

상관 신호의 도래각 추정을 위한 일반화된 Spatial Differencing Method

박근호*, 신종우*, 서원기**, 김형남*

*부산대학교 전자공학과, **㈜넥스윌

*fot97311@pusan.ac.kr, *sjjoly@pusan.ac.kr, **nextwill@nextwill.com, *hnkim@pusan.ac.kr

A Generalized Spatial Differencing Method for Direction-of-arrival Estimation of Coherent Signals

Park Geun-Ho*, Shin Jong-Woo*, Seo Won-Gi**, Kim Hyoung-Nam*

*Pusan National Univ., **NEXTWILL

요약

다중 경로 환경에 의해 발생 가능한 상관 신호(coherent signal)는 도래각 추정 알고리즘의 성능 저하의 원인이 된다. 상관 신호의 도래각 추정을 위해 제안된 spatial differencing method(SDM) 기법은 비상관(uncorrelated) 신호와 상관 신호를 독립적으로 추정하기 때문에 안테나 개수 이상의 도래각 추정이 가능하다는 점에서 기존의 기법에 비해 우수한 성능을 보여준다. 하지만, SDM은 수신 신호 정보를 전적으로 활용하지 못하여 상대적인 성능 저하가 발생한다. 본 논문에서는 상관 신호의 도래각 추정을 위한 SDM 기법에 비해 수신 신호의 정보를 더욱 효과적으로 활용할 수 있는 일반화된 형태의 SDM 방법을 제안한다. 기존의 기법과 제안한 기법의 추정 정확도를 통해 제안한 기법의 우수성을 보인다.

I. 서론

도래각 추정(direction-of-arrival estimation) 기법은 신호가 배열 안테나(array antenna)로 입사할 때의 입사 각도를 추정하는 분야로서 신호원의 방향 및 위치 탐지를 위해 레이더, 소나 등에서 활용되고 있다 [1]. 이러한 다중 신호의 입사 각도 추정을 위해 MUSIC(multiple signal classification), min-norm 등의 부공간(subspace) 기반의 도래각 추정 알고리즘이 제안되었고, 정확도와 연산량 측면에서 성능이 우수한 것으로 평가받고 있다 [2].

하지만, 부공간 기반의 도래각 추정 기법은 다중 경로 등에 의해 발생하는 상관 신호(coherent signal)가 입사하는 경우 성능이 크게 저하되는 문제가 존재한다. 상관 신호 입사에 의한 성능 저하 개선을 위해, spatial smoothing이 입사 신호 간의 상관 정도(correlation) 제거를 위한 기법으로 제안되었다 [3]. 이후 추정 가능한 신호원의 개수를 증가시키고 추정 정확도를 향상시키기 위해 forward/backward spatial smoothing(FBSS), improved spatial smoothing과 같은 다양한 방법들이 제안되었다 [4][5].

상관 신호의 도래각 추정을 위해 발전한 전처리 기법 중 하나인 spatial differencing method(SDM)는 비상관(uncorrelated) 및 상관 신호를 분리하여 추정하는 기법으로 안테나 개수 이상의 도래각을 추정할 수 있어, 기존의 spatial smoothing 기반의 기법들에 비해 우수한 성능을 보여준다 [6]. 하지만, 수신 신호의 정보를 전적으로 활용하지 못하기 때문에 도래각

추정 정확도에서 상대적인 성능 저하가 발생하는 문제점이 존재한다.

본 논문에서는 spatial differencing method의 문제점 보완 및 성능 개선을 위해 일반화된 spatial differencing method를 제안한다. 제안한 SDM 기법은 수신 신호의 정보를 전적으로 활용하기 때문에 기존의 SDM 기법에 비해 상관 신호의 도래각 추정 정확도에서 개선된 성능을 보인다.

