

목표물 추정을 위한 오차 빔 지향벡터의 적응 회소 행렬 빔형성 알고리즘 연구

강 경 식*

충북보건과학대학교 정보통신부사관학과*

A Study on Adaptive Sparse Matrix Beamforming Algorithm of Error Beam Steering Vector for Target Estimation

Kyoung Sik Kang*

요 약 본 연구는 무선통신에서 선형 배열 안테나를 이용하여 원하는 목표물의 도래 방향을 추정 한다. 도래방향 추정은 수신기 배열 안테나에 입사하는 신호들 중에서 원하는 신호를 추정하는 것이다. 본 연구에서는 도래방향 추정을 위한 최적 가중치와 고 분해능 적응 빔 형성 알고리즘과 회소행렬을 사용하여 목표물에 대한 도래방향을 추정 정확도를 향상 시켰다. 모의실험을 통하여 목표물 도래 방향 추정에서 기존의 적응 빔 형성 알고리즘과 제안 알고리즘의 성능을 비교 분석 하였다. 목표물 도래 방향 추정에서 제안한 알고리즘이 기존의 빔형성 알고리즘보다 도래 방향 추정 능력이 향상되었다.

Abstract In this paper, we estimates the direction of arrival of desired a target using linear array antenna in wireless communication. Direction of arrival estimation is to estimate for desired target position among incident signals on receiver array antennas. This paper improved estimation of direction of arrival for target using optimum weight, high resolution adaptive beamforming algorithm, and sparse matrix for drection of arrival estimation. Through simulation, we showed that we are performance the analysis to compare general algorithm with proposed algorithm. We show that propose algorithm more improve for direction of estimation than general beamforming algorithm

Keywords : Beamforming, Algorithm, Linear Array, Matrix

1. 서 론

본 연구는 공간상에서 전파를 송신하여 간섭, 잡음, 및 재밍과 같은 성분들은 제거하고 원하는 목표물의 도래 방향을 추정한다. 원하는 목표물의 방향, 거리, 속도 등으로 목표물의 위치를 찾

기 위한 도래방향 추정에 대한 연구가 진행되어 왔다[1,2]. 래방향 추정은 배열 안테나의 센서들로 공간상에서 입사되는 신호들 중에서 원하는 목표물의 위치를 찾는 것이다. 원하는 목표물 신호 이외의 간섭 및 잡음 신호를 제거하기 위한 방법으로 디지털 빔형성, 적응배열 안테나 와 적

* Corresponding Author: Electronic Info-communication Engineering Professor of Chungbuk Health&Science University (kang@chsu.ac.kr)

Received : April 04, 2014

Revised : May 02, 2014

Accepted : June 03, 2014

응 신호처리 알고리즘으로 알려진 목표물 추정 능력이 우수한 MUSIC과 ESPRIT 알고리즘 등이 도래방향 추정에 있어서 많이 사용되어왔다. MUSIC 알고리즘은 신호 공간과 잡음 공간을 분리하여 잡음 부 공간의 고유벡터에 의한 스펙트럼에서 배열 응답 벡터의 피크를 찾아 도래방향을 추정한다[3].

본 연구는 원하는 목표물의 도래방향을 추정하기 위해서 빔형성 적응 알고리즘과 최소행렬을 이용하여 최적 가중치를 계산하고 원하는 목표물의 도래방향을 추정한다. 수신 안테나에 입사하는 신호는 인간구조물과 자연구조물에 의해서 다중 경로 때문에 위상차가 발생한다.

본 연구에서는 안테나 배열 소자간의 위상차를 나타내는 지향 벡터를 이용하여 지향 방향에서 입사하는 신호 이득이 최대가 되도록 한다. 그리고 다른 방향에서 입사하는 신호들은 널을 형성하여 최적의 가중치를 계산한다. 본 논문의 순서는 우선 최적 가중치를 계산하여 출력신호를 나타내고 출력신호 중에서 원하는 목표물의 도래방향을 추정하기 위해서 적응 배열 알고리즘과 공분행렬을 구하여 목표물을 추정하였다.

