

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.2.143>

JIIBC 2013-2-19

# 무선 시스템에서 가중치 오차 보정 알고리즘과 SVD를 이용한 다중 빔 조향에 대한 연구

## A Study on Multi Beam Steering using Weight Error Compensation Algorithm and SVD in Wireless System

이관형\*, 송우영\*\*, 이명호\*\*

Kwan-Hyeong Lee, Woo-Young Song, Myeong-Ho Lee

**요약** 본 논문에서는 무선 시스템에서 목표물 도래방향 추정에 대한 다중 빔에 대해서 연구한다. 빔 조향 방법은 고각 방향의 빔 조향 방식 또는 빔 형성 방식, 스택 빔 조향, 주파수 조향, 위상 조향 및 디지털 빔 형성 등으로 구분 된다. 제안된 알고리즘은 효과적인 빔 조향을 하기위해서 위상과 크기를 보정하는 안테나 가중치 오차 보정기법과 특이 행렬을 결합한 방법이다. 본 논문에서는 빔 조향 추정 알고리즘을 제안하여 디지털 빔 형성 레이더에 빔조향 방식을 적용하여 목표물을 추정하였다. 모의실험을 통해서 본 연구에서 제안된 알고리즘의 성능을 기존 알고리즘과 비교 분석하였다. 목표물 도래방향 추정에서 본 연구에서 제안한 알고리즘이 기존 알고리즘보다 도래방향 추정 능력이 향상된 것을 입증하였다.

**Abstract** This paper study about multi-beam for detection of arrival estimation in wireless system. estimate a direction of arrival of target in multi input-output array antennas system. Beam steering method are divided by beam steering method of elevation angle or beam forming method, stack beam steering, frequency steering, phase steering radar and digital beam forming radar. Proposed algorithm is combined SVD method and antenna weight error compensation method with phase and amplitude compensation to effectivity beam steering. Through simulation, we were analysis of performance that general algorithm and proposed target estimation algorithm in this paper. It was proved to improved proposal algorithm than general algorithm in target direction of arrival estimation.

**Key Words** : Multi Beam, Beam Steering, DOA, Array antenna, Antenna Weight

### 1. 서론

목표물 방향 추정은 전자파를 이용하여 물체에서 반사된 신호를 탐지하고 위치를 추정하는 시스템이다. 목표물 추정에 대한 응용 시스템은 레이더에서 많이 사용

된다. 레이더는 목표물의 위치에 대한 정보를 정확히 나타내어야 한다. 목표물의 정보를 추정하기 위해서 레이더에 적용되는 기술은 다양한 방식이 있으며 지금까지 많은 연구가 되어왔다. 목표물을 추정하기위해 초기에 적용된 방법은 지표면 반사로 형성되는 다중경로 널 현

\*정회원, 대전대학교 통신공학과

\*\*정회원, 청주대학교 전자공학과

접수일자 : 2012년 10월 18일, 수정완료 : 2013년 2월 15일

게재확정일자 : 2013년 4월 12일

Received: 18 October 2012 / Revised: 15 February 2013 /

Accepted: 12 April 2013

\*Corresponding Author: khlee@daejin.ac.kr

Dept. of Communication Engineering, Daejin University, Korea

상을 이용하는 방식과 기계적으로 빔을 조향하는 방식이 연구되었다<sup>[1]</sup>. 그리고 접시형안테나를 사용하는 원뿔조향(conical scanning)방식 채택으로 표적을 안테나 중심에 있도록 이격 오차신호를 감소시키는 방법이 연구되었다<sup>[2]</sup>. 이러한 기술이 더욱 발전하여 현재는 대부분 다중 입력 다중출력 배열 안테나 시스템을 적용하여 송신시 직교과형을 송신하고, 목표물에 의해서 반사된 신호는 다중 안테나에 수신된다. 다중입력 다중출력 배열 안테나 시스템은 두 가지로 분류된다. 첫 번째는 분산 다중입력 다중출력 배열 안테나 시스템이다<sup>[3,4]</sup>. 모든 송신 배열 안테나 소자는 넓게 배치되고 목표물을 찾는 여러 방향으로 독립적인 신호를 방사한다. 수신기에서는 목표물에 의해서 반사된 신호의 성분을 정합필터에 의해서 원하는 성분을 추출한다. 두 번째 다중입력 다중출력 레이더는 송수기가신기와 수신기의 배열 소자가 같은 위치에 있다. 그리고 신호 합성과 송신 빔 패턴의 설계를 유연하게 할 수 있어 다중 목표물 추정을 항상 시킬 수 있으며 추정 목표물의 개수를 증가할 수 있다<sup>[5,6]</sup>. 또한 넓은 배열 개구면과 협대역 빔이면 고 분해능 공간 스펙트럼 추정을 얻을 수 있다. 또 다른 방법으로 모노펄스를 이용하여 다중 빔을 형성하여 목표물을 추정하는 방법이다.

