

전파천문 관측데이터 분석을 위해 소프트웨어를 이용한 디지털필터 설계에 관한 연구

A Study on the Digital Filter Design using Software for Analysis of Observation Data in Radio Astronomy

염재환*, 오세진*, 노덕규*, 오충식*, 정동규*, 신재식*, 김효령*, 황주연*

Jae-Hwan Yeom*, Se-Jin Oh*, Duk-Gyoo Roh*, Chung-Sik Oh*, Dong-Kyu Jung*, Jae-Sik Shin*,
Hyo-Ryoung Kim*, Ju-Yeon Hwang*

요약

본 논문은 전파천문 관측데이터 분석을 위해 소프트웨어를 이용한 디지털필터 설계방법에 대해 제안한다. 전파천문 관측시스템은 컴퓨팅 시스템의 발전과 함께 하드웨어에서 소프트웨어를 이용한 분석방법으로 넘어가는 단계이다. 기존 하드웨어로는 특정규격에 맞도록 설계·제작되었기 때문에 규격을 변경하는 것이 어렵고 제작에 많은 비용이 소요되지만, 소프트웨어는 규격 변경이 유연하고 공개 소프트웨어를 이용할 경우 저렴하게 설계할 수 있는 장점이 있다. 그러나 소프트웨어로 전파천문과 같이 많은 자료를 분석하기 위해서는 컴퓨터 시스템의 성능이 우수해야 하는 점도 있다. 본 연구에서는 한국우주전파관측망에서 운영하고 있는 관측시스템 중에서 하드웨어로 구성된 디지털필터와 같은 성능을 갖는 소프트웨어 디지털 필터 설계에 대해 제안한다. 제안 방법은 표준 C언어를 이용하여 디지털 필터를 설계하였으며, 설계한 디지털필터에 대해 GNU Octave로 시뮬레이션을 수행하여 유효성을 검토하였다. 또한 설계한 디지털필터의 고속연산을 위해 병렬연산이 가능한 SSE 라이브러리를 도입하였다. KVN 관측모드 중에 광대역 관측데이터를 대상으로 제안한 방법의 디지털 필터를 통하여 협대역 관측모드로 데이터 필터링을 수행하였다. 그 결과, 대역 내의 필터링이 설계대로 수행되었고 리플이 발생하지 않아, 제안방법이 유효함을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a design method for a digital filter using software in order to analyze the radio astronomy observation data. Recently the analysis method for radio astronomy observing system is transferring from hardware to software by developing of state-of-the-art of computer system. The existing hardware system is not able to easily change the specification because it is implemented to meet special requirements and it takes a high cost and time. In case of software, however, it has an advantage to implement with small cost if open software is used, and flexibly changes to satisfy the desired specification. But, in order to analyze the massive data like radio astronomy with software, the good performance system is needed for computer. Therefore, this paper proposes a digital filter design method using software with the same performance as that of digital filter implemented with hardware in observation system which is operated by the KVN(Korean VLBI Network). To design a digital filter, the proposed method is performed with standard C language and the simulation is conducted with GNU(GNU's Not Unix) Octave and investigated to show its effectiveness. In addition, for the high speed operation of the designed digital filter, the SSE(Streaming SIMD Extensions) library is adopted for available parallel operation. By the proposed digital filter, the digital filtering is performed for the wide band observation data in the KVN observation mode, the filtering result of narrow band observation has no ripple inside of stop band, and confirmed the effectiveness of the proposed method.

Keywords : *Optimum coding method, fftw, SSE, Shared memory, OpenMP, Software correlator*

I. 서론

한국천문연구원에서는 2008년부터 시험관측과 2009년부터

터는 정규 과학관측을 수행하는 지름 21미터 전파망원경 3대로 구성된 한국우주전파관측망(Korean VLBI) Network)을 운영하고 있다[1]. 초장기선전파간섭계(VLBI)는 수백~수천 km 떨어진 여러 대의 전파망원경으로 관측한 천체의 신호

* 한국천문연구원

투고 일자 : 2015.9.15

수정완료일자 : 2015.11.1

게재확정일자 : 2015.11.8

1) Very Long Baseline Interferometry

에 대해 간섭효과를 이용하여 구경 합성하는 원리로 전파 천문에서는 기본적인 관측방법이다. 또한 퀘이사(Quasar)와 같은 준성(準星)을 관측하여 각 전파망원경의 정밀위치를 구하는 측지관측에도 VLBI는 널리 활용되고 있다[2][3]. VLBI 관측에 활용되는 멀리 떨어진 여러 대의 전파망원경은 모두 동일한 시스템 규격으로 구성된다. 전파망원경의 시스템은 안테나, 수신기, 아날로그 및 디지털 부분으로 나눌 수 있다. 특히 수신기와 아날로그 부분은 천체로부터 도달하는 아날로그 신호를 수신하여 헤테로다인 방식으로 주파수를 다운시켜주는 역할을 하며, 디지털 부분은 다운시킨 주파수 신호를 디지털신호로 변환하기 위해 초고속 샘플러를 통하여 신호변환, 광신호전송, 디지털필터링, 디지털 분광기, 고속데이터 기록계 등으로 구성된다. 이 모든 시스템이 특정 규격에 맞추도록 하드웨어로 설계 제작된 장치이다[4].

