

GPU를 이용한 소프트웨어 디지털 필터의 성능개선에 관한 연구

염재환¹, 오세진^{1*}, 노덕규¹, 정동규¹, 황주연^{1,2}, 오충식¹, 김효령¹

¹한국천문연구원 전파천문본부, ²SET 시스템

A Study on the Performance Improvement of Software Digital Filter using GPU

Jae-Hwan Yeom¹, Se-Jin Oh^{1*}, Duk-Gyoo Roh¹, Dong-Kyu Jung¹, Ju-Yeon Hwang^{1,2},
Chungsik Oh¹, Hyo-Ryoung Kim¹

¹Radio Astronomy Division, Korea Astronomy and Space Science Institute

²SET System

요 약 본 논문은 GPU를 이용한 소프트웨어(SW) 디지털 필터의 성능개선에 대해 기술한다. 기존에 개발한 SW 디지털 필터는 CPU 기반에서 동작하여 속도가 느린 문제점이 있었는데, EAVN 관측데이터의 디지털 필터링을 위해 GPU를 도입하여 연산속도를 개선하였고, 필터링을 통하여 다른 관측국과의 데이터 처리가 가능하도록 하였다. SW 디지털 필터의 연산속도를 개선하기 위해 Tensor Core가 내장된 NVIDIA Titan V GPU 보드를 사용하였으며, 2Gbps (512 MHz BW, 1-IF)의 95초 관측데이터를 필터링하는데 관측시간의 약 1.1배, 1Gbps (16MHz BW, 16-IF)로 필터링하는데 약 0.78배 처리속도를 각각 달성하였다. 또한 KVN으로 1, 2Gbps 동시관측한 데이터에 대해 2Gbps 데이터를 디지털 필터링하여 기존 1Gbps와 비교한 결과, 교차전력스펙트럼, 위상, SNR 등이 유사한 값을 얻어 본 연구에서 개발한 SW 디지털 필터를 활용한 데이터 처리와 분석을 수행하는데 유효함을 확인하였다. 향후에는 여러 개의 GPU 보드를 사용하기 위한 소스 코드의 분산처리 최적화를 수행할 경우 실시간으로 관측데이터를 필터링할 수 있을 것으로 기대된다.

• 주제어 : 동아시아VLBI관측망, 소프트웨어 디지털필터, GPU 분산처리, 텐서코어

Abstract This paper describes the performance improvement of Software (SW) digital filter using GPU (Graphical Processing Unit). The previous developed SW digital filter has a problem that it operates on a CPU (Central Processing Unit) basis and has a slow speed. The GPU was introduced to filter the data of the EAVN (East Asian VLBI Network) observation to improve the operation speed and to process data with other stations through filtering, respectively. In order to enhance the computational speed of the SW digital filter, NVIDIA Titan V GPU board with built-in Tensor Core is used. The processing speed of about 0.78 (1Gbps, 16MHz BW, 16-IF) and 1.1 (2Gbps, 32MHz BW, 16-IF) times for the observing time was achieved by filtering the 95 second observation data of 2 Gbps (512 MHz BW, 1-IF), respectively. In addition, 2Gbps data is digitally filtered for the 1 and 2Gbps simultaneously observed with KVN (Korean VLBI Network), and compared with the 1Gbps, we obtained similar values such as cross power spectrum, phase, and SNR (Signal to Noise Ratio). As a result, the effectiveness of developed SW digital filter using GPU in this research was confirmed for utilizing the data processing and analysis. In the future, it is expected that the observation data will be able to be filtered in real time when the distributed processing optimization of source code for using multiple GPU boards.

• Key Words : East Asian VLBI Network(EAVN), Software Digital Filter, GPU distributed processing, Tensor Core

Received 15 December 2018, Revised 21 December 2018, Accepted 24 December 2018

* Corresponding Author Se-Jin Oh, Radio Astronomy Division, Korea Astronomy and Space Science Institute, 776 Daedeokdae-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea. E-mail: sjoh@kasi.re.kr

