

## 결함 소자가 존재하는 안테나 배열을 위한 빔 형성기

### A Beamformer for Antenna Arrays with Faulty Elements

김 기 만\*, 차 일 환\*\*, 윤 대 희\*\*  
(Ki M Kim\*, Il W. Cha\*\*, Dae H. Youn\*\*)

#### 요 약

실제 환경에서 배열은 비정상적으로 동작하는 소자를 가질 확률이 높다. 결함 소자는 출력이 없거나 정상인 것에 비해 크게 감소된 이득을 갖는다. 이는 빔의 부엽 레벨을 높이고, 적응 빔 형성기에서 간섭 신호를 제거하지 못하도록 한다. 이 논문에서는 결함 소자들을 갖는 배열을 위한 빔 형성 방법을 제안하였다. 이상적인 경우 배열 출력 자료들로부터 계산된 자기 상관 행렬은 Toeplitz 행렬이다. 그러나 결함 소자를 갖는 배열로부터 계산된 자기 상관 행렬은 결함 행렬이다. 따라서 이 행렬의 대각항들을 평균하여 얻어진 값들로 새로운 자기 상관 행렬을 구성하고, 새로 구성된 자기 상관 행렬을 빔 형성 방법에 적용한다. 제안된 방법의 성능을 고찰하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 제안된 방법은 기존의 부분 처리 기법의 단점이었던 자유도 문제를 해결할 수 있었다.

#### ABSTRACT

An array often has faulty elements in real operation. The faulty elements, producing no output or highly reduced gain than other normal elements, cause an elevated sidelobe level and fail to reject the interference signals in an adaptive beamformer. In this paper we have presented the beamforming algorithm for arrays with faulty elements. In the ideal case, an autocorrelation matrix computed from array output data is the toeplitz. However, the inverse of the autocorrelation matrix computed from array with faulty elements can not be obtained due to deficient values of matrix. To overcome this problem, an adaptive beamforming algorithm using the average values of the diagonal terms of matrix is proposed. The computer simulations have been performed to study the performance of the presented method. We have been able to solve the degrees-of-freedom problem that is the drawback of the previous subaperture processing technique.

#### I. 서 론

빔 형성 기법은 소나, 레이더, 통신 및 지진파 신호처리 시스템에 널리 이용되어 왔다. 특히 시시각각 변화하는 주변 환경에 효율적으로 대처하기 위해 사용되는 적응 배열 시스템은 간섭 신호의 영향을 최소화하면서 지향 방향에서 들어오는 원하는 신호만이 출력으로 나오도록 한다. 대표적인 적응 배열 시스템으로써 [1]에서 제안한 선형 제한 조건을 갖는 어레이가 있는데, 이 방법은 지향 방향에서 입사되는 신호는 정해진 주파수 응답을 유지하면서 출력의 분산을 최소화하는 것이다.

실제 환경에서는 하나 이상의 소자가 동작하지 않는

경우가 발생할 확률이 높다. Ramsdale과 Howerton은[2] 이러한 경우 평균 부엽 레벨이 상승함을 보였고, 이러한 문제점을 극복하기 위해 이웃한 소자로부터 신호를 추정하는 방법을 제안하였다. Hinich는 부분 처리 기법을 제안하였는데[3] 이는 배열을 정상적으로 동작하는 부분 배열군으로 나누어 각 부분 배열군이 개별적으로 동작하는 방법을 취하였다. 그러나 이 방법은 각 부분 배열군이 자유도를 만족하지 않으면 성능이 크게 떨어지는 단점을 갖고 있다. 이외에도 amplitude shading 기법[4], cross-sensor beamforming[5]방법, 그리고 다중 선형 제한 조건을 갖는 방법등이[6] 제안되었다.