이렇게 구축한 특정 규격의 하드웨어는 시스템이 완성된 후 다른 기능을 추가하거나 변경하는 것이 매우 어렵다. 최근에는 FPGA 등을 이용하여 추가 기능을 프로그램 하여 설치할 수 있도록 되어 있지만 모든 원하는 기능을 추가하는 것은 매우 어렵고 비용도 많이 소요된다.

따라서 최근 컴퓨터 시스템의 비약적인 발전과 전파천문 관측데이터도 디지털 변환을 통하여 리눅스의 대용량 파일 시스템으로 변환하여 자료분석을 수행하고 있다. VLBI 관측은 여러 대의 전파망원경으로 동일한 천체를 동시에 관측하고, 그 데이터를 상관센터에서 수집한 후 상관처리를 수행하는데, 현재 2Gbps급 관측데이터인 경우 초당 512MByte를 처리하며, KVN의 경우 최대 1GByte VLBI 관측데이터를 상관처리할 수 있는 상관기를 한일상관센터에서 운영하고 있다[5]. 이와 같이 관측자의 요구를 만족시키고 처리속도를 높이기 위해 하드웨어뿐만 아니라 소프트웨어를 이용한 데이터처리 시스템을 구축하기 위해서는 대용량 서버와 병렬처리와 같은 고속연산을 함께 수행할 수 있는 시스템이 필요하다. 그래서 소프트웨어를 이용할 경우 비용과 구축시간을 줄이기 위해 고속연산방법을 적절히 선택할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 전파천문 관측데이터 분석을 위한 기초연구로서 소프트웨어를 이용하여 광대역 관측데이터를 협대역으로 필터링할 수 있는 디지털필터를 설계하고, 그 유효성을 확인하기 위해 시뮬레이션과 관측데이터를 이용하여 실험을 수행하며, 그 결과에 대해 고찰하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안한 디지털 필터에 대해 소개하고, III장에서는 디지털 필터 설계에 대해 기술하며, IV장에서는 실험을 통해 결과에 대해 고찰하며, 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 제안한 디지털 필터

본 연구에서 전파천문 관측자료 분석을 위한 기초연구로서 제안한 디지털 필터에 대해 간략히 기술한다. 디지털

필터의 가장 중요한 특성은 설계한 필터에서 리플(ripple)에 따른 깁스현상(Gibb's phenomenon)이 통과대역과 정지대역에서 발생하지 않도록 강건하게 구현되어야 한다[6][7]. 따라서 본 연구에서는 다양한 필터링 방법 중에서 창함수(Window function)를 이용한 디지털 필터 설계방법을 채택하였으며, 창함수 중에서 리플 발생이 비교적 강건한 카이저(Kaiser) 창함수를 선택하였다[7].

그림 1은 차단 각주파수 ω_c 에 대한 이상적인 저역통과 필터(Low Pass Filter, LPF)의 주파수 응답을 보여준다.

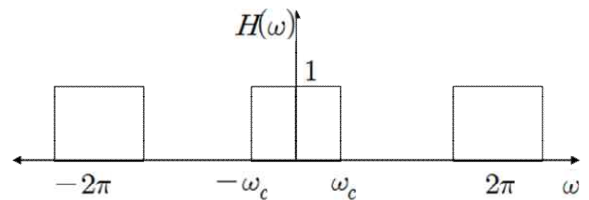


그림 1. 이상적인 LPF의 주파수 응답
Fig. 1. Frequency response of ideal LPF

차단주파수 f_c 에 대하여 $\omega_c = 2\pi f_c$ 일 경우에, 이상적인 LPF의 임펄스 응답은 식 (1)과 같다.

$$h_{LPF}[n] = 2f_c \frac{\sin(n\omega_c)}{(n\omega_c)} \quad (1)$$

LPF의 임펄스 응답은 구형 창(Rectangular window)에 대한 푸리에 변환(Fourier Transform)이 싱크함수(sinc function)가 되는 것과 유사하다[8]. 싱크함수는 그림 2와 같다.