효과적인 디지털 빔 형성을 위해서는 수신 신호를 보정합해야 한다. 만약, 안테나 소자에 수신되는 많은 신호들에 대한 보정을 하지 않으면 위상이 정확하지 않아서 시스템 성능이 크게 감소된다. 이러한 안테나 신호의 오차보정이 디지털 빔 형성알고리즘이 수행 되기전에 수정 가중치들을 곱함으로써 보정 될 수 있다.

본 논문에서는 목표물을 추정하기 위해서 안테나 가중치 오차 보정 방법과 SVD 방법을 결합한 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 안테나 가중치 오차 보정 방법에 대해서 기술하였고, III장에서는 목표물 추정을 위한 II장에서의 방향을 추정하기 위하여 SVD방법을 나타내었다. IV장에서는 모의실험을 통하여 목표물 추정 신호를 나타내었고, 마지막으로 V장에서는 결론을 맺었다.

## II. 안테나 가중치 오차 보정신호

그림 1은 본 연구에서 적용한 배열 안테나 시스템이다.

수신신호의 응답 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[7,8,9]</sup>.

$$\epsilon(f) = \begin{bmatrix} a_1(f)e^{j\phi_1(f)} \\ a_2(f)e^{j\phi_2(f)} \\ \vdots \\ a_N(f)e^{j\phi_N(f)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_1(f) \\ \epsilon_2(f) \\ \vdots \\ \epsilon_N(f) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $a_N$ 은 진폭,  $\phi_N$ 은 위상,  $f$ 는 중심주파수,  $N$  배열 안테나 소자 수 이다. 채널의 응답진폭이 1이고 위상이 0인 기준채널로 설정하면 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon(f) = \begin{bmatrix} 1 \\ \epsilon_2(f) \\ \vdots \\ \epsilon_N(f) \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)와같이 수정된 안테나 출력 값은 수정되지 않은 안테나 출력 값을 식(3)과 같이 대각행렬로 곱함으로써 구해진다.

$$z(f) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \epsilon_2(f)^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \epsilon_N(f)^{-1} \end{bmatrix} z_0(f) \quad (3)$$

여기서,  $z_o(f)$ 는 수정되지 않은 채널의 출력값이고,  $z(f)$ 는 수정된 채널들의 값이다.

$$\epsilon_N(f)^{-1} = 1/a_N(f) \cdot e^{-j\phi_N(f)} \quad (4)$$

안테나 소자들 간의 경로차이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta(\theta) = d \sin(\theta) \quad (5)$$

여기서  $d$ 는 안테나 소자 간격이고, 근접한 소자들간의 입사파의 위상차이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi(f, \theta) = \frac{-2\pi f d \sin(\theta)}{c} \quad (6)$$

서로 다른 안테나 소자에 입사되는 신호의 크기는 같고, 채널의 위상과 크기가 보정된 신호의 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_1(f, \theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j\psi} \begin{bmatrix} e^{-j \frac{2\pi f d \sin(\theta)}{c}} \\ e^{-2j \frac{2\pi f d \sin(\theta)}{c}} \\ \vdots \\ e^{-Nj \frac{2\pi f d \sin(\theta)}{c}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,  $\psi$ 는 신호의 절대위상을 나타낸다. 배열 안테나의 이득 패턴은 조향 각도에 대해 감소되므로, 안테나 소자의 이득함수 영향을 고려한 보정된 신호는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$z_2(f, \theta) = \frac{[\cos(\theta)]^{0.5}}{\sqrt{N}} e^{-j\psi} \begin{bmatrix} e^{-j \frac{2\pi f d \sin(\theta)}{c}} \\ e^{-2j \frac{2\pi f d \sin(\theta)}{c}} \\ \vdots \\ e^{-Nj \frac{2\pi f d \sin(\theta)}{c}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