이 논문에서는 배열안에 동작하지 않는 소자가 존재하는 경우 간섭 신호를 효과적으로 제거하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 배열 시스템의 자기 상관 행렬의 각 대각항들을 평균하여 얻어진 값으로 새로운 자기 상관 행렬을 구한 뒤 이를 이용하여 빔 형성기를 구성한다. 이러한 대각 평균화 방법은 이미 입사각 추정 분야에서

\* 한국해양대학교 전파공학과  
Department of Radio Sciences & Engineering, Korea Maritime University

\*\* 연세대학교 전자공학과  
Department of Electronic Engineering, Yonsei university  
접수일자: 1995년 9월 22일

배열을 구성하고 있는 소자의 불확실한 이득과 위상 문제를 해결하는 한 방법[6]으로써 제안되었으나 본 연구에서는 이를 결합 소자인 경우로 확대하였다. 제안된 방법의 성능을 보이기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 이는 기존의 부분 처리 기법과 비교하였다.

## II. 제안된 방법

먼저 배열 시스템으로 입사되는 모든 신호는 협대역 신호라고 가정하자. M개의 소자로 구성된 협대역 적응 빔 형성기의 구조를 그림 1에 나타내었다. n번째 시간에서 계수 벡터  $\underline{w}(n)$ 와 입력 자료 벡터  $\underline{x}(n)$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

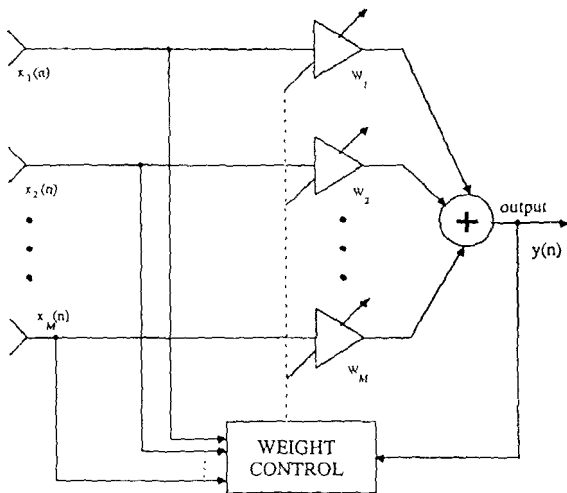


그림 1. M개의 소자로 구성된 협대역 적응 어레이 시스템.  
Fig. 1. A narrowband adaptive array system with M elements.

$$\underline{w}(n) = [w_1(n) \dots w_M(n)]^T \quad (1)$$

$$\underline{x}(n) = [x_1(n) \dots x_M(n)]^T \quad (2)$$

윗 식에서 첨자 T는 전치(transpose)를 나타낸다. 자료 벡터  $\underline{x}(n)$ 과 계수 벡터  $\underline{w}(n)$ 은 복소값을 가지며, 입력 신호들은 평균이 0인 확률 과정이라고 가정하자. 배열 시스템의 출력  $y(n)$ 은  $\underline{x}(n)$ 과  $\underline{w}(n)$ 의 내적으로 나타낼 수 있다.

$$y(n) = \underline{w}^H(n) \underline{x}(n) \quad (3)$$

첨자 H는 Hermitian 전치를 나타낸다. 입력 자료 벡터  $\underline{x}(n)$ 의 자기 상관 행렬을  $\underline{R}$ 이라 할 때 출력의 분산은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E\{|y(n)|^2\} = \underline{w}^H \underline{R} \underline{w} \quad (4)$$

$E[\cdot]$ 는 통계적인 평균을 나타낸다. Frost는 배열로 입사되는 간섭 신호를 제거하기 위하여 선형 제한 조건을 가지면서 빔 형성기 출력 분산을 최소화 하는 방법을 제안하였다[1]. 이때 제한 조건은 지향 방향으로 입사되는 신호는 배열 시스템을 그대로 통과시키도록 하는 것이다. 이 방법의 최적 해는 Lagrange Multiplier를 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$\underline{w}_{opt} = \underline{R}^{-1} \underline{s} (\underline{s}^H \underline{R}^{-1} \underline{s})^{-1} \quad (5)$$

윗 식에서  $\underline{s}$ 는 다음과 같이 주어지는 M차의 신호 벡터이다.

$$\underline{s} = [1 \ e^{j2\pi f_0 \tau} \dots e^{j2\pi(M-1)f_0 \tau}]^T \quad (6)$$

