DBpia

논문 17-42-04-03 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '17-04 Vol.42 No.04
https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.4.723

항재밍 3차원 GPS 배열 안테나를 위한 Mutual coupling 보상 및 재밍 방향탐지 알고리즘

강 규 식◆, 신 천 식*, 김 선 우°

Mutual Coupling Compensation and Direction Finding for Anti-Jamming 3D GPS Antenna Array

Kyusic Kang◆, Cheonsig Sin*, Sunwoo Kim°

요 약

본 논문에서는 안테나 간의 상호 결합을 고려한 온라인 보상 알고리즘을 고려하였으며, 이를 적용하기 위한 새로운 GPS(Global Positioning System)용 안테나 배열을 제안하였다. 제안한 안테나 배열 및 ULA(Uniform Linear Array), URA(Uniform Rectangular Array)에 대한 항재밍 성능 평가를 위해 복수의 재밍신호 환경에 대한 방향탐지를 환경 조건 별로 나누어서 진행하였다. 1. 상호 결합이 존재하지 않는 환경. 2. 상호 결합이 있으나 보상이 이루어지지 않는 환경. 3. 상호 결합 보상이 이루어진 환경. RMSE(Root Mean Square Error) 분석을 통해 온라인 보상 알고리즘이 작동함을 확인하고 복수의 재밍신호에서도 피크 검출이 가능함을 보였다.

Key Words : Mutual coupling, GPS Antenna array, Beamforming, Direction finding, Anti-jamming

ABSTRACT

In this paper, we consider an online compensation algorithm considering the mutual coupling and suggest a new GPS antenna array to apply. To evaluate the anti-jamming performance for the proposed antenna array, ULA and URA, we divide direction finding of multiple jamming signals into environments. 1. there is no mutual coupling. 2. there is mutual coupling but no compensation. 3. mutual coupling is compensated. RMSE analysis showed that the online compensation algorithm works and that peak detection is possible for multiple jamming signals.

Ⅰ. 서 론

무선통신 분야에서 통신시스템의 용량, 스펙트럼 효율성, 품질 향상 요구에 따라 무신신호의 방향탐지 및 빔포밍이 가능한 배열 안테나 기술이 많은 각광을 받고 있다. 또한, 차세대 이동통신시스템의 기반 기술로 배열 안테나 기술이 고려됨에 따라 그 중요성은 날로 증가하고 있다. 현재까지 국내외적으로 배열 안테나 기술에 대해 많은 연구가 이루어졌으며, 여전히 활발히 연구 중이다[1-3].

최근 위성항법시스템(GNSS: Global Navigation Satellite System) 전파교란의 사례가 세계적으로 증가

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [14-911-01-007, GNSS 전파혼신 검증 플랫폼 기술개발]
※ This work was supported by the Research and Development Program of the Korea Railroad Research Institute, South Korea.
◆ First Author : Hanyang University Department of Electronics and Computer Engineering, stuk88@hanyang.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : Hanyang University Department of Electronics and Computer Engineering, remero@hanyang.ac.kr, 종신회원
* Electronic and Telecommunications Research Institute:ETRI, cssin@etri.re.kr, 정회원
논문번호 : KICS2017-02-038, Received February 8, 2017; Revised April 11, 2017; Accepted April 12, 2017

www.dbpia.co.kr

함에 따라 피해발생에 대한 우려가 증가하고 있다. 위성항법시스템의 수신감도는 매우 미약하므로 간섭에 매우 취약한 특징을 가진다[4]. 여러 가지 교란 기법 중 재밍 기법은 저렴한 비용과 간단한 기술로 손쉽게 재머(전파방해 장치)를 제작하여 공격을 전개할 수 있기 때문에 군사 및 민수분야에도 큰 위협이 되고 있다[5,6]. 따라서 GNSS 분야에서도 배열 안테나 기술을 이용하여 방해전파를 효과적으로 제거하고, 위성항법신호를 보다 정밀하게 획득/추적할 수 있는 기술이 요구되고 있다[7].

