었으며, 현재 기록/재생시스템의 처리속도에 대응할 수 있는 디지털 필터장치도 채용하였다. 현재 KVN의 최대 4주파수 동시관측 전파신호와 같이 넓은 대역폭과 초고속 데이터를 처리할 수 있는 상관시스템이 필요하게 된다.

한국천문연구원에서는 일본국립천문대와 공동으로 KVN과 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry) 등의 전파 관측데이터를 처리할 수 있는 한일공동VLBI상관기(Korea-Japan Joint VLBI Correlator, KJVC)를 개발

하고 있다(노덕규 외, 2007). KJVC의 핵심 구성시스템인 VLBI상관서브시스템(VLBI Correlation Subsystem, VCS)의 시제품 개발이 2007년 8월 시작하여 2008년 8월 완성되었으며, VCS 시제품의 하드웨어 기능 및 성능을 검증할 수 있는 방법이 필요하게 되었다.

따라서 VCS 시제품을 구성하고 있는 각 기능 블록들이 정상적으로 동작하고 있는가를 확인하는 것과 규격서에서 규정한 규격을 만족하고 있는지를 검증하기 위하여 규격서에서 정의한 하드웨어 구성에 최대한 일치하는 시뮬레이션을 수행할 수 있는 소프트웨어를 개발하는 것이 필요하다. VCS 시제품의 검증은 하드웨어를 개발할 때 연산결과를 비트단위까지 비교할 수 있는 참조 데이터가 필요하며, 스펙트럼 분석과정의 어떤 블록에서 오버플로(overflow)와 같은 오동작이 발생하는지를 추적할 필요가 있다. 뿐만 아니라 VCS 시제품에 구현된 VLBI 상관기로서의 기능들이 정상적으로 동작하는가에 대한 성능평가를 비교할 수 있는 시뮬레이터의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 요구사항을 충족시키기 위하여 VCS 시제품 하드웨어의 기

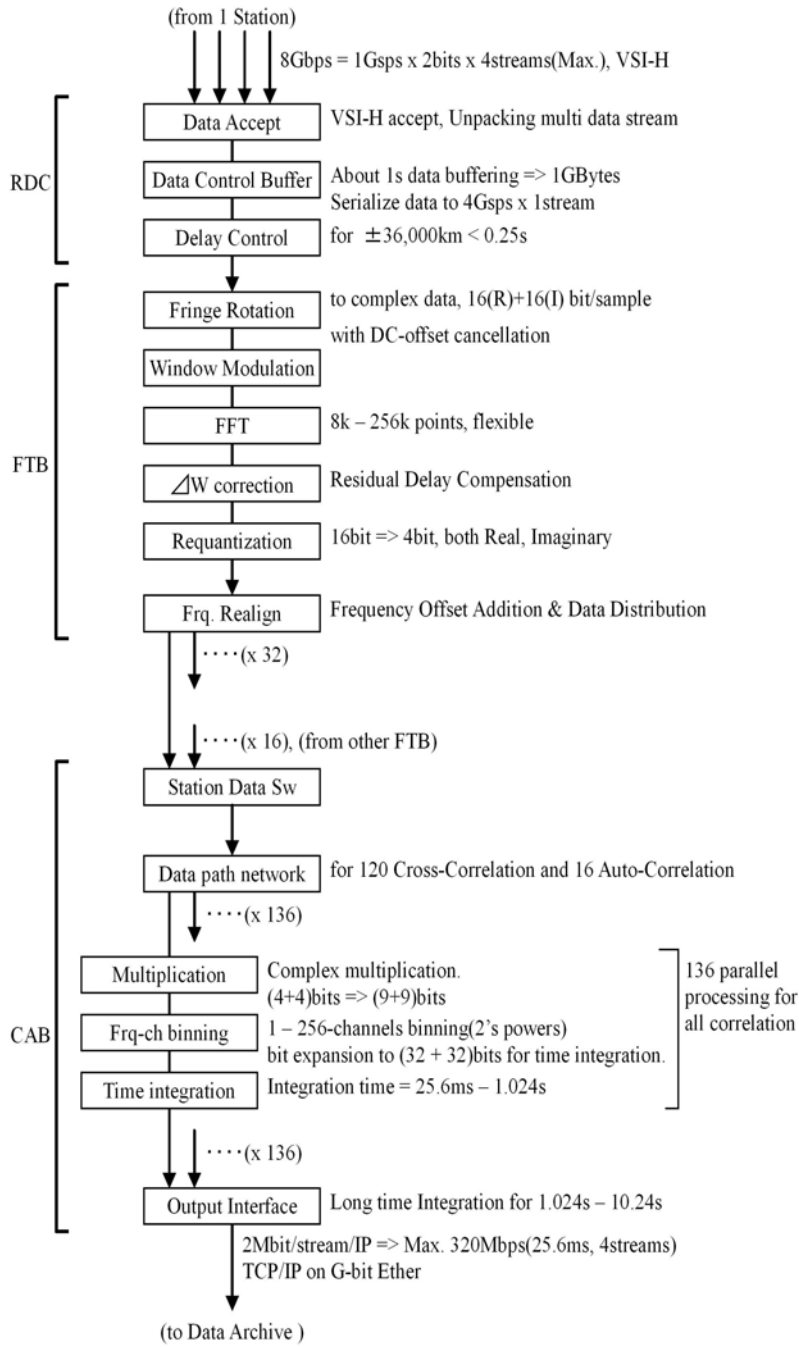


그림 1. VLBI상관서브시스템의 논리적인 구성.

능 및 성능을 확인하기 위해 규격과 일치하는 소프트웨어 시뮬레이터(Software Simulator, SS)를 개발하였다. 본 논문에서는 개발한 소프트웨어 시뮬레이터의 이론과 기능부분 설계, 그리고 성능을 확인하기 위해 기존에 개발된 소프트웨어 상관기에 사용된 데이터, KVN DAS에서 획득한 데이터, 그리고 VCS 시제품 검수를 위해 작성한 다양한 시뮬레이션 데이터에 대해 성능시험을

수행하고 그 결과를 비교하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 VCS의 논리적인 구성에 대해 간략히 기술하고, 3장에서 소프트웨어 시뮬레이터에서 구현된 VCS 규격과 동일한 기능의 이론적인 설명을 요약하며, 4장에서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터의 성능확인을 위한 실험결과에 대해 기술한다. 그리고 마지막 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

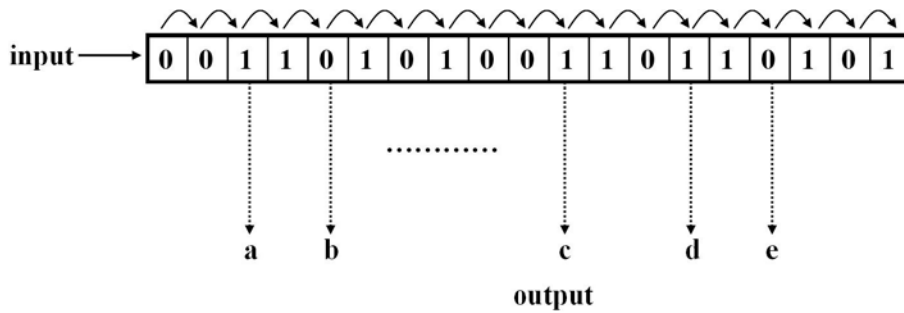


그림 2. 쉬프트 레지스터를 이용한 지연추적(주소정보의 출력은 지연변화를 나타냄).

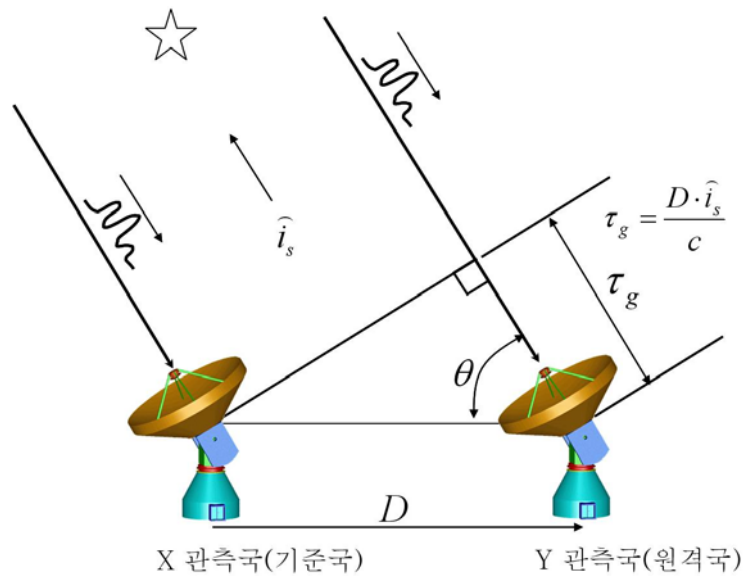


그림 3. 기하학적 지연 τ_g 의 정의.

2. VLBI상관서브시스템의 논리적인 구성

한일공동VLBI상관기(KJJVC)의 핵심구성 시스템인 VLBI상관서브시스템의 논리적인 구성도를 그림 1에 나타내었다(염재환 외, 2008). 그림 1과 같이 VCS는 3가지 보드로 구성되는데, Read Data Control (RDC) 보드에서는 데이터의 입력과 지연제어를 담당하고, Fourier Transform Board (FTB)에서는 프린지 회전과 스펙트럼 분석을 수행한다. 그리고 Correlation & Accumulation Board (CAB)에서는 스펙트럼 결과를 적분하는 역할을 수행한다.

