

결함소자를 갖는 어레이를 위한 방향 탐지 기법에 관한 연구

A Study on Direction Finding Technique for Array with Faulty Elements

김 기 만*, 윤 대 희**, 차 일 환**

(Ki-Man Kim*, Dae-Hee Youn**, Il-Whan Cha**)

※본 연구는 1995년도 학술진흥재단 신진연구인력 연구장려금 지원에 의해 수행되었습니다.

요 약

이 논문에서는 선형 어레이로 구성된 방향 탐지 시스템에서 결함 소자가 발생하였을 경우 발생하는 문제점들을 제시하고, 시스템의 성능을 개선하기 위한 방법을 제안하였다. 여기서 결함 소자란 센서의 출력이 없거나 정상적으로 동작하는 센서에 비해 그 이득이 크게 감소되어 미세한 출력을 얻는 현상을 의미한다. 결함 소자 발생시에 기존의 방향 탐지 방법들의 성능은 크게 저하된다. 제안된 방법에서는 제한 조건을 만족하면서 공간 스펙트럼 값을 최대화하는 방향으로 보정 벡터값을 구하며, 이 보정 벡터를 이용하여 개선된 성능을 갖는 공간 스펙트럼을 얻는다. 제안된 방법의 성능을 고찰하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며 기존의 결함 소자 문제 해결 방법중의 하나인 부분 처리 방법과 비교하였다.

ABSTRACT

In this paper, some problems that occur from faulty elements in a direction finding system composed of the linear array are studied and the method which improves the performance is proposed. The faulty element means the sensor that has no output or highly reduced gain than other normal sensors. In the case of the presence of faulty elements, the performance of the conventional direction finding methods is degraded. In the proposed method, the correcting vector is calculated by maximizing the spatial spectrum subject to a constraint. The corrected spatial spectrum is obtained by this vector. The computer simulations have been performed to study the performance of the proposed method. We have compared the proposed method with the subaperture processing method of one of the previous works.

1. 서 론

어레이 신호처리 기법 가운데 방향 탐지(direction finding) 분야는 그동안 많은 연구가 이루어져 왔다[1]. 그 결과 고 분해 능력을 갖는 방법들이 제안되었고, 각 방법들에 대한 성능 분석이 이루어졌다[2, 3, 4, 5]. 그러나 대부분의 경우 이상적인 주변 환경을 가정하고 전개되었기 때문에 실제적인 경우와 이론치는 상당한 오차가 발생하였고, 이 오차로 인해 방향 탐지기의 성능이 크게 저하되었다. 이러한 오차의 원인으로는 입사되는 신호 사이에 상관 관계가 존재하는 coherent 문제, 어레이내의 전방향성(omnidirectional) 센서들이 정해진 위치를 벗어나는 random error와 센서중 일부가 충격으로 인해 정상적인

동작을 하지 못하는 경우가 있다. 이중 coherent 문제를 해결하기 위해서 공간 스무딩(spatial smoothing)[6]과 같은 방법들이 제안되었고, random error 문제 해결을 위하여 보정 방법[7], 평균화 방법[8, 9]등이 제안되었다. 그러나 결함 소자 문제를 해결하기 위한 방법은 아직 미미한 상태이다. 결함 소자란 여러 원인으로 인해 센서가 출력을 나타내지 않거나 센서가 가정된 방향성을 크게 벗어난 경우를 말한다. Ramsdale등은 결함 소자를 제외한 나머지 정상적으로 동작하는 소자들 가운데 연속적으로 구성되는 집합으로 부어레이를 만들어 계산하는 방법을 제안하였다[10]. 그러나 이 방법은 부어레이를 사용함으로써 결국 어레이의 aperture size를 감소시키는 단점을 갖고 있다. 또한 공간 스펙트럼을 계산하는 과정에서 센서 출력의 자기 상관 행렬을 요구하는 경우 이 행렬의 toeplitz 특성을 이용하여 성능을 개선할 수 있다[8]. 그러나 이 방법 역시 공간 스펙트럼상의 일관성이 결여되는 단점을 지니고 있다.

