

cuFFT를 활용한 GPS L1 C/A 신호 상관기 구현

유재덕*, 유승수, 김선용†

건국대학교

kimsy@konkuk.ac.kr

A Study on the GPS L1 C/A Signal Correlator Based on cuFFT

Jae Duk Yoo*, Seungsoo Yoo, and Sun Yong Kim†

Konkuk Univ.

요약

본 논문에서는 MATLAB에서 여러 고속 푸리에 변환 기법에 따른 표본과 반복 횟수 별 수행 속도를 비교하고, 그 중 MATLAB에서 기본으로 제공하는 기법과 비교군 중 가장 처리 속도가 빠른 기법에 대하여 GPS (Global Positioning System) L1 C/A (Coarse/Acquisition) 신호 획득 블록을 구성해 처리 시간을 비교한다.

I. 서론

상관 분석은 두 신호 사이의 관계를 측정하고 상관 계수 형태로 분석하는 통계적 방법이다. 이때, 자기 상관 분석은 서로 같은 두 신호를 상관 분석하는 것을 의미하며, 교차 상관 분석은 서로 다른 두 신호를 상관 분석하는 것을 의미한다. 서로 다른 두 이산 신호 $f[t]$ 와 $g[t]$ 의 교차 상관 $(f \star g)[\tau]$ 는 식 (1)과 같다[1].

$$(f \star g)[\tau] = \overline{f[\tau]} * g[-\tau] = \sum_{t=-\infty}^{\infty} \overline{f[t]} g[t + \tau] \quad (1)$$
$$= F^{-1}\{F[\overline{f[t]}]F[g[-t]]\} \quad (2)$$

이때, 이산 신호 $\overline{f[t]}$ 는 이산 신호 $f[t]$ 의 켈레 복소수 신호이며, 기호 $*$ 는 두 신호 사이의 합성곱이다. 기호 F 와 F^{-1} 은 고속 푸리에 변환 (Fast Fourier Transform, FFT)과 역변환 (Inverse FFT, IFFT)을 의미한다. n 개의 표본에 대하여 교차 상관 연산을 할 경우, 식 (1)의 시간 복잡도는 $O(n^2)$ 인 반면, 식(2)의 시간 복잡도는 $O(2n \log_2(n))$ 로 식 (1)에 비해 개선됐다. 이후에도 FFT 연산 전 계획(plan)이라는 기법을 도입해 표본의 특성에 따라 알고리즘 최적화를 수행하는 FFTW와 그래픽 카드의 처리 장치를 활용해 FFT를 수행하는 cuFFT 등 다양한 FFT 기법이 개발되며 FFT 기반 상관 알고리즘의 처리 시간은 더욱 개선되었다.

GNSS (Global Navigation Satellite System) 위성 신호의 유무 확인하고 도플러 편이와 코드 지연을 확인하는 획득 과정에서 FFT 기반 교차 상관 알고리즘을 활용한다. 획득 블록의 기본 구성은 그림 1과 같다.

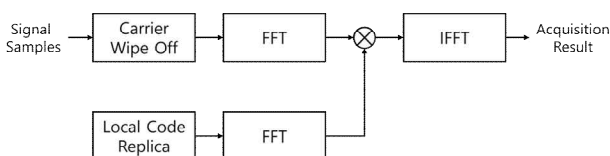


그림 1. FFT 기반 신호 획득 블록 구조

표 1과 같이 구성된 42밀리초의 표본 데이터 756,000개를 통해 [2]의 MATLAB 기반으로 작성된 OS (Open Source) GNSS SDR (Software-Defined Radio)의 획득을 수행한 결과, 각 PRN (Pseudo Random Noise)은 획득 과정에서 1160번의 FFT/IFFT를 수행하며 FFT/IFFT의 처리 시간(11.044초)은 총 획득 처리 시간(17.184초)의 64.269%로서 FFT/IFFT 연산의 속도는 획득 블록 수행 시간에 많은 비중을 차지한다.

