

LFM 신호의 펄스압축에 대한 부엽억제 성능향상 기법연구

A Study on the Performance Improvement in Sidelobe Suppression
for Pulse Compression of LFM Signal

신정훈*

Shin, Jeong-Hoon

ABSTRACT

The pulse compression technique using Linear FM signal is commonly used for improving the performance of both the detection range and range resolution in radar system. In general, the compressed LFM waveform has relatively large sidelobe level which may prevent a target from being detected when strong jammer or clutter signal is near the target signal.

In this paper, we propose a new weighting method which uses the square-root weight to suppress the sidelobe level. Typical applications are missile seekers and tracking radar systems where target tracking range is available prior to the signal processing. By computer simulation, we show that the performance of the proposed method is better than that of the conventional weighting methods in terms of sidelobe suppression.

주요기술용어(주제어) : Pulse Compression(펄스 압축), LFM(선형 주파수 변조), Sidelobe Suppression(부엽 억제)

1. 서론

레이더 시스템에서 먼 탐지 거리와 좋은 거리 해상도(resolution)를 갖기 위해서는 송신 신호가 큰 침투 전력과 짧은 펄스폭을 가져야 된다. 그러나 현실적으로 송신 신호의 침투 전력을 증가시키는 데 한계가 있으므로, 두 조건을 동시에 만족시키기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 사용되는 펄스 압축(pulse compression)은 적당한 크기의 전력과 긴 펄스폭을 가진 송신 신호를 송신하여 먼 탐지 거리를 확보하

고, 표적으로부터 반사되는 신호의 펄스폭을 압축하여 거리 해상도를 향상시키는 기법이다. 이 때, 압축된 펄스폭은 송신 신호의 주파수 대역폭에 반비례한다^[1].

정합 필터(matched filter)는 대표적인 펄스 압축 기법으로 최근에는 DSP(Digital Signal Processor) 기술의 발전에 힘입어 디지털 방식을 많이 사용하고 있다. 정합 필터는 구현 방식에 따라 FIR(Finite Impulse Response) 필터를 이용한 시간 영역 처리 방식과 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용한 주파수 영역 처리 방식으로 구분되며, 처리해야 될 샘플 수가 많아질수록 FFT를 이용한 주파수 영역 처리 방식이 연산량 측면에서 유리한 것으로 알려져 있다.

† 2006년 6월 2일 접수~2006년 7월 20일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : jhshin75@add.re.kr

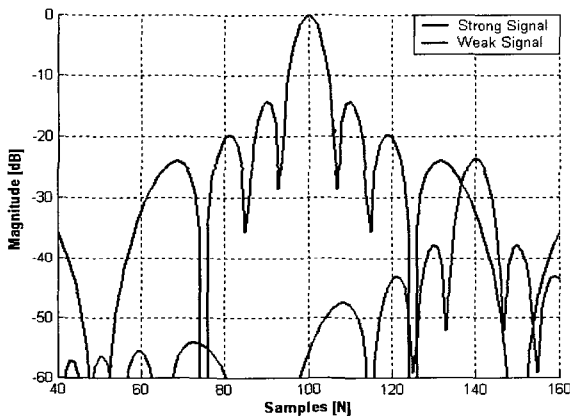
LFM(Linear Frequency Modulation) 파형을 이용한 펄스 압축 결과는 SINC 함수로 나타나며, 첫 번째 부엽 레벨이 펄스 압축비가 큰 경우에는 -13dB 정도이고, 펄스 압축비가 작은 경우에는 -15dB 정도이다^[2]. 다중 표적 또는 재밍(또는 클러터)이 존재하는 환경에서 표적 검출 성능을 향상시키기 위해서는 이러한 원치 않은 부엽 레벨을 억제시켜야 된다. 그림 1은 가중치 함수를 적용하지 않은 경우와 가중치 함수를 적용한 경우의 펄스 압축 결과를 보여준다. 그림 1-(a)는 가중치 함수를 적용하지 않은 펄스 압축 결과로 약한 세기의 신호가 강한 신호의 부엽 성분에 의해 가려지는 것을 나타내고 있고, 그림 1-(b)는 동일한 신호 세기에 대하여 가중치 함수를 적용한

펄스 압축 결과로 약한 세기의 신호 성분이 강한 신호의 부엽 위로 검출되는 것을 보여주고 있다^[2].