배열안테나의 상호 결합을 고려한 신호처리 연구는 현재 세계적으로 초동 단계라고 할 수 있으며, 극소수의 논문들이 저명 IEEE 저널에 출판되고 있는 상황이다. 항재밍을 위해서 빔포밍을 통해 재밍신호의 방향을 제거하는 것이 중요하지만 상호 결합이 존재할 경우 오차가 발생하게 된다[8]. 따라서 효율적인 시스템을 위해 상호 결합에 대한 고려의 중요성이 높아지고 있지만[9] 현재까지는 주로 IEEE Transactions on Antennas and Propagation과 같은 RF 관련 저널에서 상호 결합 관련 논문들이 검색되고 있는 상황이나, massive MIMO와 같은 대형 배열안테나 시스템의 이동통신시스템에서 적용이 가속화됨에 따라 많은 신호처리 관련 연구가 상호 결합을 고려하여 전개될 것으로 전망된다.

상호 결합의 영향을 보상하는 기술은 크게 오프라인 보상과 온라인 보상으로 나뉜다. 오프라인 보상은 사전 측정을 통한 데이터베이스를 필요로 하며 시간이 걸리고 많은 비용이 든다. 온라인 보상의 경우 수신 신호로부터 바로 보상 데이터를 추정하며 도래각과 함께 동시에 추정할 수 있다[10-14].

또한, 항재밍 GPS 기술은 향후 자율주행과 같은 안전에 매우 취약한 서비스에 대응하기 위하여 필수적으로 개발되어야 하는 기술이며 특히 차량탑재 안테나의 경우에 상호 결합 요소가 필수적으로 고려되어야 할 부분이라고 할 수 있다.

위성항법시스템은 국가 안보 및 국민 편의에 밀접하게 연관되어 있는 주요 기간 시스템임에도 불구하고, 주변국가의 GPS 전파교란으로 인해 국가 안보뿐만 아니라, 산업 전반에 걸쳐 큰 타격을 입을 수 있다. 본 논문에서는 안테나 간 상호 결합을 고려한 현실적인 배열 안테나 모델에서 재밍 환경에 대처할 수 있는 위성항법시스템의 항재밍 기술에 대해 분석하기로 한다.

Ⅱ. 온라인 배열안테나 상호 결합 보상 알고리즘

M개의 안테나에서 수신하는 신호의 개수가 D개라고 할 때 각각의 안테나에서 수신하는 신호는 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1(\theta_1) & a_1(\theta_2) & \cdots & a_1(\theta_D) \\ a_2(\theta_1) & a_2(\theta_2) & \cdots & a_2(\theta_D) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_M(\theta_1) & a_M(\theta_2) & \cdots & a_M(\theta_D) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{AS} + \boldsymbol{N} \quad (2)$$

$\boldsymbol{X} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$는 수신 신호, $\boldsymbol{A} \in \mathbb{C}^{M \times D}$는 신호의 방향 성분을 나타내는 조향 행렬이며 각 성분 $a_i(\theta_j)$는 j번째 신호 입사각에 대한 i번째 안테나의 조향벡터 성분이다. $\boldsymbol{S} \in \mathbb{C}^{D \times 1}$는 신호원, $\boldsymbol{N} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$은 잡음이다. 식 (1)과 식 (2)는 동일하다.

ULA 배열 안테나에서 p개의 인접하는 안테나 간에 상호 결합이 존재할 경우 상호 결합을 다음과 같은 대칭 banded toeplitz 행렬로 나타낼 수 있다[14].

$$\boldsymbol{T_p} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_2 & \cdots & t_{p-1} & 0 & \cdots & 0 \\ t_1 & 1 & t_1 & \cdots & t_{p-2} & t_{p-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & t_{p-1} & t_{p-2} & \cdots & t_1 & 1 & t_1 \\ 0 & \cdots & 0 & t_{p-1} & \cdots & t_2 & t_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\tilde{\boldsymbol{a}}(\theta) = \boldsymbol{T}_p \boldsymbol{a}(\theta) \quad (4)$$

상호 결합이 존재할 때의 조향 벡터는 식 (4)와 같이 나타난다. t_i는 i번째로 인접한 안테나 간의 상호 결합 계수이다. 이 때, MUSIC 알고리즘[15]의 파워 스펙트럼은 다음과 같이 나타난다.

