

디지털 펄스압축기의 연산 양 비교

신 현 익, *김 상 규, *조 태 훈, **김 환 우
국방과학연구소, *한국기술교육대학교, **충남대학교
전화 : 042-821-2544 / 핸드폰 : 017-680-6004

Comparison of Computation Complexity for Digital Pulse Compressor

Hyun-Ik Shin, *Sang-Kyu Kim, *Tae-Hoon Kim and **Whan-Woo Kim
Agency for Defense Development, shin222@hitel.net
* Korea University of Technology and Education
** Department of C & C, Chungnam National University

Abstract

With the development of digital signal processor (DSP), digital pulse compressor (DPC) is commonly used in radar systems. A DPC is implemented by using finite impulse response(FIR) filter algorithm in time domain or fast Fourier transform(FFT) algorithm in frequency domain. This paper compares the computation complexity for these two methods and calculates boundary FIR filter taps that determine which of the two methods is better based on computation amount. Also, it shows that the boundary FIR filter taps for DSP, ADSP21060, and those for computation complexity have similar characteristic.

I. 서 론

펄스압축(PC : pulse compression) 기술은 낮은 첨두(peak) 전력의 긴 펄스 폭을 갖는 부호화(coded) 신호를 송신하여, 짧은 펄스 폭의 높은 전력을 갖는 펄스에 상응하는 탐지성능과 거리 분해능(resolution)을 얻을 수 있게 한다. 이 방법은 송신펄스에 위상 또는 주파수 변조를 가하여 송신신호의 대역폭을 넓게 함으로써 얻어지는 결과이며, 송신펄스에 부호화를 사용하지 않는 레이더 시스템 보다 우수한 거리 분해능을 나타낸다. 표적으로부터 반사되어 레이더 수신기에 도달하는 반향(echo)신호는 송신펄스 발생 시 사용된 필터와 정합(matched)관계의 필터를 사용하여 수신펄스를

1/B (B는 송신신호 대역폭)로 압축한다.^[1]

펄스압축 기법은 주로 탐색(surveillance) 또는 추적(tracking) 레이더에 널리 사용되며, 최근 들어서는 이를 구현하기 위하여 DSP를 이용한 디지털 방식이 주로 사용된다. 디지털 펄스압축 방식은 아날로그 방식에서의 사용 가능한 소자(component) 제한 문제를 해결해 줌으로써, 큰 압축 비를 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다.^[2,3]

디지털 펄스압축 방식은 FIR 필터를 이용한 시간영역 처리방식과, FFT를 이용한 주파수영역 처리방식으로 구현될 수 있다. FFT를 이용하는 주파수영역 처리 방식은 펄스압축 연산을 수행하기에 앞서, 전체 거리 셀(cell) 모두를 수신해야 하는 블록(block) 단위의 처리방식이다. 하지만 FIR 필터를 이용하는 시간영역 처리 방식은 거리 셀 데이터를 수집(acquisition)하면서 연산을 수행할 수 있기 때문에, 블록 단위 처리에 의한 지연이 없을 수도 있다.^[4,5] 그러나 DSP를 사용하는 경우에는 방법에 관계없이 블록 단위 처리가 일반적으로 사용된다.

본 논문에서는 시간영역 및 주파수영역 처리방식에 대한 연산 양을 비교하고, 이 결과를 사용하여 두 처리 방식 가운데 어떤 방법이 연산 측면에서 유리한지를 선택할 수 있게 해주는 경계(boundary) FIR 필터 탭(tap)을 제시하였다. 또한 아날로그 디바이스사의 ADSP21060 DSP의 최적화 라이브러리(library)를 사용하여 DSP에 대한 경계 FIR 필터 탭이 실수 연산 양에 의한 경계 필터 탭과 유사한 특성을 나타냄을 확인하였다.