3. 소프트웨어 시뮬레이터

그림 1에 나타낸 VCS의 논리적인 구성과 동일한 규격을 갖는 소프트웨어 시뮬레이터를 개발하였다. 본 연구

에서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터는 VCS의 주요 규격 중에서 지연보정(Delay compensation), 프린지 회전(Fringe rotation), 창함수(Window function) 적용, 스펙트럼 분석(Spectral analysis), 잔차 지연보정(Residual delay compensation), 재양자화(Re-quantization) 등의 기능을 갖고 있으며, 이에 대한 이론적인 설명을 이하에 간략히 기술한다.

3.1 지연보정(Delay Compensation)

상관기에서 지연변화의 추적은 그림 2에 나타낸 것과 같이 입력되는 두 시계열 중의 하나에 버퍼회로(쉬프트 레지스터)를 두고 그 읽어내기 주소를 변경하여 가는 것으로 구현할 수 있다(Takahashi et al, 2000). 그림 1의 VCS의 논리적인 구성에서와 같이 상관처리를 수행하기 전 RDC 보드 부분에서 지연제어(Delay

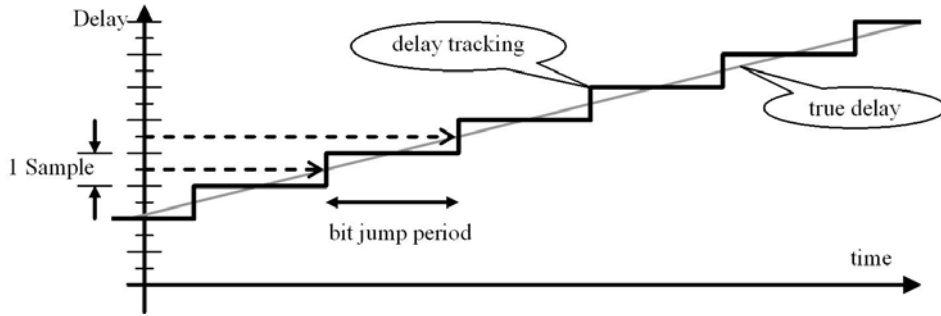
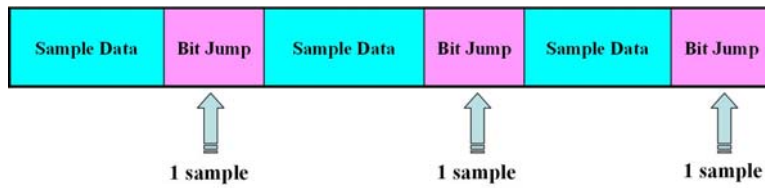
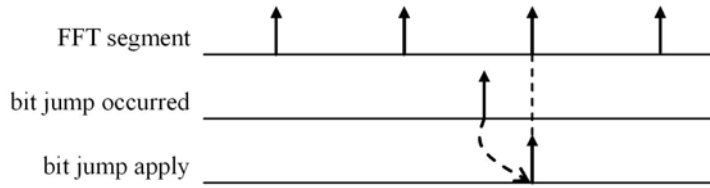


그림 5. 지연커브와 지연 추적.



(a) 시뮬레이션 데이터 작성에서 비트점프 발생을 위한 인위적인 비트점프 삽입.



(b) 비트점프 적용.

그림 6. 비트점프 발생과 적용.

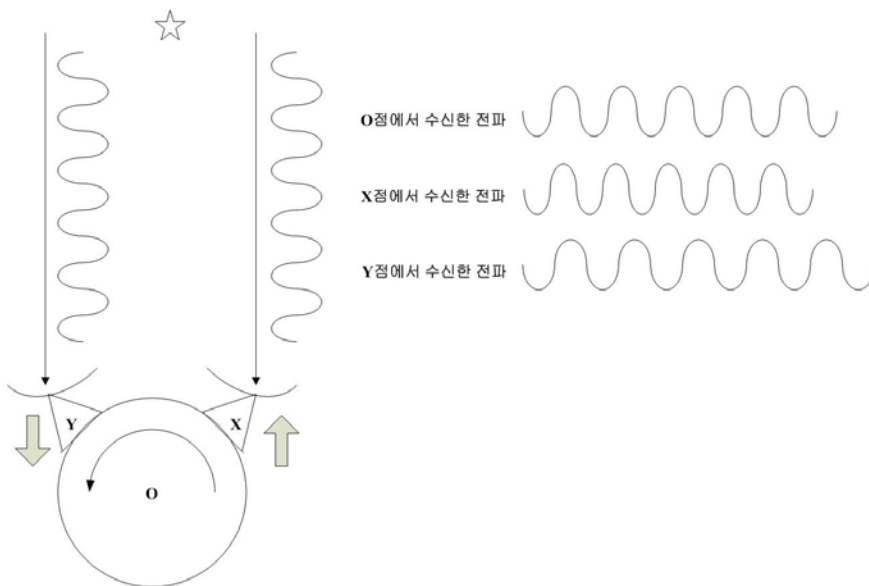


그림 7. 지구의 자전에 의한 Doppler 쉬프트.

control)를 수행하여 지연의 큰 부분은 제거하고 FTB 보드의 FFT를 수행한 후 미세조정 및 지연추적을 수행한다.

KJJVC는 2012년 발사예정인 일본의 차세대 우주 VLBI관측을 위한 VSOP-2의 관측데이터를 처리할 수 있는 규격으로 시스템을 개발하고 있다(노덕규 외, 2007). VSOP-2 위성이 지구와의 거리가 최대가 되는 거리는 약 36,000 km정도이며, 이렇게 멀리 떨어질 경우 위성과 지구상의 관측국간에는 전파의 지연이 발생하게 된다. 따라서 이를 위한 지연보정처리를 수행하여야 한다. 지연보정처리에 대한 개략적인 모식도를 지상의 전파망원경 2대를 이용한 설명을 그림 3에 나타내었다. VSOP-2의 최대기선길이 $\pm 36,000$ km에 대한 지연보정을 위해 그림 2에 나타낸 기하학적인 지연 τ_g 는 X 관측국(기준국)에서 Y 관측국(원격국)으로 향하는 기선벡터 D , 각 전파망원경에서 전파원으로 향하는 단위벡터 \hat{i}_s , 광속도를 c 라고 하면 다음의 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다. 여기서 ‘·’가 붙어 있는 것은 원격국에서 볼 때 도달지연을 ‘·’로 취하기 때문이다(그림 3)(Takahshi et al., 2000).

$$\tau_g = - \frac{D \cdot \hat{i}_s}{c} \quad (1)$$

VSOP-2의 최대 기선길이 $\pm 36,000$ km에 대한 식 (1)을 이용하여 최대 지연시간을 계산하면 약 0.12초가 되며, KVN 및 VERA에서의 데이터 샘플링 속도가 1 Gbps이므로 이는 1.2×10^8 개의 샘플에 해당한다. 이를 소프트웨어 시뮬레이터에서 구현하기 위해서는 메모리가 얼마나 필요한지 확인할 필요가 있다. 즉, 이것을 2-bit/sample로 계산하면 약 30 Mbyte에 해당하는 메모리를 요구한다. 다시 말해 -36,000 km를 적용할 경우에 메모리는 60 Mbyte가 필요하며 16관측국의 관측데이터를 처리할 수 있는 VCS 전체에 적용하면 약 240 Mbyte의 메모리가 소프트웨어 시뮬레이터에서 확보할 필요가 있다.

VSOP-2에서 관측한 데이터를 처리하기 위해 지연변화의 추적은 τ , $\dot{\tau}$, $\ddot{\tau}$, $\overset{\cdot\cdot}{\tau}$ 의 지연 예측변수를 이용하며, 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\tau_T = \tau + (\dot{\tau} + \Delta\dot{\tau})t + \frac{1}{2}(\ddot{\tau} + \Delta\ddot{\tau})t^2 + \frac{1}{6}(\overset{\cdot\cdot}{\tau} + \Delta\overset{\cdot\cdot}{\tau})t^3 \quad (2)$$

앞에서 설명한 것과 같이 VLBI와 같이 수백 km 이상 떨어진 전파망원경의 관측데이터를 상관처리할 때 중요한 과제 중의 하나가 지연보정에 대한 것이다. 그림 4는 지구의 자전에 의한 최대 지연과 최대 지연 변화율의 영향을 도식적으로 표현한 것이다.

그림 4에 나타낸 것과 같이 지연 변화율은 지연 예측변수 $\dot{\tau}$, $\ddot{\tau}$, $\overset{\cdot\cdot}{\tau}$ 에 의한 것으로 이것은 지구의 자전에 의해서 일어난다. 하드웨어를 지연추적을 구현하기 위해서는 앞에서 설명한 것과 같이 쉬프트 레지스터와 같은 버퍼에서 읽어내기 주소를 1-bit 단위로 바꾸어 가면서 수행한다. 지연예측값에 의해 지연추적은 그림 5에 나타낸 것과 비트를 버퍼로부터 선택하여 읽어내기를 하면서 수행한다. 하드웨어로 제작되고 있는 VCS에서는 모든 시스템이 디지털로 구성되므로 지연추적을 수행하는 과정에서 시간에 따른 지연의 변화로 인해 비트이동(bit shift) 또는 비트점프(bit-jump)가 발생하게 된다. 지연추적은 FFT 세그먼트(segment) 단위로 수행하도록 VCS 하드웨어 규격에서 규정되어 있으며, FFT 세그먼트 경계에서 수행된다. 그림 6에 나타낸 것과 같이 만약 비트점프가 FFT 세그먼트 중간에 발생하면 다음 FFT 세그먼트 끝에 적용되도록 예약되고, 만약 FFT 세그먼트가 비트점프 기간보다 크다면, 2 샘플이상의 비트점프가 발생하게 된다.