* 한국해양대학교 전파공학과

** 연세대학교 전자공학과

접수일자: 1997년 3월 14일

이 논문에서는 먼저 일부 센서가 결함일 경우 방향 탐지 시스템에 미치는 영향을 고찰한다. 이를 위해 기존의 대표적인 방향 탐지 방법들이 결함 소자가 존재하는 어레이에서 어떻게 동작하는지 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 알아본다. 그리고 이러한 문제를 해결하기 위한 방법을 제안한다. 제안된 방법은 그동안 많은 연구가 이루어져 온 MUSIC 방법에 기반을 두고 있으며, 보정 벡터를 갖는 공간 스펙트럼이 제한 조건을 만족하면서 최대가 되도록 하였다. 제안된 방법의 효율성을 입증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이는 기존의 방법 가운데 하나인 부분 처리 방법과 비교하였다.

II. 결함 소자의 영향 고찰

이 논문에서는 N개의 센서로 구성된 선형 어레이(linear array) 시스템을 고려한다. 이때 각 센서 사이의 간격은 입사 신호의 반파장(half-wavelength) 거리를 가지며, K개의 입사 신호들은 모두 평면파(plane wave)라고 가정한다. 그리고 어레이에 입사되는 각 신호 사이에는 상관 관계가 존재하지 않는다고 가정한다. 첫번째 센서 위치를 기준으로 할때 임의의 시각 n에서 i번째 센서의 출력은 다음과 같다.

$$x_i(n) = \sum_{j=1}^K s_j(n) a_i(\theta_j) + w_i(n) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

여기서 $s_j(n)$ 은 j번째 입사 신호, $w_i(n)$ 은 i번째 센서에 첨가된 잡음 성분이다. 그리고 θ_j 는 어레이 수직면에 대한 j번째 신호의 입사 방향이고, $a_i(\theta_j)$ 는 아래와 같이 주어지는 i번째 센서에서 j번째 신호의 상대적인 위상 변이(phase shift)이다.

$$a_i(\theta_j) = \exp(j2\pi d(i-1) \sin \theta_j / \lambda_0) \quad (2)$$

위에서 d는 이웃한 센서 사이의 간격이며, λ_0 는 반송(carrier) 신호의 파장이다. 임의의 시각에서 센서 출력 벡터인 스냅샷(snapshot) 벡터 $\underline{x}(n)$ 은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\underline{x}(n) = [x_1(n) x_2(n) \dots x_N(n)]^T \quad (3)$$

윗 첨자 T는 벡터의 transpose를 의미한다.

이제 방향 탐지 시스템을 구성하고 있는 센서중에서 일부가 결함일 경우 이들이 시스템에 미치는 영향을 고찰하기로 한다. 이를 위해서 어레이를 구성하고 있는 전체 센서 수가 8개이고, 이중 2, 3, 5번째 센서에서 결함이 발생하였을 경우 기존의 방향 탐지 방법을 이용한 공간 스펙트럼을 나타내었다. 두 개의 신호원으로부터 어레이로 입사되고 있으며, 각각의 입사 방향은 0° 와 20° , 신호대 잡음비는 10 dB와 5 dB로 가정하였다. 고려된 기존의

방향 탐지 알고리즘은 Bartlett 빔 형성기[2], Capon의 방법[3], 그리고 MUSIC 방법[4, 5]이다. 각 방법에서 공간 스펙트럼을 구하는 식들은 다음과 같다.

$$P_{Bartlett}(\theta) = \frac{a^H(\theta) \hat{R} a(\theta)}{a^H(\theta) a(\theta)} \quad (4)$$

$$P_{Capon}(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) \hat{R}^{-1} a(\theta)} \quad (5)$$

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) \left(\sum_{k=K+1}^N v_k v_k^H \right) a(\theta)} \quad (6)$$

윗 식에서 윗첨자 H는 hermitian을 의미하며, \hat{R} 는 어레이 출력으로부터 추정된 자기 상관 행렬(autocorrelation matrix)으로써, 이 행렬은 아래 식과 같이 고유분해(eigendecomposition)될 수 있다.

