

## 스마트 안테나에서 최적 공분산 행렬 연구

이 관 형\* · 송 우 영\*\* · 주 종 혁\*\*\*

### *A Study on the optimum covariance matrix to smart antenna*

Lee, Kwan Hyoung · Song, Woo Young · Joo, Jong Hyuk

#### 〈Abstract〉

This paper consider the problem of direction of arrival(DOA) estimation in the presence of multipath propagation. The sensor elements are assumed to be linear and uniformly spaced. Numerous authors have advocated the use of a beamforming preprocessor to facilitate application of high resolution direction finding algorithms. The benefits cited include reduced computation, improved performance in environments that include spatially colored noise, and enhanced resolution. Performance benefits typically have been demonstrated via specific example. The purpose of this paper is to provide an analysis of a beamspace version of the MUSIC algorithm applicable to two closely spaced emitters in diverse scenarios. Specifically, the analysis is applicable to uncorrelated far field emitters of any relative power level, confined to a known plane, and observed by an arbitrary array of directional antenna. In this paper, we researched about optimize beam forming to smart antenna system. The covariance matrix obtained using fourth order cumulant function. Simulations illustrate the performance of the techniques.

Key Words : Array Antenna, Beam forming, MUSIC, Covariance, Fourth order cumulant

## 1. 서론

레이더(RADAR: RADio Detecting And Ranging)는 안테나에서 방사된 전파신호를 이용하여 표적의 위치를 탐지하는 시스템이다[1, 2]. 표적 정보를 추정하기 위한 기술로서 빔 형성(Beam forming)기술에 대한 연구가 발전되어 왔다. 빔 형성기술은 특정한 방향으로 신호를 송

수신하며 공간적 필터링 이라고도 한다. 빔 형성기술은 안테나 배열을 이용하여 수행 될 수 있으며 배열안테나로부터 수신된 신호는 가중치(weight value)를 이용하여 신호를 처리한다[3]. 배열 안테나는 안테나 개구면이 있는 많은 위치에서 전자파를 샘플한 후 각각의 수신 소자로부터의 신호들을 복소 디지털 숫자로 변환하여 고속 디지털 처리기로 전송한다. 이 처리 과정의 최종 결과는 공간상에서 서로 다른 방향을 가지는 빔들의 집합이 된다. 디지털 빔 형성의 장점은 빔을 분리하여 제어할 수 있고 방위각에서 안테나 패턴을 형성할 수 있다는 것이

\* 국방과학연구소

\*\* 청주대학교 전자정보공학부 교수

\*\*\* 청주대학교 IT학부 산업공학전공 교수

다. 안테나 패턴은 알지 못하는 특성을 가진 방향성 방해 전파 발신기의 효과를 줄이기 위해 적응적으로 제어될 수 있다. 일반적으로 안테나의 지향성은 안테나의 전기적 길이(electrical length)를 증가시키면 향상된다[4]. 그러나, 안테나의 전기적 길이 증가는 한계가 있어, 여러 개의 안테나를 일정하게 배열시켜 각 안테나에서 방사되는 전력이 특정한 방향으로서는 보강간섭이 일어나게 하고, 다른 방향으로서는 상쇄간섭이 일어나게 하여 결국에는 원하는 방향으로 방사패턴의 지향성을 증가시키게 하는 배열안테나를 이용한다. 일반적으로 이와같은 안테나를 스마트안테나라고 한다. 스마트안테나는 간섭신호의 입사방향에 대해서는 널 패턴(null pattern)을 형성하여 일정하게 유지시킴으로써 원하는 신호만을 수신할 수 있으므로 고도의 전자전에 대비한 필수 군용 시스템이다 [5]. 본 논문에서는 스마트안테나시스템에서 최적빔을 형성하기 위하여 최적 공분산을 구하였다. 최적 공분산은 원하는 방향으로 빔을 방사하고, 신호대 잡음비를 향상시키며 클러터와 재밍신호를 제거한다. 추정알고리즘은 MUSIC알고리즘을 사용하였다. MUSIC알고리즘은 선형 배열에 일반적으로 많이 사용되며 단점으로는 배열 안테나 개수가 입사신호보다 많아야 하여 연산시간이 증가하는 단점이 있다. 장점으로는 다른 신호추정알고리즘보다 고유구조로 신호를 추정함으로써 분해능이 좋다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 적응빔형성기에 대해서 서술하고, III장에서는 목표물의 위치를 정확히 추정할 수 있는 최적공분산 알고리즘에 대해서 제안하였다. IV장에서는 모의실험을 통하여 빔패턴과 신호위상을 분석하였고, 마지막으로 V장에서는 결론을 맺었다.