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\tilde{\boldsymbol{a}}(\theta)^H \hat{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{N}} \hat{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{N}}^{\boldsymbol{H}} \tilde{\boldsymbol{a}}(\theta)} \quad (5)$$

$\widehat{\boldsymbol{E}_N}$은 상호 결합이 존재할 경우 신호의 공분산 행렬을 고유값 분해한 잡음 부공간이다. 상호 결합을 아는 경우 식 (5)을 통해 입사각을 추정할 수 있다. 하지만 상호 결합을 모르는 경우 조향벡터와 잡음 부공간이 더 이상 직교하지 않으므로 파워 스펙트럼의 피크

www.dbpia.co.kr

로 입사각을 더 이상 추정할 수 없다.

상호 결합에 의한 오차를 보상하기 위해 다음의 과정을 이용한다.

$$T_p \boldsymbol{b} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{t} \tag{6}$$

식 (6)은 [14]의 정리1을 이용한다. $\boldsymbol{b} \in \mathbb{C}^{M\times 1}$는 임의의 벡터이며 $\boldsymbol{t} = [1, t_1, \cdots, t_{p-1}]^T$는 상호 결합 계수 벡터이다. $\boldsymbol{B}$는 다음과 같이 정의된다.

$$\boldsymbol{B}(:,k) = \begin{cases} \boldsymbol{b} & \text{if } k=1 \\ \left(\boldsymbol{P}_{k-1} + \boldsymbol{P}_{k-1}^{T}\right)\boldsymbol{b} & \text{if } k>1 \end{cases} \tag{7}$$

$\boldsymbol{P}_k \in \mathbb{C}^{M\times M}$는 k번째 부분대각행렬의 모든 원소들을 이동시키는 이동행렬이다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하면 MUSIC 파워 스펙트럼을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\boldsymbol{t}^H \boldsymbol{B}^H \hat{\boldsymbol{E}}_N \hat{\boldsymbol{E}}_N^H \boldsymbol{B}\boldsymbol{t}} \tag{8}$$

$\boldsymbol{K}(\theta) = \boldsymbol{B}^H \hat{\boldsymbol{E}}_N \hat{\boldsymbol{E}}_N^H \boldsymbol{B}$로 치환하면 결국 식 (8)을 다음의 제약 등식 이차 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &\min && \boldsymbol{t}^H \boldsymbol{K}(\theta)\boldsymbol{t} \\ &\text{subject to} && \boldsymbol{e}_1^H \boldsymbol{t} = 1 \end{aligned} \tag{9}$$

$\boldsymbol{e}_1$은 단위행렬 $\boldsymbol{I}_p$의 첫 번째 열이다. 식 (9)를 풀면 최적의 $\boldsymbol{t}^*$를 얻을 수 있다.

$$\boldsymbol{t}^* = \frac{\boldsymbol{K}(\theta)^{-1}\boldsymbol{e}_1}{\boldsymbol{e}_1^H \boldsymbol{K}(\theta)^{-1}\boldsymbol{e}_1} \tag{10}$$

식 (10)을 식 (8)과 연결하면 다음과 같다.

$$P_{MUSIC} = \boldsymbol{e}_1^H \boldsymbol{K}(\theta)^{-1}\boldsymbol{e}_1 \tag{11}$$

따라서 식 (11)을 이용하여 상호 결합에 의한 방향탐지 오차를 줄일 수 있다.

Ⅲ. 항재밍 3차원 GPS 배열안테나에서의 상호 결합 보상 기술

3.1 항재밍 GPS용 3차원 GPS 배열 안테나 구조

ULA 안테나는 오직 고도각으로만 방향탐지가 가능하며 방위각 성분을 탐지할 수 없다는 단점을 지니고 있다. 고도각과 방위각을 동시에 탐지하기 위해서는 2차원 이상의 안테나 배열 구조를 가져야만 한다. 본 논문에서는 3차원 구조를 갖는 안테나 배열인 Spherical Cap에 대해 분석을 수행한다.

그림 1은 9개의 안테나를 갖는 Spherical Cap 배열 구조이다. 인접한 안테나 간의 거리는 반파장이며 t_1, t_2는 상호 결합 계수를 나타낸다. 가운데 안테나는 반파장만큼의 높이를 가진다. GPS L1 신호를 수신하기 때문에 반파장은 약 9.52cm가 된다. 또한 가로, 세로 너비가 각각 30cm가 안되기 때문에 소형 GPS 신호 안테나에 적합하다.