$$\hat{R} = U \Lambda U^H \quad (7)$$

위에서 U는 unitary이며, Λ 는 크기순으로 정렬된 고유치를 대각항으로 갖는 대각 행렬이다. 고유치들은 상대적으로 큰 값을 갖는 K개의 고유치들과 이상적인 경우 모두 같은 값을 갖는 나머지 N-K개의 고유치들로 분류할 수 있는데 이들은 각각 신호 부공간과 잡음 부공간을 의미한다. 이중 v_k 는 잡음 부공간(noise subspace)에 해당되는 고유 벡터들으로써 MUSIC 방법은 이 두 부공간이 서로 직교하는 성질을 이용하는 것이다. 그리고는 식 (2)에 주어진 값을 원소로 하는 각 방향에 대한 N차 조향(steering) 벡터이다.

$$a(\theta) = [a_1(\theta) a_2(\theta) \dots a_N(\theta)]^T \quad (8)$$

그림 1은 모든 소자가 정상적으로 동작한 경우이며, 그림 2는 결함이 발생한 경우이다. 결함이 발생하게 되면 전반적인 바이어스 레벨이 높아져 방향 추정 성능이 크게 저하됨을 볼 수 있다. 또한 Capon의 방법에서는 공간 스펙트럼을 계산할 수 없는데 그 이유는 공간 스펙트럼을 계산하는 과정에서 자기 상관 행렬의 역행렬을 요구하기 때문이다. 즉 결함이 발생한 어레이의 자기 상관 행렬은 full rank를 갖지 못하며, 따라서 역행렬을 구할 수 없다.

III. 보정된 방향 탐지 알고리즘

이 절에서는 어레이를 구성하고 있는 센서들 가운데 일부가 결함일 경우 이를 보정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 기존의 고분해능을 갖는 방법중 많은 연구가 이루어진 MUSIC 방법에 기반을 둔다.

MUSIC 공간 스펙트럼을 구하는 과정에서 자기 상관

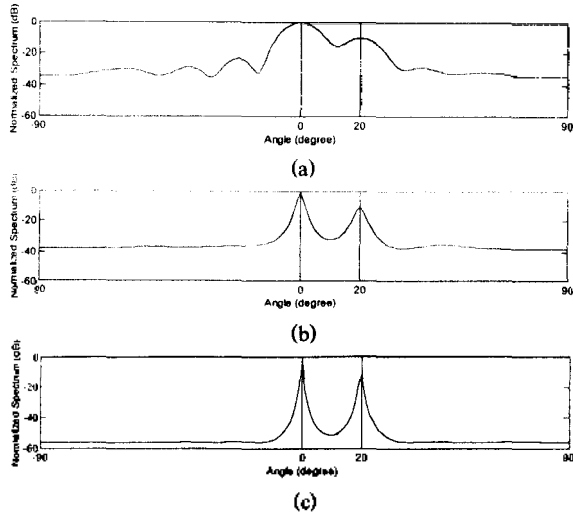


그림 1. 모든 센서가 정상인 경우 기존의 방향 탐지 알고리즘 결과, (a) Bartlett 방법, (b) Capon 방법, (c) MUSIC 방법.
 Fig. 1 Results of the previous direction finding algorithms on a normal array, (a) Bartlett method, (b) Capon method, (c) MUSIC method.

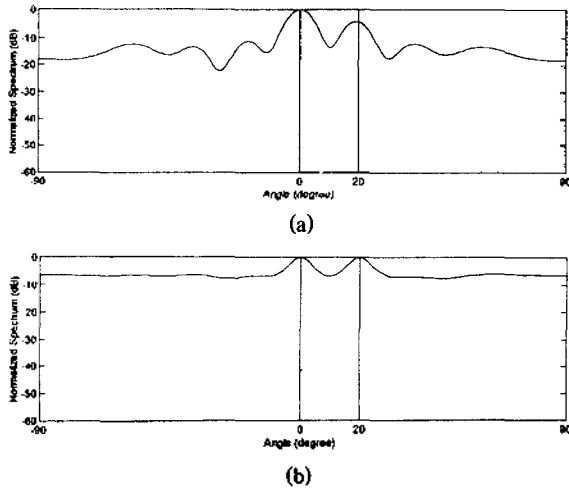


그림 2. 결함 소자가 존재하는 경우 기존의 방향 탐지 알고리즘 결과, (a) Bartlett 방법, (b) MUSIC 방법.
 Fig. 2 Results of the previous direction finding algorithms in the presence of faulty elements, (a) Bartlett method, (b) MUSIC method.

