

## GPS 항재밍을 위한 적응 배열 안테나의 성능 분석

### Performance Analysis of Adaptive Array Antenna for GPS Anti-Jamming

정 태 희\*

Taehee Jeong

#### ABSTRACT

In anti-jamming GPS receiver, adaptive signal processing techniques in which the radiation pattern of adaptive array antenna of elements may be adaptively changed used to reject interference, clutter, and jamming signals.

In this paper, I describes adaptive signal processing technique using the sample matrix inversion(SMI) algorithm. This adaptive signal processing technique can be applied effectively to wideband/narrowband anti-jamming GPS receiver because it does not consider the satellite signal directions and GPS signal power level exists below the thermal noise. I also analyzed the effects of covariance matrix sample size and diagonal loading technique on the system performance of five-element circular array antenna. To attain near optimum performance, more samples required for calculation covariance matrix. Diagonal loading technique reduces the system nulling capability against low-power jamming signals, but this technique improves robustness of adaptive array antenna.

Keywords : Adaptive Array Antenna(적응 배열 안테나), Anti-Jamming(항재밍), Adaptive Signal Processing(적응 신호처리), Sample Matrix Inversion(SMI), Diagonal Loading(대각 로드)

#### 1. 서 론

항법 위성을 이용하여 정밀한 항법 정보(위치, 속도, 시간)를 제공하는 위성 항법 시스템은 상업용(차량용 내비게이션, 스마트폰) 및 군사용(정밀타격 무기체계의 개발에 핵심적인 기술)으로 적용되고 있어 중요도 및 활용도는 갈수록 높아지고 있다. 항법 위성을 이용

한 항법 시스템의 중요성 및 활용성이 증대됨으로서 위성 항법 시스템에 인가되는 전파 방해 신호인 재밍(jamming) 신호의 억제 방법도 관심이 증가되고 있다.

위성 항법 시스템의 수신기에 수신되는 위성 신호의 파워는 매우 낮은 레벨(약 -130 dBm)이며 열잡음(thermal noise)보다 낮기 때문에, 외부의 간섭 신호나 의도적인 재밍 신호에 매우 취약한 구조를 가지고 있다<sup>[1]</sup>. 이에 따라 미약한 위성 신호에 대해 의도적인 재밍 신호를 송출함으로써 위성 신호를 교란시켜 위성 신호의 획득 방해 및 추적 손실을 발생시켜 GPS에 크게 의존하고 있는 상업용 및 군사용 위성 항법

† 2013년 3월 7일 접수~2013년 5월 17일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 정태희(taehee@add.re.kr)

시스템을 무력화시킬 수 있다. 미국에서도 GPS 구축 초기부터 군사용 무기체계에 적용할 때 의도적인 재밍 신호의 위협 문제가 부각되어, 수신기의 항재밍 능력 강화, 위성 신호 파워 증가, 재밍 신호에 강한 코드 적용 등 다양한 항재밍 기술 개발이 꾸준히 진행되어왔다.

재밍 신호를 억제하는 방법 중 가장 효과적인 방법은 배열 안테나와 적응 신호처리 알고리즘을 이용하여 원하는 신호와 재밍 신호가 함께 수신된 신호에서 의도적인 재밍 신호만을 제거하는 방법이다<sup>2,3</sup>. 이러한 방법은 수신되는 신호에 따라 배열 안테나의 이득 패턴을 조정함으로써 원하는 신호는 더 잘 수신하며, 원치 않는 신호(재밍 신호)는 제거한다.

본 논문에서는 적응 배열 안테나에서 광대역 및 협대역 재밍 신호를 제거하기 위한 적응 신호처리 알고리즘 중 sample matrix inversion(SMI) 방식에 대해 설명하였고, 이 알고리즘에서 최적 가중치(weight vector)를 계산할 때 입력 신호의 공분산 행렬(covariance matrix)을 사용하는데, 이 공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수와 공분산 행렬의 대각 성분을 수정하는 대각 로드(diagonal loading) 기법이 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. 2장에서는 적응 배열 안테나의 설계에 관한 내용을 기술하고, 3장에서는 재밍 신호를 효과적으로 제거하는 적응 신호처리 알고리즘의 개요 및 성능 영향 요인에 대해 설명하였다. 4장에서는 적응 신호처리 알고리즘에서 공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수와 대각 로드 기법이 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 제시하였다.