그림 1의 안테나 배열에서 식 (11)의 온라인 보상 알고리즘을 사용하여 파워 스펙트럼을 그리면 고도각이 0도에 근접할 때 파워 스펙트럼이 급격히 발산하는 모습을 보이며 0도에서는 특이행렬이 발생하게 된다. 이 경우 피크를 제대로 추정할 수 없기 때문에 방향탐지를 제대로 할 수가 없다. 그림 2는 고도각 0도에서 파워 스펙트럼이 발산하여 피크 추정이 왜곡되는 현상을 나타내고 있다.

안테나의 위치 행렬 $\boldsymbol{p_m} = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} \in R^{3\times M}$이라 할 때 임의의 입사각(방위각, 고도각)$=(\phi, \theta)$의 조향벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\boldsymbol{a}_m(\phi,\theta) = e^{-j\boldsymbol{p}_m^T \frac{2\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} \sin\theta\cos\phi \\ \sin\theta\sin\phi \\ \cos\theta \end{bmatrix}} \in \mathbb{C}^{M\times 1} \tag{12}$$

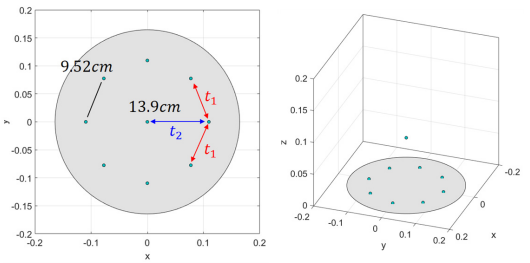

Fig. 1. Spherical Cap Antenna array

www.dbpia.co.kr

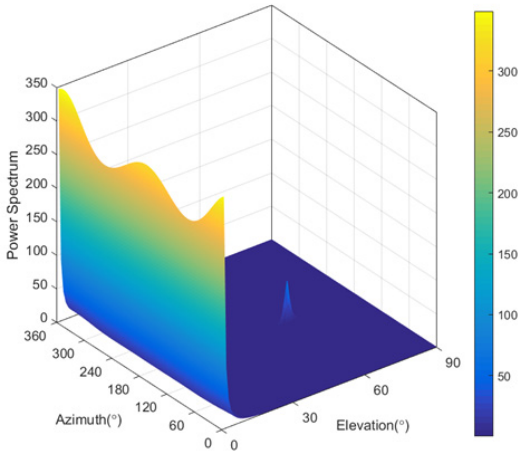

Fig. 2. Power spectrum with compensation algorithm for Spherical Cap Antenna array

이 때, 고도각이 0도일 경우 조향벡터 $\boldsymbol{a}_m(\phi,\theta)=\begin{bmatrix}1\\1\\\vdots\\1\end{bmatrix}$으로 나타나게 된다. 그림 2의 안테나 배열의 상호 결합 행렬은 다음과 같다.

$$\boldsymbol{T_p}=\begin{bmatrix}1 & t_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & t_1 & t_2\\ t_1 & 1 & t_1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & t_2\\ \vdots & & \ddots & \ddots & & & & \vdots\\ t_1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & t_1 & 1 & t_2\\ t_2 & \cdots & t_2 & t_2 & \cdots & t_2 & t_2 & 1\end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (6)이 성립하며 식 (13)을 $\boldsymbol{T_p}=\boldsymbol{I}+t_1\times\boldsymbol{T_1}+t_2\times\boldsymbol{T_2}$로 정의하면 행렬 $\boldsymbol{B}=[\boldsymbol{a}\mid\boldsymbol{T_1a}\mid\boldsymbol{T_2a}]\in\mathbb{C}^{M\times3}$로 쓸 수 있다. 이때 $\boldsymbol{T_1}$, $\boldsymbol{T_2}$는 다음과 같다.

$$\boldsymbol{T_1}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0\\ 1 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & \ddots & \ddots & & & \vdots\\ \vdots & & & \ddots & \ddots & 1 & 0\\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\boldsymbol{T_2}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1\\ \vdots & & & \ddots & \ddots & & & \vdots\\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1\\ 1 & \cdots & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 0\end{bmatrix} \quad (15)$$