행렬을 계산해야 하지만 결함 소자가 있는 경우 추정된 자기 상관 행렬은 full rank를 갖지 못하며, 따라서 고유 분해 후 얻어진 고유 벡터 v_k 도 정상치가 아닌 다른 값을 나타내게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 보정 벡터 c 를 도입한다. 이 보정 벡터 c 를 포함하는 MUSIC 공간 스펙트럼은 다음과 같다.

$$P_c(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) \left(\sum_{k=K+1}^N v_k c^H c v_k^H \right) a(\theta)} \quad (9)$$

각 고유 벡터 v_k 를 보정하기 위한 벡터 c 는 보정된 MUSIC

공간 스펙트럼 $P_c(\theta)$ 가 최대값을 갖도록 구하며, 이는 윗식의 분모항이 최소가 되도록 하는 것과 같다.

$$\text{Minimize} \int_{-1}^1 a^H(r) \left(\sum_{k=K+1}^N v_k c^H c v_k^H \right) a(r) dr \quad (10)$$

$$= \text{Minimize} c^H \sum_{k=K+1}^N \text{diag}\{v_k\} \left\{ \int_{-1}^1 a^*(r) a^T(r) dr \right\} \text{diag}\{v_k\}^H c$$

$$= \text{Minimize} c^H S c$$

$$S = \sum_{k=K+1}^N \text{diag}\{v_k\} \left\{ \int_{-1}^1 a^*(r) a^T(r) dr \right\} \text{diag}\{v_k\} \quad (11)$$

윗식에서 윗첨자 *는 공액복소수를 의미하며, $\text{diag}\{v_k\}$ 는 v_k 원소를 대각항으로 하는 대각 행렬이다. 변수 r 은 다음과 같은 함수이다.

$$r = \sin(\theta) \quad (12)$$

위의 방법에 있어서 성능을 더욱 개선시키려면 모든 방향에 대하여 적분하지 않고 신호원이 있는 가능한 범위 내에서만 적분하면 된다. 즉 r_h 와 r_l 를 각각 적분의 상하한 값이라고 하면 식(11)은 다음과 같아진다.

$$S = \sum_{k=K+1}^N \text{diag}\{v_k\} \left\{ \int_{r_l}^{r_h} a^*(r) a^T(r) dr \right\} \text{diag}\{v_k\} \quad (13)$$

결함이 발생한 위치는 알고 있으므로 다음과 같은 제한 조건을 갖는다.

$$c^H f = N - M \quad (14)$$

M 은 어레이내에 포함된 결함 소자의 수이며, 벡터 f 는 정상적으로 동작하는 센서 위치에는 1, 결함 소자에 대응되는 위치에는 0을 갖는 N 차 벡터이다. 이제 보정 벡터 c 를 구하기 위해서 Lagrange multiplier를 도입한다. Lagrange multiplier α 를 갖는 비용 함수(cost function) H 를 다음과 같이 정의한다.

$$H = c^H S c + \alpha (c^H f - (N - M)) \quad (15)$$

윗식을 보정 벡터 c 에 대해 미분한 뒤 그 결과를 0으로 놓으면 보정 벡터 c 는 다음과 같다.

$$c = -\frac{\alpha}{2} S^{-1} f \quad (16)$$

윗식의 양변에 f 를 곱하면 제한 조건으로부터 Lagrange multiplier α 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{-2(N - M)}{f^H S^{-1} f} \quad (17)$$