II. 펄스 압축

레이더 펄스압축 기법은 정합필터 시스템의 대표적인 예이다. 송신신호는 부호화 필터의 주파수 응답 $H(\omega)$ 또는 임펄스 응답특성 $h(t)$ 로 표현될 수 있다. 즉, 부호화 송신신호는 단위(unit) 임펄스를 사용하여 부호화 필터 $H(\omega)$ 를 여기(exciting) 함으로써 얻을 수 있다. 한편 수신신호는 주파수 응답특성이 부호화 필터와 복소 공액(conjugate), $H^*(\omega)$, 관계인 정합필터에 인가되며, 정합필터에 의해 수신신호가 압축된다. 따라서 펄스압축 결과는 송신신호의 주파수 응답 $H(\omega)$ 와 정합필터 응답 $H^*(\omega)$ 의 곱을 역(inverse) FFT 하여 얻어질 수 있다.^[6]

2.1 시간영역 펄스압축

시간영역에서의 펄스압축기 출력은 식 (1)과 같이 수신신호 $x(t)$ 와 정합필터의 공액 임펄스 응답특성 $h^*(-t)$ 의 상승적(convolution)으로 표현된다.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h^*(t-\tau) d\tau \quad (1)$$

식 (1)에서 $h^*(i)$ 는 $i=0, 1, \dots, N_T-1$ 에 대해서만 값을 가지기 때문에, 디지털 펄스압축기 출력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y(k) = \sum_{i=0}^{N_T-1} x(k+i)h^*(N_T-1-i),$$

$$k=0, 1, 2, \dots, N_R-N_T, \quad (2)$$

식에서 $y(k)$ 는 펄스압축기의 k 번째 출력, $x(i)$ 는 i 번째 수신신호, $h(i)$ 는 i 번째 임펄스응답 계수, N_T 는 FIR 필터 탭 수, N_R 은 수신거리 셀 수를 각각 의미한다.

2.2 주파수영역 펄스압축

주파수영역에서의 펄스압축은 그림 1에서와 같이 FFT를 사용하여 구현될 수 있다. 이 경우 선형(linear) 상승적 결과를 얻기 위해서 영이 추가된(zero-padded) 신호가 적용되며, FFT 포인트 수는 식 (3)의 관계를 만족해야 한다.

$$N_{FFT} \geq N_R + N_T - 1. \quad (3)$$

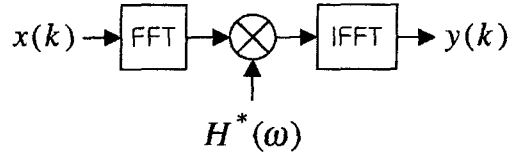


그림 1. 주파수 영역 펄스압축.

III. 연산 양 비교

입력 샘플수가 2의 멱승(power)인 N_{FFT} 의 경우, 이를 FFT 하기 위해서는 $(N_{FFT}/2) \cdot \log_2(N_{FFT})$ 번의 복소수(complex) 곱셈 및 $N_{FFT} \cdot \log_2(N_{FFT})$ 번의 복소수 덧셈이 요구된다.^[7] 그림 1에서 알 수 있듯이 주파수 영역에서의 펄스압축 방식은 두 신호에 대한 곱셈을 수행하기 위해 N_{FFT} 번의 복소수 곱셈이 필요함을 알 수 있으며, 이 경우 역 FFT는 FFT와 동일한 연산으로 계산될 수 있다. 따라서 이들 결과와 식 (2)로부터 펄스압축 연산을 위해 시간영역 및 주파수영역 방식에서 요구되는 복소수 연산 양은 표 1과 같이 표현될 수 있다.

표 1. 펄스압축 수행을 위한 복소수 연산

| | | |
|------------|---|---|
| 시 간 영 역 | x | $(N_R - N_T + 1) \cdot N_T$ |
| | + | $(N_R - N_T + 1) \cdot (N_T - 1)$ |
| 주파수 영 역 | x | $N_{FFT} \cdot \log_2(N_{FFT}) + N_{FFT}$ |
| | + | $2 \cdot N_{FFT} \cdot \log_2(N_{FFT})$ |

일반적으로 DSP를 사용하는 경우에는 모든 연산이 동일 클럭(clock)에 이루어짐으로, 곱셈과 덧셈에 대한 연산시간은 차이가 없다. 복소수 곱셈은 4번의 실수(real) 곱셈과 2번의 실수 덧셈으로, 복소수 덧셈은 2번의 실수 덧셈으로 수행된다. 따라서 시간영역 및 주파수영역 방식에 대한 실수 연산 양은 표 2의 관계로 나타낼 수 있다.