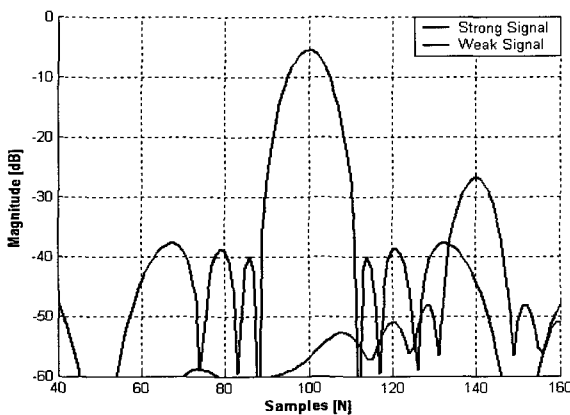
탐색 레이더 시스템의 경우에는 표적의 거리 정보를 사전에 알 수 없기 때문에 일반적으로 정합 필터 계수로 사용되는 기준 신호에만 시간 영역 또는 주파수 영역에서 가중치 함수를 곱하여 부엽 레벨을 억제시킨다.

그러나 탐색기(seeker) 또는 추적 레이더 시스템의 경우, 추적 중에는 펄스 압축 처리를 하기 전에 표적의 거리 정보를 사전에 획득할 수 있으므로, 표적으로부터 반사되는 신호와 기준 신호에 가중치 함수를 곱하는 방식인 시간 영역 제곱근(square-root) 가중치 기법을 적용할 수 있다.

본 논문에서는 탐색기 또는 추적 레이더 시스템에 적용 가능한 시간 영역 제곱근 가중치 기법을 제안하고, 일반적으로 사용되는 가중치 기법에 비해 부엽 억제 측면에서 더 우수한 성능을 보임을 검증한다.



(a)



(b)

[그림 1] 펄스 압축시 가중치 함수 적용 효과

2. 펄스 압축 기법

표적 신호에 대한 검출 확률을 높이기 위해서는 수신되는 신호의 형태를 보존하기보다는 수신 신호의 SNR(Signal-to-Noise Ratio)를 증가시키는 데 초점을 맞추어야 된다.

정합 필터는 대표적인 펄스 압축 기법으로 수신 신호의 SNR을 최대화하기 위한 선형 필터이다. 정합 필터의 임펄스(impulse) 응답은 수신 신호의 잡음이 0-평균 백색잡음(white noise)라는 가정 하에 Schwarz Inequality의 필요충분조건에 의하여 식 (1)과 같이 표현되므로, 정합 필터의 임펄스 응답은 송신 신호에 대한 시간역 공액 복소수(time inverted complex conjugate) 신호이다.

$$h(t) = K \cdot s^*(t_0 - t) \tag{1}$$

여기서, $s(t)$ 는 송신 신호를 의미하고, K 와 t_0 는 임의의 상수이다.

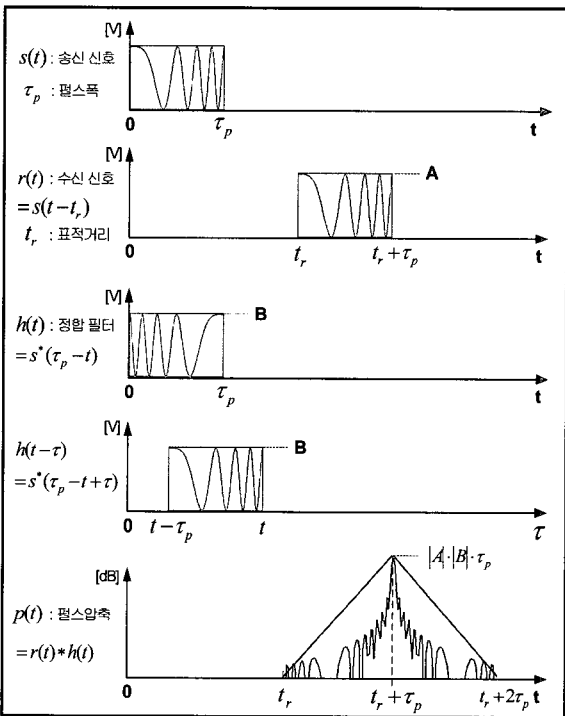
송신 신호 $s(t)$ 에 대한 정합 필터의 출력은 식 (2)와 같이 표현되므로, 정합 필터는 송신 신호에 대한 자