식 (17)을 식 (16)에 대입하면 보정 벡터 c 는 아래와 같이

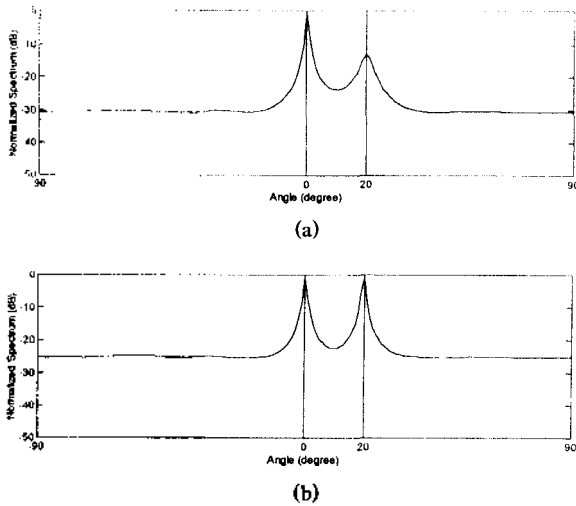


그림 3. 두 번째 소자가 결함인 경우 정규화된 공간 스펙트럼 (SNR = 10 dB, 5 dB), (a) MUSIC 방법, (b) 제안된 방법.
 Fig. 3 Normalized spectrums in the presence of the 2nd faulty element (SNR = 10 dB, 5 dB), (a) MUSIC method, (b) proposed method.

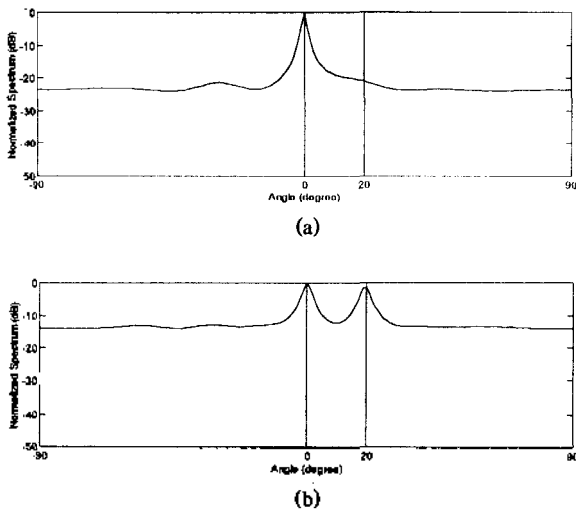


그림 4. 두 번째 소자가 결함인 경우 정규화된 공간 스펙트럼 (SNR = 10 dB, -10 dB), (a) MUSIC 방법, (b) 제안된 방법.
 Fig. 4 Normalized spectrums in the presence of the 2nd faulty element (SNR = 10 dB, -10 dB), (a) MUSIC method, (b) proposed method.

얻어진다.

$$c = \frac{(N-M)S^{-1}f}{f^H S^{-1}f} \quad (18)$$

위의 보정 벡터를 식 (9)에 대입하면 결함 소자 발생시 보정된 MUSIC 공간 스펙트럼 $P_c(\theta)$ 을 얻는다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

이 절에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 성능을 고찰한다. 성능 비교를 위해 기존의 부분 처리 기법과 비교하였다. 반파장 간격으로 배열된 8 개의 센서로 구성되는 선형 어레이를 고려하였으며, 이 어레이에 두 방향으로부터 신호가 입사한다고 가정하였다. 먼저 8개의 센서중 두 번째 소자에 결함이 발생하였을 경우 부분 처리 기법과 제안된 방법을 적용한 결과를 그림 3에 나타내었다. 이때 각 신호의 입사 방향은 어레이의 수직면에 대해 0°와 20°이며, 신호 대 잡음비는 10 dB와 5 dB로 하였다. 부분 처리 기법을 이용한 공간 스펙트럼 계산시 정상 동작하는 연속적인 센서는 세 번째부터 여덟 번째 센서이므로 이들 여섯 개의 센서 출력으로부터 자기 상관 행렬을 구성하였다. 또한 제안된 방법에서 필요한 벡터 f 는 다음과 같다.