I. 서론

한국천문연구원에서는 KVN(Korean VLBI(Very Long Baseline Interferometry) Network)과 일본국립천문대의 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry) 관측망을 연결한 KaVA(KVN and VERA Array), 그리고 이를 확장한 동아시아VLBI관측망(East Asian VLBI Network, EAVN)의 VLBI 관측데이터를 상관처리하는 한일상관센터(Korea-Japan VLBI Correlation Center, KJCC)를 운영하고 있다[1][2]. KaVA 관측망을 이용한 VLBI 관측은 정형화되어 시스템의 데이터 규격이 정해져 있으며, 데이터 처리에 문제가 없이 잘 수행되고 있다. 그러나 EAVN 관측망의 경우 관측에 참여하고 있는 전파망원경의 규격이 각각 다르고, 데이터 규격도 다르기 때문에 KJCC에서 데이터처리를 위해서는 후처리 작업을 진행해야 한다. 특히 EAVN 관측망의 VLBI 관측은 512 MHz 광대역을 1024 Msps, 2bit 샘플링을 수행하며, 이 데이터를 하드웨어 디지털필터링을 통하여 현재 1024 Mbps(최대 256 MHz 대역폭)의 속도로 관측하고 있는데, 일본의 대학연합관측망(Japanese VLBI Network, JVN)은 하드웨어 디지털 필터가 설치되어 있지 않고 광대역 관측이 가능하도록 구성되어 있다. 따라서 공통의 데이터 규격을 구성하기 위해 일본국립천문대의 미즈사와 상관센터에서 하드웨어 디지털필터링을 수행하고 있는데, 많은 시간이 소요되고 있어 데이터 처리를 통한 분석이 늦어지는 문제가 있었다. 따라서 KJCC에서 데이터 상관처리를 수행하고 있으므로, 광네트워크를 통하여 전송받은 데이터를 필터링하기 위해 소프트웨어(SW)로 수행할 수 있는 SW 디지털필터를 개발하였다[3]. 그러나 기존에 개발한 SW 디지털 필터는 CPU 기반으로 VLBI 관측데이터를 필터링하기에는 많은 시간이 소요되어 대용량 관측데이터를 직접 필터링하는데 문제가 있었다. 따라서 본 연구에서는 광대역 VLBI 관측데이터를 관측시간의 실시간으로 원하는 관측대역폭으로 필터링할 수 있는 SW 디지털필터로서 GPU(Graphical Processing Unit) 보드를 이용하여 필터링 성능을 개선하였다. 본 논문은 GPU 보드의 분산처리 기능을 활용하여 성능 개선한 SW 디지털 필터와 시험결과에 대해 기술한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 제안하는 GPU를 이용한 디지털필터 설계에 대해 알아보고, III장에서는 GPU 보드의 선택에 대해 살펴보

고, IV장에서 시험 및 결과에 대해 고찰한 후, 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 디지털 필터 설계

2.1 콘볼루션

참고문헌 [3]에서 제시한 디지털 필터의 기본적인 원리를 바탕으로 본 논문에서는 연산량을 줄이기 위한 방법을 중심으로 기술한다. 디지털 필터를 시스템적으로 설계할 때 연산량을 고려해야 하는데, 식 (1)에 나타난 콘볼루션(Convolution) 연산을 고려할 수 있다.

$$y(n) = \sum_{k=0}^M h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^M x(k)h(n-k) \quad (1)$$

식 (1)에서 h 는 필터 계수이고, x 는 입력 데이터를 의미한다. 식 (1)에 나타난 것과 같이 범위 $k=0$ 에서 M 구간에서 콘볼루션은 덧셈과 곱셈 연산의 조합으로 구성된 것을 알 수 있다. 따라서 디지털 필터를 설계할 때 중요한 점은 연산의 정확성도 있지만, 연산량을 줄여서 VLBI 관측으로 얻어진 대용량 데이터를 실시간 이내로 처리하는 것이다.

2.2 GPU를 이용한 연산속도

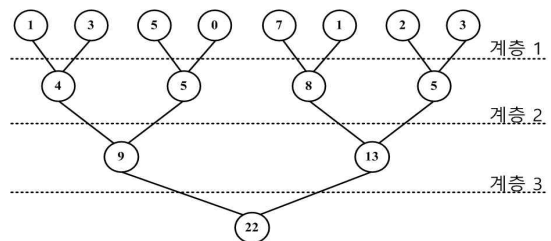


Fig. 1 Example of add and multiply operation with layer

본 연구에서는 SW로 개발한 디지털 필터의 성능개선을 위해 GPU 보드를 이용하였다. GPU를 이용한 관측데이터의 디지털 필터링에서는 2.1절에서 소개한 연산량을 줄이는 것이 필요하다. 따라서 GPU를 이용하여 필터를 설계할 때 GPU는 분산처리를 지원하므로 그림 1과 같은 트리(tree) 구조로 나타낼 수 있다[4]. 그림 1의 예와 같이 식 (1)의 M 이 7이면, 트리 구조에서 입력 샘플은 8개가 된다. 각 입력샘플마다 필터계수를 곱하므로 8번의 곱셈연산이 필요하고, 4, 5, 8, 5, 9, 13, 22와 같이 일곱 번의 덧셈연산이 필요하다. 그리고 3개의 계층연산이 필요하다. 그리고 GPU 연산의 최소단위

는 스레드(Thread)인데, 각 계층연산마다 연산의 정확성을 위해 스레드 사이의 동기를 맞추어야 하고 지정된 메모리 주소이외에는 접근할 수 없는 점을 보완할 필요가 있다.