기 상관 함수(auto-correlation) 결과임을 알 수 있다.

$$y(t) = K \cdot \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) \cdot s^*(t_0 - t + \tau) d\tau$$

$$= \phi_{ss} \quad (K=1, t_0=0) \quad (2)$$

그림 2는 LFM 신호에 대한 causal 정합 필터링 ($t_0 = \tau_p$) 과정을 보여 주고 있다. 그림 2를 통해 causal 정합 필터에 의한 펄스 압축 결과는 $t = t_r + \tau_p$ 시점에서 최대값(이상적인 경우, 송신 신호의 에너지)이 출력됨을 볼 수 있다.



[그림 2] LFM 신호에 대한 causal 정합필터링 과정

가. 시간 영역 펄스 압축 기법

시간 영역에서의 정합 필터 출력 신호는 식 (3)과 같이 수신 신호 $r(t)$ 와 정합 필터의 임펄스 응답 신호 $h(t)$ 간의 상승적(convolution)으로 표현된다.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} r(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (3)$$

실제 구현을 위해서는 정합 필터가 causal이어야 되고, 식 (4)와 같이 정합 필터 출력 신호가 이산 영역(discrete domain)에서 표현되어야 된다.

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

$$k = 0, 1, 2, \dots, N_R - N_T \quad (4)$$

여기서, N_T 는 정합필터 탭 수이고, N_R 은 수신거리 셀 수를 의미한다.

나. 주파수 영역 펄스 압축 기법

주파수 영역에서의 펄스 압축 기법은 식 (5)와 같이 시간 영역에서의 펄스 압축 기법을 FFT 함수와 IFFT 함수를 이용하여 구현한다.

$$y(k) = IFFT[FFT\{r(n)\} \cdot FFT\{h(n)\}] \quad (5)$$

식 (5)의 정합 필터 출력 신호는 원형 상승적(circular convolution) 결과가 되므로 선형 상승적(linear convolution)과 동일한 결과를 얻기 위해서는 zero-padding을 통해 FFT 크기가 식 (6)의 조건을 만족하도록 설정해 주어야 한다.

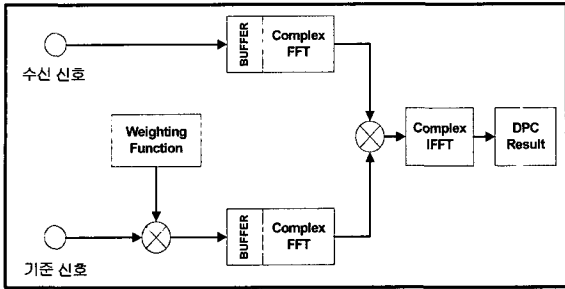
$$N_{FFT} \geq N_R + N_T - 1 \quad (6)$$

3. 펄스 압축 부엽 억제 기법

LFM 신호를 이용한 펄스 압축시 발생하는 부엽 성분을 억제하기 위한 방법은 여러 가지가 있다. 그 중 일반적으로 많이 사용되는 시간 영역 또는 주파수 영역에서 기준 신호에만 가중치 함수를 적용하는 기법을 우선 살펴 본 후, 제안된 반사 신호 및 기준 신호에 시간 영역 제공된 가중치 함수를 적용하는 기법을 소개하도록 한다.

가. 기준신호에 대한 시간영역 가중치 적용기법

정합 필터 계수로 사용되는 기준 신호에 대하여 시간 영역 가중치 함수를 적용하고, 주파수 영역에서 펄스 압축을 수행하는 구조는 그림 3과 같다.