$$f = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \quad (19)$$

그림에서 두 방법 모두 모든 방향의 신호를 추정하고 있음을 볼 수 있다. 특히 제안된 방법은 신호의 입사 방향에서 모두 높은 피크치를 나타내었다. 그림 4에는 앞선 시뮬레이션 환경과 동일하고 다만 20° 방향에서 입사하는 신호의 신호 대 잡음비를 -10 dB로 한 결과를 나타내었다. 상대적으로 낮은 신호 대 잡음비 때문에 부분 처리 기법을 적용한 결과에서 피크치를 나타내지 못하였으나 제안된 방법의 경우 신호원의 방향에서 모두 피크치를 나타내었다.

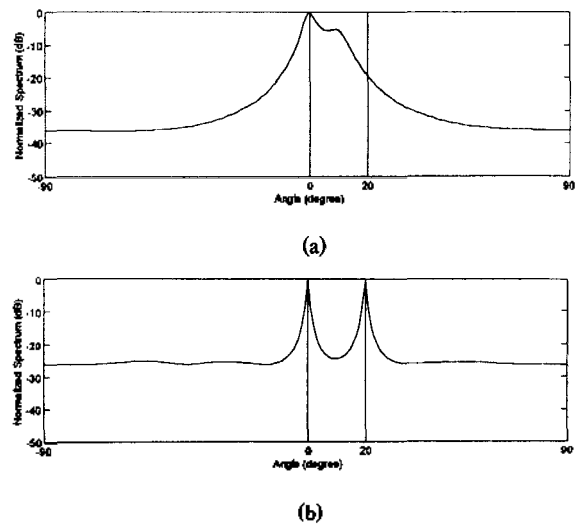


그림 5. 두 번째와 다섯 번째 소자가 결함인 경우 정규화된 공간 스펙트럼 (SNR = 10 dB, 5 dB), (a) MUSIC 방법, (b) 제안된 방법.

Fig. 5 Normalized spectrums in the presence of the 2nd and 5th faulty element (SNR = 10 dB, 5 dB), (a) MUSIC method, (b) proposed method.

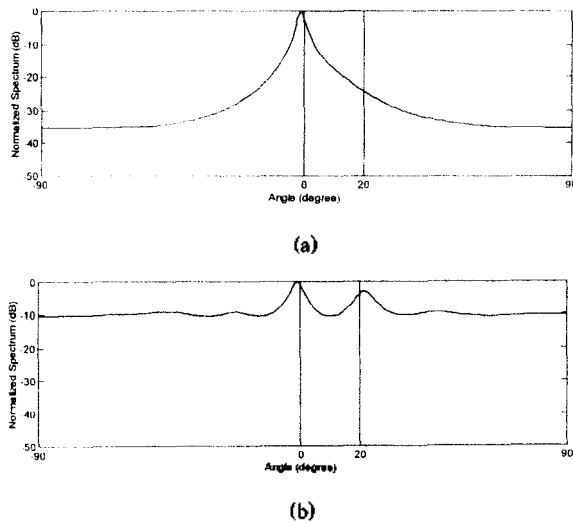


그림 6. 두 번째와 다섯 번째 소자가 결합인 경우 정규화된 공간 스펙트럼 (SNR = 10 dB, -10 dB), (a) MUSIC 방법, (b) 제안된 방법.

Fig. 6 Normalized spectrums in the presence of the 2nd and 5th faulty element (SNR = 10 dB, -10 dB). (a) MUSIC method, (b) proposed method.