앞에서 설명한 것과 같이 계층이 증가하면, 연산량이 많아져서 시간이 많이 필요하다. 본 연구에서는 디지털 필터링의 연산속도를 개선하기 위해 적절한 GPU 보드를 선택하는 것이 중요하기 때문에 G80 GPU를 사용한 실험결과를 참고하였다[4]. 이 보드는 86.4GB/sec의 메모리 대역폭과 345.6 GFLOPS를 지원한다. 실험조건은 4M개(2^{22})의 입력 샘플에 대해 덧셈 연산만을 수행한다. 덧셈 연산만을 수행하기 때문에 1초에 15.7 GFLOPS가 필요하다. 참고문헌 [4]의 비교에서 요구하는 연산량에 비해 시간이 많이 필요한 것을 알 수 있다. 또한 4M개의 입력 샘플에 대해 22개의 계층연산이 필요하다. 그리고 샘플 데이터의 입력과 출력에도 영향이 있지만, 계층연산의 수에 따라 시간이 많이 필요한 것도 알 수 있다.

III. GPU 보드

3.1 GPU 보드 선택

Table 1. Requirement of EAVN Data for SW Digital Filter

Item	Contents
Data type	2Gbps(512MHz BW, 1-IF) to 1Gbps(16MHz BW, 16-IF)
Precision	FP32
Filter Coefficient	511 coefficient
Operation rate	over 1 TFLOPS, 9 Layer

표 1은 EAVN 관측데이터에 대한 디지털 필터링 요구조건을 나타낸 것이다. EAVN 관측국 중에 JVN의 야마구치, 다카하기, 히다치 전파망원경에는 디지털 백엔드인 하드웨어 디지털 필터가 설치되어 있지 않다. 따라서 관측데이터는 광대역(2Gbps) 모드로 관측된 후 미즈사와 상관센서로 관측데이터는 전송된다. 이 관측데이터는 KVN, VERA 등과 상관처리가 되기 위해서는 1Gbps급으로 설정된 대역폭(256MHz)으로 필터링이 되어야 한다. GPU에서도 16비트 플로팅 포인트(FP16)를 지원하고 있지만, 이를 사용하면 필터계수의 정밀도에 손실이 발생된다. 즉, 이는 $2^{-14} \sim 2^{-15}$ (0.00006103~32,768)

범위의 정밀도를 나타낸다. 또한 FP16은 `sexp.mantissa`으로 표현할 수 있으며, 데이터 정밀도의 손실로 인해 이를 연산에 선택하는 것은 문제가 된다. 따라서 32비트 플로팅 포인트(FP32)를 선택하고 GPU 보드는 이를 지원하는 것을 선택할 필요가 있다. 본 연구에서 개발한 디지털 필터는 표 1에 나타낸 것과 같이 511개의 필터계수를 사용하였는데 이를 위해서는 약 1 TFLOPS의 연산이 필요하다. 또한 9개의 계층연산도 필요하다. 따라서 본 연구는 표 1에 나타낸 EAVN 관측데이터 디지털 필터링 요구조건을 만족하고 연산속도 개선을 위해 FP32에서 최소 10 TFLOPS이상을 지원하고 100GB/sec이상의 메모리 대역폭을 지원하는 GPU 보드를 선택할 필요가 있다. 표 1의 EAVN 데이터를 필터링하기 위해 여러 가지 규격의 GPU 보드를 고려하였는데, 본 연구에서는 Tensor Core[4]의 성능을 이용하기 위해 표 2에 나타낸 2가지 보드 중에서 NVIDIA Titan V GPU 보드[6]를 선택하였다(그림 2).

그리고 데이터는 서버로부터 읽을 때 비트 정렬이 되어야 하는데, GPU 보드로 필터링된 후에도 필요하다. 그리고 필터링된 결과는 스토리지에 저장되기 전에 Mark5B[7] 또는 VDIF 형식[8]으로 변환되고 재양자화과정을 거친다. 따라서 전체 시스템 연산속도를 개선하기 위해서는 데이터의 입출력 형식도 필터링 과정에서 반드시 고려하여야 한다.

Table 2. Comparison of NVIDIA Titan V and Titan Xp GPU board for considering the optimized SW DFB

	Titan V	Titan Xp
CUDA cores	5120	3840
Tensor cores	640	N/A
Core Clock	1200MHz	1485MHz
Boost Clock	1455MHz	1582MHz
Memory Clock	1.7Gbps HBM2	11.4Gbps GDDR5X
Memory Bus Width	3072-bit	384-bit
Memory Bandwidth	653GB/sec	547GB/sec
Single Precision	13.8 TFLOPS	12.1 TFLOPS
Double Precision	6.9 TFLOPS (1/2rate)	0.38 TFLOPS (1/32rate)
Half Precision	27.6 TFLOPS (2x rate)	0.19 TFLOPS (1/64rate)
Integer(INT8)	55.2 TOPS (4x rate)	48.4 TOPS (4x rate)
Tensor Performance GPU	110 TFLOPS GV100(815mm ²)	N/A GP102(471mm ²)



Fig. 2 Selected NVIDIA Titan V GPU board[6]