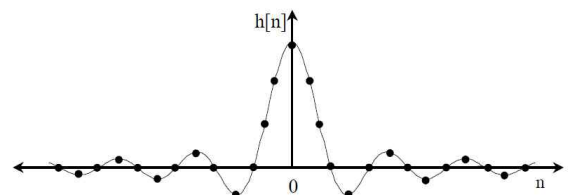


그림 2. 이상적인 LPF의 임펄스 응답
Fig. 2. Impulse response of ideal LPF

그리고 고역통과필터(High Pass Filter, HPF)와 대역통과 필터(Band Pass Filter, BPF)[9]는 식 (2)와 식 (3)에 나타내었다.

$$h_{HPF}[n] = 1 - 2f_c \frac{\sin(n\omega_c)}{(n\omega_c)} \quad (2)$$

$$h_{BPF}[n] = 2f_{c2} \frac{\sin(n\omega_{c2})}{(n\omega_{c2})} - 2f_{c1} \frac{\sin(n\omega_{c1})}{(n\omega_{c1})} \quad (3)$$

앞에서도 기술한 것과 같이 디지털 필터는 밴드의 중단에서 진폭특성에 따라 리플이 발생하는 깁스현상이 발생된다. 깁스현상을 방지하기 위해 창함수를 곱하여 진폭특성에 대한 리플을 줄이는 방안을 채택하고 있다. 따라서 본

연구에서도 여러 가지 실험을 통하여 전파천문관측 데이터에 대해 강건한 성능을 갖고 있는 카이저 창함수를 디지털 필터 설계에 적용하였다[7][8]. 카이저 창함수는 식 (4)와 같다.

$$w[n] = \frac{I_0\beta\sqrt{1-(K/n)^2}}{I_0(\beta)} \quad (4)$$

여기서, $I_0(\beta)$ 는 $1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(x/2)^n}{n!} \right]^2$ 이다.

III. 전파천문용 디지털 필터 설계

본 연구에서는 전파천문용 디지털 필터를 설계하기 위하여 유닉스 계열의 수치해석용 소프트웨어인 GNU Octave²⁾를 활용하였다. 먼저, 디지털 필터 계수에 따른 주파수 응답을 보기 위하여 수치해석을 하였다. 그림 3은 필터 계수 128일 때의 계수 값 분포와 주파수 응답을 나타낸 것이다.

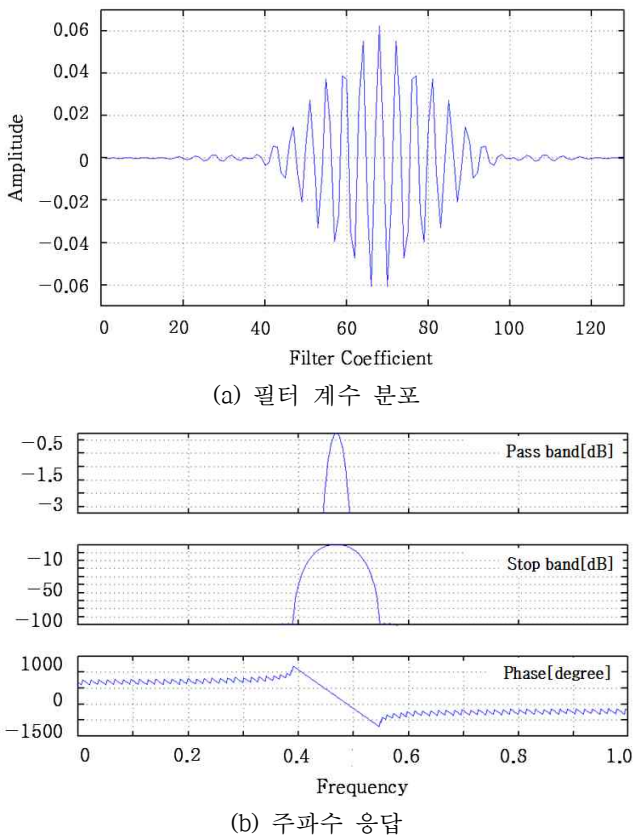


그림 3. 필터 계수 128인 경우의 계수 값 분포(a)와 주파수 응답 특성(b)
Fig. 3. Coefficient value distribution, case of 128(a), and frequency response(b)

그림 3의 (b)에서 필터 계수가 128인 경우의 주파수 응

답 특성을 보면, 통과 대역에서 -0.4 dB로 신호에 대한 왜곡이 발생될 수 있다. 신호의 왜곡은 2비트 양자화로 샘플링 된 VLBI 관측데이터와 같이 샘플링 비트가 적은 관측데이터의 신호처리에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 필터 계수를 늘려야 한다. 따라서 본 연구에서는 필터 계수를 무한정 늘릴 수 있으나 사용하는 시스템의 성능과 속도를 고려하여 512개의 필터 계수에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 필터 계수가 512일 때의 계수 값 분포와 주파수 응답 특성을 나타낸 것이다.