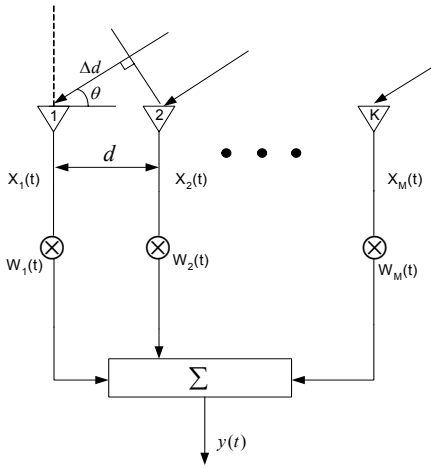


그림 1. 배열 안테나 시스템  
Fig. 1. Array Antenna system

### III. 다중 빔 도래 방향 추정 알고리즘

본 장에서는 다중입력 다중출력 배열 안테나 시스템을 이용한 목표물의 도래방향 추정 알고리즘을 제안한다. 식

(8)의 안테나 보정 신호 위상을 계산하기위해서 상관행렬의 특이 값 분해(SVD: singular value decomposition)를 사용한다. 안테나에 수신되는 신호의 표현은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[10,11]</sup>.

$$X_1 = [x_1, x_2, \dots, x_{L-1}] = A S_1 + N_1 \quad (9)$$

여기서  $L$ 은 스냅샷 수 이다.

$$S_1 = [s_1, s_2, \dots, s_{L-1}] \quad (10)$$

$$N_1 = [n_1, n_2, \dots, n_{L-1}] \quad (11)$$

이때  $s_2$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_2 = \aleph S_1 \quad (12)$$

$$\aleph = \text{diag}[e^{j2\pi f_1}, e^{j2\pi f_2}, \dots, e^{j2\pi f_p}] \quad (13)$$

여기서,  $\text{diag}[\cdot]$ 는 대각행렬(diagonal matrix)이다.

$$X_2 = A \aleph S_1 + N_2 \quad (14)$$

$X_2$  상호상관행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{21} = E[X_2 X_1^H] = A \aleph R_s A^H \quad (15)$$

$$R_s = E[S_1 S_1^H] \quad (16)$$

여기서  $R_s$ 는 신호 상관행렬,  $[\cdot]^H$ 는 복소 공액 전치 행렬,  $E[\cdot]$ 는 기댓값 이다. 두 행렬에서 상호 상관 행렬을 분리시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{21,1} = A \aleph R_s A_1^H \quad (17)$$

$$R_{21,2} = A \aleph R_s A_2^H \quad (18)$$

여기서,  $A_1$ 과  $A_2$ 는  $A$  배열 응답 행렬의 첫 번째 행과 마지막  $M(N-1)$  행을 나타낸다. 이때  $A_2$ 를 다시 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_2 = \xi A_1 \quad (19)$$

$$\xi = \text{diag}[\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_p] \quad (20)$$

여기서  $\gamma_1 = \exp(j2\pi d_r \sin\theta_1)/\lambda$  이다. 식(17)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{21,2} = A \aleph R_s \xi^H A_1^H \quad (21)$$

$R_{21,1}$ 과  $R_{21,2}$ 에 의한  $2M(N-1) \times MN$ 의 새로운 행렬을 생성한다.

$$R = \begin{bmatrix} R_{21,1}^H \\ R_{21,2}^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_1 \xi \end{bmatrix} R_S^H \aleph^H A^H \quad (22)$$

상관행렬의 SVD(singular value decomposition)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = [U_1 \ U_2] \begin{bmatrix} \sum 0 \\ 0 \end{bmatrix} V^H \quad (23)$$

$$U_1 = [u_1, u_2, \dots, \mu_p] \quad (24)$$

$$U_2 = [u_{p+1}, u_{p+2}, \dots, \mu_{2M(N-1)}] \quad (25)$$

$U_1$ 이 신호 부공간이 존재한다면, 도래방향 추정에서 다중 입력출력 배열의 부공간 방법을 사용할 수 있다. 여기서  $U_{11}$ 과  $U_{12}$ 의 두 개의  $M(N-1) \times P$  행렬에서  $U_1$ 을 분해하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_1 = \begin{bmatrix} U_{11} \\ U_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_1 \xi \end{bmatrix} T \quad (26)$$