## II. 적응 빔형성기

### 1.1 영점 조정 빔형성기(Null-steering)

평면파의 도래방향으로 응답 패턴에 영점을 형성하여

도래방향으로 수신하는 평면파를 제거하는데 사용한다. 단점으로는 사이드로브에서도 신호를 수신하는 문제점이 있다. 이 경우 간섭신호원의 방향에 대한 지식이 필요하며 출력 신호대잡음비를 최대화하지 않는다.

### 1.2 최적 빔형성기

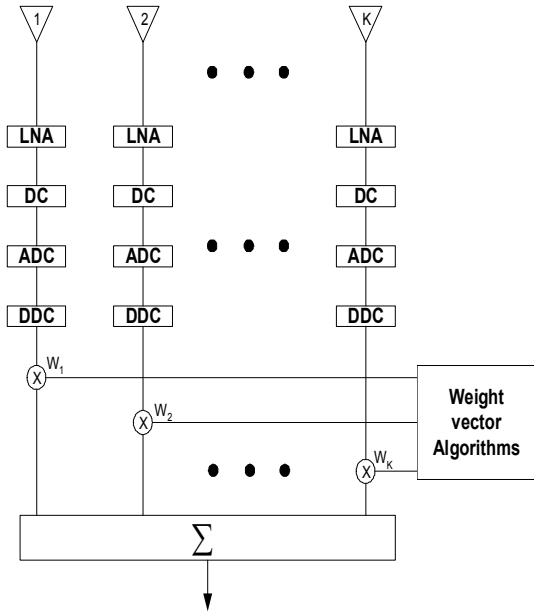
최적 빔형성기는 배열 응답벡터의 도래방향으로의 조향(steering)벡터로 주어진 응답패턴에 영점 조향비형성기의 제한점으로 극복하여 출력 신호대잡음비를 최대화시켜 최적 빔형성을 한다. 출력신호의 크기를 일정하게 유지하면서 간섭신호와 잡음신호 성분을 최소화시킴으로써 출력 신호대잡음비를 최대화 시킨다.

### 1.3 기준신호 최적 빔형성기

빔형성기의 가중치 벡터를 예측하기 위해서 이미 알고있는 기준신호를 사용하는 빔형성 방식이다. 가중치벡터를 예측하기 위해서는 배열 안테나 출력과 기준신호 사이의 에러를 최소화하는 방향으로 가중치를 구한다. 이렇게 구해진 가중치벡터는 요소 공간(element-space) 빔 형성방식과 빔 공간(beam-space) 빔형성 방식으로 구분된다. 요소 공간방식은 가중치 벡터가 배열신호 벡터와 선형결합으로 최종출력을 구하고, 빔 공간 빔형성 방식은 선형결합전에 여러개의 직교빔을 형성하는 과정을 하나더 거치게된다. 본 연구에서는 빔 공간 빔형성기에 대해서 연구한다. 위에서 설명한 최적 가중치를 구하는 세가지 기준은 서로 밀접한 관련식으로 연관되어 있으며, 특정 계산기준의 선정이 배열 안테나 시스템 성능에 미치는 영향은 그리 심각한 중요성을 지니진 않는다. 그러나 적응 가중치 벡터를 유도하기 위한 적응처리 알고리즘의 선정은 중요하다. 왜냐하면 시스템의 수렴속도와 안정도, 실시간 처리용 알고리즘구현에 요구되는 하드웨어의 복잡도를 결정하기 때문이다.

스마트안테나시스템은 <그림 1>과 같이 다수의 배열

소자안테나, 배열소자에서 출력된 값을 가중치와 곱하는 디지털 빔형성기, 적응신호 신호처리 알고리즘으로 구성된다[6].



<그림 1> 스마트 안테나 시스템

균일 선형 배열의 소자 수가  $M$ 일때, 입력벡터  $x(k)$ 는 다음과 같이 나타낸다[7, 8, 9].

$$x(t) = As(t) + N(t) \quad (1)$$

여기서,  $s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$ 는  $K$ 벡터의 신호이고,  $N(t)$ 는 평균이 0이고, 분산이  $\sigma^2 I$ 인 가우시안 잡음벡터이다.  $I$ 는  $M \times M$  단위행렬이다.