VCS 내부에서는 FFT 세그먼트 단위로 지연추적이 이루어지기 때문에 지연예측 변수를 이용하여 항상 계산을 해야 한다. 어느 순간 지연시간 값의 소수점 이하의 값이 0.5를 넘어 서는 순간에 비트점프가 발생하게 된다. 이는 샘플 1개를 버리거나 건너뛰는 것을 의미한다.

3.2 프린지 회전(Fringe Rotation, FR)

상관기에서 지연시간 변화율이 양인 경우, 그림 2와 같이 전파원에서 보면 Y 관측국(원격국)은 X 관측국(기준국)에서 점점 멀어지는 상태를 나타낸다. 이 경우 그림 7에 나타낸 것과 같이 도플러 이동(Doppler shift) 현상 때문에 Y 관측국에서 수신되는 신호는 X 관측국의 신호에 비하여 주파수가 낮게 관측된다. 따라서 X 관측국의 신호도 그만큼 주파수를 낮추지 않으면 Y 관측국과의 상관결과가 출력되지 않는다. 이와 같이 관측을 수행할 때 자연적인 지연정보와 함께 인위적인 신호 즉, 관측 장치 또는 인위적인 주파수 오프셋(offset) 설정에 의한 지연정보가 발생할 수 있으며, 이때 발생하는 주파수의 위상이 변하는 것을 멈추도록 하는 것이 프린지 멈추기(Fringe stopping)이다(Takahashi et al., 2000, Sasao et al., 2005). 실제 상관기에서의 프린지 멈추기는 한 관측국의 시계열에 대해 프린지 위상회전에 대응하는 cos 및 sin 함수를 곱하여 수행하고, 3 레벨 근사(+1, 0, 1)를 사용한다. 소프트웨어 시뮬레이터에서 프린지 멈추기를 수행하기 위한 cos 및 sin의 함수값은 롬(ROM)을 사용하여 프린지 위상에 해당하는 주소로부터 함수값을 읽어내는 방식을 채용하였다.

이상에서 설명한 것과 같이 프린지 회전은 지구의 자전에 의해 발생하는 도플러 이동 현상(그림 7)을 보정하기 위한 것으로 전파원으로부터 멀어질수록 주파수 성분이 낮아지

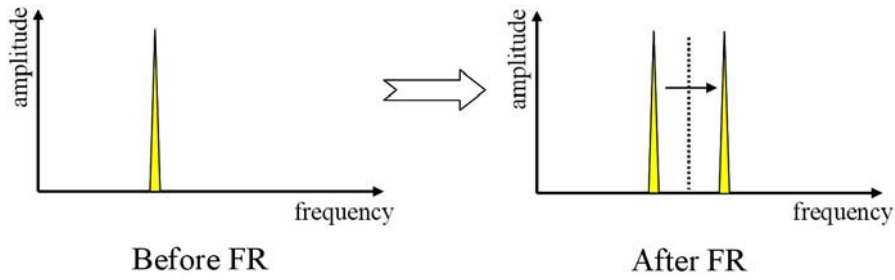


그림 8. 프린지 회전 전후의 예측결과.

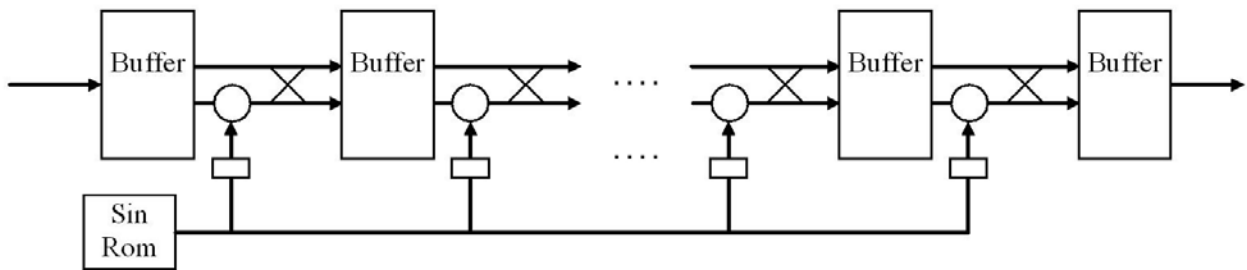


그림 9. FFT 연산 구성도.

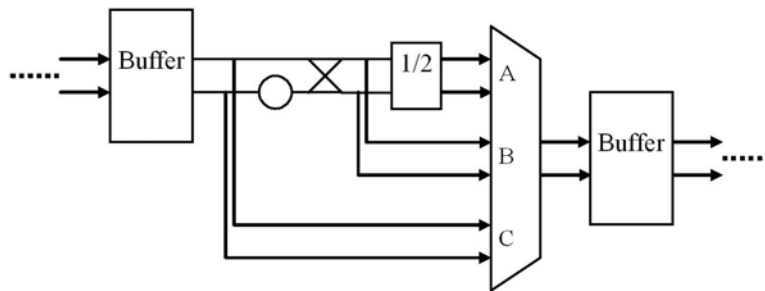


그림 10. 오버플로 방지를 위한 스케일링 구성.

는 것에 대한 보정을 수행해야 하며, 프린지 회전을 수행한 후에 예측되는 결과를 그림 8에 나타내었다.

X 관측국의 시계열 $x(t)$ 에 대해 프린지 멈추기를 수행하는 주파수를 f_r , 초기위상이 ϕ_0 인 cos 및 sin 함수를 곱한 후의 시계열을 $x_r(t), x_i(t)$ 라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_r(t) &= x(t) \cdot \cos(2\pi f_r t + \phi_0) \\ x_i(t) &= x(t) \cdot \sin(2\pi f_r t + \phi_0) \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 프린지 멈추기에서 프린지 회전 주파수는 다음 식으로 계산한다.

$$f_r = f \cdot \tau_T \quad (4)$$

여기서, f 는 관측주파수이며, 초기위상은 식 (4)와 같이 나타낸다. τ_T 는 식 (2)에 의한 결과를 나타낸다.

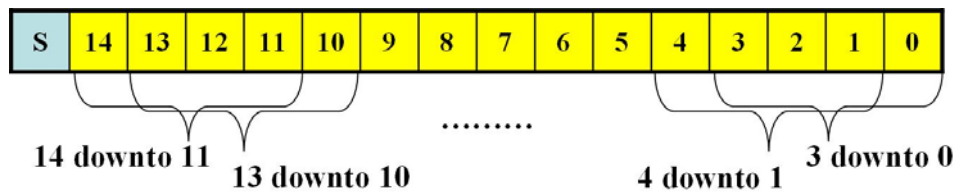
$$\phi_0 = 2\pi(f \cdot \tau_T)\text{rem} \quad (5)$$

여기서, $(f \cdot \tau_T)\text{rem}$ 은 정수부분을 뺀 나머지 소수점 이하의 값이다.

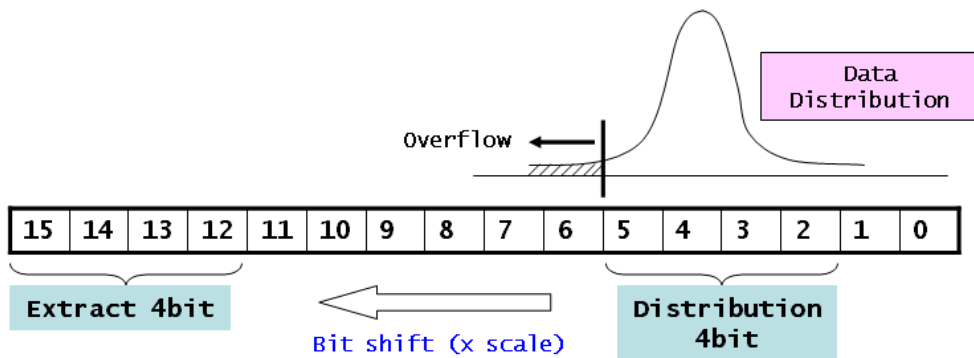
이상의 프린지 회전에 대해 VCS의 하드웨어 규격과 동일하게 소프트웨어 시뮬레이터에서도 구현하였다.

3.3 창함수(Window function)

스펙트럼 분석과정에서 샘플데이터에 창함수(Window function)를 곱하는 것은 FFT 세그먼트 단위로 데이터를



(a) 재양자화 처리과정.



(b) 재양자화 과정에서 스케일링을 곱한 후의 비트이동 과정.

그림 11. FFT 연산후의 재양자화 처리과정.