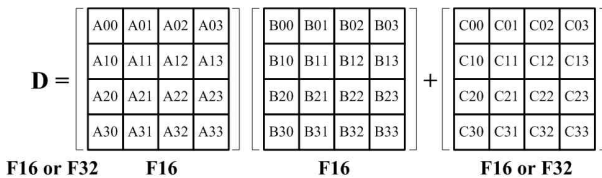


Fig. 3 Example of matrix operation using Tensor Core of FP16 or FP32

본 연구에서 선택한 NVIDIA Titan V GPU 보드에 내장된 Tensor Core에 대해 기술하면, 그림 3에 나타난 것과 같이 4 × 4 매트릭스의 곱셈 및 덧셈을 동시에 연산할 수 있는 하드웨어 블록이라고 할 수 있다[5]. FP16과 FP32 연산을 각각하거나 혼합해서 할 수 있다. NVIDIA Titan V GPU 보드는 표 2에 나타난 것과 같이 하드웨어적으로 640개의 Tensor Core를 가지고 있으며, FP16 단일연산에 대해 110 TFLOPS를 지원한다.

IV. 시험 및 결과

본 논문에서는 기존에 CPU 기반으로 개발한 SW 디지털 필터의 성능을 개선하기 위해 GPU 기반의 분산 처리 환경에서 구현한 SW 디지털 필터의 성능을 확인하기 위해 VLBI 전파천문 관측데이터를 대상으로 시험을 수행하였으며, 그 데이터의 상관처리를 통하여 성능검증에 대해 기술한다.

4.1 시스템 구축 및 시험 데이터

Table 3. System specification for SW DFB

Supermicro 4029GP TRT	
CPU	Intel XEON Gold 6154 2ea
Memory	384Gbytes DDR4
Disk	SAS RAID board 2ea
Array	64TB HDDs
Ethernet	10GbE SFP+



Fig. 4 Implemented SW Digital Filter System using NVIDIA Titan V GPU, Intel XEON CPU, and SAS RAID

그림 4는 본 연구에서 선택한 NVIDIA Titan V GPU 보드를 이용하여 구현한 SW 디지털 필터 시스템이다. 표 3은 구축한 디지털 필터 시스템의 규격을 나타낸 것이다. 디지털 필터 시스템은 Intel XEON Gold 6154 CPU 2개와 384GB의 메모리, SAS raid board를 이용하여 총 64TB의 디스크 용량으로 구성된다.

본 연구에서 다루는 데이터는 VLBI 전파천문 관측 데이터인데, 일본에 위치한 JVN 관측망 중에 EAVN 관측에 참여하는 관측국은 약 4개 정도이다. 이들 관측국은 광대역 관측시스템을 구비하고 있는데 1Gbps, 2bit로 샘플링을 수행하고 512 MHz 관측 대역폭을 직접 샘플링하기 때문에 출력 데이터 속도는 2Gbps 광대역이다. 향후 EAVN에서도 2Gbps 이상의 광대역 관측 모드를 고려하고 있지만[2], 각 관측국의 시스템을 고려하여 현재는 1Gbps 관측을 수행하고 있다. 그러나 일본 JVN 관측국 중에 몇 개 관측국은 협대역 디지털 필터를 갖는 관측시스템이 아닌 광대역 시스템이 도입되어 운영되고 있어서 공통의 관측과 데이터처리를 위해서는 관측 후 필터링을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 구축한 디지털 필터 시스템의 성능확인과 비교를 위해 KVN에서 1, 2Gbps 동시에 관측한 데이터를 준비하였다. 특히 2Gbps 관측데이터에 대해 GPU를 이용한 SW 디지털 필터를 통하여 1Gbps로 필터링을 수행하고 상관처리를 수행한 후 결과를 비교하는 시험을 수행하였다.

4.2 디지털 필터링 시험

본 연구에서는 GPU보드로서 Tensor Core의 성능 활용하기 위해 NVIDIA Titan V 보드를 선택하였으며, 앞 절에서 소개한 KVN 2Gbps 데이터에 대해 디지털 필터링을 수행하였다. KVN 관측데이터는 2Gbps, 95초이다. 그림 5는 디지털 필터링 경과를 보여주는 것이다. 1개의 NVIDIA Titan V GPU 보드를 사용한 서버에

서 디지털 필터링을 수행하는데 약 106초의 시간이 걸렸다. 이는 원래 95초 길이의 2Gbps 관측데이터에 대해서 1.1배의 시간이 소요된 것을 의미한다. 이 관측데이터의 실제 필터링한 결과를 그림 6에 나타내었다. 디지털 필터링이 완료된 관측데이터는 헤더 없는 KVN Mark5B 형식으로 재양자화와 재정렬 과정을 거친 후 스토리지에 저장하였다. 이러한 모든 과정을 포함하여 1.1배의 시간이 걸렸으며, GPU 보드 2개를 이용하여 분산처리를 수행한다면 실시간이상으로 디지털 필터링을 수행하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