## 2. 적응 배열 안테나

적응 배열 안테나(Fig. 1)는 배열 안테나에 적응 신호처리 알고리즘을 이용하여 배열 안테나의 이득 패턴을 제어하여 원하지 않는 방향의 신호는 제거하고, 원하는 방향의 신호는 더 크게 수신할 수 있는 안테나이다. 이 적응 배열 안테나를 위성 항법 수신기에 적용하면 특정 방향으로부터 입사되는 재밍 신호를 제거할 수 있고, 위성이 송신하는 위성 신호만을 수신할 수 있어 재밍 신호가 있을 때도 항법이 가능하다. 적응 배열 안테나는 광대역 및 협대역 재밍 신호를

모두 제거할 수 있어 효과적이며, 이론적으로 제거할 수 있는 재밍 신호의 수는 배열 안테나의 소자의 수와 관계가 있으며 소자의 수를  $N$ 이라고 했을 때 제거할 수 있는 재밍 신호의 수는  $N-1$ 개이다.

본 논문에서는 적응 배열 안테나의 크기 및 4개 이하의 재밍 신호를 제거하기 위하여 5소자 원형 배열 안테나(Fig. 2)를 사용하였다. 이때 배열 안테나의 상호 결합(mutual coupling) 및 이득 패턴을 고려하여 각 소자 간의 간격은 반파장( $\lambda/2$ )으로 설계하였다. 배열 안테나에서의 상호 결합은 한 소자가 다른 소자에 미치는 영향을 말하는데, 서로의 이득 패턴 및 입력 임피던스에 영향을 미치므로 작을수록 좋다. 배열 안테나의 상호 결합은 적응 배열 안테나의 항재밍 성능의 열화 요인 중 하나이므로<sup>4</sup> 본 논문에서는 상호결합을 -12 dB 이하로 설계하였다.

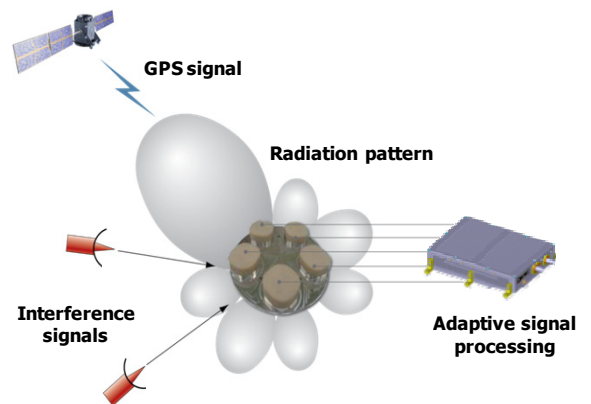


Fig. 1. Adaptive array antenna for GPS anti-jamming

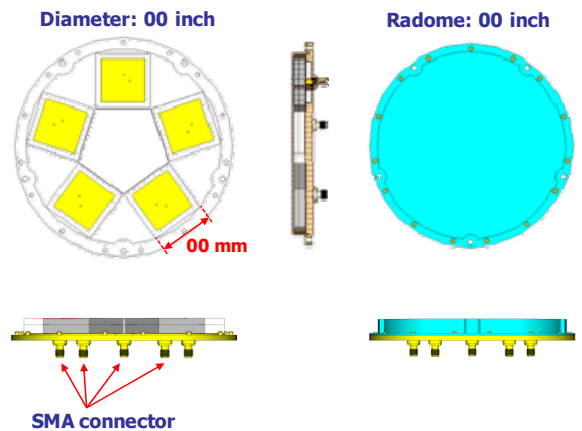


Fig. 2. Five-element circular array antenna

### 3. 적응 신호처리 알고리즘

#### 가. 개요

배열 안테나가 위성 신호와 재밍 신호를 함께 수신하는 경우 원하지 않는 재밍 신호만을 제거하기 위한 기법들은 다양하게 존재한다<sup>3,5</sup>. 배열 안테나에서 재밍 신호의 수신 방향을 예상하여 해당 영역에 널(null)을 형성하여 재밍 신호를 감쇄시키기 위한 안테나 이득 패턴 변경 방법과 적응 신호처리 알고리즘을 이용하여 수신된 재밍 신호의 파워를 감쇄시키는 방법, 관성 항법 측정을 통한 수신기의 코드/반송파 추적 루프의 변경 등이 있다. 이 중 본 논문에서는 적응 배열 안테나와 적응 신호처리 알고리즘을 이용하여 수신된 재밍 신호의 파워를 최소화하는 방법을 설명하고 성능을 분석하였다.