II. Spatial differencing method(SDM)

Spatial smoothing은 균일 선형배열안테나에서 부어레이(subarray)를 구성하고 각 부어레이에 해당하는 공분산 행렬을 평균하여 입사 신호의 상관 관계를 제거하는 전처리 기법으로서 상관 신호의 도래각 추정을 위한 많은 연구의 기반이 되었다 [2]. 안테나 개수 이상의 도래각 추정이 불가능한 spatial smoothing의 한계를 극복하기 위해 제안된 SDM은 그림 1과 같이 일반적인 도래각 추정 기법을 이용하여 비상관 신호의 도래각을 먼저 추정한다. 다음으로 비상관 신호의 정보를 제거한 spatial differencing matrix \mathbf{D}_1 을 구성하여 상관 신호를 추정하는 과정을 통해 모든 신호원의 입사 각도를 추정할 수 있다.

비상관 신호의 공분산 행렬이 toeplitz 행렬이라는 성질을 이용하여 식 (1)과 같이 spatial differencing matrix \mathbf{D}_1 을 구성할 수 있다.

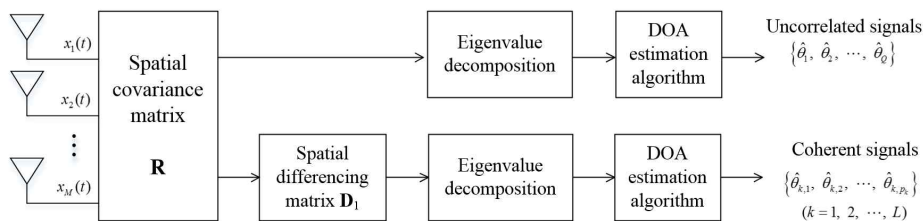


그림 1. Spatial differencing method의 비상관 및 상관 신호 도래각 추정 블록도.

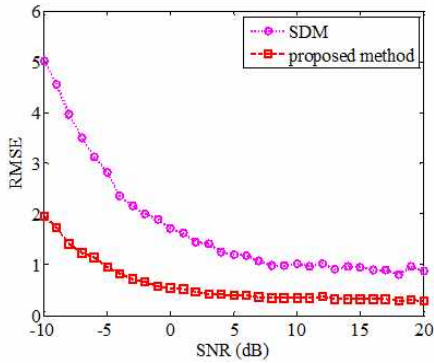


그림 2. SNR에 따른 상관 신호의 도래각 추정 정확도.

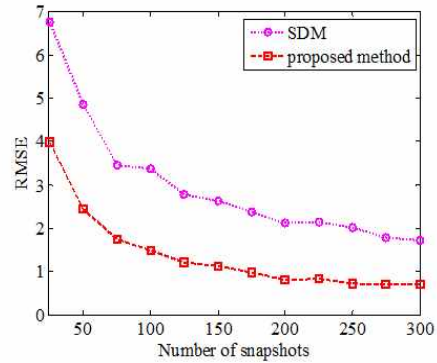


그림 3. Snapshot 개수에 따른 상관 신호의 도래각 추정 정확도.

$$\mathbf{D}_1 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (\mathbf{R}_1 - \mathbf{J}_{M-N+1} \mathbf{R}_m^* \mathbf{J}_{M-N+1}). \quad (1)$$

여기서 M 은 안테나 개수, N 은 부어레이 개수, \mathbf{R}_r 은 r 번째 부어레이의 공분산 행렬, \mathbf{J} 는 교환 행렬(exchange matrix)을 의미한다. 식 (1)의 \mathbf{D}_1 을 이용하여 전처리를 수행한 후 기존의 MUSIC, min-norm 등과 같은 도래각 추정 알고리즘을 적용하면 상관 신호의 도래각을 추정할 수 있다.