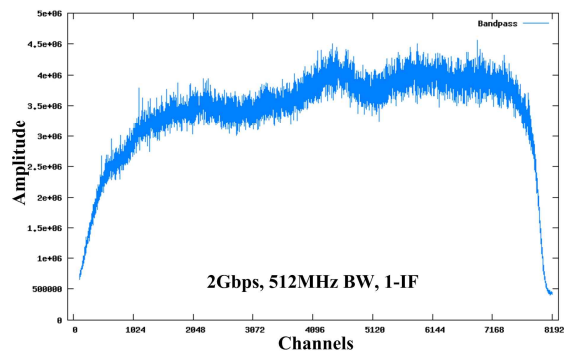
```

[oper@localhost eavnconverge_v2.315] ll /data/k17kh03b/
total 71433712
-rw-r--r-- 1 oper oper 24463638528 Nov 1 11:01 k17kh03b_KVNTN_290024325_W5
-rw-r--r-- 1 oper oper 24371544864 Nov 1 13:50 k17kh03b_KVNUS_290024325_W5
-rw-r--r-- 1 oper oper 24312938496 Nov 2 20:37 k17kh03b_KVNYS_290024325_W5
[oper@localhost eavnconverge_v2.315]
----- Semaphore Arrays -----
key      semid  owner  perms  nsens

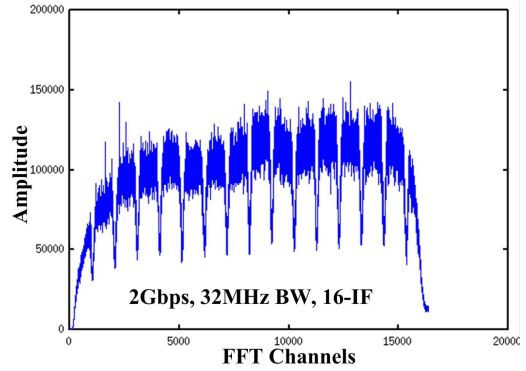
[oper@localhost bin]$ ./kavafil_gpu 0 16 1 16 95.0 /data0/k17kh03b/k17kh03b_KVNYS_290024318.vdif
GPU Device 0: "TITAN V" with compute capability 7.0
SAMPLEFILEBYTELEN(4202464), TOTALSAMPLELEN(16744448)
Measured time for parallel execution = 106.718s
Test passed
[oper@localhost bin]$
    
```

Fig. 5 Screen capture of SW digital filter processing of KVN 2Gbps data

본 연구에서 개발한 SW 디지털 필터의 연산성능을 확인하기 위해 시험한 데이터에 대해 필터링 결과를 나타내었다. 그림 6은 2Gbps, 512 MHz BW, 1-IF 데이터에 대해 SW 디지털 필터링 전과 후의 결과를 Octave[9]로 그린 것이다. 그림 6의 (a)는 512 MHz 대역폭을 갖는 2Gbps 관측데이터이며 디지털 필터링을 수행할 데이터의 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 6(b)는 그림 6(a)의 데이터에 대해 디지털 필터링한 것으로 16개 IF로서 각 IF 대역폭은 32 MHz를 갖는다.



(a) Original wideband observed data(512MHz BW, 1-IF)



(b) SW digital filtered data(32MHz BW, 16-IF)

Fig. 6 SW digital filtering result for 2Gbps data

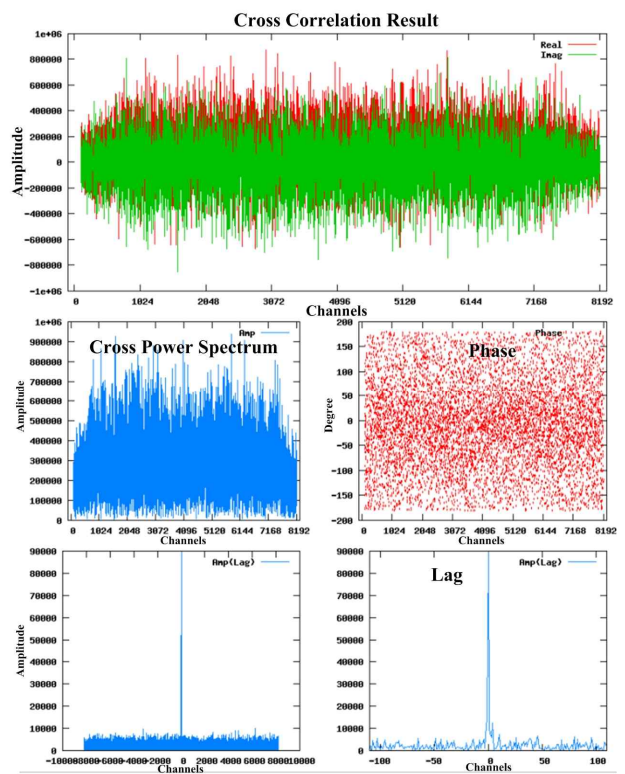


Fig. 7 Cross correlation result for digital filtered data for KVN Tamna and Ulsan baseline (r17289c, Table 4)