재밍 신호를 효과적으로 제거하기 위한 적응 신호처리 알고리즘(Fig. 3)은 배열 안테나의 각 소자를 통해 들어온 신호들에 가중치를 곱해 출력을 결정한다. 적응 신호처리 알고리즘을 통해 계산된 최적 가중치는 재밍 신호의 파워가 최소가 되도록 결정되며, 재밍 신호가 변화하더라도 변화된 재밍 신호의 파워가 최소가 되도록 반복적으로 갱신된다.

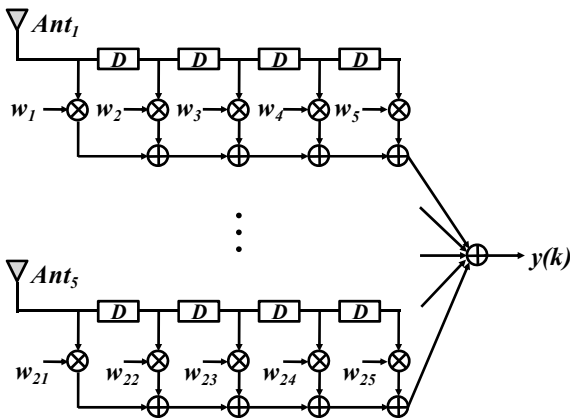


Fig. 3. Block diagram of sample matrix inversion(SMI) algorithm

적응 배열 안테나는  $5(N)$ 개의 소자로 구성되어 있고, 각 소자별로  $5(M)$ 개의 시간 지연 탭(tap)을 갖는다. 따라서 총  $25(NM)$ 개의 가중치를 갖고, 원하는 신호 방향의 주파수 응답(frequency response)을 결정하기 위해서는  $5(M)$ 개의 제약조건이 필요하다. 남은 20

$(NM-M)$ 개의 자유도(degree of freedom)는 적응 배열 안테나의 출력 파워를 최소화 하는 가중치를 결정하는데 사용된다.  $5(M)$ 개의 제약조건으로 원하는 신호 방향의 주파수 응답이 고정되므로, 시간 지연 탭에서 원하는 신호와 재밍 신호가 무상관(uncorrelated)하다면 적응 배열 안테나의 출력 신호 파워를 최소화하는 것은 원치 않는 재밍 신호의 파워를 최소화 하는 것과 같다<sup>6</sup>. 위성 신호와 재밍 신호는 무상관하므로 적응 신호처리 알고리즘을 이용해서 출력 신호 파워를 최소화한다면 재밍 신호를 억제할 수 있다.

적응 신호처리 알고리즘에서 배열 안테나를 통해 입력되는 각 탭의 신호와 가중치를 벡터로 표시하면 다음과 같다.

$$\mathbf{X}(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \dots \ x_{25}(k)]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{W}(k) = [w_1(k) \ w_2(k) \ \dots \ w_{25}(k)]^T \quad (2)$$

여기서  $k$ 는 샘플링(sampling) 된 시간이며,  $T$ 는 행렬의 전치(transpose)를 뜻한다.

출력  $y(k)$ 과 평균 출력 파워  $E[y^2(k)]$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$y(k) = \mathbf{W}^H(k)\mathbf{X}(k) = \mathbf{X}^H(k)\mathbf{W}(k) \quad (3)$$

$$E[y^2(k)] = E[\mathbf{W}^H(k)\mathbf{X}(k)\mathbf{X}^H(k)\mathbf{W}(k)] = \mathbf{W}^H(k)\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}\mathbf{W}(k) \quad (4)$$

여기서  $H$ 는 행렬의 에르미트(hermitian)를 뜻하며,  $\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}$ 는 입력 신호의 공분산 행렬을 나타내며 다음과 같다.

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = E[\mathbf{X}(k)\mathbf{X}^H(k)] \quad (5)$$

입력 신호의 공분산 행렬을 이용하여 평균 출력 파워를 최소화 하는 최적 가중치  $\mathbf{W}_{opt}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다<sup>6</sup>.

$$\mathbf{W}_{opt} = \frac{\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}^{-1}\mathbf{S}}{\mathbf{S}^H\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}^{-1}\mathbf{S}} \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{S}$ 는 수신 신호의 입사 방향을 나타내는 조

향 벡터(steering vector)이다. 본 논문에서는 배열 안테나의 1번 소자를 통해 들어온 신호를 기준으로 위성 신호가 천정 방향에서 오는 것을 가정하여 최적 가중치  $\mathbf{W}_{opt}$ 를 구하기 위해서 조향 벡터  $\mathbf{S}$ 를 다음과 같이 설정하였다.