본 논문의 구성은 II장에서 데이터 모델에 대해서 서술하였고, III장에서는 행렬 도래방향 추정 방법을 제안하였다. IV장에서는 모의실험을 통하여 본 논문에서 제안한 방법과 기존의 방법을 비교 분석하였으며, V장에서는 본 연구에 대해서 결론을 맺는다.

2. 데이터 모델

M 개의 배열 안테나에 K 개의 신호가 θ 방향으로 입사하고 신호 개수보다 배열 안테나 개수가 많다고 가정한다. 잡음은 복소 가우시안 잡음으로 신호와 무상관이다. 이때 배열 출력 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$X(t) = A(\theta)s(t) + N(t) \quad (1)$$

여기서, $s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$ 는 신호벡터, $[\cdot]^T$ 는 전치행렬이다. $N(t)$ 는 평균이 0, 분산이 $\sigma^2 I$ 잡음벡터이다. N 은 데이터 샘플 개수,

$$A(\theta) = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_K)] \quad (2)$$

$a_k(\theta)$ 는 신호의 크기, $A(\theta)$ 는 $M \times K$ 응답 벡터, $k = 1, 2, \dots, N$ 이다. k 번째 행벡터는 k 번째 신호 배열 지향 벡터이다. 선형 배열 안테나 시스템에서 배열 공분산 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = [X(t)X^H(t)] = AR_s A^H + \sigma^2 I \quad (3)$$

여기서, R_s 는 신호 공분산 행렬, $E[\cdot]$ 는 기대값, $[\cdot]^H$ 는 허미트 행렬이다. 수신기에 입사하는 신호는 경로와 안테나 배열소 간격에 따라서 위상차가 발생한다. 안테나 배열 소자간의 위상차를 나타내는 지향벡터를 이용하여 지향방향에서 입사하는 신호 이득이 1이 되도록 하여 출력을 최소화한다. 그리고 다른 방향에서 입사하는 신호들에 대해서는 널(null)을 형성하여 최적 가중치를 구한다[13-14]. 그림1은 본 연구에서 적용한 적응배열 안테나 시스템이다. 안테나 배열 소간의 간격은 반파장이다. 안테나 배열의 수가 M 개일 때 근사 공분산 행렬은 $M \times M$ 행렬이 되므로 자유도가 M 으로 감소한다. 이것은 지향벡터를 $M \times M$ 차원의 지향행렬로 변환시키는 기능을 수행한다. 지향방향을 θ 라고 하면 n 번째 안테나의 대한 경로차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_k = \exp[j2\pi d(n-1)\sin\theta] \quad (4)$$

여기서 $n = 1, 2, \dots, M$, d 는 안테나 배열 소자간의 간격이고, λ 는 파장이다. 식(5)의 지향행

터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{\delta}_k = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \cdots & \delta_M \\ \delta_2 & \delta_3 & \cdots & \delta_{M+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_M & \delta_{M+1} & \cdots & \delta_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

수신호에서 지향방향에 입사하는 신호성분을 빼면 원하지 않는 신호성분만 남게 되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[X - A \overline{\delta}_k] v = 0 \quad (6)$$

여기서, A 는 신호 크기, v 는 고유벡터이다. 고유 벡터 v 는 지향 방향인 θ 를 제외한 다른 방향에서 입사하는 신호와는 직교함으로서 다른 방향의 입사 신호는 출력에서 제거된다. 지향방향에 대한 이득이 1이 되는 제한조건을 두기 위해서 지향방향에 대한 지향벡터는 다음과 나타낼 수 있다.

$$\overline{\delta}_k = [1 \ e^{j\beta} \ e^{j2\beta} \ \dots \ e^{j(M-1)\beta}]^T \quad (7)$$

최적 가중치는 고유벡터를 스칼라 값으로 나누어 구할 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_k = \frac{v}{\overline{\delta}_k^T v} \quad (8)$$

안테나 배열 소자간의 경로 위상 차이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi(\theta) = \frac{-2\pi d \sin(\theta)}{\lambda} \quad (9)$$

다음과 같이 행렬로 다시 나타낼 수 있다.

$$R = A(\vec{\theta})B + \sigma^2 I \quad (10)$$

여기서, $B = [b_1, b_2, \dots, b_M]$ 이다.