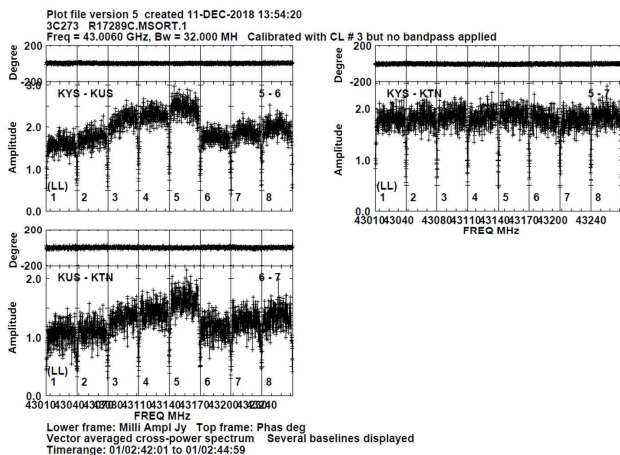
그림 7은 GPU 보드를 이용하여 2Gbps (512MHz BW, 1-IF) 관측데이터를 1Gbps (16MHz BW, 16-IF)로 필터링한 데이터에 대해 DjROY 소프트웨어 상관기[10]를 이용하여 상관처리한 결과이다. 이때는 95초의 관측데이터에 대해 0.78배의 연산속도를 보였다. 상관처리는 KVN 연세, 울산, 탐라 3개 기선에 대해서 수행했으며, 그림 7은 탐라와 울산 기선 사이의 결과를 나타낸 것이다. 그림 7에 나타낸 것과 같이 상관처리를 수행하여 필터링된 데이터에 대한 진폭과 위상정보가 정

상적으로 출력되고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 진폭, 위상, 프린지 확인을 위한 상관처리가 정상적으로 수행되고 있으므로 비교분석을 위해 필터링한 95초 전체 데이터를 대상으로 대전상관기[2]를 이용하여 상관처리를 수행하였다. AIPS[11]를 이용하여 분석한 결과는 그림 8과 9에 각각 나타내었다. 본 실험에서 사용한 VLBI 관측데이터는 KVN을 이용하여 KVN으로 1Gbps(32MHz BW, 8-IF)와 2Gbps(512MHz BW, 1-IF)를 동시에 관측기록한 데이터이다. SW 디지털 필터의 성능을 확인하기 위해 2Gbps 관측 데이터를 1Gbps로 필터링을 하였으며, 표 4에 사용된 데이터의 정보를 나타내었다.

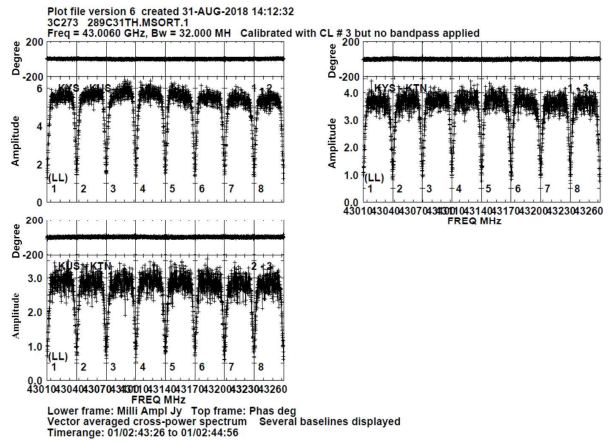
Table 4. Test observation data information

r17289c	
Array	Korean VLBI Network (KVN)
Target	3C273
Recording	1Gbps, 32MHz BW, 8-IFs
	2Gbps, 512MHz BW, 1-IF
Comparison time	02:43:26~02:44:56

그림 8은 원래 KVN 1Gbps 관측데이터와 2Gbps 관측데이터를 1Gbps로 필터링한 데이터에 대한 교차전력 스펙트럼(Cross power spectrum)과 위상(Phase)을 나타낸 것이고, 그림 9는 이들 관측데이터의 KUS 기선에 대한 신호대잡음비(SNR)을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 그림 8(a)와 (b)의 비교에서 교차전력스펙트럼의 진폭모양이 다른 것은 디지털 필터링을 수행할 때 사용된 필터계수가 다르고 스케일링(Scaling)의 차이가 있기 때문에 생기는 것으로 판단된다.

