

레이더 펄스 압축 신호의 최적 탐색 알고리즘 개발 및 최적 코드에 관한 연구

정희원 김효준*, 이명수**, 김영기***, 송문호*

Optimal Radar Pulse Compression Processing Algorithm and the Resulting Optimal Codes for Pulse Compressed Signals

Hyo-joon Kim*, Myung-soo Lee**, Young-ki Kim***, Moon-ho Song* *Regular Members*

요 약

현대의 레이더 펄스 압축기술로 가장 널리 사용되고 있는 방식은 바커코드를 사용하여 matched filter로 레이더 신호를 처리하는 상관처리(correlation processing)이다. 그러나 이 방식의 경우 탐지 감도를 높여 주는 장점이 있지만, 환경에 따라서 range-sidelobe가 발생하여 레이더의 성능을 낮추게 된다. 본 논문에서는 상관처리방식에 추가적인 처리로 sidelobe를 제거하는 최적처리 방법을 제안하고 Doppler shift가 존재할 때의 성능을 평가한다. 그리고 제안된 알고리즘 환경에서 최적의 이진 코드를 개발하고 이를 Barker 코드를 사용한 전통적인 상관처리방식의 경우와 비교·분석한다. 도플러 변이가 존재할 때, 최적 코드를 사용하여 최적 처리하는 방식이 바커코드를 사용한 전통적인 처리방법보다 레이더의 성능을 향상시킴을 보여줄 것이다.

ABSTRACT

The most widely used radar pulse compression technique is correlation processing using Barker code. This technique enhances detection sensitivity but, unfortunately, suffers from the addition of range sidelobes which sometimes will degrade the performance of radar systems. In this paper, our proposed optimal algorithm eliminates the sidelobes at the cost of additional processing and is evaluated in the presence of Doppler shift. We then propose optimal codes with regard to the proposed algorithm and the performance is compared against the traditional correlation processing with Barker codes. The proposed processing using optimal codes will be shown to be superior over the traditional processing in the presence of Doppler shift.

Keyword : radar pulse compression, Barker code, correlation processing, optimal processing, optimal code

1. 서 론

레이더(RADAR)는 RADio Detection And Rang-ing의 약어로서, 1940년에 미해군(U.S. Navy)에서 최초로 사용하였다. 레이더는 radio wave를 이용하여 목표물의 존재 여부를 탐지하고 그것의 위치를 파악하는 기능을 갖는 장치이다. 현대의 레이더 기

술의 비약적 발전은 목표물의 종류를 분류할 수 있고 심지어 목표물의 영상까지 복원시킬 수 있게 되었다.

레이더의 기본 원리를 살펴보면 다음과 같다. 우선, 매우 짧은 시간동안 날카로운 지향성 안테나를 통해 전자기파를 송신시키면 어떤 목표물로부터의 미약한 반사파가 되돌아온다. 이때, 그 반사파를 수신하면 송신된 시간과 수신된 시간사이의 시간차를

* 고려대학교 전파공학과 멀티미디어 신호처리 연구실(hjkim@bessel.korea.ac.kr, song@kucc08.korea.ac.kr),

** 삼성전자 정보통신총괄 (myungsu@telecom.samsung.co.kr), *** 현대전자산업(주) 전자사업본부(kimyok@hei.co.kr)
논문번호 : 99475-1129, 접수일자 : 1999년 11월 29일

※ 본 연구는 학술진흥재단 자유공모과제 지원 및 고려대학교 정보통신연구소 관리로 수행되었습니다.

알게 되므로 목표물까지의 거리를 측정할 수 있다는 비교적 간단한 개념이 바로 레이더의 기본적인 원리이다.