$$\mathbf{S} = [111110 \cdots 0]^T \quad (7)$$

식 (3)에 최적 가중치  $\mathbf{W}_{opt}$ 를 대입하면 최적 출력  $y_{opt}(k)$ 를 구할 수 있는데 다음과 같다.

$$y_{opt}(k) = \mathbf{W}_{opt}^H \mathbf{X}(k) \quad (8)$$

이 알고리즘을 이용해서 구한 최적 출력은 파워가 가장 작게 유지되므로 수신된 재밍 신호는 제거되며 위성 신호의 크기는 열잡음보다 작기 때문에 손실이 거의 없다. 따라서 항재밍 위성 수신기에 효과적으로 사용 가능하다.

#### 나. 성능 영향 요인

적응 신호처리 알고리즘에서 최적 가중치  $\mathbf{W}_{opt}$ 를 구할 때 결정적으로 영향을 주는 것은 식 (6)에서 볼 수 있듯이 입력 신호의 공분산 행렬  $\mathbf{R}_{XX}$ 이다. 입력 신호의 공분산 행렬  $\mathbf{R}_{XX}$ 를 좀 더 자세히 쓰면 다음과 같다.

$$\mathbf{R}_{XX} = \frac{1}{K} \sum_i^K \mathbf{X}(i) \mathbf{X}^H(i) \quad (9)$$

여기서  $K$ 는 공분산 행렬을 계산하는데 사용한 샘플의 수이다.

적응 신호처리 알고리즘에서 원하는 신호의 입사 방향의 정보가 불완전하거나 다른 신호로 인해 원하는 신호가 변질되었을 때 많은 수의 샘플을 사용하여 공분산 행렬을 계산해야 이론적인 최적의 성능을 낼 수 있다고 알려져 있다<sup>[7]</sup>.

공분산 행렬의 고유값(eigenvalue)들도 성능과 관련이 있다. 공분산 행렬의 고유값을  $\lambda_i$ 라고 할 때, 잡음 고유값의 퍼짐  $EV_{spread}$ 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$EV_{spread} = \frac{\lambda_{J_n+1}}{\lambda_{NM}} \quad (10)$$

여기서  $J_n$ 은 재밍 신호의 개수이고, 각 고유값들의 크기 비교는 다음과 같다.

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_{NM} \quad (11)$$

공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수  $K$ 가 작아, 공분산 행렬의 추정이 불완전하다면 잡음 고유값의 퍼짐이 커지며 배열 안테나 이득 패턴의 측엽(side lobe)이 증가하여 다중 경로(multi-path)를 통해 들어오는 신호의 수신율이 커져 재밍 신호를 제거하는 성능이 열화 되고, 배열 안테나의 이득이 정상 상태(steady state)의 배열 안테나 이득 대비 감소하는 단점이 있다<sup>[8]</sup>.

이론적인 최적의 성능을 내려면 많은 수의 샘플을 이용하여 공분산 행렬을 계산해야 된다. 하지만, 많은 수의 샘플을 이용하여 공분산 행렬을 계산하고 이를 이용하여 최적 가중치를 구하면, 취한 샘플에 비례하여 최적 가중치가 갱신되는 시간이 증가한다. 따라서 재밍 신호가 최적 가중치가 갱신되는 시간보다 빨리 변한다면 재밍 신호를 효과적으로 제거할 수 없다. 재밍 신호는 변하지 않는다고 가정하고 수신기의 위치가 변한다고 하면 수신기의 입장에서는 재밍 신호가 변하는 것과 같으므로 위와 같은 현상이 발생할 수 있다.

즉, 공분산 행렬을 이용하는 SMI 방식의 알고리즘에서는 동적 성능과 이론적인 최적의 성능 사이에는 상충(trade-off) 관계가 있다.

공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수  $K$ 가 작을 때 생기는 이러한 열화 현상을 개선하기 위해 공분산 행렬의 대각 성분을 수정하여 최적 가중치를 계산할 수 있다<sup>[8,9]</sup>. 이러한 수정을 대각 로드 기법이라 하며 수정한 공분산 행렬  $\mathbf{R}'_{XX}$ 은 다음과 같다.

$$\mathbf{R}'_{XX} = \mathbf{R}_{XX} + \delta \sigma \mathbf{I} \quad (12)$$

여기서  $\mathbf{I}$ 는 항등 행렬(identity matrix),  $\delta$ 는 대각 로드 상수이며,  $\sigma$ 는 공분산 행렬  $\mathbf{R}_{XX}$ 의 대각 성분들의 표준 편차이다. 공분산 행렬의 대각 성분들은 각 탭에서 입력 신호의 평균 파워를 의미하는데, 이들의 표준 편차는 입력 신호의 잡음과 관련이 있다. 따라서 식 (12)은 공분산 행렬의 대각 성분들에 잡음을 더해주는 것과 같고, 각 시간 지연 탭의 입력 신호에 잡음을 더

해주는 것과 같다.