따라서 $\boldsymbol{a}=\begin{bmatrix}1\\1\\\vdots\\1\end{bmatrix}$, $\boldsymbol{T_1a}=\begin{bmatrix}2\\\vdots\\2\\0\end{bmatrix}$, $\boldsymbol{T_2a}=\begin{bmatrix}1\\\vdots\\1\\8\end{bmatrix}$ 이다. 이들 3개의 열벡터가 선형독립 관계가 아님을 쉽게 보일 수 있다 ($16\boldsymbol{a}=7\boldsymbol{T_1a}+2\boldsymbol{T_2a}$). 따라서 행렬 $\boldsymbol{B}$는 full column rank를 갖지 못하며 $\boldsymbol{K}(\theta)=\boldsymbol{B}^H(\theta)\hat{\boldsymbol{E}}_N\hat{\boldsymbol{E}}_N^H\boldsymbol{B}$이므로 행렬 $\boldsymbol{K}$가 full column rank를 갖지 못하게 된다. 이때 역행렬이 존재하지 않으므로 식 (11)으로 파워 스펙트럼을 나타낼 수 없다.

3.2 온라인 상호 결합 보상을 위한 개선된 3차원 배열 구조

그림 3은 기존의 Spherical Cap 안테나 배열 구조에서 두 개의 안테나를 제거하여 원형 구조를 깨트린 형상이다. 인접한 안테나 간의 거리는 반파장이며 t_1,t_2는 각각 상호 결합 계수를 나타낸다. 가운데 안테나는 반파장만큼의 높이를 가진다. 이 경우 안테나 구조가 바뀌었으므로 상호 결합 행렬의 구조도 변하게 된다. 수정된 7개의 안테나를 갖는 Spherical Cap 안테나 배열 구조의 상호 결합 행렬은 다음과 같다.

$$\boldsymbol{T_p}=\begin{bmatrix}1 & t_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_2\\ t_1 & 1 & t_1 & 0 & 0 & 0 & t_2\\ 0 & t_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & t_2\\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_1 & 0 & t_2\\ 0 & 0 & 0 & t_1 & 1 & t_1 & t_2\\ 0 & 0 & 0 & 0 & t_1 & 1 & t_2\\ t_2 & t_2 & t_2 & t_2 & t_2 & t_2 & 1\end{bmatrix} \quad (16)$$

위와 같은 방법으로 전개한다. $\boldsymbol{T_p}=\boldsymbol{I}+t_1\times\boldsymbol{T_1}+t_2\times\boldsymbol{T_2}$으로 정의하면 $\boldsymbol{T_1}$, $\boldsymbol{T_2}$는 다음과 같다.

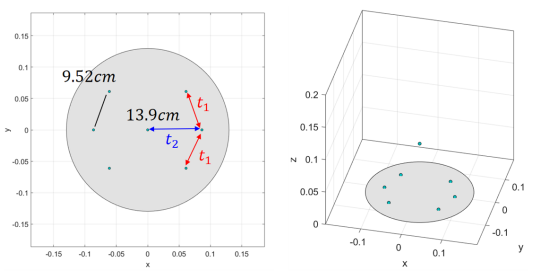

Fig. 3. Modified Spherical Cap Antenna array

www.dbpia.co.kr

$$T_1 = \begin{bmatrix} 0&1&0&0&0&0&0 \\ 1&0&1&0&0&0&0 \\ 0&1&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&0 \\ 0&0&0&1&0&1&0 \\ 0&0&0&0&1&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0&1 \\ 1&1&1&1&1&1&0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

따라서 $a = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$, $T_1 a = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $T_2 a = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ 6 \end{bmatrix}$

이다. 이들 열벡터가 선형독립 관계임을 쉽게 확인할 수 있다(가우스 소거법으로 확인 가능하다.). 따라서 행렬 B가 full column rank를 가지므로 행렬 K의 역행렬이 존재하고 따라서 식 (11)으로 상호 결합이 보상된 파워 스펙트럼을 구할 수 있다. 기존의 Spherical Cap 배열에서 발생하던 고도각 0도에서의 특이행렬 발생 문제가 사라지게 된다. 이를 Modified Spherical Cap (MSPC)으로 정의하기로 한다. 그림 4에서 파워 스펙트럼의 왜곡이 없이 정상적으로 피크를 추정하는 모습을 확인할 수 있다.