표 2. 펄스압축 수행을 위한 실수 연산

| | |
|------------|---|
| 시 간 영 역 | $-8 \cdot N_T^2 + (8 \cdot N_R + 10) \cdot N_T - (2 \cdot N_R + 2)$ |
| 주파수 영 역 | $6 \cdot \{N_{FFT} \cdot \log_2(N_{FFT}) + N_{FFT}\} + 4 \cdot N_{FFT} \cdot \log_2(N_{FFT})$ |

표 2의 두 관계식을 이용하여 특정 거리 셀 N_R 에

대해 FIR 필터 탭 N_T 에 따른 실수 연산 양을 비교함으로써, 두 펄스압축 방법 중 어느 방식이 연산 양 측면에서 유리한지를 알 수 있다. 그림 2는 $N_R=800$ 에 대해, N_T 의 함수로 표 2의 두 연산 양을 도시한 결과이다. 그림 2에서 두 곡선의 교차점을 확인할 수 있으며, 바로 이 교차점이 두 영역을 구분하는 경계가 된다. 즉, $N_T \geq 16$ 인 경우 주파수 영역 펄스압축 방식이 시간영역 펄스압축 방식 보다 적은 실수 연산을 수행하게 된다. 레이더 시스템에 있어서 N_R 이 N_T 보다 일반적으로 크기 때문에, N_T 는 $0.5 \cdot N_R$ 까지만 고려하였다. 특히 2개 이상의 교차점이 나타나는 경우에는 가장 큰 교차점을 경계 FIR 필터 탭으로 선택하여야 한다. 그림 3은 여러 거리 셀에 대한 경계 FIR 필터 탭을 도시한 결과로서, FFT 포인트 수 근처에서 증가하였다가 감소하는 현상이 반복적으로 나타나는 것을 알 수 있으며, 거리 셀 수에 관계없이 펄스압축 탭 수가 증가함에 따라 주파수영역 방식이 유리함을 알 수 있다.

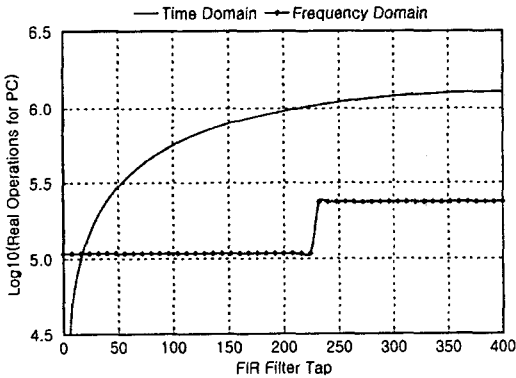


그림 2. 시간영역 및 주파수영역 펄스압축 방식에 대한 실수 연산 양 ($N_R=800$)

IV. DSP에 대한 경계 FIR 필터 탭

특정 DSP에 대해 그림 3의 경계 FIR 필터 탭을 계산하기 위해서는, 펄스압축 처리에 필요한 클럭 수가 수신 거리 셀과 FIR 필터 탭의 함수로 표현되어야 한다. 본 논문에서는 아날로그 디바이스사의 ADSP21060 DSP를 사용하였으며, 이에 대한 펄스압축연산은 Wideband Computer사의 최적화 DSP 라이브러리^[8]를 사용하였다. 이 경우 시간영역 펄스압축 수행을 위해 소요되는 클럭 수는

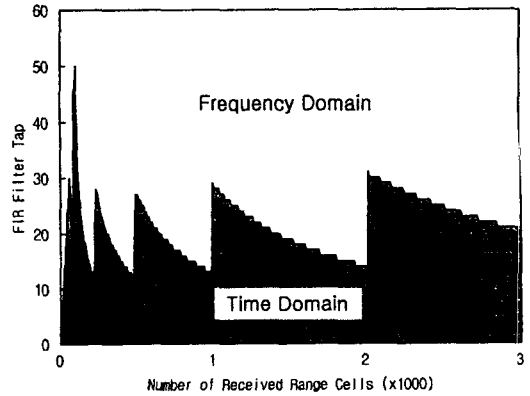


그림 3. 시간영역 처리방식과 주파수영역 처리방식을 구분하는 경계 FIR 필터 탭

$$59 + (9 + 5 \cdot N_T) \cdot (N_R - N_T + 1) \quad (4)$$

와 같이 표현된다. 한편 주파수영역 펄스압축을 수행하기 위한 FFT 연산에 필요한 클럭 수는 표 3과 같으며, 주파수 영역에서의 복소수 곱셈을 위해 소요되는 클럭 수는

$$44 + (12 + 7 \cdot (N_{FFT} - 1)) \quad (5)$$

과 같이 주어진다.