공분산 행렬의 대각 성분들에  $\delta\sigma$ 를 더해주면, 고유값도  $\delta\sigma$ 만큼 증가하며, 잡음 고유값의 퍼짐은 다음 식과 같이 된다. 이때 고유벡터(eigenvector)는 변하지 않는다.

$$EV'_{spread} = \frac{\lambda_{J_n+1} + \delta\sigma}{\lambda_{NM} + \delta\sigma} < \frac{\lambda_{J_n+1}}{\lambda_{NM}} \quad (13)$$

위 식 (13)에서와 같이 대각 로드 기법으로 잡음 고유값의 퍼짐은 작아지면서 공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수가 작을 때 생기는 열화 현상인 배열 안테나 이득 패턴의 측엽 증가와 이득 감소로 인한 성능 열화가 감소하며 대각 로드 기법 이후 이득 패턴은 이상적인 패턴에 가까워진다.

하지만, 대각 로드 기법은 배열 안테나에 작은 제밍 신호를 가해주는 것과 같으므로 작은 제밍 신호에 대해 시스템의 제거 용량(nulling capability)을 감소시키며 곧 최대 제거 깊이(null depth)를 줄여 성능 열화를 가져올 수 있다. 따라서 공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수  $K$ 와 마찬가지로 대각 로드 상수  $\delta$ 의 크기를 적절히 선택하여야 한다.

다음 장에서 실제 위성 신호 및 제밍 신호가 함께 수신 될 때 샘플의 수  $K$ 와 대각 로드 상수  $\delta$ 의 크기가 적응 배열 안테나의 항제밍 성능에 미치는 영향을 분석한다.

#### 4. 적응 신호처리 알고리즘 성능 분석

##### 가. 성능 분석 환경 및 방법

적응 신호처리 알고리즘의 성능을 분석하기 위해서 실제 구현된 적응 배열 안테나에서 위성 신호 및 제밍 신호를 배열 안테나로 인가한 후 analog-to-digital converter(ADC) 및 data acquisition(DAQ) 장비를 이용해 추출하여 MATLAB을 통해 전산 모의 실험(computer simulation)을 수행하였다.

야외에 적응 배열 안테나를 설치하여(Fig. 4) 위성 신호와 제밍 신호를 동시에 수신 할 수 있게 하였다. 이때 인가한 제밍 신호의 종류는 continuous wave(CW)으로 설치하였고, 주파수는 1575.42 MHz(L1)로, 신호 파워는 배열 안테나에 -55 dBm으로 수신되게 설정하였다. 이 값은 배열 안테나에 도달하는 위성신호를

-130 dBm으로 가정하면 J/S 75 dB에 해당한다. 또, 제밍 신호가 배열 안테나의 방위각(azimuth angle) 155도, 앙각(elevation angle) 75도로 입사하도록 위치하였다.

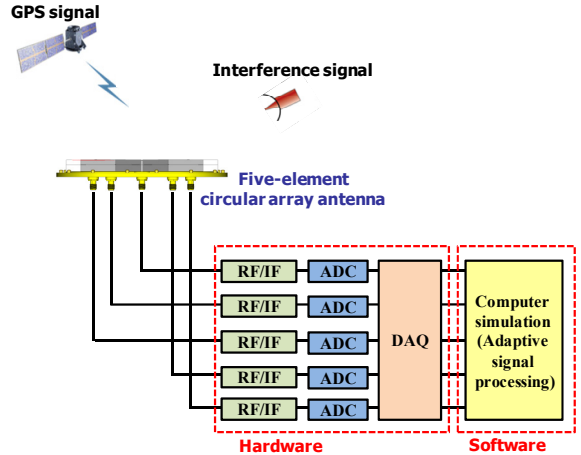


Fig. 4. GPS and interference signals logging

적용 배열 안테나를 통해 수신된 위성 신호와 제밍 신호가 각 채널의 RF/IF부를 통과한 뒤 14-bit ADC를 통해 DAQ 장비에 각 채널 별로 저장된다. 각 채널 별로 저장된 신호를 사용하여 적응 신호처리 알고리즘에 대해 전산 모의 실험하였다.