식(26)에서  $U_{11} = A_1 T$ ,  $U_{12} = A_1 \xi T$ 으로 표현될 수 있으며  $U_{12}$ 을 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$U_{12} = U_{11} T^{-1} \xi T \quad (27)$$

$$U_{11}^* U_{12} = T^{-1} \xi T \quad (28)$$

$\xi$  행렬의 대각 요소 도래방향 추정은  $U_{11}^* U_{12}$ 의 고유치  $\gamma_p$ 에 의해서 구할 수 있다. 그러므로 목표물에 대한 도래방향 추정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \sin^{-1} \left[ \frac{\arg(\gamma_p) \lambda}{2\pi d_r} \right] \quad (29)$$

## IV. 모 의 실험

본 장에서는 네 개의 목표물에 대한 도래방향을 추정하기 위해서 본 연구에서 제안한 알고리즘과 기존의 도래방향 알고리즘을 비교 분석 한다. 본 연구에서 제안한 방법은 안테나 가중치 오차 보정 방법과 SVD를 결합한 방법이다. 모의실험에서 기존의 도래방향 알고리즘은 ESPRIT알고리즘을 사용하였고 송신과 수신을 같은 위치에서 사용하는 다중입력 다중출력 배열 안테나 시스템을 고려하였다. 송신 안테나 소자와 수신 안테나 소자는 각각 9개, 각 배열 소자간의 거리는 반 파장으로 하였다. 그림 2는 4개의 목표물이[0o,30o,50o, 60o]에 있을 때 본 연구에서 제안한 안테나 가중치 오차 보정 방법과 SVD를 적용한 방법으로 목표물을 추정한 그래프이다. [0o,30o,50o,60o]에서 정확히 빔을 조향하고 있다. 그림 3은 신호대 잡음비를 변화해가면서 다중입력 다중출력 배열 안테나 시스템에서 ESPRIT 알고리즘과 제안 알고리즘의 도래 방향 추정 정확도를 나타내었다. 신호대 잡음비를 변화시키면서 ESPRIT 알고리즘과 제안 알고리즘을 분석한 결과 본 연구에서 제안한 알고리즘의 도래방향 추정정확률이 향상되었음을 나타내고 있다. 신호대 잡음비가 10dB일 때 제안 알고리즘의 평균추정 정확률은 약  $10^{-2.9}$ 이고, ESPRIT알고리즘의 평균 추정 정확률은  $10^{-2.3}$ 으로 본 연구에서 제안한 방법이 우수함을 나타내었다.

