

# AOA 추정기 기반의 적응 빔형성 시스템 구조

문지윤\* · 배영철\*\* · 황석승\*\*\*

## Adaptive Beamforming System Architecture Based on AOA Estimator

Ji-Youn Mun\* · Young-Chul Bae\*\* · Suk-Seung Hwang\*\*\*

### 요 약

신호의 도래각(Angle-of-Arrival, AOA) 추정기 및 간섭 제거기 등으로 구성된 적응 빔형성기 기반의 신호정보 수집(Signal Intelligence, SIGINT) 시스템은 레이더나 위성 등과 같은 각종 장비를 활용하여 다양한 신호정보를 수집하기 위한 최첨단 기술이다. 본 논문에서는 도래각 추정기와 적응 빔형성기로 구성된 효율적인 신호정보 수집 시스템의 구조를 제안한다. 다양한 신호의 도래각 정보를 추정하기 위해 MUSIC(Multiple Signal Classification) 알고리즘을 사용하고, 불필요한 간섭 신호를 제거하기 위해 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response) 기법을 사용한다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 적응 빔형성기의 성능을 평가한다.

### ABSTRACT

The Signal Intelligence (SIGINT) system based on the adaptive beamformer, comprised of the AOA estimator followed by the interference canceller, is a cutting edge technology for collecting various signal information utilizing all sorts of devices such as the radar and satellite. In this paper, we present the efficient adaptive SIGINT structure consisted of an AOA estimator and an adaptive beamformer. For estimating AOA information of various signals, we employ the Multiple Signal Classification (MUSIC) algorithm and for efficiently suppressing high-power interference signals, we employ the Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) algorithm. Also, we provide computer simulation examples to verify the performance of the presented adaptive beamformer structure.

### 키워드

Signal Intelligence, Adaptive Beamformer, AOA Estimation, Interference Suppression  
신호 정보 수집, 적응 빔형성기, 도래각 추정, 간섭 제거

### 1. 서 론

신호정보 수집(SIGINT)[1-2] 시스템은 레이더, 위성 등과 같은 첨단 장비를 활용하여 필요한 신호정보

를 수집하기 위한 기술이다. 신호의 도래각 추정[3-4] 및 간섭제거 기술[5] 등이 기반이 되는 적응 빔형성기 [6]는 신호정보 수집의 핵심 기술이다. 대표적인 신호의 도래각 추정 알고리즘에는 MUSIC[7]과 ESPRIT

\* 조선대학교 전자공학과 (jiyou0551@chosun.kr)

\*\* 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부 (ycbae@chonnam.ac.kr)

\*\*\* 교신저자 : 조선대학교 전자공학과

• 접수일 : 2017. 09. 27

• 수정완료일 : 2017. 10. 05

• 게재확정일 : 2017. 10. 18

• Received : Sep 27, 2017, Revised : Oct 05, 2017, Accepted : Oct 18, 2017

• Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

Dept. of Electronic Engineering, Chosun University,

Email : hwangss@chosun.ac.kr

(: Estimation Signal Parameter via a Rotational Invariant Technique)[8] 등이 널리 사용되고 있다. 또한, 간섭제거 기술로는 MVDR 기법[9-10], LCMV (: Liner Convenience Minimum Variance), GSC (: Generalized Sidelobe Canceller)[11] 등이 대표적이다.

본 논문에서는 도래각 추정기와 적응 빔형성기로 구성된 효율적인 적응 신호정보 수집 시스템의 구조를 제안한다. 신호의 도래각 추정기 및 간섭제거 기술 등이 탑재된 신호정보 수집 시스템은 다양한 간섭 신호 또는 제밍 신호가 존재하는 환경에서 원하는 신호의 정보를 효율적으로 수집할 수 있다. 다양한 수신 신호의 도래각 추정을 위하여 우수한 성능을 가지는 MUSIC 알고리즘을 사용하며, 고 전력 간섭 신호 또는 제밍 신호를 효율적으로 제거하기 위해 MVDR 알고리즘을 사용한다. 제안된 시스템은 수신신호를 기반으로 MUSIC 알고리즘을 사용하여 신호들의 도래각을 추정한 뒤, 그 결과를 MVDR 빔형성기에 적용하여 원하는 신호를 제외한 나머지 간섭 신호 또는 제밍 신호를 제거한다. 본 논문에서 제안된 시스템 구조의 성능평가를 위해 [12]에서 제시된 수신신호 모델을 고려한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 적응 빔형성기 기반의 신호정보 수집 시스템의 입력에 해당하는 간섭과 잡음이 포함된 수신신호 모델을 제시하고, 3장에서 다양한 신호정보 수집을 위한 적응 빔형성기 기반의 신호정보 수집 시스템의 효율적인 구조를 제시하며, 4장에서 제시된 신호정보 수집 시스템의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보인다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