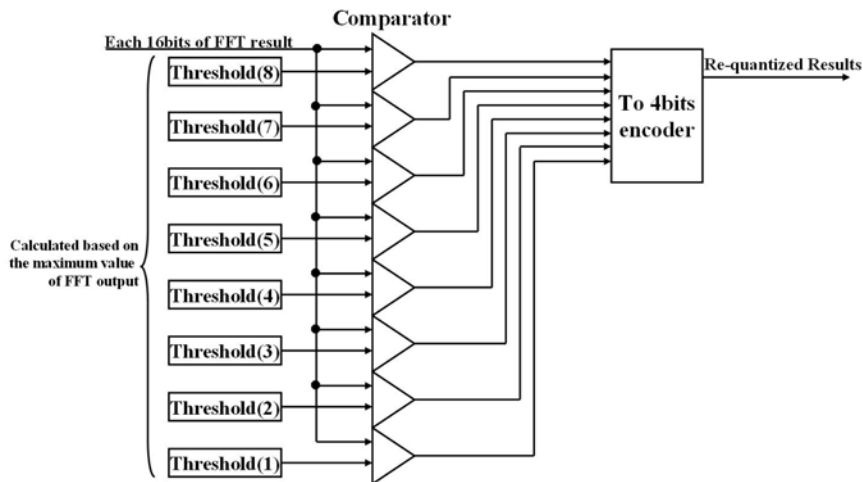


그림 12. 제안된 재양자화 방법.

가져올 때 세그먼트 시작 부분의 데이터와 끝 부분의 데이터가 주파수 도메인에 영향을 미칠 수 있기 때문에 이에 의한 영향을 사전에 없애기 위해서 하는 것이다. 본 소프트웨어 시뮬레이터에는 해밍(Hamming), 해닝(Hanning), 블랙만(Blackman) 함수(이채욱, 1994)가 사용되었다.

3.4 스펙트럼 분석(Spectral Analysis)

VCS의 규격에서 FFT 포인트(points)는 56k/128k/64k/32k/16k/8k 포인트를 지원하며 변수의 길이는 16-bit 실수와 16-bit 허수의 데이터로 구성된다(오세진 외, 2008). 실제 FFT 연산을 수행하는 구성도를 그

림 9에 나타내었으며, FFT 연산과정에 발생할 수 있는 오버플로 연산을 방지하기 위해 16-bit 고정소수점 연산(Q15)의 스케일링(scaling) 연산을 수행하도록 하였으며, 그 구성도를 그림 10에 나타내었다. 소프트웨어 시뮬레이터에서는 소프트웨어의 장점을 살려 VCS 하드웨어 규격과 동일하면서 FFT의 비트 연산을 가변적으로도 수행할 수 있도록 구현하였다.

3.5 Δw Correction

Δw 보정은 잔차 지연보정(Residual delay compensation)이라고도 하며, 그림 1에 나타낸 RDC의 지연 추적에서 발생한 소수점 이하 값에 의한 오차를 보정하기 위한 것으로 FFT 연산처리를 한 후의 데이터에 계수 값을 각 채널 데이터에 곱하여 계산하며, 간단히 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$e^{j\frac{2\pi}{N}k \cdot \Delta T} \quad (6)$$

여기서, k 는 주파수 채널, N 은 전체 주파수 채널 수, ΔT 는 지연시간의 소수점 이하의 값에 의해 발생하는 오차 값이다. Δw 보정을 한 후의 FFT 출력 결과를 주파수 도메인에서 시간 도메인으로 역FFT를 하면 샘플 데이터가 Δw 보정에 의해서 계산된 값만큼 이동된 것을 확인할 수 있다. VCS 규격에는 FFT 출력의 주파수 채널의 64 포인트 간격으로 Δw 보정을 하도록 규정하고 있다.

3.6 재양자화(Re-quantization)

그림 1에 나타낸 VCS의 논리적인 구성도에서 재양자화 과정은 FFT 연산처리를 수행한 후의 결과 데이터(16-bit 실수 + 16-bit 허수)의 양이 다음 연산처리를 수행할 수 없을 정도로 증가하고 다음 연산 블록으로의 데이터 전송에 문제가 발생하기 때문에 각 채널 데이터의 비트 수를 실수부와 허수부에 대해 각각 4-bit만 취하여 재양자화를 수행한다. 이 과정을 그림 11의 (a)에 나타내었다. 재양자화 과정에서는 주어진 재양자화 테이블을 수행하기 전에 FFT 출력 결과를 평균하고 그 분포를 조사하여 재양자화 과정을 수행한다.

그러나 VCS 규격(오세진 외, 2008)에서의 재양자화 방법은 FFT 연산과정에서 오버플로를 방지하기 위해 스케일링 값을 먼저 찾아야 하는 번거로움과 찾는 스케일링 값을 이용하여 그림 11 (b)에 나타낸 것과 같이 연산비트를 이동(shift)했을 경우에도 FFT 연산과정에서 오버플로가 발생하는 문제가 있다. 즉, FFT 연산처리 후 16-bit로 표현된 데이터 중에 상위 4-bit만을 무조건 취하여 재양자화를 수행하도록 규정하고 있기 때문에 항상 상위 4-bit에 유효한 데이터가 있다는 보정을 할 수 없다. 또한 그 유효한 데이터가 어느 비트에 있는 것도 판단하기 어려운 문제가 있다. 그림 11의 (b)에 나

타낸 것과 같이 만약 유효한 데이터가 3-bit에서 2-bit 사이에 있는 경우에도 현재의 VCS 규격에 의해 스케일링 값을 찾아 비트이동을 하면, 현재 처리중인 데이터에서는 유효하지만, 다른 데이터가 입력되면 기존의 설정된 값이 무효가 될 가능성이 많다. 따라서 이를 해결하기 위해 본 연구에서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터에서는 수 초정도의 데이터를 이용하여 유효한 데이터 비트분포를 확인하는 과정을 도입하고 FFT 연산처리 후의 16-bit 데이터 비트 스트림(bit stream)에 대해 비교기(comparator)를 두어 최대 유효비트를 찾는 과정을 구현하였다. 이에 대한 설명을 그림 12에 나타내었다.

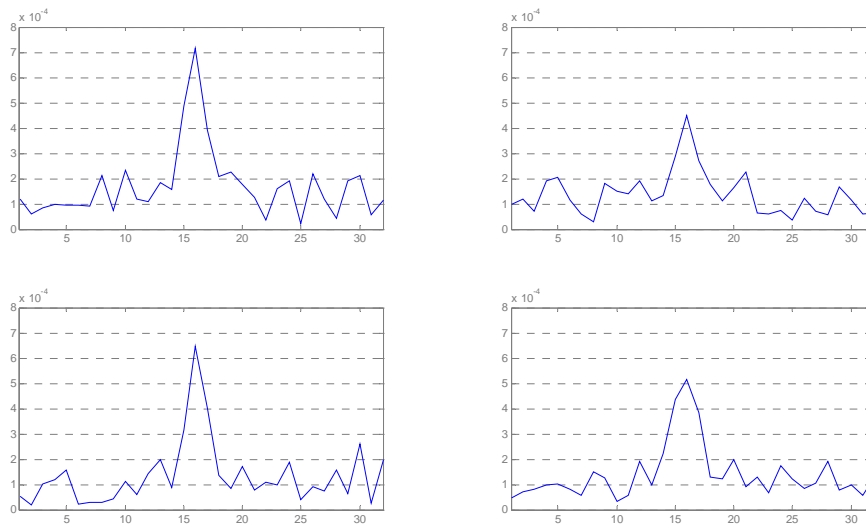
4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터의 유효성을 확인하기 위해 일본 국립정보통신연구원(NICT)과 일본 국립천문대(NAOJ)에서 개발된 소프트웨어 상관기에서 처리한 동일한 데이터에 대해 실험을 수행하였다. 그리고 한일공동VLBI상관기의 핵심구성품인 VCS 시제품의 성능평가에서 사용된 동일한 시뮬레이션 데이터를 대상으로 성능평가를 수행하였다. 비교실험의 경우 일본 NICT에서 관측한 측지VLBI관측 데이터를 NICT에서 개발한 소프트웨어 상관기로 상관처리한 결과와 본 연구에서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터의 결과를 비교하였다. 소프트웨어 시뮬레이터에 구현된 기능 중 지연보정, 비트점프, 프린지 회전, 스펙트럼 분석, 재양자화 등의 기능을 확인하기 위해 VCS 시제품의 검수를 위해 작성한 시뮬레이션 데이터를 대상으로 평가실험을 수행하였다. 그리고 KVN의 자료획득시스템(DAS)에는 디지털 분광기(Digital Spectrometer, DSM)에 구현된 자기상관기로 처리한 결과와도 비교실험을 수행하였다.