레이더는 군사적인 목적뿐만 아니라 선박의 충돌 방지 시스템, 기상 예측, 해상 교통 조절기능 등과 같이 산업 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 현대 레이더 기술의 발전은 range는 물론 range rate의 측정도 가능하게 되었는데, 이러한 기술적 발전은 여러 산업 분야에서 도움을 주고 있다. 예를 들면, 전투기에 사용되는 레이더는 목표물 탐색 및 추적이 가능하며, synthetic-aperture radar(SAR)의 경우는 지도를 만들 수 있는 기능을 갖추고 있다.

이러한 레이더 시스템에서는 전송 펄스의 길이에 따라, 크게 두 개의 펄스, 즉 long pulse와 short pulse를 송신한다. long pulse를 송신할 경우, 평균 전력을 효과적으로 사용하여 미약한 반사파에 보상 효과를 가져옴으로써 보다 먼 거리까지 송신할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 송신부에서는 높은 첨두 전력을 만들 필요가 없으며, 펄스 반복 주파수(Pulse Repetition Frequency, PRF)를 높여서 레이더의 ambiguous range를 감소시키는 일이 없이 평균 전력을 높일 수 있다^[1]. 그러나, 여러 목표물이 혼재해 있을 경우 선명도(range resolution)가 비교적 떨어지는 단점을 지닌다. 반면에 short pulse를 전송할 경우, 선명도가 높은 장점을 지니지만, 실어 보낼 수 있는 평균 전력이 작기 때문에 먼 거리를 송신하기에 부적합하다. 펄스 압축이란 위에서 언급한 두 펄스의 장점을 극대화하고, 단점을 보완시킨 기술이다. 즉 short pulse의 선명도를 유지하면서, 원거리에 있는 목표물의 탐지에 보다 적합한 long pulse의 장점을 결합시킨 기술이다. 레이더 펄스 압축은 요구되는 선명도를 유지하면서, 목표물의 반사 에너지를 충분히 얻을 수 있다^[2,3,4,5,6,7].

레이더에서는 펄스 압축기술을 보편적으로 사용하고 있으며, 그 중 가장 널리 사용되고 있는 방식은 바커코드를 사용하여 matched filter로 레이더 신호를 처리하는 상관처리(correlation processing)이다. 그러나, 이 방식의 경우 탐지 감도를 높여 주는 장점이 있지만, range-sidelobe가 발생하여 환경에 따라 레이더의 성능을 낮추게 된다.

본 논문에서는 최적화 이론을 바탕으로 레이더 신호의 최적처리 알고리즘을 개발하고, 이것을 기존의 펄스압축방식(correlation processing)에 부가하여 range-sidelobe를 최대한 제거시켜 궁극적으로 목표물을 정확하게 탐지할 수 있는 알고리즘을 구현하

는데 그 목적을 둔다. 그리고 제안된 최적처리 알고리즘을 바탕으로 구성된 환경에서의 최적코드(optimal code)를 제시하고, 제안한 최적처리 알고리즘에서 최적코드를 사용한 경우와 기존의 상관처리 방식에서 바커코드를 사용한 경우에 대해서 비교·분석함으로써 제안한 방법의 우수성을 입증하고자 한다.

II. 최적처리 모델링

레이더 펄스 압축의 과정은 바커코드된 펄스의 전달로 시작한다. 되돌아 온 신호는 바커코드와 상관처리되고, 상관처리된 신호는 바커코드의 성질에 의해 한 chip의 range 선명도를 보존하지만 어떤 range bins에서는 불필요한 range-sidelobe가 발생한다. 레이더 펄스 압축에 관한 과정을 다음과 같이 수학적으로 모델링할 수 있다. 우선 point target으로부터 반사되어 돌아온 기저대역신호(baseband) $x \in R^{N_r}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$x = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T \quad (1)$$

식 (1)에서 “1”의 위치는 실제로 레이더의 짧은 펄스(short pulse) 폭 단위의 목표 범위, 즉, 한 개의 chip에서의 목표물 범위(target range)를 의미한다. 따라서, 송신 파형이 한 개의 펄스(one chip)일 때, x 는 목표물에서 반사되어 기저대역으로 돌아온 신호를 나타낸다. N_R 은 PRI(pulse repetition interval)에서 range bins의 수이다.