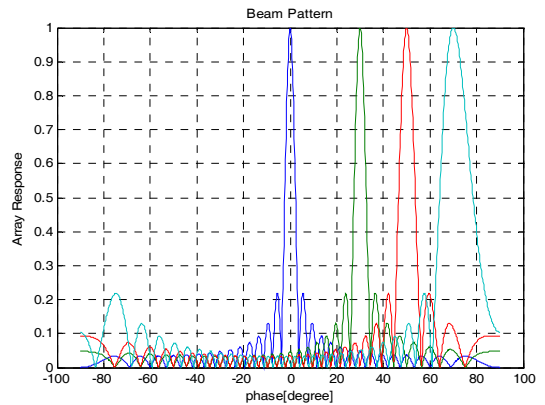


그림 2. 목표물 도래방향 추정 빔 패턴  
Fig. 2. Target DOA estimation Beam pattern

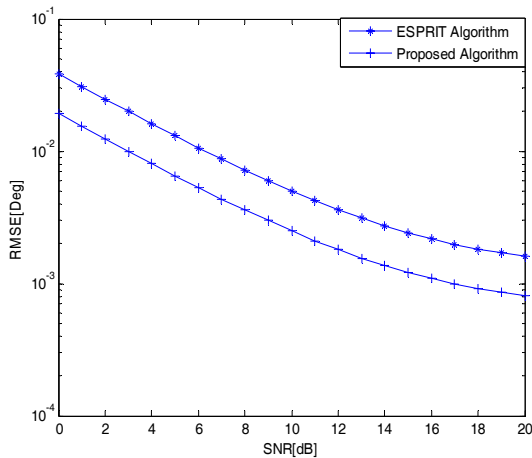


그림 3. 도래방향 추정 평균 확률  
Fig. 3. DOA estimation of Mean Probability

### V. 결론

본 논문에서는 다중입력 다중출력 배열 안테나 시스템에서 안테나 가중치 오차 보정 방법과 SVD 방법을 사용하여 목표물에 대한 도래방향을 추정하였다. 그림1에서 수신 빔 패턴에서 부엽준위상의 높이 상호 일치됨을 확인하였다. 그러나 사용 주파수가 높아지면 배열 안테나의 간격이 좁아져 전체 빔 조향 범위가 감소한다. 그리고 안테나 가중치 오차 보정에서 배열 안테나 이득 합수를 고려한 보정된 신호는 조준선(boresight)에서 멀어 질수록 부엽의 크기가 작아지고 이득이 감소한다. 이와같은 부분은 보정의 질적인 문제(calibration quality), 채널분리(channel isolation-low cross-talk)가 고려되어야 한다.

도래방향 추정 확률에서, 본 연구에서는 신호 부 공간 행렬을 나타내기 위해서 특이 값 분해 방법을 사용하였다. ESPRIT 알고리즘은 고유벡터의 부공간과 회전한 다른 고유벡터 부공간을 계산하여 목표물의 도래방향을 추정하기 때문에 계산량이 증가하는 한다. 그러나 본 연구에서 제안한 알고리즘은 회전행렬과 고유벡터 부공간을 계산하지않기 때문에 ESPRIT 알고리즘에 비해서 계산량이 감소하고 목표물 평균 추정확률이 향상되었다.

### 참고 문헌

[1] Merrill. Skolnik, "Radar Handbook", McGraw - Hill

Publishing Co, N.Y, 1990.

[2] Cantrell B. Willwerth F., Leibowitz L. and Parris C. "Development of Digital Array Radar", IEEE AESS System Magazine, pp.22-27, Mar.2002.

[3] Kwan Hyeong Lee, "A Study on the Target Incident Signal Estimation Technique of Spatial Spectrum in Wireless Network System", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vo. 8, No. 4, pp. 49-54, Apr, 2010

[4] E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum, L. Cimini, D. Chizhik, and R. Valenzuela, "Spatial diversity in radars-Models and detection performance", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 54, No.1, pp. 823-838, March 2006.

[5] J. Li, P. Stoica, and X. Zheng, "Signal synthesis and receiver design for MIMO radar imaging", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 56 No. 1, pp. 3959-3968, Aug. 2008.

[6] C. Chen and P. Vaidyanathan, "MIMO radar space-time adaptive processing using prolate spheroidal wave functions", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 56, No. 3, pp. 623-635, Feb. 2008.

[7] Kwan Hyeong Lee, "A Study on the Decrease Estimation time using Covariance Vector Sparse Matrix", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vo. 10, No. 6, pp. 39-44, Jun, 2012

[8] Kwan Hyeong Lee, "A Study on the Multi Target Position Estimation using Multi Input Multi Output Array Antenna System and 2D MUSIC Algorithm", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vo. 10, No. 4, pp. 64-70, April, 2012

[9] David K. Barton, Modern Radar System Analysis, Artech House, Inc, Norwood.

[10] K. Forsythe and D. Bliss, "Waveform correlation and optimization issue for MIMO radar", Proc. of the 39th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, pp. 1306-1310, March 2005.

[11] L. Xu and J. Li, "Iterative generalized-likelihood ratio test for MIMO Radar", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 55, No. 2, pp. 2375-2385, June 2007.

저자 소개

이 관 형(정회원)



- 1998년 3월 ~ 2004년 8월 : 강릉영동 대학정보통신과 조교수
  - 2007년 3월 ~ 2010년 2월 : 국방과학 연구소
  - 2010년 3월 ~ 현재 : 대진대학교 통신 공학과 조교수
- <관심분야 : 무선통신, 통신시스템>

• E-mail : khlee@daejin.ac.kr

송 우 영(정회원)



- 1977년 2월 : 연세대학교 전자통신과 (공학사)
- 1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1982년 3월 ~ 현재 : 청주대학교 전자 공학과 교수

<관심분야 : 안테나, 초고주파>

• E-mail : microwave@cju.ac.kr

이 명 호(정회원)



- 1979년 2월 : 과운대학교 전자통신과 (공학사)
- 1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1991년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1984년 3월 ~ 현재 : 청주대학교 전자공학과 교수

<관심분야 : 데이터통신, 위성통신>

• E-mail : himmel@cju.ac.kr