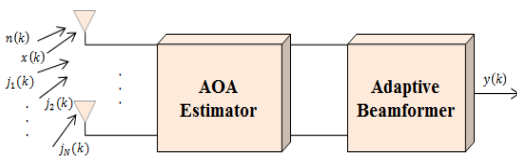


그림 1. 제안된 신호정보 수집 시스템 구조  
Fig. 1 Architecture of the proposed SIGINT system

## II. 수신신호 모델

본 장에서는 적응 신호정보 수집 시스템의 입력으로 적당한 간섭과 잡음이 포함된 수신신호 모델을 제시한다. 안테나가  $M$ 개의 어레이 요소를 가진다고 가정하면, 샘플(sample) 인덱스  $k$ 에 대한 수신신호 벡터는 식(1)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{a}_x x(k) + \mathbf{A} \mathbf{j}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

식 (1)에서  $\mathbf{r}(k)$ 는  $M \times 1$  크기의 수신신호 벡터이며,  $\mathbf{a}_x$ 는  $M \times 1$  크기의  $x(k)$ 에 대한 어레이 응답 벡터이고,  $x(k)$ 는 원하는 신호이다.  $\mathbf{A}$ 는 크기  $M \times N$ 의 어레이 응답 행렬이며,  $\mathbf{A}$ 의 열은 간섭 신호의 도래각 어레이 응답 벡터이고,  $N$ 은 간섭 신호의 개수이다. 또한,  $\mathbf{j}(k)$ 는  $N \times 1$  크기를 가지는 간섭 신호 벡터이고,  $\mathbf{n}(k)$ 는  $M \times 1$  크기의 잡음 벡터이며, 잡음 벡터는 i.i.d(independent identically distributed) 특성을 가지는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)으로 이루어져 있다.

## III. 적응 신호정보 수집 시스템 구조

본 장에서는 다양한 신호정보 수집을 위한 효율적인 적응형 신호정보 수집 시스템 구조를 제시한다. 제시된 시스템은 그림 1에서와 같이, 도래각 추정기와 적응 빔형성기로 구성되어 있다.

### 3.1 도래각 추정기

안테나를 통해 수신된 다양한 신호의 정확한 도래각 추정을 위하여 우수한 성능을 보유한 MUSIC 알고리즘을 적용한다. MUSIC 알고리즘은 신호 부공간(signal subspace)과 잡음 부공간(noise subspace)이 서로 직교한다는 성질을 이용하여 공간 스펙트럼(spatial spectrum)을 구하고, 공간 스펙트럼에서의 피크값을 신호의 도래각으로 추정하는 알고리즘이다. 잡음 부공간은  $\mathbf{R}$ 의 고유분해를 통하여 구할 수 있다. 여기서  $\mathbf{R} = E[\mathbf{r}(k)\mathbf{r}^H(k)]$ 은 수신신호 벡터의 공분산 행렬이며, 위첨자  $H$ 는 켈레 전치를 뜻한다. MUSIC 알고리즘에서 신호의 입사방향은 식 (2)를 통해 계산된다.

$$a(\phi)^H E_N E_N^H a(\phi) = 0 \quad (2)$$

식 (2)의  $a(\phi)$ 는 특정각도  $\phi$ 에 대응하는 어레이 응답벡터이다. 식 (3)은 피크값을 얻기 위한 MUSIC 비용 함수이다.

$$P(\phi) = \frac{1}{a(\phi)^H E_N E_N^H a(\phi)} \quad (3)$$

### 3.2 적응 빔형성기

제안된 시스템은 간섭 또는 재밍 신호를 효율적으로 제거하기 위해 원하는 신호의 방향으로 빔을 형성하고, 원하지 않는 신호의 방향으로 널(null)을 형성하는 MVDR 기법을 사용한다. 식 (4)는 MVDR 알고리즘의 가중치 벡터를 나타낸다.

$$\mathbf{w}_{mvdr} = [\mathbf{a}_x^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_x]^{-1} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_x \quad (4)$$

MVDR 빔형성기의 출력은 식 (5)와 같다.

$$y(k) = \mathbf{w}_{mvdr}^H \mathbf{r}(k) \quad (5)$$

식 (4)의 어레이 응답 벡터는 3.1 절의 추정 결과로부터 얻을 수 있다.

## IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 제시된 적응형 신호정보 수집 시스템의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보인다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 두 가지 시나리오를 고려하였다. 첫 번째 시나리오에서 원하는 신호는 CW(Continuous Wave) 신호라고 가정하였고, 한 개의 WB(Wideband) 잡음 신호, 한 개의 AM(Amplitude Modulation) 신호, 두 개의 FM(Frequency Modulation) 신호, 한 개의 pulse(on/off) 신호의 총 다섯 개 간섭 신호가 존재한다고 가정하였다. 두 번째 시나리오에서는 원하는 신호가 PM(Phase Modulation) 신호이고, 두 개의 CW 신호, 한

개의 WB 잡음 신호, 한 개의 AM 신호, 한 개의 FM 신호의 총 다섯 개 간섭신호가 존재한다고 가정하였다. 첫 번째 시나리오와 두 번째 시나리오에 대한 각 신호들의 매개변수들은 표 1과 표 2에 각각 요약되어 있다. 두 시나리오에서 AM 신호의 변조지수  $\alpha$ 는 0.05이고, PM 신호의 위상감도  $K_p$ 는 0.001이다. 또한, FM 신호의 변조 인덱스  $\beta$ 는 0.05이며, 정규화된 변조 주파수  $f_m$ 은 0.001로 가정하였다. PULSE 신호는 50 샘플의 on/off 주기신호로 가정하였다. 출력 SINR(Signal-to-Interference and Noise Ratio) 시뮬레이션을 제외한 모든 시뮬레이션에서 SNR(Signal-to-Noise Ratio)은 20dB로 가정하였다.

그림 2와 그림 3은 첫 번째와 두 번째 시나리오에 대한 MUSIC 알고리즘의 방위각 추정 결과를 각각 보인다. 표 1 및 표 2와 추정된 결과들을 비교하면, 두 시나리오에 대한 모든 신호들의 방위각도가 효과적으로 추정된 것을 확인할 수 있다. 그림 4(a)와 그림 5(a)는 첫 번째와 두 번째 시나리오의 주파수영역에서의 수신신호 스펙트럼이다. 두 그림으로부터 수신신호에 포함된 모든 신호들을 확인할 수 있다. 다른 신호들과 달리 그림 4(a)에 포함되어 있는 Pulse 신호는 모든 주파수 영역에 걸쳐 분포하므로 스펙트럼 자체에 해당 신호가 나타나지는 않지만, 스펙트럼의 “Magnitude” 수치를 다른 그림과 비교해 보면, 그 존재를 확인할 수 있다. 그림 4(b)와 그림 5(b)는 두 시나리오에 대한 빔형성기 출력 스펙트럼을 나타낸다. 그림 6은 첫 번째 시나리오의 입력 SNR에 대한 출력 SINR이고, 그림 7은 두 번째 시나리오에 대한 출력 SINR이다. 위에서 설명된 네 개의 그림들로부터, 원하는 신호를 제외한 모든 신호들이 효과적으로 제거되었음을 확인할 수 있다. 첫 번째 시나리오의 Pulse 신호에 대한 제거여부는 그림 4(a)와 4(b)의 “Magnitude” 수치를 비교하여 확인할 수 있다. 위 결과들로부터, 제안된 적응형 신호정보 수집 시스템 구조는 신호의 AOA 정보를 추정하고, 그 결과를 이용하여 원하지 않는 간섭신호를 효율적으로 제거한다. 즉, 원하는 신호의 수집에 적합한 구조이다.

표 1. 첫 번째 컴퓨터 시뮬레이션 시나리오  
Table 1. The first computer simulation scenario

Signal	Azimuth(°)	Elevation(°)	Center Frequency
CW (Desired)	47	81	0.3
WB	161	81	0.1
AM	99	81	0.44
FM	-152, -23	81, 81	0.25, 0.35
Pulsed	-88	81	-

표 2. 두 번째 컴퓨터 시뮬레이션 시나리오  
Table 2. The second computer simulation scenario

Signal	Azimuth(°)	Elevation(°)	Center Frequency
PM (Desired)	-21	-51	0.37
CW	48, -168	-51, -51	0.1, 0.3
WB	151	-51	0.45
AM	102	-51	0.21
FM	-101	-51	0.05