4.1 NICT 소프트웨어 상관기와의 비교

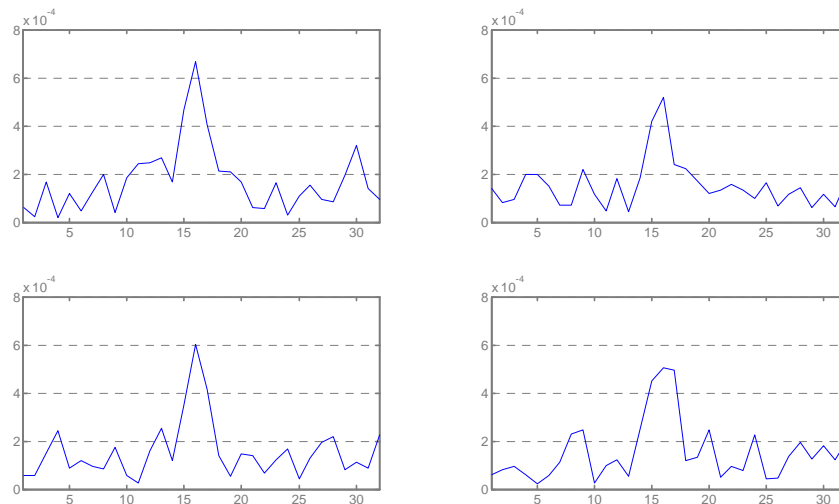
실험을 위해 사용된 샘플데이터는 일본의 Kashima 관측국과 Tomakomai 관측국사이의 기선에서 관측되었으며 (Imai et al, 2005), 8 MHz로 샘플링하고 1-bit로 양자화하였고, 4채널로 구성되어 있다. 4채널 데이터의 각 관측주파수는 8.20999 GHz, 8.21999 GHz, 8.24999 GHz, 8.30999 GHz이다. 이 실험데이터에 대해 NICT 소프트웨어 상관기와 소프트웨어 시뮬레이터의 상관결과를 그림 13에 나타내었다.

그림 13에 나타낸 것과 같이 NICT 소프트웨어 상관기와 소프트웨어 시뮬레이터의 상관결과에서 동일한 채널에서 상관결과가 출력되는 것을 확인하였다. 그림 13의 (a)와 (b)를 비교해 보면, 상관결과가 출력되는 채널의 양쪽에서 표시되는 side lobe 성분의 크기가 조금 다르게 보이지만, 이는 상관결과와 적분시간을 길게 하면 동일하게 출력될 것으로 생각된다. 이 실험에서 사용된 샘플 데이터의 양이 작아서 긴 시간동안의 상관적분을 수행하



x : channels, y : amplitude

(a) 4채널 관측데이터에 대한 NICT 소프트웨어 상관기의 상관결과.



x : channels, y : amplitude

(b) 4채널 관측데이터 대해 개발한 소프트웨어 시뮬레이터의 상관결과.

그림 13. NICT 소프트웨어 상관기와 개발한 소프트웨어 시뮬레이터의 상관결과 비교.

지 못하였다.

4.2 소프트웨어 시뮬레이터 시험결과

4.2.1 지연보정 실험결과

본 연구에서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터에서 지연보정 기능이 정상적으로 수행되는가를 확인하기 위해 임의의 시뮬레이션 데이터에 대해 실험을 수행하였다. 지

연보정 실험을 위해 사용된 실험 데이터는 그림 14에 나타낸 것과 같이 입력 데이터 X 축을 기준으로 할 경우 Y 축 입력 데이터가 얼마만큼 지연된 것으로 가정하기 위해 데이터 구조의 앞쪽에 가상의(dummy) 데이터를 삽입하여 작성하였다. 실험에서는 잡음(Noise)과 16 MHz의 톤 신호(tone signal)를 혼합하고 Y 축 입력에 1,500 km(0.005sec) 지연된 데이터로 가정하여 입력 데이터를 작성하였다. 본 실험에서는 소프트웨어로 하

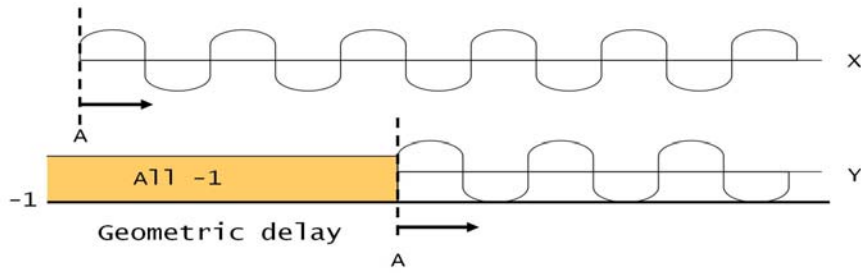
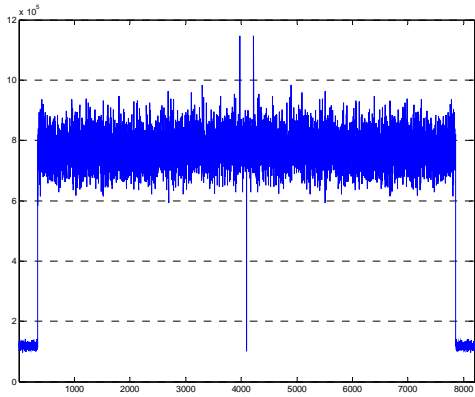
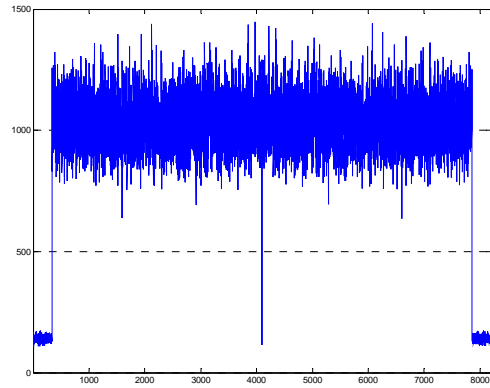


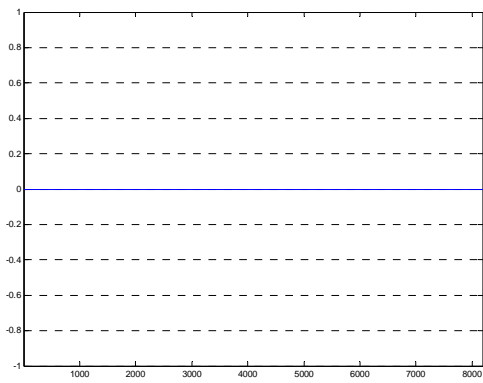
그림 14. 지연보정을 위해 작성된 실험 데이터의 구조.



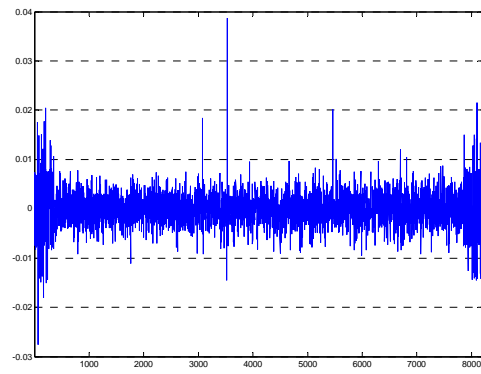
(a) 부동소수점 연산 상호상관결과.



(b) 고정소수점 연산 상호상관결과.

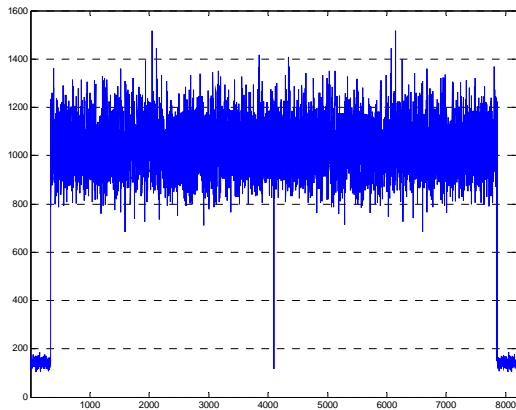


x: channels, y : radian
(c) 부동소수점 연산 위상응답

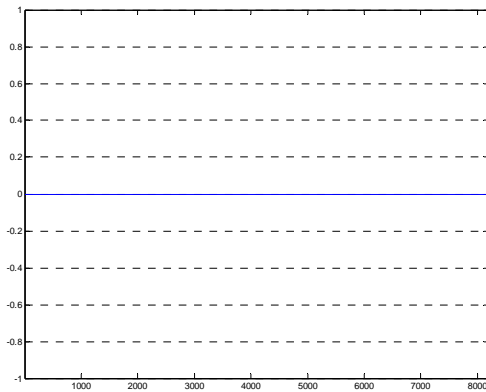


x: channels, y : radian
(d) 고정소수점 연산 위상응답

그림 15. 소프트웨어 시뮬레이터에 의한 지연보정 상관결과.



(a) 상관결과(x : channels, y : amplitude)



(b) 위상응답(x : channels, y : radian)

그림 16. 소프트웨어 시뮬레이터의 비트점프 기능에 의한 상관결과(고정소수점 연산).

드웨어와 같은 규격으로 작성하였기 때문에 실수연산과 고정연산에 대한 결과도 확인하기 위해 실험을 수행하였다. 실제 예측되는 상관결과는 상호상관(cross-correlation) 결과의 경우 16 MHz의 톤 신호가 출력되고 위상은 0이 되는 결과이면 정상적으로 동작되는 것으로 판단된다. 실제로 수행된 실험결과를 그림 15에 나타내었다. 그림 15의 결과에서 우선 Y 축 입력데이터를 1,500 km 지연시킨 경우에 대해 결과가 정상적으로 출력되는 것을 확인하였다. 그러나 부동소수점(floating-point) 연산 결과와 고정소수점(fixed-point) 연산결과를 비교해보면 고정소수점 연산에 의한 상관결과에서 상호상관 결과와 위상응답에서 flat한 결과를 얻지 못하는 것을 알 수 있다. 특히 상호상관 결과에서 16 MHz 톤 신호가 다른 인접 결과에 숨어져 보이지 않는데, 이는 상관적분을 많이 수행하면 해결될 수 있다. 그리고 현재 VCS 하드웨어를 구현할 때 시스템의 하드웨어 물량을 고려하여 고정소수점 연산방법을 채택하고 있는데, 그 영향이 얼마나 되는지 확인하기 위해 실험을 수행한 결과이다. 실험에서 부동소수점 연산 방법에 의한 결과가 더 정확하게 출력되는 것은 당연한 것이라고 판단된다.