$A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_K)]$ 는  $M \times K$ 의 방향벡터로서 배열응답을 나타낸다.  $a(\theta)$ 는 조향벡터(steering vector)로서 배열안테나에 입사되는 신호를 나타낸다.

$$a(\theta_i) = [1, e^{-j\beta \cos \theta_i}, e^{-j(M-1)\beta \cos \theta_i}]^T \quad (2)$$

여기서,  $i = 1, 2, \dots, K$ 이고,  $\beta = 2\pi d/\lambda$ 이며  $d$ 는 배열

소자간의 간격이다.  $\lambda = f/c$ 이고,  $f$ 는 주파수  $c$ 는 광속이다.  $M \times M$  요소 공간 공분산행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_x = E[x(t)x^H(t)] = ASA^H + \sigma^2 I \quad (3)$$

여기서,  $S$ 는 신호공분산행렬로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = E[s(t)s(t)^H] \quad (4)$$

공분산 행렬은 고유치와 고유벡터로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_x = E_s A_s E_s^H + E_n A_n E_n^H = \sum_{j=1}^K \lambda_j e_j e_j^H + \sigma^2 \sum_{j=K+1}^M e_j e_j^H \quad (5)$$

$\lambda_j$ 는 고유치이고,  $e_j$ 는 고유벡터이다.  $\sigma^2$ 는 배열소자의 잡음전력이다. 여기서,  $E_s$ 는 신호 고유벡터의 신호부분공간이고,  $E_n$ 는 잡음부분공간이다.

빔 형성후의 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = W^H x(t) \quad (6)$$

출력 공분산 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_y = E[y(t)y^H(t)] = W^H A S A^H W + \sigma^2 W^H W \quad (7)$$

여기서 가중치가 직교성을 갖고,  $W^H W = I$ 이면 식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_y = W^H A S A^H W + \sigma^2 I \quad (8)$$

식(8)을 고유치와 고유벡터형태로 다시 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_y = E_{sD} \Delta_{SD} E_{sD}^H + \sigma^2 E_{nD} E_{nD}^H \quad (9)$$

여기서,  $E_{sD}$ 는 빔 영역 신호 고유벡터이고,  $E_{nD}$ 는 빔

영역 잡음 고유벡터이다.  $\Delta_{sD}$ 는 빔 영역 고유치 행렬이다. 빔 공간 MUSIC(MULTIPLE SIGNAL CLASSIFICATION) 알고리즘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{a(\theta)a^H(\theta)WW^H}{a(\theta)WE_{nD}E_{nD}^H W^H a^H(\theta)} \quad (10)$$

### III. 최적 공분산 행렬

본 논문에서는  $K$ 개의 신호원을  $G$ 그룹으로 분할하고,  $g$ 번째 신호원을  $K_g$  나타낸다. 이때, 각그룹의 신호원들은 독립적이다. 분할된 각 그룹의 입력벡터신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_g(t) = A_g s_g(t) + N(t), \quad 1 \leq g \leq G \quad (11)$$

여기서,  $A_g$ 는  $g$ 번째 그룹의 방향벡터이다. 그리고,  $s_g(t)$ 는  $s(t)$ 의 부벡터 신호이다. 이때 출력 신호벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \sum_{g=1}^G A_g s_g(t) + N(t) \quad (12)$$

입력의  $z_g(t)$  벡터는 식(13)과같이 정의한다.

$$z_g(t) = x_g(t) \otimes x_g^*(t) \quad (13)$$

여기서,  $\otimes$ 는 크로네커 곱(Kronecker product)이다.

$$z_g(t) = [A_g(\theta)s_g(t)] \otimes [A_g^*(\theta)s_g^*(t)] \\ = (A_g(\theta) \otimes A_g^*(\theta))(s_g(t) \otimes s_g^*(t)) \quad (14)$$

각 그룹의 공분산행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{yg} = E[z_g(t)z_g^H(t)] \\ = A_g S_g A_g^H + \sigma^2 I \quad (15)$$

$$A_g = (A_g \otimes A_g^*) \quad (16)$$

$$A_g^H = (A_g \otimes A_g^*)^H \quad (17)$$

$$S_g = E[(s_g(t) \otimes s_g^*(t))(s_g(t) \otimes s_g^*(t))^H] \\ - E[s_g(t) \otimes s_g^*(t)] \cdot E[s_g(t) \otimes s_g^*(t)]^H \\ - E[s_g(t)s_g^H(t)] \otimes E[s_g(t)s_g^H(t)] \quad (18)$$