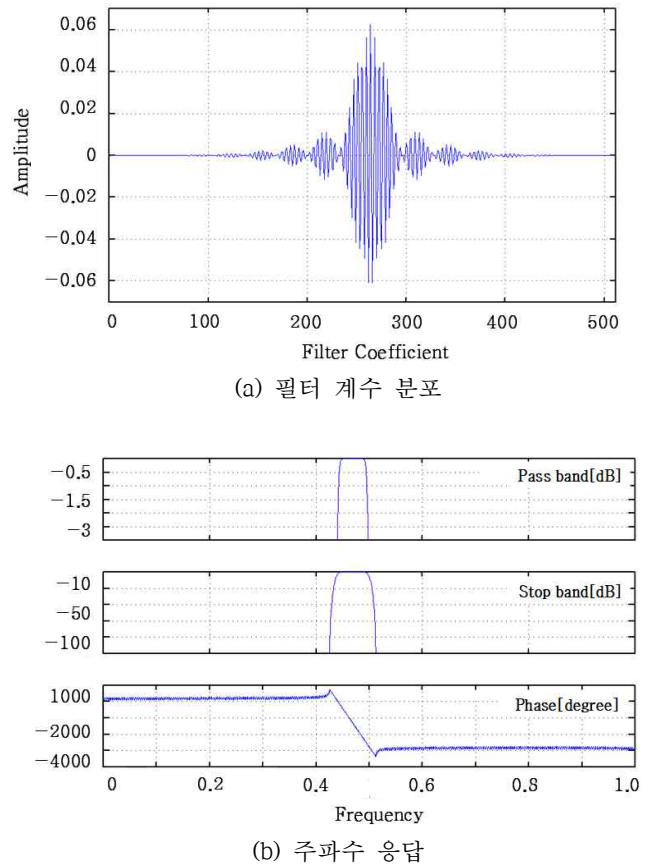


그림 4. 필터 계수 512인 경우의 계수 값 분포(a)와 주파수 응답 특성(b)
Fig. 4. Coefficient value distribution, case of 512(a), and frequency response(b)

그림 4의 (b)에서 필터 계수가 512인 경우의 주파수 응답 특성을 보면, 통과 대역에서 신호의 손실이 없음을 확인할 수 있고 위상 역시 안정적으로 변화함을 알 수 있다. 수치해석을 기반으로 본 연구에서 제안한 필터 계수가 512인 디지털 필터가 안정적임을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

본 논문에서는 디지털 필터를 구현할 서버의 계산속도를 증가시키기 위하여 인텔(Intel Co., Ltd)에서 제공하는 SSE³⁾(Streaming SIMD Extensions) 라이브러리를 사용하였다.

2) <http://www.octave.org>

3) https://en.wikipedia.org/wiki/Streaming_SIMD_Extensions

SSE(Streaming SIMD Extensions)는 x86 아키텍처에 대한 단일 명령 다중 데이터(Single Instruction Multiple Data, SIMD) 명령어 집합 확장으로 인텔이 1999년에 펜티엄(Pentium) 3 프로세서 시리즈에 도입하였다. x86(32비트) 아키텍처에는 128비트 XMM0 - XMM7까지 8개의 연산 레지스터가 있으며, x86-64에는 XMM8 - XMM15까지 8개의 연산 레지스터를 추가하였다. SSE2 라이브러리에서는 연산 레지스터를 128비트로 확장함으로써 다음과 같은 병렬 연산을 한 번의 연산 주기에 수행할 수 있다.

- 4개의 32비트 단정도 부동 소수점(single precision floating point) 연산
- 2개의 64비트 배정도 부동 소수점(double precision floating point) 연산
- 2개의 64비트 정수(integer) 연산
- 4개의 32비트 정수 연산
- 8개의 16비트 정수 연산
- 16개의 8비트 정수 연산

연산 명령어는 MOVSS, MOVAPS, ADDSS 등 70여가지의 기계어 코드를 제공한다. 그리고 C/C++ 코드에서는 컴파일러 내장 함수를 이용하여 간단한 형태로 작성할 수 있다. 내장 함수는 다음과 같다.

- `_mm_load_ps`: 16바이트로 정렬된 변수의 데이터를 XMM 레지스터에 쓴다.
- `_mm_store_ps`: XMM 레지스터의 값을 16바이트로 정렬된 변수의 메모리에 쓴다.
- `_aligned_malloc(size, alignment)`: 변수를 메모리에 생성할 때, alignment 설정 값 단위로 정렬한다. 예를 들어, alignment 값이 16이라면 16바이트로 메모리에 정렬한다.
- `_aligned_free(*memblock)`: 정렬된 변수 메모리를 해제한다.
- `_mm_add_ps`: 4개 실수형 변수의 덧셈 연산을 한다.
- `_mm_sub_ps`: 4개 실수형 변수의 뺄셈 연산을 한다.
- `_mm_mul_ps`: 4개 실수형 변수의 곱셈 연산을 한다.
- `_mm_div_ps`: 4개 실수형 변수의 나눗셈 연산을 한다.