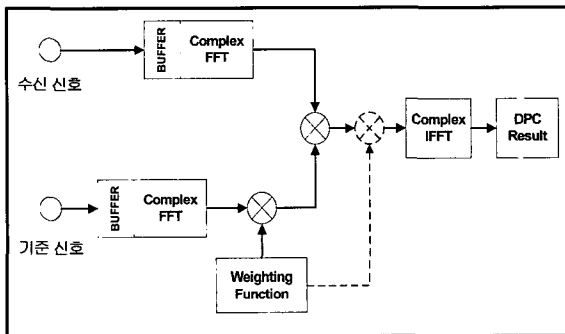


[그림 3] 기준신호에 시간영역 가중치 적용 구조

펄스 압축 출력 신호는 식 (7)과 같이 표현되고, 일반적으로 연산량을 고려하여 기준 신호에 대하여 가중치를 적용하고, FFT를 한 결과가 DSP 메모리에 저장된다.

$$y(k) = IFFT[FFT\{r(n)\}FFT\{s(n)w(n)\}] \quad (7)$$

나. 기준신호에 대한 주파수영역 가중치 적용기법
기준 신호에 대하여 주파수 영역 가중치 함수를 적용하고, 주파수 영역에서 펄스 압축을 수행하는 구조는 그림 4와 같다.



[그림 4] 기준신호에 주파수 영역 가중치 적용 구조

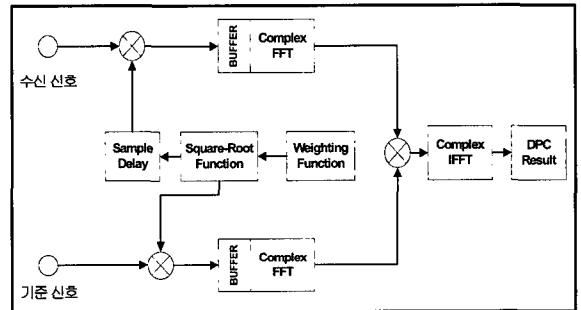
펄스 압축 출력 신호는 식 (8)과 같이 표현되고, 일반적으로 연산량을 고려하여 기준신호의 스펙트럼에 가중치를 적용한 결과가 DSP 메모리에 저장된다. 그리고 식 (8)를 통해 기준 신호의 스펙트럼에 가중치를 적용하는 방식이나 수신 신호 및 기준 신호의 스펙트럼을 곱한 후, 가중치를 적용하는 방식이 결과적으로 동일함을 알 수 있다.

$$y(k) = IFFT[FFT\{r(n)\}FFT\{s(n)\}w(n)] \quad (8)$$

다. 시간영역 제곱근 가중치 적용기법

시간 영역 제곱근 가중치 적용기법은 송신 신호와 기준 신호에 대하여 적용되는 기법이나, 송신단에서 선형 전력 증폭기(linear power amplifier)가 추가적으로 필요하므로 구현하기 어려운 문제점이 있다^[1].

그러나 사전에 표적의 거리 정보를 알 수 있다면, 그림 5와 같이 수신 신호 중 표적으로부터 반사되는 신호에만 시간 영역 제곱근 가중치를 적용할 수 있으므로, 송신 신호에 시간 영역 제곱근 가중치를 적용하는 기법과 동일한 효과를 볼 수 있다.



[그림 5] 시간영역 제곱근 가중치 적용 구조

펄스 압축 출력 신호는 식 (9)와 같이 표현되고, 일반적으로 연산량을 고려하여 기준 신호에 시간 영역 제곱근 가중치를 적용하고, FFT를 한 결과가 DSP 메모리에 저장된다.

$$y(k) = IFFT[FFT\{r(n) \cdot \sqrt{w(n)}\} \cdot FFT\{s(n)\} \cdot \sqrt{w(n)}] \quad (9)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

가. 시뮬레이션 설정 파라미터

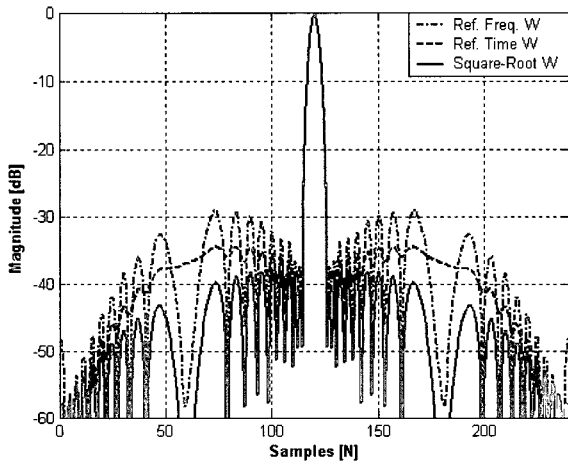
펄스압축 부엽제거 기법에 따른 성능 비교를 위한 시뮬레이션 설정 파라미터는 표 1과 같다.