3. 행렬 도래방향 추정

본 장에서는 도래방향 추정을 위한 회소 행렬 최적 방법에 대해서 연구한다[5-6].

$$\begin{aligned} \min_B \quad & \|bb\|_1 \quad (11) \\ \text{subject to} \quad & R = A(\vec{\theta})B + \sigma^2 I \end{aligned}$$

여기서, bb 는 회소 행렬(sparse matrix)이다. 도래하는 신호의 입사방향을 추정하기 위해서 배열 공분산행렬을 구하여야 한다. ΔR 는 $\hat{R} - R$ 이다.

$$\hat{R} = \frac{\sum_{t=1}^N [X(t)X^H(t)]}{N} \quad (12)$$

R 대신에 \hat{R} 대입하기 위해서는 ΔR 을 계산하여야 한다. 결국 도래방향 추정문제는 최소 차승 가중(least squares weight) 데이터 모델을 이용하여 가장 적합한 회소 행렬 bb 을 찾는 것이다.

$$\begin{aligned} \min_B \quad & [\hat{R} - A(\vec{\theta})B - \sigma^2 I]^H W^{-1} \\ & \cdot \text{soc}[\hat{R} - A(\vec{\theta})B - \sigma^2 I]^H + \lambda \|bb\| \quad (13) \end{aligned}$$

여기서, W^{-1} 는 역 가중 행렬(inverse weighting matrix)이다. 식(11)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \min_B \quad & \|W^{-0.5} \text{soc}[\hat{R} - A(\vec{\theta})B - \sigma^2 I]\|^2 \\ & + \lambda \|bb\| \quad (14) \end{aligned}$$

여기서, λ 는 bb 를 정규화 시키는 파라미터이다. 도래방향을 추정하기 위해서는 λ 를 직접 결정하는 것은 어렵기 때문에 ΔR 의 오차를 감소시키기 위해서 정확한 기준을 제시하고 도래방향을 추정하기 위해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W^{-0.5} \text{soc}[\hat{R} - A(\vec{\theta})B - \sigma^2 I_M] \simeq \text{asnd}(0, I_{M^2}) \quad (15)$$

$$\| W^{-0.5} \text{soc}[\hat{R} - A(\vec{\theta})B - \sigma^2 I_M] \|_2^2 \simeq cs \chi^2(M^2) \quad (16)$$

여기서, $cs \chi^2(M^2)$ 는 자유도(degrees of freedom)가 M^2 인 카이스퀘어분포(chi-square distribution)이다. 식(15)과 식(16)을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \min_B \| bb \|_1 \text{ subject to} \\ \| W^{-0.5} \text{soc}(\hat{R} - \sigma^2 I_M) \\ - W^{-0.5} [I_M \otimes A(\vec{\theta})] \text{soc}(B) \end{aligned} \quad (17)$$

신호의 개수를 알고 있다면 σ^2 는 \hat{R} 의 $M-K$ 의 가장 작은 고유치 평균에 의해서 나타내고, 신호의 개수를 모르면 $M > K$ 가정으로 \hat{R} 의 최소 고유치로 나타낸다. 오차제한기준은 과소추정오차를 허용하고 통계적으로 도래방향을 추정한다. N 은 충분히 크다고 가정한다. 왜냐하면 배열 안테나에서 N 에 대한 개수는 변화할 수 있다.