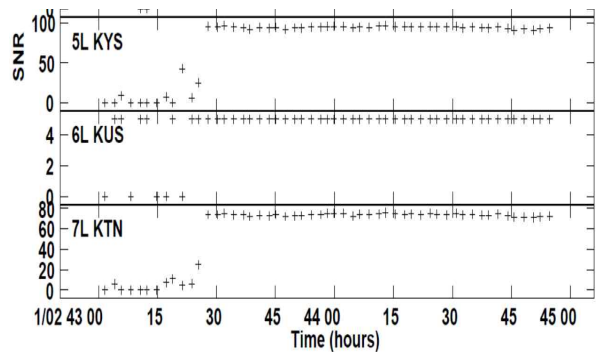


(a) Original 1Gbps data

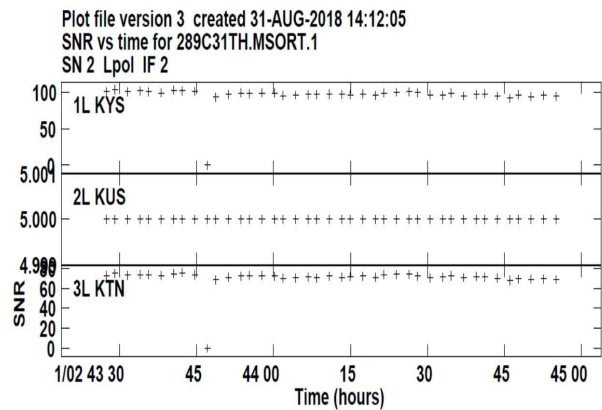


(b) Digital filtered 1Gbps from 2Gbps data

Fig. 8 Comparison result of cross power spectrum and phase between original and digital filtered 1Gbps data for KVN



(a) Signal to noise ratio(SNR) of original 1Gbps data



(b) SNR of digital filtered 1Gbps data from KVN 2Gbps
Fig. 9 SNR comparison result between 1Gbps and digital filtered 1Gbps for KVN

따라서 원래 데이터와의 비교를 위해 필터링된 데이터의 SNR을 확인하는 것이 효과적이며, 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9에 나타낸 것과 같이 SNR

값이 원래 데이터(a)와 필터링된 데이터(b)에 대해 KUS를 기준으로 하여 KYS는 약 100, KTN은 약 75정도를 보이고 있음을 알 수 있으며, 원래 데이터와 필터링된 데이터의 SNR이 거의 같은 값을 나타내고 있어서 본 연구에서 개발한 SW 디지털 필터를 통해 얻어진 상관처리 결과를 활용하여 데이터 분석을 수행하는데 유효함을 알 수 있다.

이상의 디지털 필터링 속도, 필터링 결과에 대한 상관처리 및 데이터 분석시험을 통하여 본 연구에서 개발한 GPU 보드를 이용한 SW 디지털 필터의 유효성을 확인하였다. 특히 참고문헌 [3]의 기존에 개발한 CPU 기반의 SW 디지털 필터 시스템은 속도가 느려서 실제 VLBI 관측데이터를 대상으로 필터링을 하고 그 결과를 활용하는 것은 어려움이 있었다.

그러나 GPU의 분산처리를 활용한 SW 디지털 필터는 GPU 보드 1개에 대해 2Gbps (512MHz BW, 1-IF) 관측데이터에 대해 2Gbps (32MHz BW, 16-IF)로 필터링한 경우 약 1.1배, 1Gbps (16MHz BW, 16-IF)로 필터링한 경우 약 0.78배의 필터링 시간이 소요되기 때문에 관측데이터를 필터링하고 데이터처리를 수행하는데 매우 효과적으로 활용할 수 있다. 그리고 상관처리 후 기존 1Gbps 관측데이터와의 교차전력스펙트럼과 위상, SNR 등의 결과에서도 거의 유사한 결과를 얻어 GPU 보드를 이용한 SW 디지털 필터 시스템이 KVN을 포함한 EAVN 등에서 관측한 데이터를 필터링하여 상관처리에 활용될 수 있어서 한일상관센터(KJCC)에서도 효과적으로 지원할 수 있을 것으로 기대된다.

향후에는 여러 장의 GPU 보드를 활용하여 필터링을 고속으로 진행할 수 있도록 개발한 코드의 최적화와 여러 개의 GPU 보드에서 동작할 수 있는 분산처리 작업을 지원할 수 있도록 수정할 계획이다.

V. 결론

본 논문에서는 GPU를 이용한 SW 디지털 필터의 성능 개선에 대해 기술하였다. 기존에 개발한 SW 디지털 필터는 CPU 기반에서 동작하기 때문에 데이터량이 많은 VLBI 관측데이터를 필터링하여 처리하는데는 속도가 느려 활용할 수 없는 문제가 있었다. 이 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 GPU의 분산처리를 활용하여 고속으로 VLBI 관측데이터를 필터링할 수 있도록 속도문제를 해결하였으며, 약 95초의 2Gbps 관측데이

터 대비 약 1.1배, 1Gbps로 필터링한 경우에는 약 0.78배 이상으로 디지털 필터링을 할 수 있도록 하였다. 따라서 각국의 관측시스템이 다른데 특히 EAVN 중에 광대역 관측시스템을 갖춘 JVN으로 관측한 광대역 관측데이터를 협대역으로 디지털 필터링하여 공통의 데이터 처리가 가능하도록 하였다. GPU 보드를 활용하여 기존의 SW 디지털 필터의 연산속도를 개선한 시스템의 유효성을 확인하기 위해 KVN 광대역 관측데이터를 대상으로 디지털 필터링을 수행하고 다중속도로 기록한 기존의 1Gbps 데이터와 2Gbps 데이터를 필터링하여 협대역 1Gbps로 만든 데이터를 상관처리하고 데이터 분석을 수행한 결과, 교차전력스펙트럼과 위상, SNR 등에서 유사한 결과를 나타내는 것을 확인하여 개발한 GPU 보드를 활용한 SW 디지털 필터가 광대역 VLBI 관측데이터를 협대역으로 필터링하는데 유효함을 알 수 있었다.