IV. 실험 및 결과

본 연구에서 소프트웨어를 이용하여 설계한 디지털 필터의 유효성을 확인하기 위해 실제 광대역 VLBI 관측데이터를 대상으로 협대역 필터링 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 관측데이터의 형식은 KVN 관측시스템의 마지막 부분에서 관측데이터를 하드디스크에 저장하는 Mark5B[10] 시스템의 형식이며, 디스크 프레임(disk frame) 헤더의 정보는 그림 5와 같다.

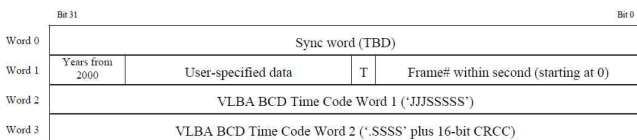


그림 5. Mark5B 디스크 프레임 헤더 정보
Fig. 5. Header information of Mark5B disk frame

Word 0 - 고정된 동기 워드(0xABADDEED)

Word 1

- Bits 31-28 : Integer years since 2000(to resolve year ambiguity of VLBA time tag)
- Bits 27-16 : User specified data
- Bits 15 : T - data is from interval-tvg
- Bits 14-0 : DF # within second(starts at zero on second tick)

Word 2-3 : VLBA BCD time code and 16bit CRCC

디지털 필터링의 고속연산을 위해 병렬 처리 연산을 도입하기 위해 SSE 라이브러리를 적용하였으며, 실험에 사용한 서버는 12개 코어 인텔 코어 i7 4960X 3.6GHz, 15MB L2 캐쉬 CPU를 장착하고 있다. 마더보드(Mother Board)는 ASRock X79 extreme 11, 16GB RAM, ARECA ARC-1882ix-12 RAID 컨트롤러, 스토리지는 시게이트 NAS 3TB 하드디스크를 장착하고 있는 STARDOM ST8-S2P 24TB로 구성되어 있다.



그림 6. 실험에 사용한 서버
Fig. 6. Implementation server

표 1. KVN의 관측모드[4]
Table 1. Observation mode of KVN

Mode	#IF	BandWidth [MHz]	Output Streams	#Bits	Output Data Rate [Mbps]	Output Clock Speed [MHz]
1	1	256	1	2	1024	32
2	1,2	128	2	2	1024	32
3	1,2,3,4	64	4	2	1024	32
4	1,2,3,4	32	8	2	1024	32
5	1,2,3,4	16	16	2	1024	32

디지털 필터링 실험에 사용한 관측데이터는 관측명 r13343a이며 2013년에 관측한 것이며, 관측에는 한국천문연구원원의 KVN과 일본국립천문대의 VERA 관측망이 참여하였다[1]. 관측한 데이터는 광대역(Wide band) 모드이며 초고속 샘플러를 통하여 1.024 Gsps의 속도로 샘플당 2비트로 샘플링되었으며, 2.048 Gbps, 256 MHz 대역폭을 갖고 있다 [1]. 그림 7은 대전상관기로 상관처리한 실험데이터의 광대역 자기상관 스펙트럼(auto power spectrum)이다.

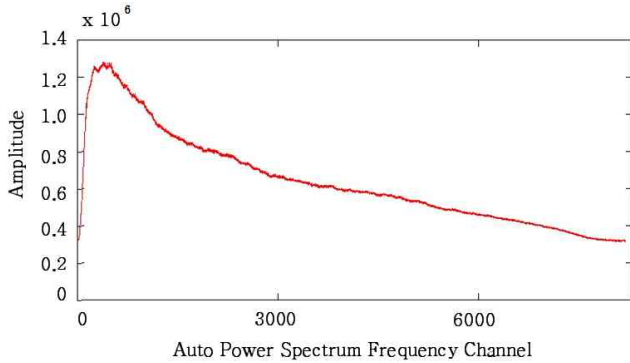


그림 7. r13343a 관측데이터의 광대역 자기상관 스펙트럼
Fig. 7. Wide band auto power spectrum of r13343a