표 3. FFT 수행을 위한 클럭 수

| FFT 포인트 | 소요 클럭 수 |
|---------|---------|
| 8 | 184 |
| 16 | 388 |
| 32 | 771 |
| 64 | 1,274 |
| 128 | 2,368 |
| 256 | 4,724 |
| 512 | 10,060 |
| 1,024 | 21,618 |
| 2,048 | 46,744 |
| 4,096 | 101,054 |
| 8,192 | 217,828 |

따라서 위의 관계식을 적용함으로써 펄스압축 연산을 위해 ADSP21060을 사용하는 경우, 경계 FIR 필터 탭을 쉽게 얻을 수 있다. 그림 4는 이에 대한 결과로서 FFT 포인트 수 근처에서 증가하였다가 서서히 감소하는 그림 3의 특성이 동일하게 나타남을 확인할 수 있다.

DSP에 의한 경계 FIR 필터 탭들이 표 2의 시간영역 및 주파수영역 실수 연산 양에 의한 결과와 경향에 있어서는 유사한 특징을 갖지만, N_T 에 따른 기울기차

이로 경계 필터 값에 대해서는 차이가 있음을 알 수 있다.

참고문헌

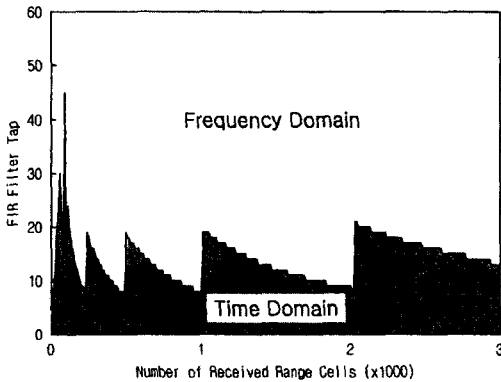


그림 4. ADSP21060을 사용한 경우 시간영역 처리방식과 주파수영역 처리방식을 구분하는 경계 FIR 필터 탭

V. 결 론

본 논문에서는 FIR 필터를 이용한 시간영역 및 FFT를 이용한 주파수영역 디지털 펄스압축 방식에 대한 실수 연산 양을 비교함으로써, 두 방식 가운데 어떤 방법이 연산 측면에서 유리한지를 판단할 수 있는 경계 FIR 필터 탭 개념을 도입하였다. 계산된 경계 FIR 필터 탭은 FFT 포인트 지점에서 증가하였다가 서서히 감소하는 현상을 반복적으로 나타내었으며, 수신 거리 셀에 관계없이 FIR 탭 수가 증가함에 따라 주파수영역 방식이 유리함을 확인할 수 있었다.

이러한 경계 FIR 필터 탭은 DSP를 이용한 디지털 펄스압축기 구현 시에도, 실수 연산 양에 의한 결과와 유사한 특성을 가진다는 사실을 ADSP21060에 대해 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 경계 FIR 필터 개념은 펄스 압축방식 선택 시 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, Inc., New York, NY, 1980.
- [2] D. C. Schleher, *Electronic Warfare in the Information Age*, Atrech House, Norwood, MA, 1999.
- [3] Stephen To et al., Digital Implementation Issues in a Pulse Compression Radar System, Information, Decision and Control, Proceedings, pp. 181-186, 1999.
- [4] R. Peihong, A Kind of High-Speed Real-Time Digital Pulse Compressor Implemented in Time Domain, Radar, 2001 CIE International Conference on, Proceedings, pp. 966-969, 2001.
- [5] T. Long and E. Mao, High-Speed Real-Time Radar Processor : Design and Implementation, Radar, 2001 CIE International Conference on, Proceedings, pp. 987-991, 2001.
- [6] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, McGraw-Hill, Inc., New York, NY, 1990.
- [7] C. T. Chen, *One-Dimensional Digital Signal Processing*, Marcel Dekker, Inc., New York, NY, 1979.
- [8] Wideband Computers, Inc., *ADSP-21K Optimized DSP Library Users Manual Version 2.6*, Wideband Computers, Inc., Pear Avenue, CA, 1998.