그리고 지연보정을 수행하는 과정에 발생하는 비트점프의 기능이 정상적으로 동작되는지 확인하기 위해 실험을 수행하였다. 사용된 실험데이터는 그림 6에 나타낸 것과 같이 잡음과 256.25 MHz 톤 신호를 혼합하여 임의로 비트점프가 발생하도록 FFT의 세그먼트 사이에 1 샘플의 비트점프 데이터를 삽입하여 작성하였다. 예상되는 상관결과는 프린지 회전은 적용하지 않는 상태에서 자기상관결과와 동일한 결과가 출력되면 정상

적으로 동작되는 것으로 판단된다. 비트점프에 대한 실험결과를 그림 16에 나타내었다.

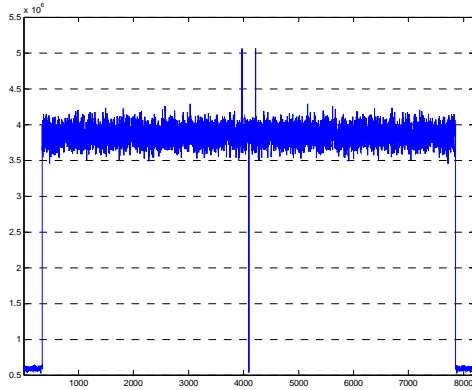
그림 16에서는 고정소수점 연산결과만 나타내었으며, 예상되는 자기상관결과와 동일하게 출력되는 것을 확인하였다.

4.2.2 프린지 회전 실험결과

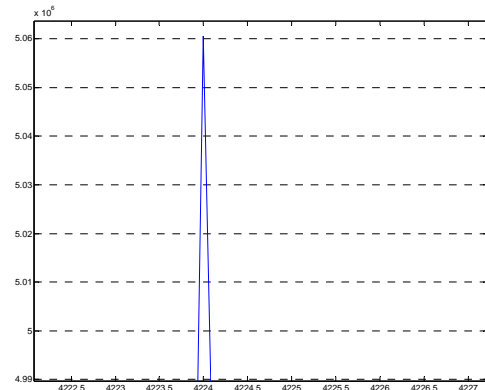
소프트웨어 시뮬레이터에 구현된 프린지 회전 기능을 확인하기 위해 실험 데이터를 이용하여 실험을 수행하였다. 사용된 실험데이터는 관측주파수는 22 GHz로 가정하였으며, 그림 8에 나타낸 것과 같이 입력 데이터의 주파수를 시뮬레이터에서 임의로 회전시킨 것으로, 만약 Y축은 15.9 MHz 신호로서 기준이 되고, X축은 16 MHz일 경우 상관결과가 출력되지 않기 때문에 시뮬레이터에서 X축을 15.9 MHz로 주파수 회전을 시켜야 한다. 본 연구에서는 프린지 회전과 동일한 기능으로 Δf 만큼 주파수를 이동시키는 기능으로 프린지 회전이 가능하도록 하였다. 이 경우 예상되는 결과는 자기상관과 상호상관결과에서 동일한 채널에서 주파수의 스펙트럼이 출력되면 정상이라고 판단된다. 프린지 회전에 대한 실험결과를 그림 17에 나타내었다.

4.3 KVNDAS의 디지털분광기와 결과 비교

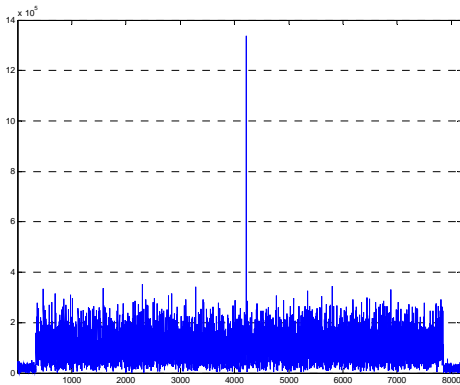
샘플데이터는 KVNDAS의 실험을 위해 제작한 노이즈 소스(Noise Source)와 톤 신호(tone signal)에 혼합된 신호를 사용하였다. 샘플링주파수는 1 GHz, 2-bit이며, 협대역 모드(Narrow band mode)에 대해 784 MHz의 톤 신호를 입력하여 사용하였다. 그림 18에 나타낸 것과



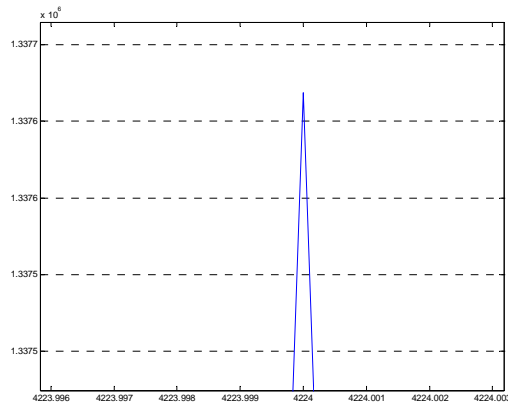
(a) 프린지 회전 후 자기상관결과.
(x: channels, y: amplitude)



(b) 프린지 회전 후 자기상관 결과에서 4224 channels의 스펙트럼.
(x: channels, y: amplitude)



(c) 프린지 회전 후 상호상관결과.
(x: channels, y: amplitude)



(d) 프린지 회전 후 상호상관 결과에서 4224 channels의 스펙트럼.
(x: channels, y: amplitude)

그림 17. 프린지 회전 후의 소프트웨어 시뮬레이터의 자기/상호상관 결과.

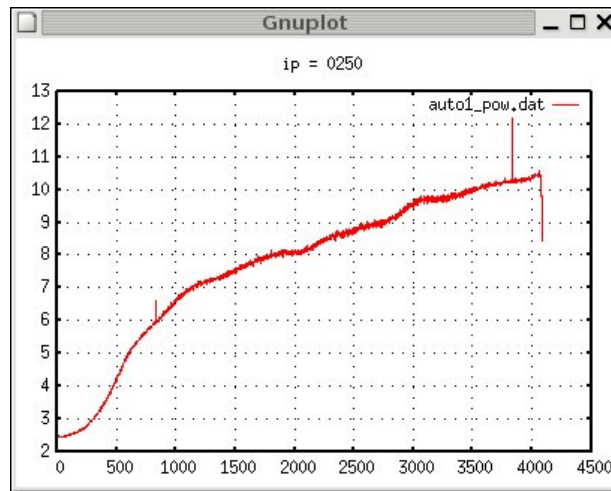
같이 KVNDAS의 관측모드 1(256 MHz 대역폭)의 DSM 자기상관결과와 소프트웨어 시뮬레이터의 자기상관결과가 동일함을 알 수 있다.

4.4 VCS 시제품의 상관결과와 비교

실험에 사용된 샘플데이터는 소프트웨어를 이용하여 VCS 하드웨어 및 소프트웨어 시뮬레이터에서 동작할 수 있도록 인위적으로 구성된 노이즈 신호를 작성하였다. 그림 1에 나타낸 VCS의 논리적인 구성과 3장에서 설명한 것과 같이 재양자화는 스펙트럼 분석이 끝난 후 수행하도록 되어 있다. 여기서 데이터의 표현을 16-bit에서 4-bit로 줄이는 과정과 스펙트럼 분석의 오버플로 방지를

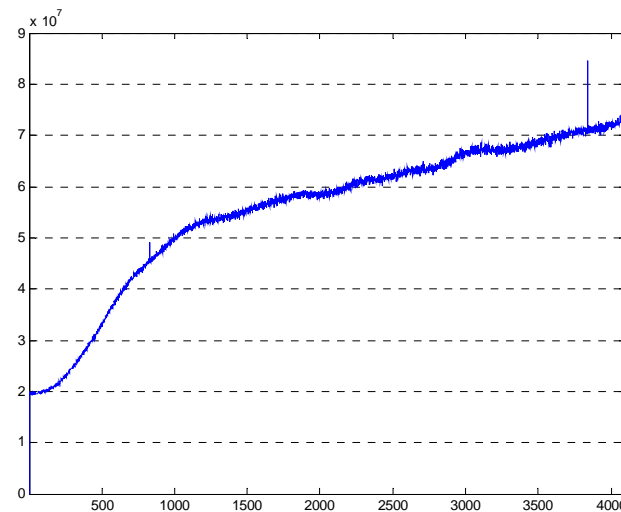
위해 스케일링 값을 처리하는 과정에서 VCS 시제품의 지연추적을 수행하는 상관결과에서 이상한 결과가 출력되는 것을 확인하였다.

따라서 본 실험에서는 3장에서 소개한 VCS의 규격과 동일하게 개발한 소프트웨어 시뮬레이터와 VCS 시제품의 상관결과를 비교하는 과정에 재양자화 문제가 발생하였는데, 이 문제점의 원인을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 우선 샘플데이터를 이용하여 VCS 시제품의 2 샘플(sample) 지연한 후의 상관결과와 위상변화에 대한 결과를 그림 19에 나타내었다. 실험결과에서 정확한 실수부와 허수부의 상관결과는 cos 또는 sin 파형 형태의 결과가 출력되어야 하고, 상호 전력스펙트럼(cross power



x : channels, y : amplitude

(a) KVNDAS의 DSM 자기상관결과(256 MHz BW).