향후에는 실시간으로 필터링할 수 있도록 여러 장의 GPU 보드에서 동작하도록 개발한 시스템이 분산처리할 수 있도록 코드의 최적화 작업을 수행하여 시스템의 성능개선을 진행할 예정이다.

REFERENCES

- [1] Thompson, A. R., Moran, J. M., and Swenson, G. W. Jr., *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, 2nd Ed., (New York: John Wiley & Sons), 2001, pp. 289.
- [2] Duk-Gyoo Roh, Se-Jin Oh, Jae-Hwan Yeom et al, "Report on Development of Korea-Japan Joint VLBI Correlator and Receiver," KASI, pp. 3-100, 2008.
- [3] Jae-Hwan Yeom, Se-Jin Oh, Duk-Gyoo Roh et al., "A Study on the Digital Filter Design using Software for Analysis of Observation Data in Radio Astronomy," KICSP, Vol. 16, No. 4, pp. 175-181, 2015.
- [4] Mark Harris, "Optimizing Cuda," SC07: High Performance Computing With CUDA, 2007.
- [5] Haidar, A., S. Tomov, J. Dongarra, and N. J. Higham, "Harnessing GPU Tensor Cores for Fast FP16 Arithmetic to Speed up Mixed-Precision Iterative Refinement Solvers," The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis (SC18), 2018.

[6] <http://www.nvidia.com/ko-kr/titan/titan-v/?nvid=nv-int-tnvptlh-29191>

[7] A. R. Whitney, "Mark 5 Disk-Based Gbps VLBI Data System," in *New Technologies in VLBI*, edited by Y. C. Minh, ASP Conference Series, Vol. 306, Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, CA, 2003.

[8] <http://www.vlbi.org/vdif>

[9] <https://www.gnu.org/software/octave>

[10] Jae-Hwan Yeom, Se-Jin Oh, Duk-Gyoo Roh et al(2009, December), Development of Software Correlator for KJJVC, *Journal of Astronomy and Space Science*, 26(4) pp. 567-588.

[11] <http://www.aips.nrao.edu/index.shtml>

저자 소개

염 재 환 (Jae-Hwan Yeom)



2005년 8월 : 한양대 정밀기계공학과(공학석사)
 2005년 9월~현재 한국천문연구원 선임연구원
 관심분야 : 디지털신호처리, VLBI상관기 개발

오 세 진 (Se-Jin Oh)



1996년 2월 : 영남대 전자공학과(공학사)
 1998년 2월 : 영남대 전자공학과(공학석사)
 2002년 2월 : 영남대 전자공학과(공학박사)

2001년 9월 ~ 2002년 12월 대구과학대학 교수
 2010년 6월 ~ 2011년 5월 한국천문연구원 그룹장
 2002년 12월 ~ 현재 한국천문연구원 책임연구원
 관심분야 : 디지털신호처리, VLBI상관기 및 천문관측기 개발

노 덕 규 (Duk-Gyoo Roh)



1985년 2월 : 서울대 천문학과(이학사)
 1994년 8월 : 동경대 천문학과(이학석사)
 1997년 8월 : 동경대 천문학과(박사수료)

2005년 11월 ~ 2009년 3월 한국천문연구원 그룹장
 1985년 4월 ~ 현재 한국천문연구원 책임연구원
 관심분야 : 전파천문, VLBI상관기 개발

정 동 규 (Dong-Kyu Jung)



2004년 8월 : 충남대 천문학과(이학사)
 2006년 8월 : 충남대 천문학과(석사수료)
 2012년 1월 ~ 현재 한국천문연구원 연구원

관심분야 : VLBI상관처리, 천문관측기기 개발

황 주 연 (Ju-Yeon Hwang)



2006년 2월 전남대 자원공학과(공학사)
 2014년 ~ 현재 한국천문연구원 연구원
 2014년 1월 ~ 현재 SET 시스템 연구원

관심분야 : VLBI상관처리, 천문관측기기 개발

오 충 식 (Chungsik Oh)



2002년 2월 : 서울대 천문학과(이학사)
 2006년 3월 : 일본 동경대 천문학과(이학석사)
 2009년 3월 : 일본 동경대 천문학과(이학박사)

2009년 4월 ~ 2010년 11월 한국천문연구원 박사후연수원
 2010년 12월 ~ 현재 한국천문연구원 선임연구원
 관심분야 : Astrometry, VLBI상관처리

김 효 령 (Hyo-Ryoung Kim)



1990년 2월 서울대 천문학과(이
학사)

1996년 2월 부산대 지구과학과
(이학석사)

2003년 8월 부산대 지구과학과
(이학박사)

2006년 6월 ~ 2008년 12월 한국천문연구원 전파천문
연구부 부장

1990년 6월 ~ 현재 한국천문연구원 선임연구원

관심분야 : 전파천문 SW 개발, VLBI상관처리