LFM 신호의 펄스 압축비는 40이고, 샘플링 주파

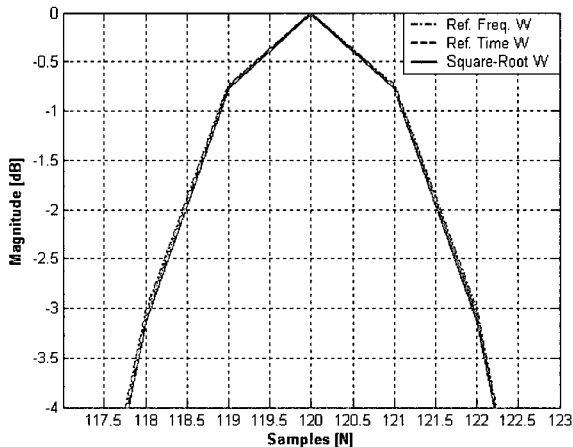
수는 30MHz이며, 가중치 함수는 일반적으로 많이 사용되는 Hamming 윈도우를 적용하였다.

[표 1] 시뮬레이션 설정 파라미터

파라미터	설정 값
샘플링 주파수	30MHz
LFM 대역폭	10MHz
LFM 펄스폭	4us
FFT 크기	256
가중치 함수	Hamming



[그림 6] 가중치 적용기법에 따른 펄스압축결과



[그림 7] 가중치 적용기법에 따른 압축 펄스폭

나. 가중치 적용기법에 따른 펄스압축 결과 부엽 제거를 위한 가중치 적용기법에 따른 펄스 압축 결과는 그림 6 및 그림 7과 같다.

표 2에서 보는 바와 같이 시간영역 제공근 가중치 적용 기법이 주엽 크기 및 펄스폭은 다른 가중치 적용 기법과 거의 동일하나, 부엽 억제 측면에서 기준 신호에 대한 주파수 영역 가중치 적용 기법에 비하여 9dB 이상, 기준 신호에 대한 시간 영역 가중치 적용 기법에 비하여 3dB 이상 성능이 더 우수함을 볼 수 있다.

[표 2] 가중치 적용기법에 따른 성능 비교

파라미터	①	②	③
주엽 크기 [dB]	36.165	36.17	36.17
부엽 크기 [dB]	-29.0	-34.2	-38.0
압축 펄스폭 [us]	0.132	0.130	0.130

※ 참고

- ① 기준신호에 대한 주파수영역 가중치 적용기법
- ② 기준신호에 대한 시간영역 가중치 적용기법
- ③ 시간영역 제공근 가중치 적용기법

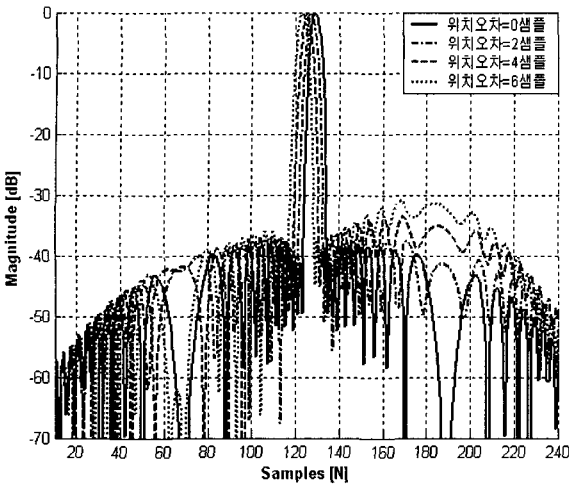
다. 시간영역 제공근 가중치 기법의 위치오차 민감도

시간영역 제공근 가중치 기법을 적용하기 위해서는 사전에 표적의 거리 정보를 알고 있어야 한다. 만약 사전에 제공되는 표적 정보가 부정확한 경우, 제공근 가중치를 반사 신호의 펄스폭에 정확히 적용할 수가 없기 때문에 부엽 크기가 상대적으로 커지게 된다.