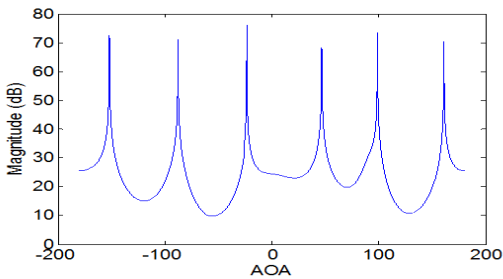


그림 2. 첫 번째 시나리오의 MUSIC 비용함수  
Fig. 2 MUSIC cost function for the first scenario

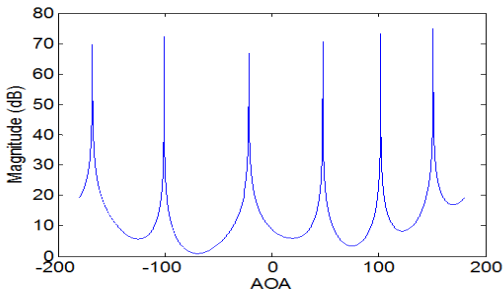


그림 3. 두 번째 시나리오의 MUSIC 비용함수  
Fig. 3 MUSIC cost function for the second scenario

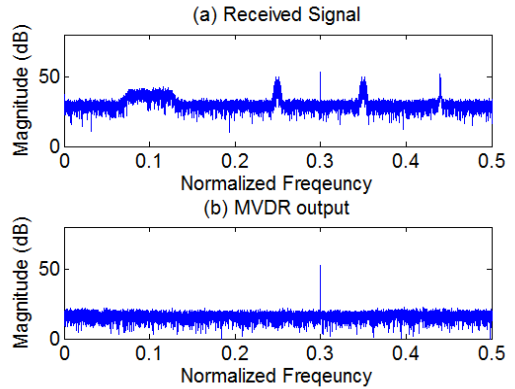


그림 4. 첫 번째 시나리오의 신호 스펙트럼  
(a) 수신 신호 (b) MVDR 빔형성기 출력  
Fig. 4 Signal spectrum for the first scenario  
(a) Received signal (b) Output of MVDR beamformer

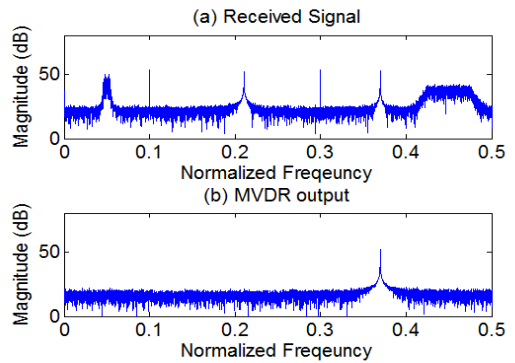


그림 5. 두 번째 시나리오의 신호 스펙트럼  
(a) 수신 신호 (b) MVDR 빔형성기 출력  
Fig. 5 Signal spectrum for the second scenario  
(a) Received signal (b) Output of MVDR beamformer

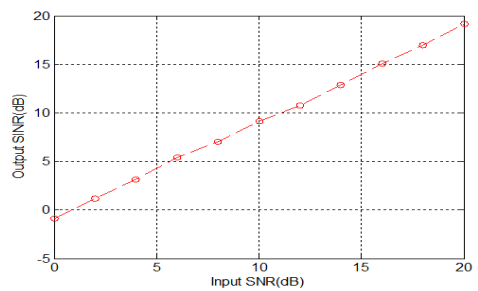


그림 6. 첫 번째 시나리오의 출력 SINR  
Fig. 6 Output SINR for the first scenario

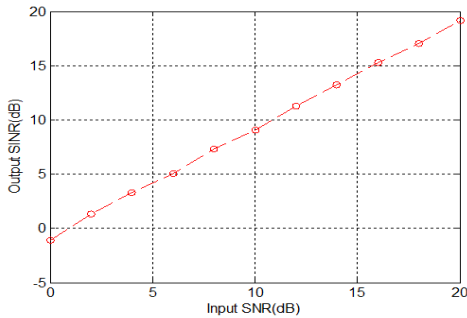


그림 7. 두 번째 시나리오의 출력 SINR  
Fig. 7 Output SINR for the second scenario

#### IV. 결 론

본 논문에서는 효율적인 신호정보 수집을 위해 도래각 추정기와 빔형성기 기반의 적응 빔형성 시스템 구조를 제시하고, 제시된 시스템의 성능평가를 실시하였다. MUSIC 알고리즘을 적용하여 안테나를 통해 수신되는 다양한 신호의 도래각을 추정하였으며, 수신신호의 불필요한 간섭신호를 제거하기 위해 MVDR 기반의 빔형성기를 사용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 시스템 구조의 도래각 추정 및 간섭신호 제거 성능을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2015R1D1A1A01058827).