표 1. 표본 데이터 구성

Format	File Type	IF Frequency (Hz)	Sampling Frequency (Hz)	Total Time (s)
IFEN	16 bit	4,092,000	16,368,000	60
	I/Q			

본 논문은 MATLAB 자체의 FFT/IFFT 성능과 MATLAB MEX를 통해 구성한 FFTW, cuFFT 기반 FFT/IFFT 처리 시간을 비교하고, OS GNSS SDR의 MATLAB 자체의 FFT를 활용한 GPS (Global Positioning System) L1 C/A (Coarse/Acquisition) 신호 획득 블록과 cuFFT의 FFT를 활용한 GPS L1 C/A 신호 획득 블록을 구성한 후 처리 시간을 비교한다.

II. FFT 기법 별 처리 성능 평가

MATLAB 자체의 FFT와 FFTW, cuFFT의 성능 평가를 위하여, 세 기법을 모두 활용할 수 있는 MATLAB을 주요 환경으로 구성하였다. FFTW와 cuFFT는 컴파일된 mexw64 확장자의 파일을 MATLAB에서 함수 형태로 호출해 사용할 수 있는 MATLAB의 MEX 기능을 활용해 실험을 진행했으며, MEX 프로그램 호출, 입력 변수 분석과 출력 변수 설정 등 외부 파일을 호출해 처리를 수행하는 과정에서 발생하는 손실을 모두 포함하여 처리 속도를 측정했다.

FFT 성능을 비교하기 위해, 그림 2와 같이 모의실험을 구성했다. 이때, N 은 FFT/IFFT를 수행할 표본의 개수, M 은 FFT/IFFT의 반복 횟수를 의미한다.

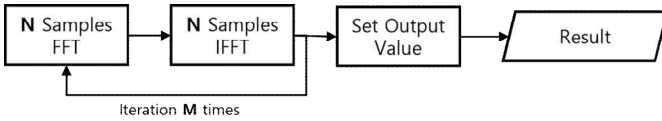


그림 2. FFT 기법 성능 평가 모의실험 구조

MATLAB 자체의 FFT, FFTW, cuFFT 세 가지 기법에 대하여 2^{10} , 2^{17} 개의 표본을 3회, 10회 FFT/IFFT를 반복하는 방식으로 모의 실험을 진행했다. 실험용 신호 표본은 의사 난수 생성 함수를 통해 생성했으며, 실험 결과는 표 2와 같다.

표 2. 모의실험 결과

		MATLAB Based FFT (ms)		FFTW with MEX (ms)		cuFFT with MEX (ms)	
Iteration (M)		3	10	3	10	3	10
Samples Count (N)	2^{10}	0.235	0.665	0.116	0.137	0.947	1.165
	2^{17}	7.685	25.985	4.338	11.566	2.937	4.272

GPS L1 C/A 신호의 1주기는 1밀리초로, 이는 표 1 기준 16,398개의 표본에 해당한다. 영 삽입(zero padding)을 고려할 경우, FFT를 통해 32,736 개의 표본을 처리해야 한다. 이를 고려해 기존 OS GNSS SDR의 MATLAB 기반 GPS L1 C/A 신호 획득 블록과 cuFFT 기반 GPS L1 C/A 신호 획득 블록의 처리 시간을 비교하였다.

GPS L1 C/A 신호 획득 블록은 표 1과 같은 구성의 신호 표본에 대하여 7000Hz의 범위를 500Hz 단위로 14개의 주파수 공간으로 분할해 최대 32 개의 PRN 코드를 탐색하도록 구성하였다. 또한 정확한 평가를 위해 OS GNSS SDR 획득 블록에 적용된 동기 적산과 비동기 적산 블록은 제외하였다. 따라서 획득 블록은 상관 과정에서 최대 32개의 PRN 코드에 대하여 928번의 FFT/IFFT를 수행한다. 그림 3는 MATLAB 자체의 FFT를 활용해 구성된 획득 블록 1과 그래픽 카드와 cuFFT를 활용해 구성된 획득 블록 2의 흐름도이다.