디지털 필터를 실험하기 위해 표 1에 나타낸 KVN 관측 모드와 같이 1개의 스트림을 갖는 256 MHz 대역폭의 C1 모드, 2개의 스트림을 갖는 128MHz 대역폭의 C2 모드, 4개의 스트림을 갖는 64MHz 대역폭의 C3 모드, 8개의 스트림을 갖는 32 MHz 대역폭의 C4 모드, 그리고 16개의 스트림을 갖는 16MHz 대역폭의 C5 모드에 대해 각각 설계한 소프트웨어 디지털 필터를 이용하여 실험을 수행하였다. 그림 8에서 그림 12는 각 관측모드에 대한 디지털 필터링 결과를 그림으로 각각 나타내었으며, 참고문헌 [4]의 실험결과에서 KVN의 하드웨어 디지털필터와의 성능을 비교할 수 있다. 그림 13은 디지털 필터링에 사용된 관측데이터에 대해 필터링된 결과를 모든 관측모드에 대해 중첩해서 그림으로 나타낸 것이다. 실제 관측데이터를 대상으로 디지털 필터링 실험을 수행하였으나, 각 그림에서 나타낸 것과 같이 본 연구에서 설계한 카이저 창함수를 이용한 필터의 정지대역의 리플이 발생하지 않고 정확하게 필터링이 되는 것을 확인할 수 있다. 또한 다양한 관측모드에 대해서도 관측데이터의 필터의 통과대역과 정지대역에서 손실없이 필터링이 된 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 소프트웨어를 이용한 디지털 필터 설계방법이 VLBI와 같은 전파천문 관측데이터를 사후에 분석을 위해 사용하는 데 유효함을 확인할 수 있다. 또한 이렇게 소프트웨어 디지털 필터링 방법으로 필터링한 각 데이터는 광대역으로 관측한 데이터를 사후에 필터링하여 다른 기록 미디어로 다시 저장할 수 있고, 분석을 수행할 수 있다는 점에서 본 연구에서 설계한 디지털 필터가 매우 유효할 것으로 판단된다. 그리고 전파천문에서 활용하는 디지털 필터와 같이 특정 하드웨어로 구성할 경우 많은 비용이 소요되지만, 고속성능의 서버와 소프트웨어로 디지털 필터를 구현할 경우

적은 비용이 소요되는 장점이 있다.