민약 바커코드된 파형을 송신할 경우, 수신부에서의 수신된 기저대역 신호는 적당한 matrix A 를 사용하면, 식 (1)의 x 값과 작용하여 $A^T x$ 형태로 표현된다. 예를 들어, 5:1 바커코드(++++)를 사용한 경우, 레이더 시스템에서 수신되는 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y = [0, \dots, 0, 1, 1, 1, -1, 1, 0, \dots, 0]^T \quad (2)$$

여기서 T는 matrix transpose를 의미한다. 이 경우에 있어서의 A 는 다음과 같이 $N_R \times M$ matrix로 정의된다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & \ddots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이때, dimension $M = N_R + N - 1$ 이고, N 은 바커코드의 길이를 의미한다. 식 (3)의 A 를 살펴보면, 5:1 바커코드를 포함한 각각의 행은 바로 이전 행의 지연된 형태를 나타내므로, 수신된 기저대역 신호에 대한 정합필터(matched filter)를 매트릭스 형태로 구현한 것이다.

다시 정리하면, 위에서 정의된 matrix A 는 상관처리 과정(correlation processing)을 실행하는 일종의 연산자로 볼 수 있다. 여기서, 연산자 A^T 는 짧은 펄스를 취해 바커코드된 파형을 생성하게 된다. 따라서, A 는 펄스 압축(pulse compression) matrix, A^T 는 펄스 확장(pulse expansion) matrix라 칭할 수 있겠다. 위에서 정의한 레이더 신호 모델은 다음과 같은 분석을 가능하게 한다. 레이더 수신기는 다양한 혼합과 필터링에 따라 $y (= A^T x)$ 와 같은 수신된 기저대역 신호의 sample들을 제공한다. 결국, 여기에서는 주어진 y 로부터 x 의 값을 회복시키는 것이 바로 본 문제이다. 이것은 잘 알려진 Least Squares Problem 으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min_{x \in R^{N_R}} \|A^T x - y\|_2^2 \tag{4}$$

만약, A 가 full-rank라고 가정하면, 위의 식 (4)에 대한 solution은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = (AA^T)^{-1}Ay \tag{5}$$

위 식(5)을 optimal solution이라고 명명한다.

각각의 행이 그것의 이전 행에 대한 지연된 형태를 가진다는 matrix A 의 구조로부터, 위와 같이 구성된 모든 matrix는 full-rank임을 알 수 있다. 따라서, optimal solution(식 5)는 x 에 대한 unique solution이 된다. 더욱이, A 가 full-rank matrix라는 사실 때문에 본 모델링에서 최종적으로 원하는 완벽한 sidelobe의 제거가 가능하게 된다.

위의 주어진 모델에서 기존의 바커코드 처리와 최적처리 과정은 다음과 같이 다시 표현 할 수 있다.

수신된 기저대역 신호를 $y (= A^T x)$ 라고 모델링했을 때, 기존의 상관 처리 과정은 다음과 같이 수식적으로 표현할 수 있다.

$$x_{corr} = A(A^T x) \tag{6}$$

한편, 최적화 처리과정의 경우는 다음과 같다.

$$x_{opt} = (AA^T)^{-1}x_{corr} \tag{7}$$

결국, 식 (6)과 (7)에서, x_{opt} 값은, 기존의 상관처리과정에서 도출된 x_{corr} 값에 $(AA^T)^{-1}$ 를 적용함으로써 계산된다.