적용 신호처리 알고리즘의 성능을 분석하기 위해서 다음과 같은 방법으로 전산 모의 실험을 진행하였다. 첫 번째로 공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수  $K$ 의 크기를 변화시켜가면서 성능에 미치는 영향을 분석하였고, 두 번째로 대각 로드 기법의 영향을 확인하기 위해 샘플의 수  $K$ 의 크기는 고정시킨 후 상수  $\delta$ 를 변화시켜가면서 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 항제밍 성능에 대한 척도로는 계산된 최적 가중치에 따른 이득 패턴과 잡음 고유값의 퍼짐, 제거 깊이가 있다.

##### 나. 샘플의 수 영향 분석

최적 가중치의 계산을 위해 사용한 공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수  $K$ 의 크기가 적응 신호처리 알고리즘의 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해서 샘플의 수  $K$ 의 값을 다음과 같이 변화시켜가면서 성능을 분석하였다.

$$K = \beta NM \quad (\beta = 20, 30, 40, 50) \quad (14)$$

여기서  $\beta$ 는 상수이며,  $N$ 과  $M$ 은 각각 적응 배열 안테나의 소자와 시간 지연 탭 수이다. 구현된 적응 배열안테나에서  $N$ 과  $M$ 은 둘 다 5이다.

샘플의 수  $K$ 의 크기를 결정하는  $\beta$ 의 크기에 따른 잡음 고유값의 퍼짐 및 제거 깊이를 Table 1에 나타내었고, 각각의 경우에 대한 스펙트럼 및 이득 패턴을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5의 스펙트럼에서 파란색과 빨간색은 각각 적응 신호처리 알고리즘 적용 전과 후를 나타낸다. 적용 전과 후의 차이로 제거 깊이를 계산할 수 있다. Fig. 6의 이득 패턴에서 검은색 원으로 재밍 신호의 입사 위치를 표시하였다.

Table 1. The effect of covariance matrix sample size on the system performance

| $\beta$                   | 20    | 30    | 40    | 50    |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| EV <sub>spread</sub> [dB] | 154.2 | 150.5 | 147.5 | 145.6 |
| Null depth [dB]           | 51    | 54    | 55    | 59    |

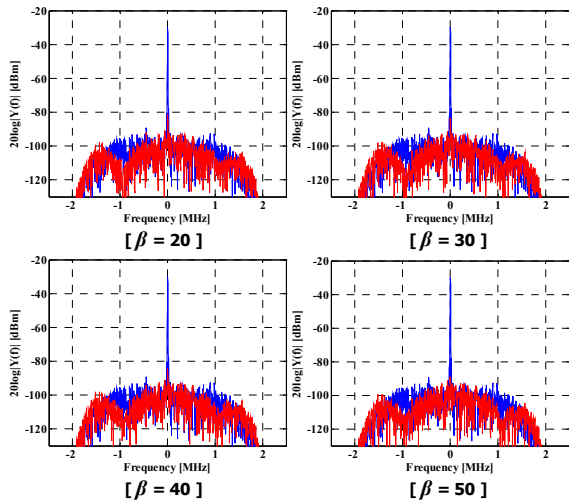


Fig. 5. Spectrums of SMI algorithm with varying parameter  $\beta$

공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수  $K$ 의 크기를 결정하는  $\beta$ 의 크기에 따른 잡음 고유값의 퍼짐은  $\beta$ 의 크기가 증가할수록 즉, 샘플의 수  $K$ 가 증가할수록 작아짐을 알 수 있다. 이는 샘플의 수  $K$ 가 증가할수록 잡음에 대한 추정이 더 좋아지면서 잡음 고유값들이 모이게 되기 때문이다.