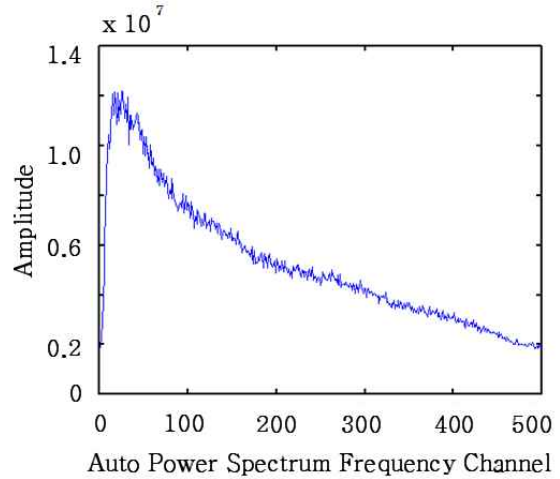


그림 8. C1모드 1스트림 데이터의 자기상관스펙트럼
Fig. 8. Auto power spectrum of C1 mode

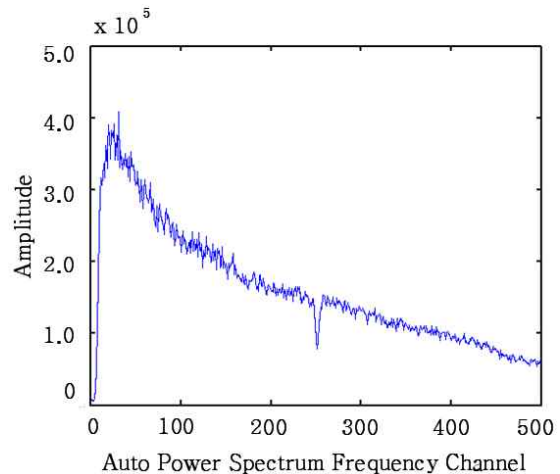


그림 9. C2모드 2스트림 데이터의 자기상관스펙트럼
Fig. 9. Auto power spectrum of C2 mode

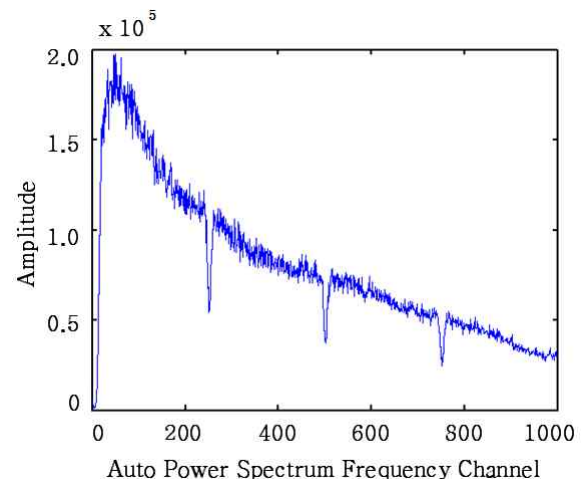


그림 10. C3모드 4 스트림 데이터의 자기상관스펙트럼
Fig. 10. Auto power spectrum of C3 mode

V. 결론

본 논문에서는 전파천문 관측데이터 분석을 위한 기초연구로서 소프트웨어를 이용한 디지털필터 설계방법에 대해 제안하였다. 기존 하드웨어 디지털 필터는 특정규격에 맞도록 설계되었기 때문에 규격을 변경하는 것이 어렵고 제작에 많은 비용이 소요되었지만, 본 연구에서 제안한 소프트웨어 디지털 필터는 설계 규격을 쉽게 변경할 수 있어 비용과 시간을 단축할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 표준 C언어를 이용하여 디지털 필터를 설계하였으며, 설계한 디지털필터에 대해 GNU Octave로 시뮬레이션을 수행하여 유효성을 검토하였다. 또한 설계한 디지털 필터의 고속연산을 위해 병렬연산이 가능한 SSE 라이브러리도 도입하여 데이터 처리 시간을 줄이도록 구성하였다. 다양한 대역을 갖는 KVN 관측모드에 대해 광대역 관측데이터를 대상으로 제안한 방법의 디지털 필터를 적용하여 C1~C5의 협대역 관측모드로 데이터 필터링을 수행하였으며, 필터링 결과 대역 내의 필터링 결과와 리플이 발생하지 않아, 제안방법이 유효함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 노덕규, 오세진, 염제환 외 15명, “2008년도 한일공동VLBI상관기 및 수신기 개발 결과보고서,” 한국천문연구원, pp. 3-100, 2008.
- [2] Takahashi F., Kondo T., and Koyama Y., *Very Long Baseline Interferometer*, Ohmsha, pp. 35-55. 2000.
- [3] Thompson, A. R., Moran, J. M., and Swenson, G. W.Jr., *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, 2nd Ed., (New York:John Wiley & Sons), pp. 289, 2001.
- [4] Se-Jin Oh, Duk-Gyoo Roh, Kiyooki Wajima et. al., “Design and Development of a High-Speed Data Acquisition System for the Korean VLBI Network,” Publication of Astronomical Society of Japan, Vol. 63, pp. 1229-1242, 2011 December 25.
- [5] 오세진, 염제환, 노덕규 외 9명, “한일상관기의 잔차지연보정 알고리즘의 개선,” 신호처리시스템학회 논문지 제14권, 제2호, pp. 136-146, 2013.
- [6] Alan V. Oppenheim and Ronald W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall, Chapter 9, 1989.
- [7] 황운택, “Kaiser 창함수를 이용한 비회귀 디지털 필터 설계,” 한국통신학회 전문대학 논문지, Vol. 5, No. 1, pp. 506-514, 1995.
- [8] Sophocles J. Orfanidis, *Introduction to Signal Processing*, Prentice Hall, Chapter 10, 1996.
- [9] University of Newcastle Upon Tyne, *Digital Signal Processing EEE305 & EEE801 Part A*, Chapter 4, 2002.
- [10] 오세진, 노덕규, 김광동 외 5명, “관측 데이터의 고속 기록을 위한 대용량 저장시스템,” 천문학논총, 제19권, pp. 83-92, 2004.