Ⅳ. 온라인 상호 결합 보상 및 재밍 방향탐지 성능 분석

앞에서 개선된 Modified Spherical Cap 배열 안테나를 제시하고 보상 알고리즘을 적용했을 때 파워 스펙트럼의 피크 추정을 통해서 입사각을 추정할 수 있음을 확인하였다. 그림 5는 SNR에 따른 RMSE를 통해 온라인 보상 알고리즘의 성능을 평가한 모습을 나타낸 그래프이다. 200회의 몬테카를로 시행횟수와 50개의 스냅샷을 사용하였으며 방위각 170도, 고도각 60도의 1개의 소스를 가정하였다. $t_1 = 0.37 - 0.29j$, $t_2 = -0.12 + 0.05j$의 상호 결합 계수를 가정하였다.

상호 결합이 존재하나 보상이 이루어지지 않을 경우 SNR이 증가해도 방향탐지 오차가 어느 수준을 유지하는 것에 비해 온라인 보상 알고리즘을 적용한 경우 오차가 눈에 띄게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 상호 결합의 크기가 작을 때와 강할 때 방향탐지 오차를 비교한 모습이다. 상호 결합이 작을 때 $t_1 = 0.37 - 0.29j$, $t_2 = -0.12 + 0.05j$를 가정하였으며 상호 결합이 클 때 $t_1 = 0.68 - 0.49j$, $t_2 = -0.19 + 0.12j$를 가정하였다. 보상이 이루어지지 않은 경우 상호 결합이 커짐에 따라 오차가 커지지만 보상이 이루어진 경우에는 상호 결합의 크기에 관계없이 오차가 일정하게 감소하는 모습을 확인할 수 있다.

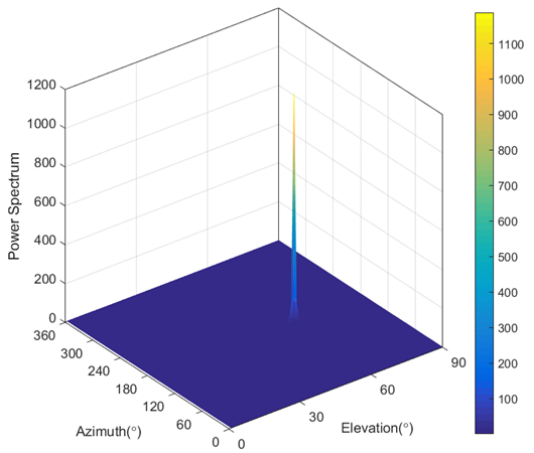

Fig. 4. Power spectrum with compensation algorithm for MSPC Antenna array

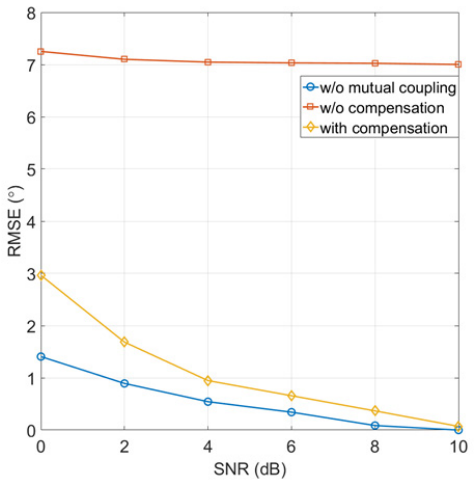

Fig. 5. SNR-RMSE graph of 7-elements MSPC Antenna array

www.dbpia.co.kr

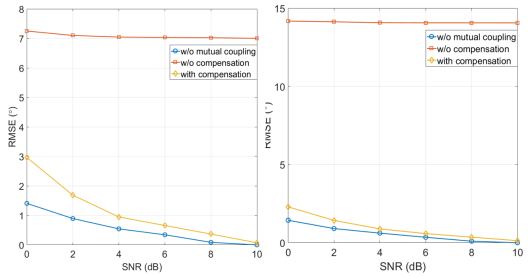

Fig. 6. Weak mutual coupling (Left) Strong mutual coupling (Right)

ULA, URA, MSPC 세 가지 타입의 배열 안테나에 대해 상호 결합이 존재하는 환경에서 복수의 재밍신호가 들어올 때 온라인 보상 알고리즘을 적용한 재밍신호의 방향탐지 성능 분석을 수행하였다.