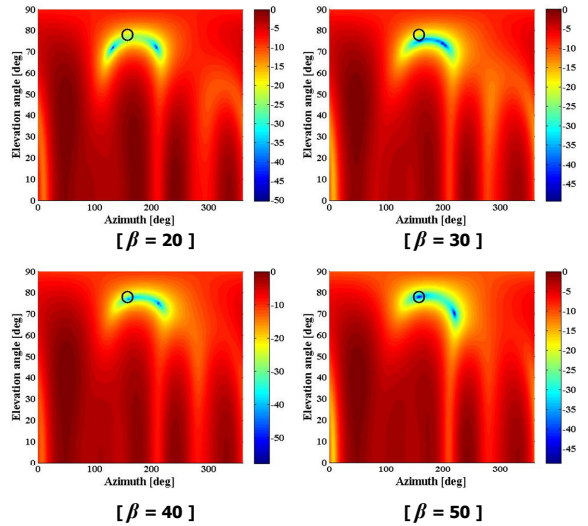


Fig. 6. Gain patterns of SMI algorithm with varying parameter  $\beta$

재밍 신호를 제거하는 척도인 제거 깊이도  $\beta$ 의 크기가 증가함에 따라 증가했다.  $\beta$ 의 크기가 20에서 50까지 증가되었을 때 제거 깊이는 51 dB에서 59 dB로 8 dB정도 향상되었다. 즉, 항재밍 성능이 8 dB정도 향상됨을 알 수 있었다. 이는 샘플의 수  $K$ 가 증가함에 따라 공분산 행렬의 추정이 더 정확해지기 때문이다. 더 정확한 값으로 추정된 공분산 행렬을 이용해 최적가중치를 계산하므로 좀 더 이론적으로 최적인 가중치에 가까워진다.

이득 패턴 역시,  $\beta$ 의 크기가 증가함에 따라 널의 위치가 재밍 신호의 위치에 가까워짐을 알 수 있다. 이는 위와 같은 이유로 최적 가중치가 이론적인 최적치에 가까워지면서 재밍 신호의 위치에 가깝게 널이 형성되어 더욱 효과적으로 재밍 신호를 제거할 수 있게 된다.

#### 다. 대각 로드 영향 분석

식 (12)의 대각 로드 기법에서 대각 로드 상수  $\delta$ 의 크기가 적응 신호처리 알고리즘의 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해서  $\delta$ 의 값을 다음과 같이 변화시켜가면서 성능을 분석하였다.

$$\delta = 0, 0.001, 0.01, 0.1 \quad (15)$$

이때 대각 로드 상수  $\delta$ 의 영향만을 분석하기 위해

공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수  $K$ 의 크기를 결정하는  $\beta$ 는 20으로 고정하였다.

대각 로드 기법에서 대각 로드 상수  $\delta$ 의 크기에 따른 잡음 고유값의 퍼짐 및 제거 깊이를 Table 2에 나타내었고, 각각의 경우에 대한 스펙트럼 및 이득 패턴을 Fig. 7와 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7의 스펙트럼에서 파란색과 빨간색은 각각 적용 신호처리 알고리즘 적용 전과 후를 나타낸다. 적용 전과 후의 차이로 제거 깊이를 계산할 수 있다. Fig. 8의 이득 패턴에서 검은색 원으로 재밍 신호의 입사 위치를 표시하였다.

Table 2. The effect of diagonal loading on the system performance( $\beta = 20$ )

| $\delta$                  | 0     | 0.001 | 0.01  | 0.1   |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $EV_{\text{spread}}$ [dB] | 154.2 | 27.54 | 10.32 | 1.785 |
| Null depth [dB]           | 51    | 51    | 53    | 54    |

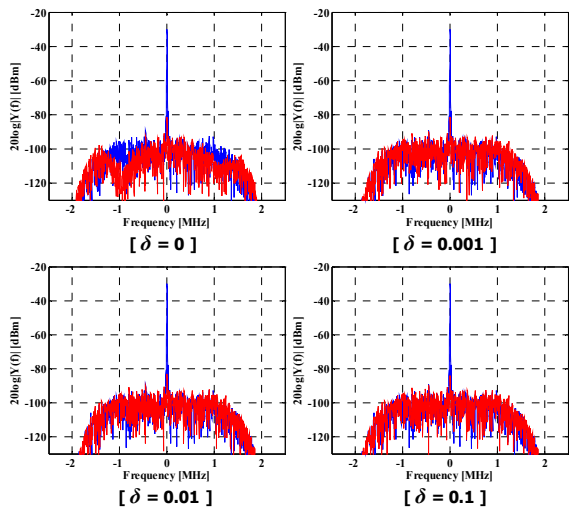


Fig. 7. Spectrums of SML algorithm with varying parameter  $\delta$

대각 로드 상수  $\delta$ 의 크기에 따른 잡음 고유값의 퍼짐은  $\delta$ 의 크기가 증가할수록 작아짐을 알 수 있다. 이는 대각 로드 기법으로 고유값들도  $\delta\sigma$ 만큼 증가하며 식 (13)와 같이 잡음 고유값의 퍼짐이 줄어들게 되기 때문이다.