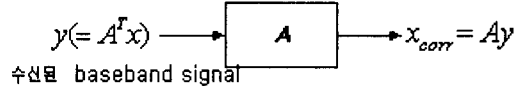


그림 1. 기존 방식에 의한 처리 과정

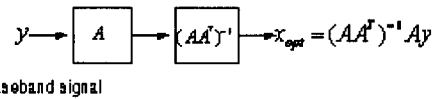


그림 2. 최적화 과정에 대한 블록 다이어그램

그림 1은 기존의 상관처리 과정을 나타낸 것이고, 그림 2는 제안한 알고리즘을 구성한 블록 다이어그램이다. 매트릭스 $(AA^T)^{-1}$ 의 궁극적인 목표는 mainlobe 값을 기존의 상관 처리과정과 같이 그 상태를 유지하면서, sidelobe를 제거하는 것이다¹⁸⁾.

III. 시뮬레이션 결과

그림 3은 노이즈가 없다는 가정하에 5:1 바커코드를 사용하여 기존의 상관처리 방식을 사용한 경우와 최적 처리 알고리즘을 사용한 경우의 각각의 출력값을 비교한 것이다. (a)는 도플러 변이가 가해지지 않은 경우, 바커코드를 사용하여 기존의 방식으로 펄스 압축을 했을 때(상관 처리 과정을 거친 후)의 출력 파형을 나타내고 있다. (b)는 기존의 상관처리 과정을 거친 후의 출력값을 최적 처리 알고리즘을 통과시켜 얻은 출력 파형이다. 두 파형을 면밀히 검토하면, 최적처리 알고리즘을 사용한 결과가 기존 방식에 비해 mainlobe 값은 유지하면서 sidelobe 값이 완전히 제거되어 신호 추적에 있어 이롭다는 것을 알 수 있다.

그림 4와 그림 5는 상관 처리 방식과 최적처리 방식의 차이를 비교하기 위해, 같은 조건하에서 시뮬레이션 결과를 함께 나타내었다. 그림 4와 그림 5에서 실선으로 그려진 파형은 기존의 상관 처리 방식을 사용했을 때를 의미하며, 점선은 최적처리 알

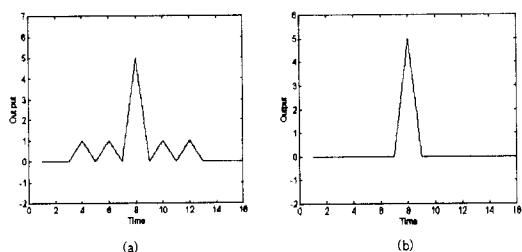


그림 3. 5:1 바커코드를 사용하여 상관처리한 것과 최적처리한 것에 대한 결과
(a) 기존의 상관처리 방식에 의한 결과
(b) 제안된 최적처리에 의한 결과

고리즘을 사용한 경우의 파형을 나타낸다. (a)와 (b)는 각각 샘플당 3도의 도플러 각도가 주어진 경우와 샘플당 5도의 도플러 각도가 주어진 조건하에서의 결과이다. 이 결과를 살펴보면 최적처리를 했을 때 sidelobe가 현저하게 줄었음을 알 수 있다.

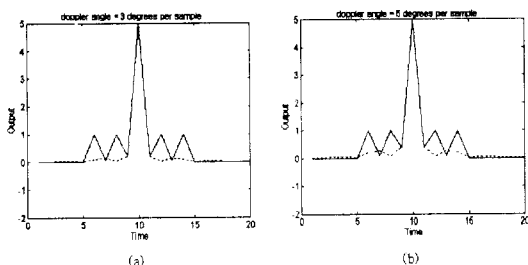


그림 4. 5:1 바커코드를 사용하여 상관처리한 것과 최적처리한 것에 대한 결과
(a) 각 샘플당 3도의 도플러 각도가 주어진 경우
(b) 각 샘플당 5도의 도플러 각도가 주어진 경우

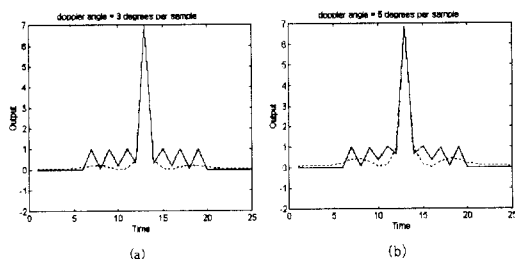


그림 5. 7:1 바커코드를 사용하여 상관처리한 것과 최적처리한 것에 대한 결과
(a) 각 샘플당 3도의 도플러 각도가 주어진 경우
(b) 각 샘플당 5도의 도플러 각도가 주어진 경우