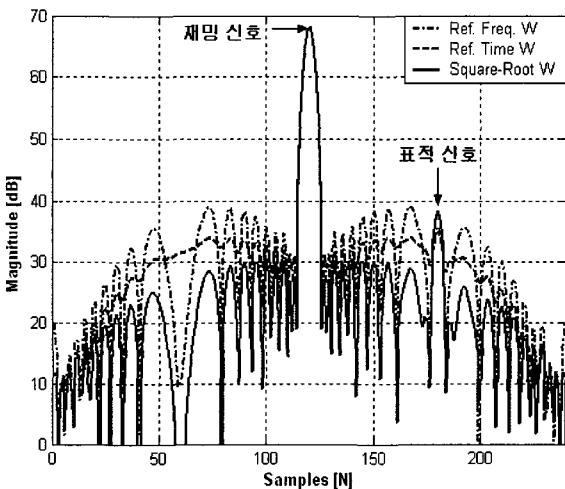
그림 8은 반사 신호와 제공근 가중치 함수간의 위치 오차에 따른 펄스 압축 결과를 보여 주고 있다. 그림 8을 통해 위치 ± 4 개 샘플($\pm 20m$)까지는 기준 신호에 대한 시간 영역 가중치 적용 기법보다 부엽 억제 성능이 더 우수함을 볼 수 있다.

라. 재밍 환경하에서 표적 신호 검출 성능

재밍 등과 같이 강한 세기의 신호가 수신 신호에 포함되면, 신호 처리기는 강한 세기의 신호를 추적하게 된다.



[그림 8] 가중치 적용 위치오차에 따른 펄스압축결과



[그림 9] 재밍 환경 하에서 펄스압축결과

그림 9는 수신 게이트에 표적 신호에 비하여 상대적으로 신호 세기가 큰 신호(32dB 차이)가 존재하는 경우의 펄스 압축 결과를 보여 주고 있다. 시간 영역 제공근 가중치 적용 기법은 신호 세기가 큰 신호에만 가중치가 적용된 결과이다. 그림 9를 통해 시간 영역 제공근 가중치 적용 기법이 기준 신호에 대한 시간 영역 및 주파수 영역 가중치 적용 기법에 비하여 표적 신호의 세기가 크고, 부엽 레벨이 작기 때문에 표적 신호 검출 가능성이 더 높음을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 LFM 신호에 대한 펄스 압축의 부엽 준위를 억제할 목적으로 탐색기 또는 추적 레이더 시스템에 적용 가능한 시간 영역 제공근 가중치 구조를 제안하였다.

기존의 시간 영역 제공근 가중치 기법은 송신 펄스 내에서 이득을 가변할 수 있는 선형 전력 증폭기가 추가적으로 필요하므로 구현하기 어려운 문제점이 있다. 그러나 탐색기 또는 추적 레이더 시스템의 경우, 사전에 추적중인 표적의 거리 정보를 획득할 수 있으므로, 수신단으로 입력되는 수신 신호 중 표적으로부터 반사되는 신호에만 시간 영역 제공근 가중치를 적용할 수 있어 송신 신호에 시간 영역 제공근 가중치를 적용하는 기법과 동일한 효과를 볼 수 있다.

표적의 사전 정보를 이용한 시간 영역 제공근 가중치 기법은 주엽 크기 및 압축 펄스폭은 기존의 기준 신호에 대한 시간 영역 및 주파수 영역 가중치 적용 기법과 거의 동일하나, 부엽 억제 측면에서 3dB 이상 더 우수한 성능을 보임을 확인하였고, 표적 사전 정보의 부정확성에 대하여 어느 정도 강인(robust)한 특성을 보이며, 재밍 등과 같이 강한 신호 성분이 존재하는 환경 하에서 표적 신호에 대한 검출 가능성이 더 높음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Nadav Levanon, and Eli Mozeson, Radar Signals, Wiley Interscience, 2004.
- [2] Mark A. Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, Mcgraw-Hill, 2005.
- [3] Peyton Z. Peebles JR., Radar Principles, Wiley Interscience, 1998.
- [4] Hu Hang, "Study of the Weighting Methods of Suppressing Sidelobe for Pulse Compression of Chirp Signal", International Conference on Micro wave and Millimeter Wave Technology Proceedings, 2004.