이제 8개의 센서중 두 번째와 다섯 번째 소자가 결합인 경우를 고려하였다. 앞선 시뮬레이션과 마찬가지로 각 신호의 입사 방향은 어레이의 수직면에 대해 0°와 20°이며, 신호 대 잡음비는 10 dB와 5 dB로 하였다. 정상 동작하는 센서군은 세번째와 네번째 센서로 구성되는 부어레이와 여섯 번째부터 여덟 번째 센서까지 이어지는 부어레이로써 부분 처리 기법 적용시 여섯 번째부터 여덟 번째 센서로 구성되는 부어레이를 이용하였다. 왜냐하면 세번째와 네번째 센서로 구성되는 부어레이로 부터 얻어지는 자기 상관 행렬은 2차원이므로 2개의 신호원이 존재하는 환경에서 잡음부공간을 찾을 수 없기 때문이다. 그림 5에 나타난 결과를 보면 부어레이 처리 기법은 하나의 방향만을 찾는 반면 제안된 방법은 두 방향 모두를 찾고 있다. 20° 방향에서 입사하는 신호의 신호 대 잡음비를 -10 dB로 하였을 경우에도 제안된 방법은 두 방향에서 피크치를 나타냄을 그림 6에서 볼 수 있다.

V. 결 론

이 논문에서는 결합 소자가 발생하였을 경우 이들이 방향 탐지 시스템에 미치는 영향을 고찰하고 문제를 하기 위한 방법을 제안하였다. 결합 소자 발생시 공간 스펙트럼들의 성능은 크게 저하되거나, 아예 공간 스펙트럼을 구할 수 없다. 제안된 방법은 MUSIC 알고리즘에 기반을 두었다. 보정 벡터를 포함하는 MUSIC 공간 스펙트럼이 제한 조건하에서 최대화되도록 하는 보정값들을 구하였다. 제안된 방법의 성능을 고찰하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 기존의 부어레이 처리 기법

보다 어레이의 aperture size와 신호 대 잡음비 측면에서 향상된 성능을 나타내었다. 제안된 방법은 비록 MUSIC 알고리즘에 기반을 두었으나 다른 공간 스펙트럼 추정 방법에도 그대로 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

1. H. Krim and M. Viberg, "Two Decades of Array Signal Processing Research," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 67-94, July 1996.
2. M.S. Bartlett, "Smoothing Periodograms from Time Series with Continuous Spectra," *Nature*, vol. 161, pp. 686-687, 1948.
3. J. Capon, "High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis," *Proc. IEEE*, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, Aug. 1969.
4. R.O. Schmidt, *A Signal Subspace Approach to Multiple Emitter Location and Spectral Estimation*, Ph.D. thesis, Stanford Univ., Stanford, CA, Nov. 1981.
5. R.O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, March 1986.
6. T.J. Shan, M. Wax, and T. Kailath, "On Spatial Smoothing for Directions of Arrival Estimation of Coherent Signals," *IEEE Trans. on Acoust. Speech Signal Proc.*, vol. 33, no. 4, pp. 806-811, Apr. 1985.
7. A.J. Weiss and B. Friedlander, "Array Shape Calibration using Sources in Unknown Locations-A Maximum Likelihood Approach," *IEEE Trans. on Acoust. Speech Signal Proc.*, vol. 37, no. 12, pp. 1958-1966, Dec. 1989.
8. Y.M. Chen, J.H. Lee, C.C. Yeh, and J. Mar, "Bearing Estimation without Calibration for Randomly Perturbed Arrays," *IEEE Trans. on Signal Proc.*, vol. 39, no. 1, pp. 194-197, Jan. 1991.
9. Y.M. Chen, J.H. Lee, and C.C. Yeh, "Two-dimensional Angle-of-arrival Estimation for Uniform Planar Arrays with Sensor Position Errors," *IEE Proc.*, vol. 140, Pt.F, no. 1, pp. 37-42, Feb. 1993.
10. D.J. Ramsdale and R.A. Howerton, "Effect of Element Failure and Random Errors in Amplitude and Phase on the Sidelobe Level Attainable with a Linear Array," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 68, no. 3, pp. 901-906, Sept. 1980.

▲김 기 만(Ki-Man Kim)

현재: 한국해양대학교 전과공학과 전임강사
제 15권 6호 참조

▲윤 대 희(Dae-Hee Youn)

현재: 연세대학교 전자공학과 교수
제 14권 4호 참조

▲차 일 환(Il-Whan Cha)

현재: 연세대학교 전자공학과 교수
제 14권 4호 참조