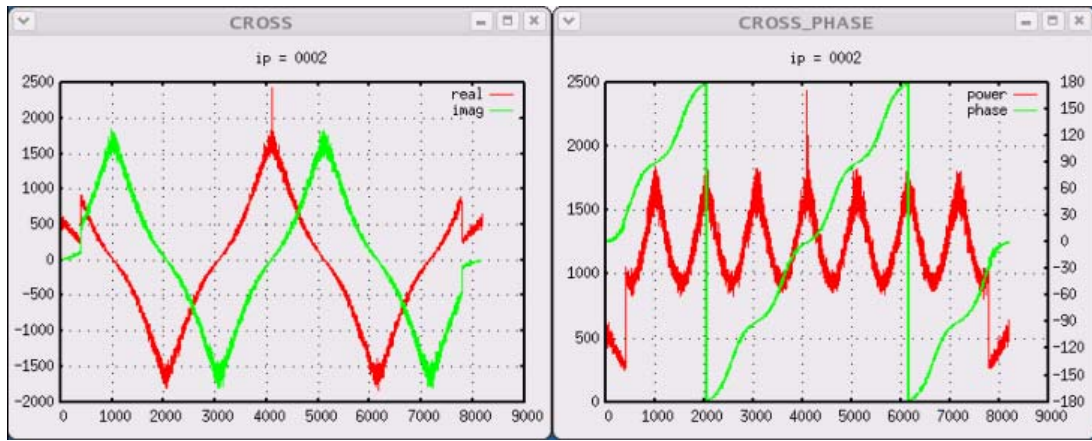
x : channels, y : amplitude

(b) 소프트웨어 시뮬레이터에 의한 자기상관결과(256 MHz BW).

그림 18. KVNDAS의 DSM과 소프트웨어 시뮬레이터의 상관결과 비교.

spectrum)은 평탄(flat)한 결과를 나타내야 하지만, 그림 19에 나타난 것과 같이 파도모양(waving) 형태의 상관결과가 출력되는 것을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 VCS 시제품의 문제점이 스펙트럼 분석의 오버플로 방지를 위한 스케일링 값의 처리와 재양자화의 데이터 비트 표현에 기인하는 것을 확인하였으며, 특히 데이터를 표현하는 비트의 길이가 작다는 것을 확인하였다.

이를 정확하게 분석하기 위해 소프트웨어 시뮬레이터에서도 동일한 결과가 출력되는지 확인하기 위해 재양자화의 데이터 표현을 4-bit로 설정하여 실험을 수행하였으며, 그 결과를 그림 20에 나타내었다. 그림 20에 나타난 것과 같이 그림 19의 VCS 시제품의 결과와 유사하게 상관결과에서 파도모양 형태가 출력되는 것을 확인하였다. 하드웨어로 시스템을 구현할 때 어려운 점이 설계와 구



x : channels, y : amplitude
 (a) 실수부와 허수부의 상관결과. (b) 상관결과의 상호 전력스펙트럼과 위상 결과.

그림 19. VCS 시제품의 2 샘플 지연한 후의 상관결과.

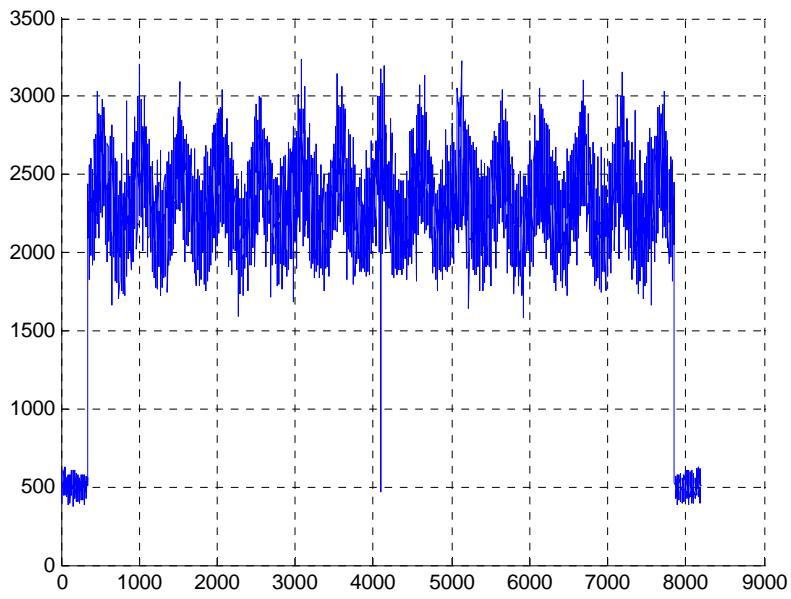
현 단계에서 물량의 정확한 예측을 잘 하는 것이 중요하다고 볼 수 있다. 따라서 VCS 시제품의 경우 우선 하드웨어의 설계 내용을 당장 변경하는 것이 곤란하여 소프트웨어 시뮬레이터에서 재양자화 비트를 변화시키면서 3장에서 스펙트럼 분석 후에 비교기(comparator)를 사용하여 데이터의 최적 비트분포를 찾을 수 있도록 제한한 재양자화 방법과 스케일링 값 처리과정을 적용하여 실험을 수행하였으며, 그 결과를 그림 21에 나타내었다. 그림 20과 그림 21의 결과를 비교해 보면, 파도모양 형태의 출력 결과가 현저하게 없어지는 것을 알 수 있으며, 실수 및 허수에 대한 상관결과에서도 cos 및 sin 파형 형태의 상관결과가 출력되는 것을 확인할 수 있다.

이상의 실험결과에서 나타난 것과 같이 본 연구에서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터의 상관처리 결과가 기존에 개발된 시스템으로 처리한 결과가 동일함을 확인할 수 있었다. 또한 실제 VCS 시제품을 이용한 실험에서도 시제품의 기능 및 성능을 검증에 하는데 이 소프트웨어 시뮬레이터를 사용하였으며, VCS 시제품에서 스펙트럼 분석시의 오버플로 방지를 위한 스케일링 값 처리와 재양자화 과정에 문제가 있음을 확인하였다.

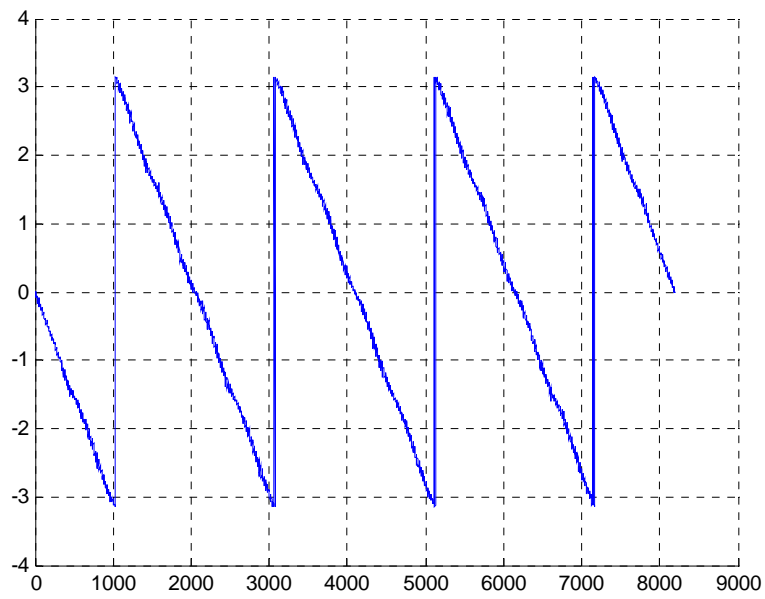
특히 본 연구에서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터를 이용하여 VCS 시제품의 공장검수에 활용하였으며, VCS 시제품의 문제가 된 스펙트럼 분석에서 스케일링 값 처리와 재양자화 부분에 대해 VCS 제작사와 본 제품의 설계 및 제작에서 심도있는 논의를 진행하고 있는 중이다. 이상의 실험결과를 바탕으로 본 연구에서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터의 유효성을 확인할 수 있었다.