그림 7, 그림 8, 그림 9는 각각 3개의 재밍신호가 입사하며 상호 결합이 존재할 때 ULA, URA, MSPC 안테나에서 온라인 보상 알고리즘을 적용한 후 파워 스펙트럼의 피크를 검출하는 모습을 나타낸다. ULA 안테나는 방위각을 검출할 수 없으므로 고도각에 대해서만 피크를 가지며 전 방위각에 대해서 모두 같은 스펙트럼을 나타낸다. URA와 MSPC 안테나는 방위각과 고도각 둘 다에 대해 피크를 검출할 수 있다. 상

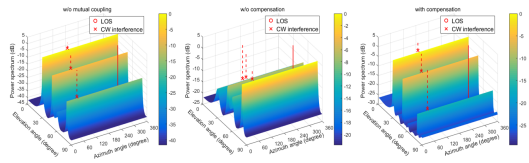

Fig. 7. Power spectrum with online compensation algorithm for ULA (3 jammers)

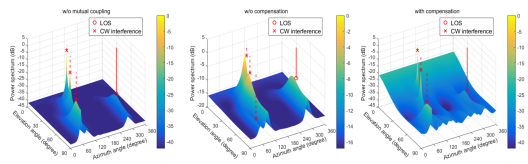

Fig. 8. Power spectrum with online compensation algorithm for URA (3 jammers)

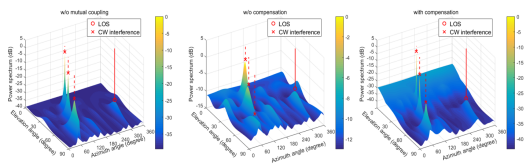

Fig. 9. Power spectrum with online compensation algorithm for MSPC (3 jammers)

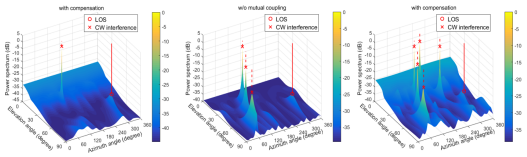

Fig. 10. Power spectrum of MSPC according to number of jammers

호 결합이 존재하나 보상이 이루어지지 않는 경우 파워 스펙트럼이 왜곡되어 피크 검출이 제대로 이루어지지 않는데에 반해 온라인 보상 알고리즘을 통해 재밍신호의 방향을 제대로 검출하는 모습을 확인할 수 있다. MSPC는 3차원 배열이기 때문에 높은 분해능을 가지므로 URA에 비해 좀 더 뾰족한 피크를 갖는 모습을 확인할 수 있다.

그림 10은 재밍신호가 각각 1개, 3개, 5개일 때 MSPC 안테나에서 온라인 보상 알고리즘을 적용한 파워 스펙트럼을 나타낸 모습이다. 재밍신호의 개수만큼 피크가 나타나므로 재밍신호의 개수와 상관없이 재밍신호 방향을 탐지할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

재밍 환경에서 위성항법 신호를 수신하기 위해서는 재밍신호의 방향을 추정 후 제거해야 한다. 이 때 안테나 간에 상호 결합이 존재할 때 재밍신호의 입사각을 추정하기 위해서는 보상 알고리즘이 필수적이다. 본 논문에서는 온라인 보상 알고리즘을 사용하여 시변 특성을 지닌 수신 신호 환경에서 상호 결합의 영향을 최소화하며 재밍신호의 방향을 정확히 추정하여 재밍 환경에서도 위성 항법 신호를 수신하는 방법에 대해 고찰하였다.

GPS용 3차원 소형 배열 안테나에 대한 성능분석을 위해 Spherical Cap 안테나를 고려하였지만 온라인 보상 알고리즘이 제대로 작동하지 않는다는 문제점이 있었고 이를 보완하기 위해 안테나 구조를 변경한 Modified Spherical Cap 안테나 배열 구조를 제안하였다. MSPC 안테나에서 온라인 보상 알고리즘이 잘 작동하는 것을 RMSE 분석을 통해 확인하였다.

ULA, URA, MSPC 세 가지 안테나 타입에 대하여 상호 결합 환경에 대한 MUSIC 스펙트럼을 분석하였다. 상호 결합이 존재하나 보상이 이루어지지 않은 경우 피크 추정에 왜곡이 생길 수 있음을 보였으며 온라인 보상 알고리즘을 적용한 경우 스펙트럼에서의 안정적인 피크 추정을 통해 정확한 도래각을 추정하는

www.dbpia.co.kr

모습을 확인하였다. 추후 연구에서는 더욱 높은 분해능을 갖는 다른 안테나 배열을 고려함으로서 빔포밍 이득을 높이고 더욱 안정적인 GPS 수신 환경을 만드는 방안을 고려해 볼 수 있다.