이 논문은 2014년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

#### References

- [1] H. Lee, "The History and Current Status of Signal Intelligence Satellites," *J. of Current*

*Industrial and Technological Trends in Aerospace*, vol. 11, no. 2, 2013, pp. 111-118.

- [2] S. Kim, J. Choi, and H. Chin, "A Study on the Design of Digital Frequency Discriminator with 3-Channel Delay Lines," *J. of the Korea Academia-Industrial*, vol. 18, no. 6, 2017, pp. 44-52.
- [3] C. You, B. Song, and I. Hwang, "Research Regarding Filter Composition and Motor Control for Yagi-Antenna Remote Tracking System," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 11, no. 11, 2016, pp. 1039-1046.
- [4] S. Hwang, "Output SINR Analysis of GPS Adaptive Interference Canceler Based on Modified Despreader," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 9, no. 2, 2014, pp. 195-202.
- [5] S. Yeom and Y. Park, "Analysis of Adaptive Multiuser Detector using the Cancellation Method," *J. of the Korea Information and Communications Society*, vol. 26, no. 8, 2001, pp. 1291-1297.
- [6] S. Hwang and J. J. Shynk, "Multicomponent Receiver Architectures for GPS Interference Suppression," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 2, 2006, pp. 489-502.
- [7] Y. Yun, Y. Park, and H. Park, "A Comparative Performance Analysis of High Resolution Direction Finding Algorithms in Wideband Mobile Environments," *J. of the Korea Information and Communications Society*, vol. 31, no. 8, 2006, pp. 752-759.
- [8] S. Shahbazpanahi, S. Valaee, and M. H. Bastani, "Distributed Source Localization Using ESPRIT Algorithm," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 49, no. 10, 2001, pp. 2169-2178.
- [9] Y. Wang, L. Huang, and Y. Shi, "Robust widely linear adaptive MVDR beamformer based on interference-plus-noise covariance matrix and steering vector estimation," *Conf. IEEE Signal and Information Processing*, Chengdu, China, July 2015, pp. 726-730.
- [10] S. Hwang, S. Kim, and C. Park, "TPMS Interference Suppression Based on Beamforming," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 6, no. 2, 2011, pp. 180-185.
- [11] S. Kim and S. Hwang, "Computational

Complexity Comparison of TPMS Beamformers for Interference Suppression," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 7, no. 6, 2012, pp. 1327-1335.

- [12] J. Mun and S. Hwang, "Input Signal Model Analysis for Adaptive Beamformer," *J. of the Korea Institute of Electronics Communications Sciences*, vol. 12, no. 3, 2017, pp. 433-438.

저자 소개



**문지윤(Ji-Youn Mun)**

2016년 2월 조선대학교 전자공학과 졸업  
 2016년 3월 조선대학교 대학원 전자공학과 석사과정

※ 관심분야 : 데이터베이스, 위치추정, 간섭제거, 적응신호처리



**배영철(Young-Chul Bae)**

1984년 광운대학교 전기공학과 (공학사)  
 1986년 광운대학교대학원 전기공학과 (공학석사)

1997년 광운대학교대학원 전기공학과 (공학박사)  
 1986 ~ 1991년 한국전력공사  
 1991년 ~ 1997년 산업기술정보원 책임연구원  
 1997년 ~ 현재 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부 교수  
 2002년 ~ 2002년 Brigham Young University 방문교수  
 2011년 ~ 2011년 University of Utah 방문교수  
 ※ 관심분야 : Chaos Control and Chaos Robot, Robot control etc.



**황석승(Suk-Seung Hwang)**

1997년 2월 광운대학교 제어계측공학과 졸업  
 2001년 6월 University of California, Santa Barbara, Electrical & Computer Engineering Department

대학원 졸업 (공학석사)  
 2006년 University of California, Santa Barbara, Electrical & Computer Engineering Department 대학원 졸업 (공학박사)  
 2006. 5~2008. 3 삼성전자 통신연구소 책임연구원  
 2008. 3~2014. 1 조선대학교 메카트로닉스공학과 교수  
 2014. 2 ~ 현재 조선대학교 전자공학과 교수  
 ※ 관심분야 : 적응신호처리, 위치추정, 채널추정, 이동로봇용 위치추정, 간섭제거, RFID