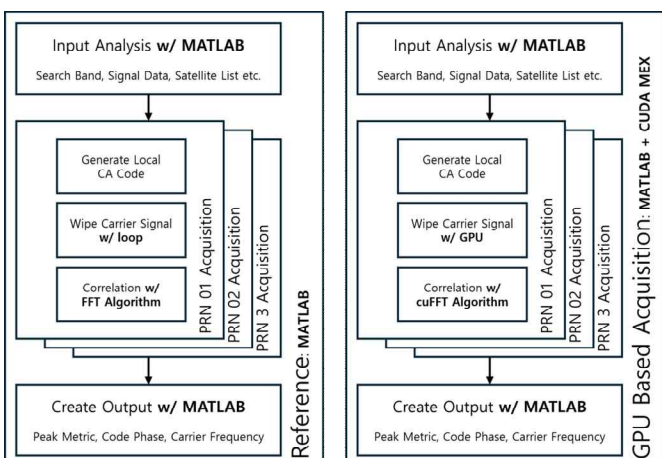


그림 3. GPS L1 C/A 획득 블록 구조

구성된 두 획득 블록의 PRN 2번 코드의 상관 결과는 그림 4와 같이 구성되었다.

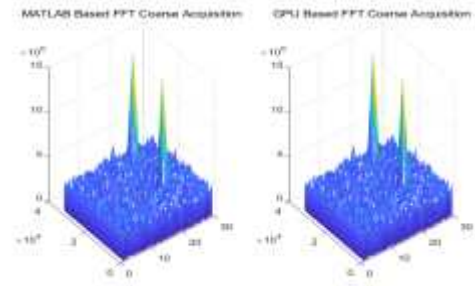


그림 4. 획득 블록 별 PRN 2 상관 결과

이를 통해 두 획득 블록 모두 정상적으로 구성되었음을 확인할 수 있다. 각 획득 블록의 PRN 코드 개수에 따른 처리 시간은 표 3과 같다.

표 3. 탐색할 PRN 코드 개수에 따른 획득 블록의 처리 시간

PRN Count	Tack Time (s)		Proportion (%)
	Acquisition with MATLAB FFT (1)	Acquisition with cuFFT (2)	
1	0.0586	0.0685	116.894
4	0.2533	0.1825	54.481
16	0.4152	0.2520	60.693
32	1.5866	0.4195	24.440

단일 PRN 코드를 탐색하는 경우, 획득 블록 1은 평균 0.0586초의 처리 시간을 보였다. 이는 획득 블록 2의 평균 처리 시간인 0.0685초보다 약 0.0099초 빠른 것으로 나타났다. 이러한 결과는 단일 PRN 코드를 빠르게 탐색하는데 획득 블록 1이 효율적임을 시사한다. 그러나 탐색할 PRN 코드의 수가 증가할수록 다른 양상을 보인다. 32개의 PRN 코드를 탐색할 경우, 획득 블록 2의 처리 시간은 0.4195초로 이는 획득 블록 1의 처리 시간 1.5866초와 비교했을 때 약 3.79배 빠른 처리 속도이다.

III. 결론

본 논문에서는 MATLAB 환경에서 세 가지 다른 FFT 기법을 비교 분석하였으며, 기법 중 OS GNSS SDR에 활용된 MATLAB의 FFT와 cuFFT를 통해 GPS L1 C/A 신호 획득 블록을 구성해 성능을 평가하였다. 분석 결과, cuFFT를 통해 구성한 신호 획득 블록은 MATLAB을 통해 구성한 신호 획득 블록에 비해 최대 3.79배 빠른 처리 속도를 보였다. 이는 신호 획득 과정에서 그래픽 카드의 처리 장치를 활용하여 처리 속도를 유의미하게 개선할 수 있음을 의미한다. 이를 바탕으로 향후 그래픽 카드 기반의 GPS L1 C/A SDR 구성에 초점을 맞추어 연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구 센터 사업의 연구 결과로 수행되었습니다. (IITP-2024-RS-2023-00258639)

참고 문헌

- [1] A. Papoulis and S. U. Pillai, Probability, *Random Variables, and Stochastic Processes*. 4th ed. McGraw-Hill, New York, NY, 2002.
- [2] gnsscsdr. "CU-SDR-Collection," github.com. <https://github.com/gnsscsdr/CU-SDR-Collection> (accessed Feb. 03, 2024).