5. 결론

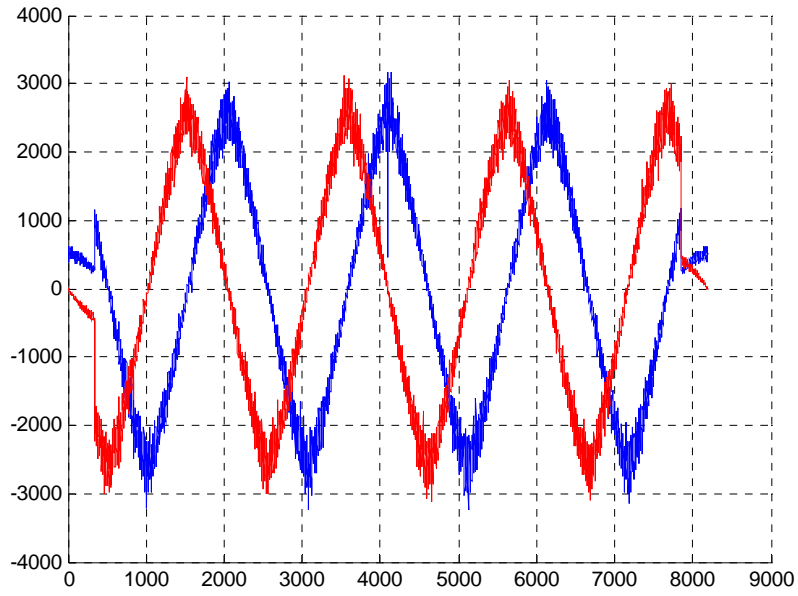
본 논문에서는 VLBI상관서브시스템(VCS)의 하드웨어 검증을 위해 개발한 소프트웨어 시뮬레이터와 그 성능 평가 실험결과를 소개하였다. 개발한 소프트웨어 시뮬레이터는 VCS 시제품 하드웨어와 동일한 규격을 갖고 있으며, 지연보정, 비트 점프, 프린지 회전, 스펙트럼 분석, 자기/상호상관처리 등의 기능들을 포함하고 있다. 본 연구에서는 개발한 소프트웨어 시뮬레이터의 유효성을 확인하기 위해 다른 관측소에 개발한 소프트웨어 상관기와 비교실험을 수행하였다. 그리고 소프트웨어 시뮬레이터에 구현한 다양한 기능의 성능을 확인하기 위해 VCS 시제품의 공장검수를 위해 작성한 다양한 시뮬레이션 데이터에 대해 성능시험도 수행하였다. 특히 VCS 시제품과 동일한 규격으로 구현한 소프트웨어 시뮬레이터를 활용하여 하드웨어로 구성된 VCS 시제품의 스펙트럼 분석의 오버플로 방지를 위한 스케일링 값 처리과정과 재양자화과정에 문제가 있는 것을 소프트웨어 시뮬레이터를 통하여 확인하였다. 본 연구에서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터와 NICT에서 개발한 소프트웨어 상관기의 결과에서는 스펙트럼의 모양이 유사한 것을 확인하였다. 그리고 소프트웨어 시뮬레이터의 기능에 대한 성능시험에서도 다양한 시뮬레이션 데이터에서 정상적인 결과가 출력되는 것을 확인하였다. 앞에서도 설명한 VCS 시제품의 재양자화 문제 등은 VCS 본제품을 제작하기 위한 설계단계에서 한일 상관기팀 그리고 제작사 간의 심도있는 논의가 진행중이며, 이 결과를 적극 반영할 예정이다. 이상의 실험결과로부터 본 논문에서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터의 성능이 유효함을 확인할 수 있었다. 향후에는 본 연구에서 개발한 소프



(a) 4 샘플 지연시킨 후의 상관 진폭결과.

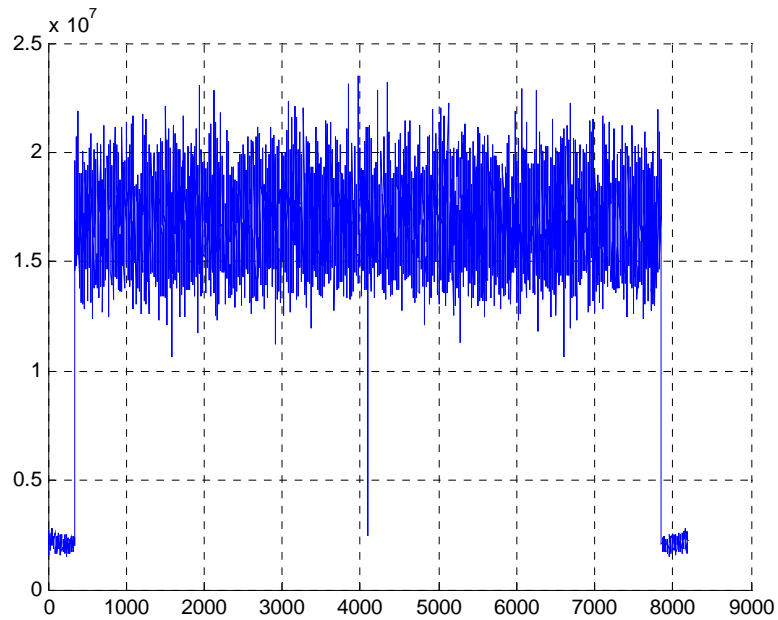


(b) 4 샘플 지연시킨 후의 상관 위상결과.

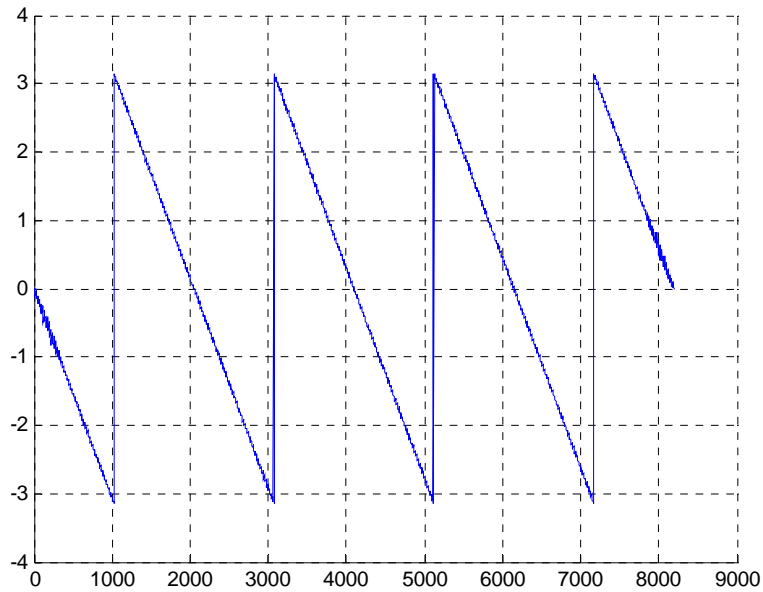


(c) 4 샘플 지연 후의 실수부와 허수부의 상관결과.

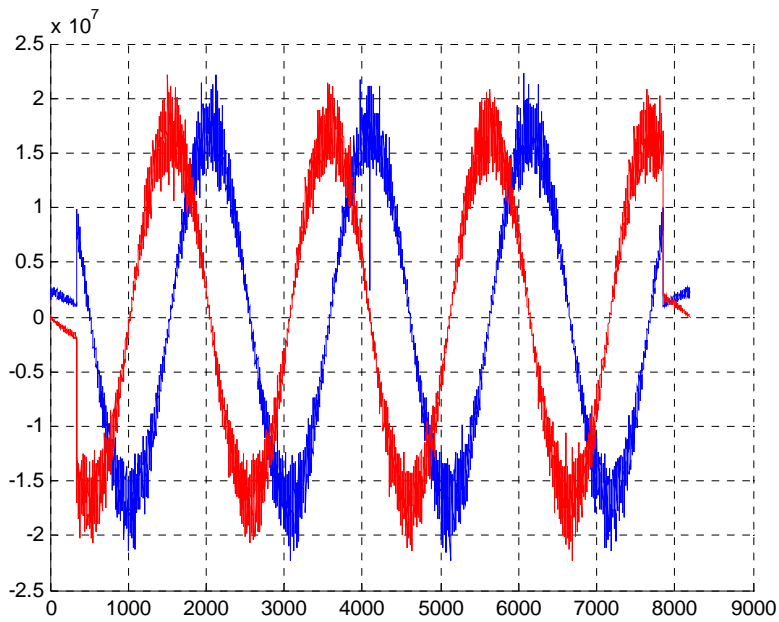
그림 20. VCS 시제품과 동일한 규격으로 작성한 소프트웨어 시뮬레이터를 이용한 상관결과 비교. (x : channels, y : amplitude)



(a) 4 샘플 지연시킨 후의 상관 진폭결과.



(b) 4 샘플 지연시킨 후의 상관 위상결과.



(c) 4 샘플 지연 후의 실수부와 허수부의 상관결과.

그림 21. 소프트웨어 시뮬레이터에서 제안한 재양자화 방법을 적용한 경우의 상관결과 비교. (x : channels, y : amplitude)

트웨어 시뮬레이터를 VCS 하드웨어의 검증뿐만 아니라 소프트웨어 상관기로 개발할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 한국천문연구원 2008년도 “한일공동 VLBI상관기 및 수신기 개발” 연구과제의 연구비로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김효령 외, 2007, 한국우주전파관측망 건설, 한국천문연구원 2007년도 연구보고서
- 노덕규 외, 2007, 한일공동VLBI상관기 및 수신기 개발, 한국천문연구원 2007년도 연구보고서
- 염재환, 노덕규, 오세진, 강용우, 박선엽, 2008, 한일공동 VLBI상관서브시스템의 하드웨어를 기반으로 한 고정소수점 연사코드의 개발, 2회 천문관측기기워크숍 논문집, 2, 65-70
- 오세진, 염재환, 노덕규, 2008, VLBI상관서브시스템 시제품 공장검수 보고서, 한국천문연구원
- 이채욱, 1994, 디지털신호처리 기초와 응용, 청문각
- F. Takahashi, T. Kondo, Y. Koyama, 2000, Very Long Baseline Interferometer, Ohmsha
- Hiroshi Imai, Yasuhiro Koyama, Testuro Kondo, 2005, K5 software correlator user manual, NICT
- Tetsuro Sasao, Andre Fletcher, 2005, Basic Knowledge of Radio Astronomy, Lecture Note