여기서,  $s_g$ 는 4차누적함수를 적용하였다. 이때, 전체 신호 공분산 행렬을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

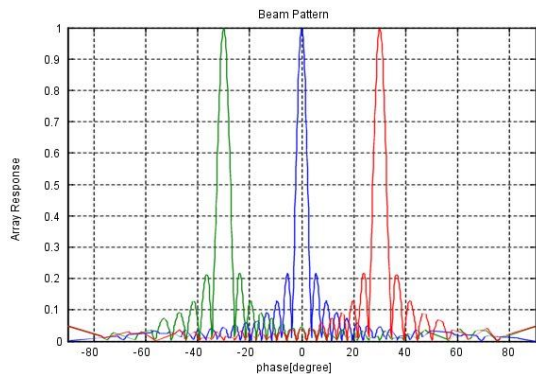
$$R_y = \sum_{g=1}^G R_{yg} \quad (19)$$

### IV. 시스템 성능분석

본 장에서는 위상변화에 따른 빔 패턴을 모의실험 하였다. 본 논문의 실험 파라미터 값은 다음과 같다. 안테나 개수 16개, 신호대 잡음비 20dB, 신호상관성이 60% 존재할 때 3개의 신호가 배열안테나에 입사조건하에서 모의 실험을 하였다. 그림2는 목표물 신호의 도래방향을 정확히 추정하여 원하는 방향으로 빔을 방사한 빔 패턴이다. 본 논문에서 제안된 공분산값을 이용하여 수신신호에 최적의 가중치를 곱하여 재밍과 클러터 신호를 제거한 후 목표방향으로 신호를 방사하는 패턴을 나타내었다. 그림2는 입사신호의 방향이  $0^\circ$ 와  $\pm 30^\circ$ 에서 방사한 빔을 나타내었다. 정확히 3개의 빔이 각각  $0^\circ, \pm 30^\circ$ 에서 방사하는 것을 입증하였다. 그림 3은 그림2를 로그형태로 변화시켜 나타낸 그래프이다. 그림3에서도 그림2와 같이 입사신호가  $0^\circ, \pm 30^\circ$ 에서 정확히 빔 패턴이 나타나는 것을 입증하였다. 더욱더 좋은 성능을 나타내기 위해서는 다음과 같은 방법이 있다. 첫 번째 배열 안테나 개수를 증가시키면 성능이 더욱더 향상되지만 비용이나 크기에 제한을 받게되어 효율적이지 못하다. 두 번째로 스냅샷을 증가 시키면 되는데 이는 MUSIC알고리즘의 단점인 처리시간이 증가되 실시간에 부적합하다.

## V. 결론

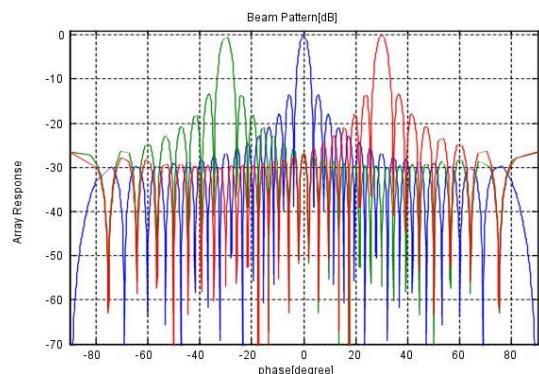
본 논문에서는 스마트 안테나 시스템에서 최적의 공분산 행렬을 구하여 최적 빔 형성을 연구하였다. 공분산행렬은 4 차누적합수를 이용하여 구하였다. 전체 신호 공분산 행렬을 빔 공간 MUSIC알고리즘에 적용하여 빔 패턴을 분석하였다. 일반적인 디지털 빔 형성은 배열 안테나, 수신기 모듈, 아날로그-디지털 변환기, 디지털 빔형성기 등으로 구성되어 있다. 본 논문에서 제안 빔 패턴은 알지 못하는 특성을 가진 방향성 방해 전파 발신기의 효과를 줄이기 위해 적응적으로 제어될 수 있다. 방해 전파 발신기 억제에 포함된 가중치 제어 법칙은 상당히 복잡하고 디지털 형태로만 효과적으로 구현될 수 있다. Null의 깊이는 안테나 소자와 수신기 채널에서 진폭과 위상 오차에 의해 영향을 받지 않는데 그것은 디지털 빔 형성에서 구현된 교정기법에 의해 보상될 수 있기 때문이다. 배열 안테나 이득 함수를 고려한 보정된 신호는 조준선(boresight)에서 멀어 질수록 부엽의 크기가 작아지고 이득이 감소한다. 만약, 수신기의 이동이 빈번한 경우에는 빔 형성한 후 신호 처리하여 빔을 고각방향으로 조향할 경우에는 빔을 최적화하기가 매우 어려운 단점이 있다. 빔 형성에서 수신 빔 회전으로 인하여 신호 좌표계가 정현공간기준일 경우 빔 폭 및 빔 간격이 변화된다. 이것은 정현공간 기준각도를 활용하기 위해서는 안테나 좌표계로 다시 원위치로 돌려놓고 처리해야 하는 단점이 있다. 향후 이 부분에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.