위에서 제시한 시뮬레이션 결과를 보면, 바커코드 5:1과 7:1을 사용하여 도플러 변이가 있는 상황에 대하여 제안한 최적 처리 알고리즘이 기존의 상관 처리 방식에 비해 우수한 특성을 나타냄을 알 수

있다. 이 때, 도플러 변이가 발생하는 상황에서 두 코드에 대한 조건을 같이 설정하고 시뮬레이션을 하였다.

이상의 결과로부터 바커코드로 상관 처리를 하면 sidelobe가 불가피하게 존재하게 된다. 이것은 환경에 따라 weak target이 결국 large target의 range-sidelobe에 가리게 되어 신호 추적에서 있어서 큰 불이익을 수반한다. 그러나, 본 논문에서 제안된 최적 처리 알고리즘(매트릭스 $(AA^T)^{-1}$)을 적용함으로써, 경우에 따라 sidelobe가 완전히 제거되거나 극명하게 감소되어 신호 추적에 있어 훨씬 좋은 성능을 기대할 수 있다.

최적처리를 수행 할 때 Matrix A는 어떤 코드를 사용하더라도 full-rank를 갖게되고, 따라서 최적처리 알고리즘을 통해 sidelobe를 제거할 수 있다. 그러므로 sidelobe를 제거하기 위해 Barker code를 사용할 필요 없어진다. 그러나 도플러 변이가 존재한다면 양상은 달라지고 이러한 상황에서는 어떤 코드가 최적의 기능을 수행 할 지 알 수 없다.

따라서 본 절에서는 최적 처리 알고리즘을 사용하는 환경 하에서 최적화 코드를 개발하여 제시한다. 또한, 현재 통용화되고 있는, 바커코드를 사용하여 상관 처리하는 방식과 개발한 최적 코드를 사용하여 최적 처리를 하는 방식과의 성능 평가를 통해 후자의 우수성을 입증하고자 한다.

1. 코드길이가 5인 최적 코드

코드길이가 5인 최적코드는 $(++-++)$, $(-+++)$ 으로 두개의 코드가 동일한 성능을 나타내었다. 주어진 조건이 같을 경우, 이 두 코드들은 자기 상관 함수의 성질이 같음을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다. 이 최적 코드는 기존의 상관 처리 방식에서는 뚜렷하게 좋은 자기 상관 함수값을 가지지는 못한다. 그러나, 최적 처리 과정을 통해 mainlobe 폭이 줄어 들고 sidelobe 값이 현저히 줄어들었다.

2. 코드길이가 7인 최적 코드

코드길이가 7인 최적코드는 $(+-----)$, $(+ + - + - + +)$ 으로 두개의 코드가 동일한 성능을 나타내었다. 이것은 코드길이가 5인 경우와 마찬가지로 주어진 조건이 같을 경우, 이 두 코드들은 자기 상관 함수의 성질이 같음을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다. 이 최적 코드들 역시 기존의 상관 처리 방식에서는 뚜렷하게 좋은 자기 상관 함수값

을 가지지는 못한다. 그러나, 최적 처리 과정을 통해 mainlobe 폭이 줄어들고 sidelobe 값이 현저히 줄어드는 현상을 수반한다.