4. 모의실험

그림 1은 본 연구를 위한 시스템 블록도이다. 배열 안테나와 빔 형성기로 구성되어 있다. 본 연구에서 배열 안테나의 개수가 신호의 개수보

다 많을 경우에 기준신호와 위상 천이부터 목표물의 방향을 추정할 수 있다. 모의실험 조건은 안테나 배열 개수 12개, 스냅샷은 200회 그리고 그레이팅 로브를 피하기 위하여 안테나 간격은 반파장으로 하였다.

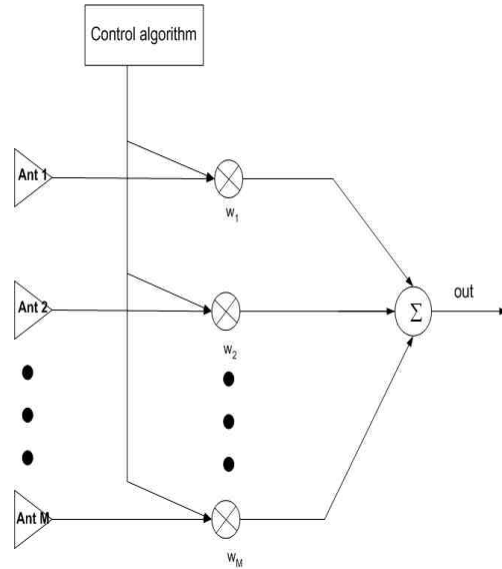
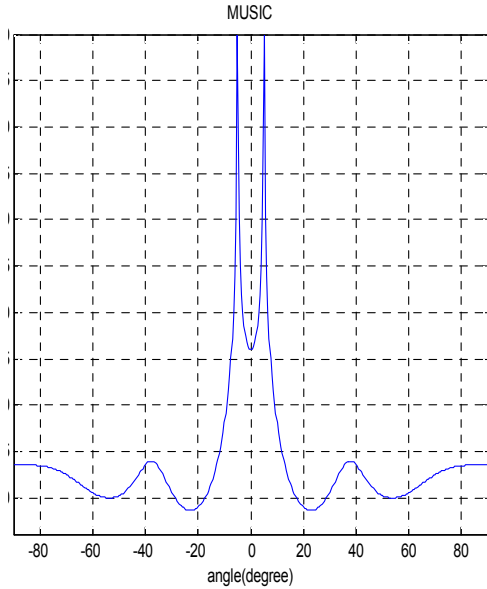


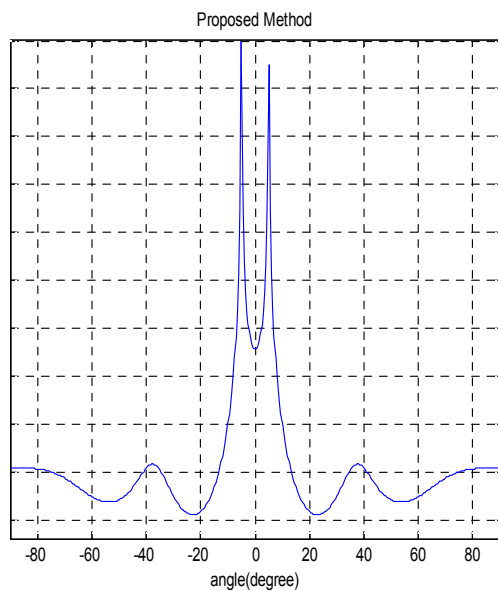
그림 1. 시스템 블록도
Fig. 1. Block diagram of system

기존의 부 공간 기법을 이용하여 목표물을 추정하는 방법은 고유치 전개를 통하여 목표물을 추정하기 때문에 실시간 처리에 어려움이 예상된다. 그러나 본 연구에 제안한 방법이 기존의 방법보다 처리시간이 단축된 것을 그림2에서 알 수 있다. 그림2와그림3은 신호대 잡음비가 20dB, -5° 와 5° 에서 목표물의 방향을 추정한 그래프를 나타내었다. 그림 3은 MUSIC 알고리즘을 이용하여 -5° 와 5° 에서 도래방향을 추정하였다. 추정오차 없이 정확히 도래방향을 추정하였다. 그림3은 본 연구에서 제안한 방법으로 -5° 와 5° 에서 목표물을 추정한 그래프이다. 그림3과 같이 추정오차 없이 정확히 도래방향을 추정하였다. 즉, 본 연구에서는 고유치 전개를 사용하는 적응 빔형성 알고리즘과 정확도가 같은 것을 그