III. Generalized spatial differencing method

기존의 SDM은 첫 번째 부어레이의 공분산 행렬인 \mathbf{R}_1 을 기준으로 하여 spatial differencing matrix \mathbf{D}_1 을 유도하였다. 하지만 상관 신호의 정보는 다른 부어레이를 기준으로 하여 추가적으로 얻을 수 있다. 예를 들어, 세 번째 부어레이의 공분산 행렬인 \mathbf{R}_3 를 기준으로 하여 spatial differencing matrix \mathbf{D}_3 을 구할 수 있다. 본 논문에서는 기존의 spatial differencing matrix를 일반화한 형태인 \mathbf{D}_r 을 정의하고 N 개 부어레이의 spatial differencing matrix를 이용한 \mathbf{D} 를 제안한다. 이를 나타내면 식 (2)와 식 (3)과 같다.

$$\mathbf{D}_r = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (\mathbf{R}_r - \mathbf{J}_{M-N+1} \mathbf{R}_m^* \mathbf{J}_{M-N+1}), \quad r = 1, \dots, N, \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \sum_{r=1}^N \mathbf{D}_r^2. \quad (3)$$

결과적으로 상관 신호의 도래각 추정을 위해 식 (3)의 \mathbf{D} 를 사용한 전처리를 수행하며, 제안한 방법의 추정 성능은 모의실험에서 확인할 수 있다.

III. 모의실험

본 논문에서 제안한 일반화된 SDM의 도래각 추정 성능 분석을 위해 signal-to-noise ratio(SNR)과 snapshot 개수에 따른 도래각 추정치의 root-mean-square-error(RMSE)를 분석하였다. 안테나 수가 9개, 부어레이의 수가 4개인 균일 선형배열안테나로 비상관 신호 2개와 상관 신호는 2개의 그룹으로 이루어진 5개의 신호가 입사하는 경우를 모의실험 하였다. 비상관 신호의 입사 각도는 $\{-50^\circ, -30^\circ\}$ 이며, 상관 신호는 $\{0^\circ, 10^\circ, -30^\circ, -20^\circ, 60^\circ\}$ 로 입사하였다. 그림 2는 snapshot 개수를 1000개로 고정할 때 SNR에 따른 기존 SDM 기법과 제안한 알고리즘의 RMSE를 도시한 것이며, 그림 3은 SNR을 10dB일 때의 snapshot에 따른 RMSE를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 제안한 방법이 SNR에 따라 더 낮은 RMSE값을 보이므로 추정 정확도 측면에서 우수한 성능을 나타낸 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 비상관 및 상관 신호가 공존하여 균일 선형배열안테나로 입사할 때, 안테나 개수 이상의 도래각 추정이 가능한 spatial differencing method를 분석하였다. 또한, spatial differencing matrix를 구성하여 상관 신호를 추정할 때 수신 신호의 정보를 전적으로 활용하지 않아 상대적인 성능 저하가 발생하는 문제점을 해결하기 위해 spatial differencing method를 일반화하고 이를 적극적으로 활용하기 위한 방법을 제안하였다. 모의실험 결과, 제안한 기법은 추가적인 연산을 통해 상관 신호의 도래각 추정 정확도에서 더욱 우수함을 확인할 수 있었다. 따라서 더욱 복잡한 신호 수신 환경에서는 제안된 방법이 기존의 SDM보다 더 효과적으로 활용될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 지식경제부 산하 (재)충청광역경제권 선도산업지원단의 광역경제권 선도산업 육성사업에 의해 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] S. Haykin, "Radar array signal processing for angle of arrival estimation," in S. Haykin, editor, *Array Signal Processing*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [2] H. Krim, M. Viberg, "Two decade of array signal processing research," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 13, no. 4, pp. 67-94, Jul. 1996.
- [3] T. J. Shan, M. Wax, and T. Kailath, "On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation for coherent signals," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, vol. 33, no. 4, pp. 806-811, Aug. 1985.
- [4] S. U. Pillai and B. H. Kwon, "Forward/backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, vol. 7, no. 1, pp. 8-15, Jan. 1989.
- [5] W. Du and R. L. Kirlin, "Improved spatial smoothing techniques for DOA estimation of coherent signals," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 39, no. 5, pp. 1208-1210, May. 1991.
- [6] F. Liu, J. Wang, C. Sun and R. Du, "Spatial Differencing Method for DOA Estimation Under the Coexistence of Both Uncorrelated and Coherent Signals," *IEEE Trans. Antenna and Propagation*, vol. 60, no. 4, pp. 2052-2062, April. 2012.