그림 6과 그림 7에서는 바커코드를 사용하여 최적 처리하는 방식과 최적 코드를 사용하여 최적 처리하는 방식사이의 성능을 비교한다. 각각의 그림에서, 실선은 바커코드를 사용한 경우이고 점선은 최적 코드를 사용한 경우를 나타낸다. 비교적 작은 도플러 변이에 대하여 두 코드의 성능 차이가 뚜렷하게 나타나지는 않는다. 그러나, 그림 6과 그림 7의 (a)와 (b)를 살펴보면, 도플러 변이(샘플당 5도, 10도)가 증가함에 따라 최적 코드를 사용할 경우, 바커코드를 사용하는 경우에 비해 mainlobe의 폭이 좀 더 줄어들고, sidelobe 값이 감소함을 알 수 있다.

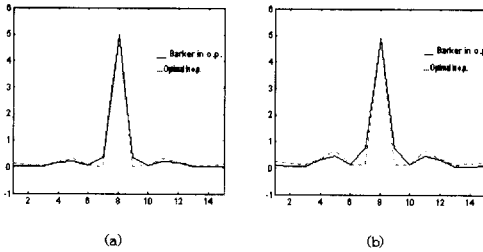


그림 6. 5:1 바커코드와 최적코드를 사용한 최적처리 결과 비교
(a) 각 샘플당 5도의 도플러 각도가 주어진 경우
(b) 각 샘플당 10도의 도플러 각도가 주어진 경우

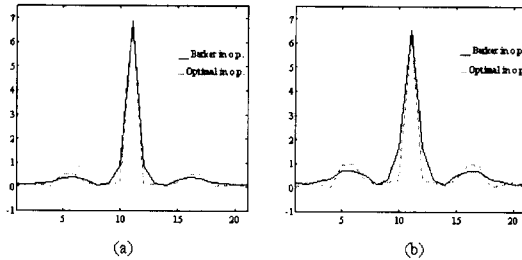


그림 7. 7:1 바커코드와 최적코드를 사용한 최적처리 결과 비교
(a) 각 샘플당 5도의 도플러 각도가 주어진 경우
(b) 각 샘플당 10도의 도플러 각도가 주어진 경우

위 결과를 정리하여 표 1에 5:1, 7:1 바커코드와 최적코드를 수록하였다. 표 1의 최적코드는 위 시뮬레이션 결과를 통해 얻은 이진코드 중에서 mainlobe 대 second-maximum의 차가 최대인 코드이다. 물론, 최적코드는 기존의 상관처리 방식에서는 뚜렷

하게 좋은 자기 상관 함수 값을 가지지는 못한다. 그러나, 도플러 현상이 존재하는 환경에서는 바커코드보다 최적코드를 사용하여 최적처리할 경우 mainlobe 폭이 줄어들고 sidelobe 값이 현저히 감소하게 되어 레이더의 성능을 향상시킨다.

표 1. 바커코드와 최적코드

코드길이	바커코드	최적코드
N=5	+++-+	++-++ (-+++-)
N=7	+++--+-	+-----+ (++-+-++)

IV. 결론

바커코드를 사용하여 matched filter로 레이더 신호를 처리하는 방식은 도플러 변이로 인해 출력값에 range-sidelobe가 발생하여 신호 탐지에 있어 적절하지 못한 성능을 나타내었다. 그러나, 본 논문에서 제안한 최적처리 알고리즘을 사용한다면 sidelobe값이 완전히 제거되거나, 현저히 감소됨을 알 수 있었다. 이것은 신호 추적에 있어 아주 중요한 의미를 가진다. multiple-target 시스템에서 자기 상관 함수상에 sidelobe가 발생하면, 어떤 경우에는 large target의 sidelobe에 weak target의 신호가 가려져, 신호 추적에 어려움을 겪게 되는 것이다. 따라서, 레이더 신호를 추적하는데 있어 상관 함수의 mainlobe 대 sidelobe의 비가 크고, 가능하면 sidelobe가 발생하지 않는 것이 매우 유리하다.