$f_0$ 는 입사 신호의 중심 주파수이고,  $\tau$ 는 기준 센서와 균일한 분포를 갖는 배열 구성 센서들간의 거리에 의해 발생하는 지연 시간이다. 그러나 결합 소자가 존재하는 경우 (5)식에 나타낸 최적 해는 얻을 수 없다. 왜냐하면 자기 상관 행렬  $\underline{R}$ 이 더 이상 full rank를 갖지 못하고, 그에 따라 역행렬을 구할 수 없기 때문이다. 보기를 들어 m번째 소자가 결함일 경우 자기 상관 행렬 가운데 m번째 행과 열에 해당하는 항들은 모두 영이 된다.

이러한 결합 소자 문제를 해결하기 위해 기존에 많은 연구들이 진행되었으나 대표적인 것이 부분 처리 기법[3]이다. 이 방법은 그림 1과 같은 배열내에서 결함 소자 부분을 제외한 나머지 소자 가운데 연속적으로 구성된 소자들로부터 배열을 재구성한다. 그리고 각 부분 배열은 독립적으로 동작하고 그 결과들을 평균하여 전체 배열의 출력으로 하는 것이다. 예를들어 8개의 소자로 구성된 선형 배열에서 둘째와 다섯째 소자가 결함일 경우 셋째와 넷째 소자로 부분 배열을 구성하고, 여섯째부터 여덟째 소자로 부분 배열을 구성한다. 이 방법의 성능은 입사되는 신호의 수, 또는 자유도에 따라 좌우된다. 만약 부분 배열 하나라도 자유도를 만족시키지 않는다면 그 성능이 크게 떨어진다. 이에 이 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다.

이상적인 경우 자기 상관 행렬  $\underline{R}$ 은 hermitian toeplitz 행렬[6, 7]이다. 즉 각 대각항들은 모두 같은 값을 갖는 hermitian 행렬이다. 그러나 앞선 식에서 볼 수 있듯이 결합 소자가 발생한 경우에 대각항들은 더 이상 같은 값을 갖지 못하게 된다. 이에 본 논문에서는 자기 상관 행렬  $\underline{R}$ 이 toeplitz 성질을 만족시키도록 만들기 위해 다음과 같은 대각 평균화 방법을 사용하였다.

$$\hat{r}_{j+1} = \frac{\sum_{i=1}^{M-j} r_{i,j+i}}{M-j} \quad j=0, 1, \dots, M-1 \quad (7)$$

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} \hat{r}_1 & \hat{r}_2 & \dots & \dots & \dots & \hat{r}_M \\ \hat{r}_1^* & \hat{r}_1 & \hat{r}_2 & \dots & \dots & \hat{r}_{M-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{r}_M^* & \dots & \dots & \dots & \dots & \hat{r}_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8)식에서 윗 첨자 \*는 켈레복소수를 의미한다. 곧 각각 대각항의 값 가운데에서 영이 아닌 나머지 값들의 평균을 구하고, 그 값들을 이용하여 새로운 toeplitz 행렬  $\hat{R}$ 를 구한다. 이렇게 하여 새로 구한 자기 상관 행렬  $\hat{R}$ 를 (5)식에서  $R$  대신에 대입하여 결합 소자가 존재하는 경우를 위한 최적 빔 형성기의 계수를 구한다.