References

[1] J. Li, P. Stoica, and Z. Wang, "On robust Capon beamforming and diagonal loading," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 51, no. 7, pp. 1702-1715, Jul. 2003.

[2] S. Vorobyov, A. Gershman, and Z.-Q. Luo, "Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: A solution to the signal mismatch problem," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 51, no. 2, pp. 313-324, Feb. 2003.

[3] B. Liao, S.-C. Chan, and K.-M. Tsui, "Recursive steering vector estimation and adaptive beamforming under uncertainties," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 49, no. 1, pp. 489-591, Jan. 2013.

[4] K. Kim, K. Lee, and J. Lim, "Alternative scheme of INS-Dependent positioning for relative navigation without GRUs," *J. KICS,* vol. 40, no. 12, pp. 2520-2527, Dec. 2015.

[5] S Lim, S. Han, J. Lee, and J. Choi, "Tactical beamforming for anti-jamming under limited feedback," *J. KICS,* vol. 41, no. 11, pp. 1410-1413, Nov. 2016.

[6] I. Lee, S. Oh, and J. Han, "Narrow-band jamming signal cancellation algorithm for GPS receivers," *J. KICS,* vol. 41, no. 08, pp. 859-867, Aug. 2016.

[7] K. Kim, "Analysis of anti-jamming techniques for satellite navigation systems," *J. KICS*, vol. 38C, no. 12, pp, 1216-1227, 2013.

[8] L. Wang, Y. L. Li, S. B. Xu, W. Zeng, and K. Wei, "Robustness analysis of adaptive anti-jamming algorithms with channel mismatch and mutual coupling for GNSS systems," *IEEE ICSPCC,* pp. 705-710, Hong Kong China, 2012.

[9] K. A. Griffith and I. J. Gupta, "Effect of mutual coupling on the performance of GPS AJ antennas," *IEEE Position Location and Navig. Symp., Inst. Navig.,* pp. 871-877, May 2008.

[10] B. Friedlander and A. J. Weiss, "Direction finding in the presence of mutual coupling," *IEEE Trans. Ant. Propaga.*, vol. 39 pp. 273-284 Mar. 1991.

[11] J. Pierre and M. Kaveh, "Experimental performance of calibration and direction-finding algorithms," in *Proc. ICASSP*, vol. 2, pp. 1365-1368, Apr. 1991.

[12] F. Sellone and A. Serra, "A novel online mutual coupling compensation algorithm for uniform and linear arrays," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 55, no. 2, pp. 560-573, Feb. 2007.

[13] M. Lin and L. Yang, "Blind calibration and DOA estimation with uniform circular arrays in the presence of mutual coupling," *IEEE Ant. and Wirel. Propaga. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 315-318, Dec. 2006.

[14] A. Bazzi, D. T. M. Slock, and L. Meilhac, "Online angle of arrival estimation in the presence of mutual coupling," *IEEE SSP*, pp. 1-4, 2016.

[15] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Ant. Propaga.*, vol. 34, pp. 276-280, Mar. 1986.

강 규 식 (Kyusic Kang)

2016년 2월 : 한양대학교 수학과 학사

2016년 9월~현재 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사과정

<관심분야> DOA Estimation, Beamforming

www.dbpia.co.kr

신 천 식 (CheonSig Sin)

1990년 2월 : 한양대학교 전자공학과 학사졸업
2000년 2월 : 충남대학교 전자공학과 석사졸업
2005년 3월~현재 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 박사과정
1990년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원
<관심분야> 위성통신, 위성항법, 위성궤도 주파수

김 선 우 (Sunwoo Kim)

1999년 : 한양대학교 전파공학, 학사
2002년 : 미국 University of California, Santa Barbara, 전기컴퓨터공학, 석사
2005년 : 미국 University of California, Santa Barbara, 전기컴퓨터공학, 박사
2005년~현재 : 한양대학교 융합전자공학부 부교수
<관심분야> Wireless Positioning System, GNSS System, 5G Communication System.

www.dbpia.co.kr