바커코드는 코드길이가 N 일 때, 자기상관 함수의 mainlobe 대 second-maxima 의 비가 N:1 을 유지하는 특성을 지닌다. 그러나, 도플러 변이가 있는 상황에서는 이러한 자기상관 함수의 성질이 변형되고, 성능이 저하됨을 시뮬레이션 결과를 통해 살펴보았다. 결국, 이러한 경우의 해결책은 자기상관함수의 range-sidelobe를 완전히 제거하거나 현저히 줄이는 것이다.

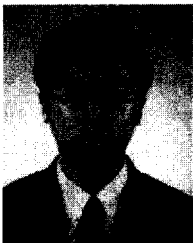
본 논문에서 가장 크게 고려한 사항은, 도플러 변이에 의한 각각의 코드들의 자기상관함수의 특성 변화, 다시말해, mainlobe 값은 줄어 들고 sidelobe 값이 상승하는 현상을 보상하기 위한 최적 처리 알고리즘의 개발에 역점을 둔 것이다. 또, 제안한 최적처리 환경하에서의 최적코드를 제시하고, 이것들

을 현재 통용되고 있는 바코드를 사용하여 상관 처리는 방식과의 비교를 시뮬레이션 결과로 나타내었다. 이 결과를 통해, 제안한 최적 처리 알고리즘에서 최적 코드를 사용하는 경우가 가장 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 李相高, 姜貞洙 共著: “레이다 工學”, 普成文化社, pp. 501, 1997
- [2] G. W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, El Segundo: Hughes Aircraft Company, pp. 217-229, 1983.
- [3] Memil I. Skolnik, *Radar Handbook*, McGraw-Hill Book, 2nd ed., 1990.
- [4] Memil I. Skolnik : “Fifty years of Radar”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 73, No. 2, pp. 182-197, Feb., 1985.
- [5] J. F. F. Kretschmer, “New radar pulse compression waveforms,” *1988 IEEE National Radar Conference*, pp. 194-199, 1988.
- [6] K. Gerlach and J. F .F. Kretschmer, “Reciprocal radar waveforms,” *IEEE AES*, vol.27, no.4, pp. 646-654, 1991.
- [7] J. F. F. Kretschmer and K.Gerlach, “Low sidelobe radar wave forms derived from orthogonal matrices,” *IEEE Trans. AES*, vol. 27, no. 1, pp. 92-101, 1991.
- [8] S. Moon-Ho Song, “Optimization of Radar Pulse Compression Processing”, *SPIE*, vol. 3066, pp. 211-216, 1997

김 효 준(Hyo-joon Kim) 준회원



1998년 8월 : 고려대학교
전파 공학과 졸업
1998년 9월 ~ 현재 : 고려대학교
전파공학과 석사과정
<주관심 분야> 전파공학, DSP
공학, 영상통신 공학

이 명 수(Myung-soo Lee) 정회원



1996년 2월 : 고려대학교
전파 공학과 졸업
1998년 2월 : 고려대학교
전파 공학과 석사
1998년 1월 ~ 현재 : 삼성전자
정보통신총괄 연구원
<주관심 분야> 통신신호처리,
DSP공학, 레이더 신호처리

김 영 기(Young-ki Kim) 준회원



1997년 2월 : 영남대학교
전기 공학과 졸업
1999년 8월 : 고려대학교
전파 공학과 석사
1999년 9월 ~ 현재 : 현대전자
(주)전장사업본부
<주관심 분야> 전파공학, DSP
공학 영상신호처리

송 문 호(S. Moon-ho Song) 정회원



1982년 6월 : M.I.T.공대
전자 공학과 졸업
1985년 6월 : UCLA대
전자공학과 석사
1991년 12월 : USC대
전자공학 박사

1982년 ~ 1983년 : 미국 Litton 산업 연구원
1983년 ~ 1991년 : 미국 Hughes 항공회사 선임연구원
1992년 ~ 1993년 : 미국 Stanford University Research Scholar
1994년 ~ 1995년 : 미국 University of California 조교수

1995년 ~ 현재 : 고려대학교 전파공학과 부교수
<주관심 분야> 영상신호처리, DSP공학, 동영상압축