III. 시뮬레이션 결과 고찰

이 절에서는 제안된 방법의 성능을 고찰하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션은 8 개의 소자를 갖고 선형 등간격으로 배열된 배열라고 가정하였으며, 각 소자 사이는 신호의 반파장의 거리를 갖는다고 하였다. 먼저 기존의 방법 가운데 대표적인 부분 처리 기법과의 비교를 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해 배열에는 원하는 신호와 아울러 두 가지의 간섭 신호, 그리고 백색 정규 잡음이 존재한다고 하였다. 원하는 신호는 배열의 수직면을 기준으로 0° 방향에서 입사하고 있으며, 간섭 신호들은 각각 -40°와 10°에서 입사한다고 가정하였다. 그리고 입력 신호 대 잡음비는 -27 dB이고, -40°로 입사하는 간섭 신호는 40 dB, 10°로 입사하는 간섭 신호는 30 dB의 입력 간섭신호 대 잡음비를 갖도록 하였다. 또한 원하는 신호와 간섭 신호 사이에는 상관 관계가 존재하지 않으며, 각각 10회의 독립 시행을 수행하였다. 그림 2 (a)는 소자 가운데 2, 5번째 소자가 동작하지 않을 때 부분 처리 기법의 빔 패턴이다. 앞서 언급된 바와 같이 -40° 간섭 신호 입사 방향으로만 영점을 만들뿐 다른 간섭신호의 입사 방향인 10°에서는 영점을 형성하지 못하고 있음을 볼 수 있다. 그 이유는 부 배열을 구성하면서 각각의 부 배열들도 자유도를 만족해야하나 이 보기의 경우 세계와 네제 센서로 구성된 부 배열로는 자유도를 만족시키지 못하기 때문이다. 따라서 상대적으로 강한 파워를 갖는 -40°에서만 영을 형성한다. 이에 반해 그림 2 (b)에 나타난 제안된 방법의 경우 두 개의 간섭 신호 입사 방향으로 영을 형성함을 보여준다. 그러나 입사신호의 상대적인 파워의 차이 때문에 일관성은 다르게 나타남을 볼 수 있다.

다음은 입력 간섭신호 대 잡음비의 변화가 전체 배열 시스템에 미치는 영향에 대해서 고찰하였다. 이때 -30 dB의 신호 대 잡음비를 갖는 원하는 신호가 0° 방향에서 입사하며, 20° 방향에서 하나의 간섭 신호가 입사하고 있다고 가정하였다. 그림 3 (a)에는 입력 간섭신호 대 잡음

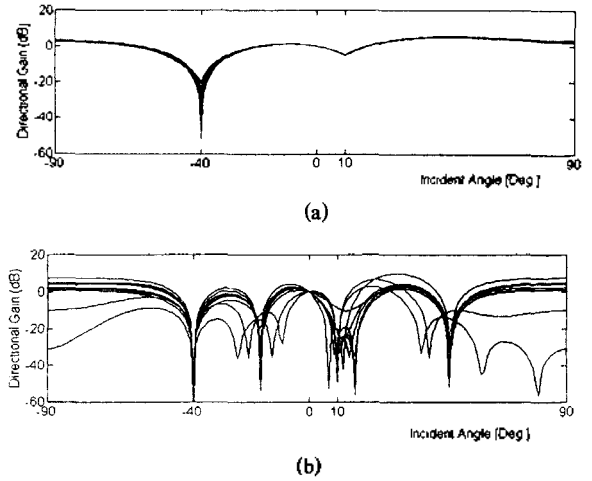


그림 2. 결합 소자를 갖는 배열 시스템의 빔 패턴, (a)부분 처리 기법, (b)제안된 방법.  
Fig. 2. Beam pattern of array system with faulty elements, (a) subaperture processing technique, (b)proposed method.

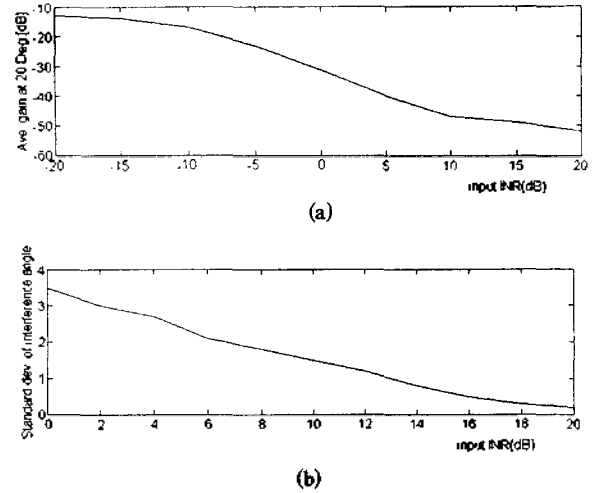


그림 3. 입력 간섭신호 대 잡음비의 변화에 따른 제안된 방법의 성능, (a)간섭 신호 방향에서의 평균 이득, (b)간섭 신호 방향에서 이득의 표준 편차.  
Fig. 3. Performances of the proposed method according to the input INR variations, (a)the average gain at interference incident angle, (b)the standard deviation of the gain at the interference incident angle.