재밍 신호를 제거하는 척도인 제거 깊이도  $\delta$ 의 크기가 증가함에 따라 증가하였다. 대각 로드 상수  $\delta$ 의 크

기가 0에서 0.1까지 증가되었을 때 제거 깊이는 51 dB에서 54 dB로 3 dB정도 향상되었다. 즉, 항재밍 성능이 3 dB정도 향상됨을 알 수 있었다.

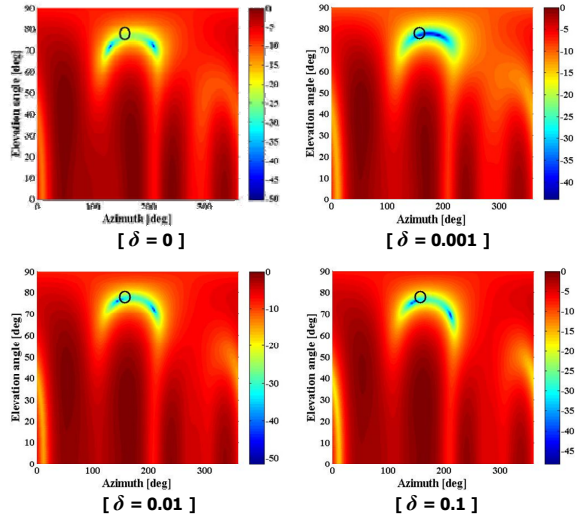


Fig. 8. Gain patterns of SML algorithm with varying parameter  $\delta$

이득 패턴 또한  $\beta$ 의 크기가 증가함에 따라 널(null)의 위치가 재밍 신호의 위치에 가까워짐을 알 수 있다. 이는 잡음 고유값의 퍼짐이 작아지면서 공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수가 작을 때 생기는 열화 현상인 이득 패턴의 축엽 증가와 이득 감소로 인한 성능 열화가 감소해 대각 로드 기법 이후 이득 패턴이 이상적인 패턴에 가까워지기 때문이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 GPS 항재밍을 위한 적용 배열 안테나를 설계하고, 이에 사용된 적용 신호처리 알고리즘의 성능을 분석하였다.

적용 신호처리 알고리즘에서 최적 가중치를 계산할 때 입력 신호의 공분산 행렬을 사용하는데, 이 공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수와 공분산 행렬의 대각 성분을 수정하는 대각 로드 기법이 항재밍 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

분석 결과 샘플의 수가 증가할수록 공분산 행렬의 추정치가 더 정확해지기 때문에 이론적인 최적의 성능에

가까워짐을 알 수 있었고, 공분산 행렬을 계산할 때 사용한 샘플의 수가 작을 때 열화 현상이 존재하는데 이를 대각 로드 기법이 개선함을 확인하였다.

하지만, 공분산 행렬을 계산하는데 사용한 샘플의 수가 증가할수록 동적 성능은 열화 되고, 대각 로드 기법으로 작은 재밍 신호에 대해 시스템의 제거 용량 감소로 성능 열화를 가져올 수 있기 때문에 적절한 샘플의 수와 대각 로드 상수 결정이 필요하다.

## References

- [1] E. D. Kaplan, "Understanding GPS : Principles and Applications", Artech House, 1996.
- [2] D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, "Array Signal Processing : Concepts and Techniques", Prentice Hall, 1993.
- [3] R. Klemm, "Principles of Space-Time Adaptive Processing", The Institution of Electrical Engineers, 2002.
- [4] I. J. Gupta and A. A. Ksienski, "Effect of Mutual Coupling on the Performance of Adaptive Arrays", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-31, No. 5, Sept. 1983.
- [5] M. V. Maksimov et al., "Radar Anti-Jamming Techniques", Artech House, 1979.
- [6] O. L. Frost, III, "An Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Array Processing", Proc. IEEE, Vol. 60, No. 8, pp. 926~935, Aug. 1972.
- [7] D. M. Boroson, "Sample Size Considerations for Adaptive Arrays", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 16, No. 4, pp. 446~451, Jul. 1980.
- [8] B. D. Carlson, "Covariance Matrix Estimation Errors and Diagonal Loading in Adaptive Arrays", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 24, No. 4, pp. 397~401, Jul. 1988.
- [9] J. Li, P. Stoica, and Z. Wang, "On Robust Capon Beamforming and Diagonal Loading", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 51, No. 7, pp. 1702~1715, Jul. 2003.