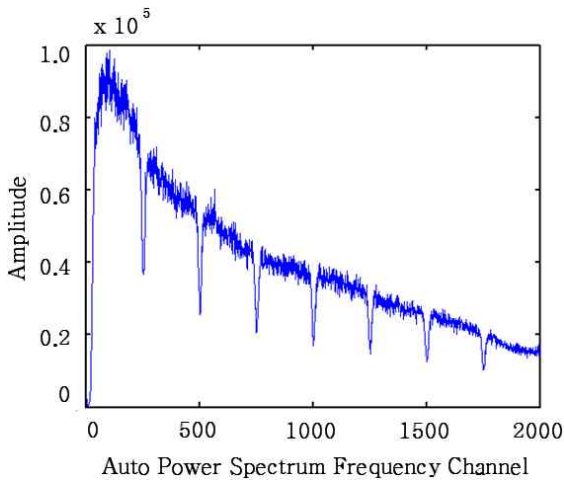


그림 11. C4모드 8 스트림 데이터의 자기상관스펙트럼
Fig. 11. Auto power spectrum of C4 mode

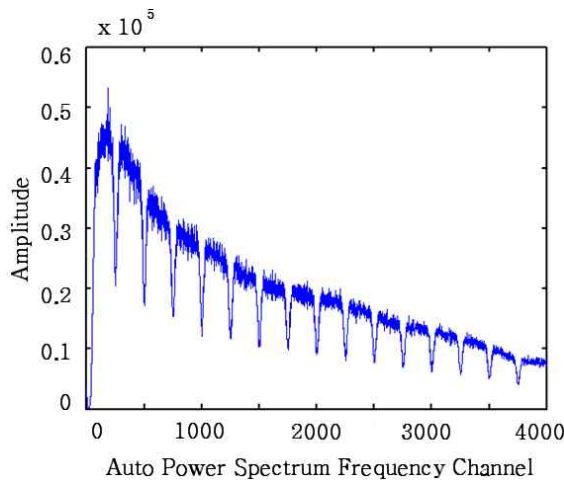


그림 12. C5모드 16스트림 데이터의 자기상관스펙트럼
Fig. 12. Auto power spectrum of C5 mode

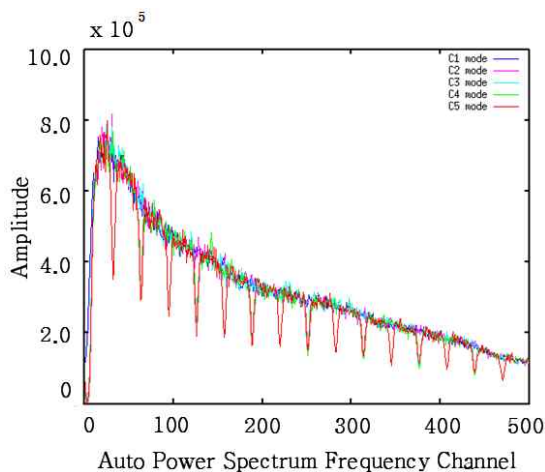


그림 13. C1, C2, C3, C4, C5 모드 자기상관스펙트럼
Fig. 13. Auto power spectrum of C1, C2, C3, C4, C5 mode



염 재 환(Jae-Hwan Yeom)

正會員
2005년 8월 한양대 정밀기계공(석사)
2005년~현재 한국천문연구원 선임연구원

※주관심분야 : 디지털신호처리, VLBI상관기 개발



오 세 진(Se-Jin Oh)

正會員
1996년 2월 영남대 전자공학과(학사)
1998년 2월 영남대 전자공학과(석사)
2002년 2월 영남대 전자공학과(박사)
2001년 9월~2002년 12월 대구과학대학 교수
2010년 6월~2011년 5월 한국천문연구원 그룹장

2002년 12월 ~ 2014년 12월 한국천문연구원 선임연구원
2015년 1월 ~ 현재 한국천문연구원 책임연구원
※주관심분야 : 디지털신호처리, VLBI상관기 개발, 천문관측기기개발



노 덕 규(Duk-Gyoo Roh)

正會員
1985년 2월 서울대 천문학과(이학사)
1994년 8월 동경대 천문학과(이학석사)
1997년 8월 동경대 천문학과(박사수료)
1985년 4월~ 현재 한국천문연구원 책임연구원
2005년 11월~2009년 3월 한국천문연구원 그룹장

※주관심분야 : 전파천문, VLBI상관기 개발



오 충 식(ChungSik Oh)

2002년 2월 서울대 천문학과(이학사)
2006년 3월 동경대 천문학과(이학석사)
2009년 3월 동경대 천문학과(이학박사)
2009년 4월~2010년 11월 한국천문연구원 박사후 연수원

2010년 12월 - 현재 한국천문연구원 선임연구원
※주관심분야 : 전파천문, Astrometry, VLBI상관처리



정 동 규(Dong-Kyu Jung)

2004년 8월 충남대 천문학과(이학사)
2006년 8월 충남대 천문학과(석사수료)
2012년 1월 ~ 현재 한국천문연구원 연구원
※주관심분야 : VLBI상관처리, 천문관측기기 개발



신 재 식(Jae-Sik Shin)

正會員
1989년 2월 한남대 회계학과(학사)
2014년 2월 한남대 멀티미디어과(석사수료)
1991년 ~ 2003년 소프트웨어 개발
2004년 ~ 2013년 한국천문연구원 전산팀장
2014년 ~ 현재 한국천문연구원 책임기술원

※주관심분야 : VLBI 관측 프로그래밍, VLBI-WEB 인터페이스 개발



김 효 령(Hyo-Ryoung Kim)

1990년 2월 서울대 천문학과(이학사)
1996년 2월 부산대 지구과학과(이학석사)
2003년 8월 부산대 지구과학과(이학박사)
2006년 6월~2008년 12월 한국천문연구원 전파부 부장

1990년 6월 ~ 현재 한국천문연구원 선임연구원
※주관심분야 : 전파천문 SW 개발, VLBI상관처리



황 주 연(Ju-Yeon Hwang)

2006년 2월 전남대 자원공학과(공학사)
2014년 ~ 현재 한국천문연구원 연구원
※주관심분야 : VLBI상관처리, 천문관측기기 개발