비의 변화에 따른 간섭 신호 입사 방향에서의 평균 이득을 나타내었다. 그림은 입력 간섭신호 대 잡음비가 증가할수록 간섭 신호 입사 방향에서 이득이 점점 감소함을 알 수 있다. 이는 큰 간섭 신호를 제거하기 위해 배열이 점점 작은 이득을 갖는 것으로 해석할 수 있다. 그림 3 (b)에는 제안된 방법이 얼마나 안정된 시스템인가를 고찰하기 위해 입력 간섭신호 대 잡음비의 변화에 따라 간섭신

호 방향에서 이득의 표준 편차를 나타낸 것이다. 결과에서 입력 간섭신호 대 잡음비가 증가할수록 일관성이 증가함을 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

이 논문에서는 동작하지 않는 소자가 존재하는 경우를 위한 최적 빔 형성 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 자기 상관 행렬 가운데 결합 소자로 인한 값들을 각 대각항들을 평균하여 얻어진 값으로 대체한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 성능을 고찰하였다. 그 결과 기존의 부분 처리 기법의 단점이었던 자유도 문제를 해결할 수 있었다. 그러나 배열내에 결합 소자가 증가할 경우 전체적인 평균 부엽 레벨이 상승함을 볼 수 있다. 앞으로 이에 대한 고찰과 아울러 이 연구에서는 선형 배열만을 대상으로 하였지만 원형 배열이나 평면, 3차원 형태를 갖는 배열 구조에 대해서도 연구가 진행되어야 하며, 또한 제안된 방법의 경우 결합 소자 수가 증가할수록 그 일관성이 결여되므로 이를 해결하기 위한 효율적인 방법에 대해 연구되어야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. O. L. Frost, III, "An Algorithm for Linearly Constraint Adaptive Array Processing," *Proc. IEEE*, vol. 60, no. 8, pp. 926-935, Aug. 1972.
2. 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. Amer.* vol. 68, no. 3, pp. 901-906, March 1980.
3. M. J. Hinich, "Bearing Estimation using a Perturbed Linear Array," *J. Acoust. Soc. Amer.* vol. 61, no. 5, pp. 1504-1544, May 1977.
4. H. S. C. Wang, "Amplitude Shading of Sonar Transducer Arrays," *J. Acoust. Soc. Amer.* vol. 57, no. 3, pp. 1076-1084, March 1975.
5. H. P. Bucker, "Cross-sensor Beamformer with a Sparse Linear Array," *J. Acoust. Soc. Amer.* vol. 61, no. 2, pp. 494-498, Feb. 1977.
6. S. L. Marple, Jr., *Digital spectral analysis with applications*, Prentice-Hall, Inc., 1987.
7. Y. M. Chen, J. H. Lee, C. C. Yeh, and J. Mar, "Bearing Estimation without Calibration for Randomly Perturbed Arrays," *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. SP-39, no. 1, pp. 194-197, Jan. 1991.
8. M. H. Er and B. C. Ng, "A New Approach to Robust Beamforming in the presence of Steering Vector Errors," *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. SP-42, no. 7, pp. 1826-1829, July 1994.

#### ▲김 기 만(Ki-Man Kim)



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 1990년 8월: 연세대학교 본대학원 전자공학과(공학석사)  
 1995년 2월: 연세대학교 본대학원 전자공학과(공학박사)  
 1995년 3월~1996년 8월: 연세대학교 의용공학교실 Fellow

1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 전임강사  
 ※주관심분야: 레이더 및 소나 신호처리, 적응 신호처리, 데이터 통신, 전기 음향

#### ▲차 일 환(Il-Whan Cha)

제14권 4호 참조

#### ▲윤 대 희(Dae-Hee Youn)

제14권 4호 참조