림 2와 그림 3으로부터 입증하였다. 즉, 처리시간면에서는 본 연구에서 제안한 방법이 감소한 것을 알 수 있다.



[그림 2] MUSIC방법의 도래방향 추정
Fig. 2. DOA estimation of MUSIC method



[그림 3] 제안 방법의 도래방향 추정
Fig. 3. DOA estimation of proposal method

5. 결 론

본 연구에서는 선형 배열안테나에서 적응 빔형성 알고리즘을 이용한 공분산 회소 행렬 이용하여 목표물 도래방향을 추정하였다. 목표물을 추정하기 위해서 고유치 전개와 고유 분해를 사용하는 적응 배열 알고리즘을 사용하지 않고 원하는 목표물의 추정 정확도를 향상 시켰다 고유치 전개와 고유분해를 사용하는 방법은 실시간 처리 시스템에서는 많은 제약이 따른다. 본 연구에서 제안 방법은 회소 행렬을 이용한 배열 공분산 오차값을 최소화시키고 적응 빔 알고리즘을 이용하여 원하는 목표물의 정확도를 향상시키는 방법이다. 기존의 도래방향 추정 알고리즘의 하나인 MUSIC 방법은 분해능을 향상시키기 위해서 고유치 전개를 한다. 이와 같은 방법으로 신호 부 공간과 잡음 부 공간으로 신호를 분리한다. 이러한 방법의 고유치 전개는 푸리에 변환 및 푸리에 역변환 과정을 처리해야 되기 때문에 처리 속도가 증가 되어 실시간 구현에 어려움이 있다. 그러나 본 연구에서는 부 공간기법과 고유치 전개를 하지 않고 선형 배열 공분산 벡터의 회소행렬을 이용하기 때문에 기존 방법보다 처리속도를 향상 시키고 목표물 정확도도 향상 시켰다..

References

- [1] B. Allen and M. Ghavami, "Adaptive Array System", Wiley, pp. 97-150, Feb, 2005.
- [2] Frank.B.Gross, "Smart Antennas for Wireless Communications", Mc Graw Hill, pp. 73-197, Jan, 2005.
- [3] N. Le Bihan, S. Miron, and J.I Mars, "MUSIC Algorithm for vector-sensors Array using Biquaternions", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 55, No. 9, pp. 4523-4533, Sept, 2007.

- [4] M. Haardt and J. A. Nossek, "Unitary ESPRIT : How to Obtain Increased Estimation Accuracy with a Reduced Computational Burden", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 43, No. 5, pp. 1232-1242, May, 1995.
- [5] Zhang Meng Liu, Zhi Tao Huang, and Yi Yu Zhou, "Direction of Arrival Estimation of Wideband Signals via Covariance Matrix Sparse Representation", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 59, No. 9, pp. 4256-4270, Sep, 2011.
- [6] P.Stoica, P.Babu, and Li Jian, "SPICE: ASparse Covariance-Based Estimation Method for Array Processing", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 59, No. 2, pp. 629-638, Feb, 2011.

저자약력

강 경 식(Kyoung-Sik Kang) [정회원]



- 1983년2월 : 청주대 전자과 졸업
- 1989년2월 : 한양대학교 전자통신과 졸업(석사):
- 1997년8월 : 청주대학교 전자과 졸업(박사)
- 1989년 4월 ~1993년2월 금성반도체 근무
- 1993년 3월 ~현재 충북보건과학대학 정보통신부사관과 재직

<관심분야>

무선통신, 위치추적, 오류정정 부호이론