<그림 2> 스마트 안테나 빔 패턴

## 참고문헌

- [1] 이명호 · 송우영 · 주종혁, "FFT를 적용한 다중빔의 고도각추정에 관한 연구," 한국정보기술학회, 한국정보기술학회논문지 제6권 제3호, 2008, pp. 156-161.
- [2] Merrill. Skolnik, "Introduction to Radar Systems" McGraw-Hill Publishing, 2000.
- [3] 송우영 · 이명호 · 주종혁, "적응배열 안테나에서 빔 조향알고리즘을 적용한 다중빔 패턴", 한국정보기술학회, 한국정보기술학회논문지 제6권 제4호, 2008, pp. 60-65.
- [4] 주종혁 · 이명호, "적응배열 레이더 시스템에서 최적 가중치 방법에 대한 연구", 한국정보기술학회, 한국정보기술학회논문지 제6권 제5호, 49-54, 2008, pp.49-54.
- [5] 주종혁 · 송우영, "목표물 추정에서 빔 패턴 보정에 관한 연구", 한국정보기술학회, 한국정보기술학회 논문지 제7권제1호, 2009, pp. 273-278.
- [6] 송우영 · 주종혁, "신호 입사각 추정을 위한 재밍 제거에 대한 연구", 한국정보기술학회, 한국정보기술학회논문지, 제7권 제1호, 2009, pp. 113-118.
- [7] Boaz Porat, Benjamin Friedlander, "Direction Finding Algorithms Based on High-Order Statistics", IEEE TRANS ON SIGNAL PROCESSING, Vol. 39, No. 9, 1991, pp. 2016-2024.



<그림 3> 로그스케일 스마트 안테나 빔 패턴

- [8] Y.H.Choi, "Subspace-based coherent source localization with forward/backward covariance matrices", IEE Proc-Radar Sonar Navig, Vol. 149, No. 3, 2002, pp. 145-151.
- [9] Benjamin Friedlander, "A Subspace Method for Space Time Adaptive Processing", IEEE TRANS ON SIGNAL PROCESSING, Vol. 53, No. 1, 2005, pp. 74-82.

논문접수일 : 2009년 2월 5일
수정일 : 2009년 월 일
게재확정일 : 2009년 3월 3일

■ 저자소개 ■



이 관 형  
Lee, Kwan Hyung

2005년 3월~현재  
국방과학연구소 선임연구원  
2004년 8월 청주대학교 전자공학과(공학박사)  
1996년 8월 청주대학교 전자공학과(공학석사)  
1994년 2월 청주대학교 전자공학과(공학사)  
관심분야 : 무선통신, 레이더, 이동통신  
E-mail : khlee368@empal.com



송 우 영  
Song, Woo Young

1982년 3월~현재  
청주대학교 전자정보공학부 교수  
1988년 2월 연세대학교 전자공학과(공학박사)  
1981년 2월 연세대학교 전자공학과(공학석사)  
1977년 2월 연세대학교 전자통신과(공학사)  
관심분야 : 안테나, 초고루자공학, 무선통신  
E-mail : microwave@cju.ac.kr



주 종 혁  
Joo, Jong Hyuk

1995년 3월~현재  
청주대학교 산업공학과 교수  
1994년 8월 서울대학교 산업공학과(공학박사)  
1991년 2월 서울대학교 산업공학과(공학석사)  
1989년 2월 청주대학교 전자공학과(공학사)  
관심분야 : 유비쿼터스 컴퓨팅, 시스템 최적화,  
E-mail : jonghyuk@cj.ac.kr