

# 항재밍 GPS 시스템을 위한 선형 어레이 안테나 성능 분석

김기윤\*

## Performance Analysis of Linear Array Antenna for Anti-jamming GPS Systems

Kiyun Kim\*, Regular Member

### 요 약

본 논문에서는 항재밍 GPS(Global Positioning System) 시스템을 위한 선형 어레이 안테나(linear array antenna) 시뮬레이터(simulator)를 설계하고 시뮬레이션을 통해 다양한 성능 평가를 수행하였다. 먼저 GPS 위성의 신호 구조 분석을 통해 모의 송신 신호를 발생시키고, 선형 어레이 안테나 고려시 잡음 환경하에서의 어레이 수에 따른 SNR(Signal to Noise power Ratio) 성능을 분석하였다. 또한 MMSE(Minimum Mean Square Error) 방식의 신호처리 시스템을 통해 재머(jammer) 수에 따른 항재밍 빔패턴 (beam pattern) 성능을 분석하였으며, 안테나 캘리브레이션(calibration) 문제를 고려하여 어레이간 지연이 존재하는 경우에서의 항재밍 성능을 분석하였다.

**Key Words :** Anti-jamming, GPS(Global Positioning System), Array Antenna, MMSE(Minimum Mean Square Error), Calibration

### ABSTRACT

In this paper, I design a linear array antenna simulator for anti-jamming GPS systems and perform various performance analysis by simulation. First, I generate simulated transmission signals through the analysis of GPS satellite signal structure, and analyze SNR(Signal to Noise power Ratio) performance of linear array antenna according to number of arrays under noise environments. In addition, I analyze the performance of the anti-jamming beam pattern using MMSE(Minimum Mean Square Error) signal processing method, and also analyze the anti-jamming performance considering antenna calibration problem when there are different delays between arrays.

## I. 서 론

GPS 신호는 지상 20,183 km라는 장거리 위치의 위성에서 보내온 전파가 지상에 수신되기 때문에 전파 수신 감도가 매우 낮아 재머(jammer)에 의한 재밍(jamming, 전파교란, 방해)에 매우 취약한 한 문제점을 가지고 있다[1~3]. 군사용 GPS 시스템은 이러한 의도적인 재밍 신호에 대해 대응할 수 있는 능력을 갖추어야만 GPS를 이용한 군사 임무를 정확히 수행할 수 있다[3]. GPS 시스템은 본래 확산코드(spreading code)를 사용하기 때문에 확산 스펙트럼 이득으로 일부 간섭 및 잡음 등을 극복할 수 있으나 의도적인 재밍에 대응하기에는 부족하다. 따라서, 항재밍(anti-jamming)을 위해 공간적(spatial)으로 재밍 신호를 제거할 수 있는 적응형 안테나(adaptive antenna)가 사용되며, 아울러 적응형 안테나와

함께 디지털 신호처리를 통해 빔(beam)을 형성하여 원하는 신호방향으로의 포밍(forming)과 재밍 신호방향으로 널링(nulling)이 가능하도록 하는 방식이 선호되고 있다[4~5].

따라서 본 논문에서는 GPS 위성 신호를 분석하고 송신신호에 발생에 관한 시뮬레이터와 재밍 신호가 인가된 환경에서의 선형 어레이 안테나(linear array antenna)에 의한 수신 신호 시뮬레이터를 제작하고 다양한 시뮬레이션을 수행하였다.

먼저 II장에서는 GPS 송신기 구조를 분석하고, III 장에서는 선형 어레이 안테나를 가정한 GPS 수신기 구조를 분석하고 시뮬레이터를 제작하였다. IV 장에서는 잡음 환경에서의 안테나 수에 따른 이득 계산과 MMSE 방식의 신호처리 시스템을 통해 재머수에 따른 항재밍 빔패턴 성능을 분석하고, 어레이간 서로 다른 신호 지연이 발생한 경우 항재밍 성능에 미치는 정도를 확인하였다. 그리고 V 장에서 결론을 맺는다.

\*명지전문대학 공학정보학부 전기과 (kkim@mjc.ac.kr)

접수일자 : 2015년 11월 3일, 수정완료일자 : 2015년 12월 17일, 최종재확정일자 : 2015년 12월 24일

## II. GPS 송신기 구조 분석

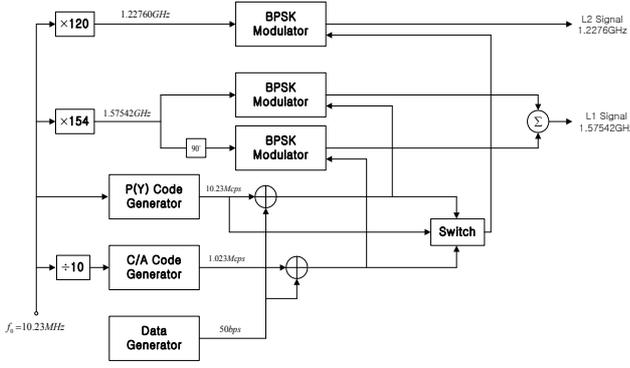


그림 1. GPS 송신기 구조(L1/L2)

기존의 GPS에서 보내는 위성 신호는 그림 1과 같이 위성의 발진 주파수 10.23MHz의 154 배인 1575.42 MHz를 사용하는 L1과 120 배인 1227.6 MHz를 사용하는 L2 반송파가 있다(Block-IIR-M 이후부터 L2C 포함). 아울러 GPS 현대화 계획에 따라 새롭게 도입된 10.23MHz의 115 배인 1176.45 MHz의 반송파인 L5를 사용하고 있다[6~7].

GPS 서비스는 암호화 되어 있어 암호를 해독할 수 있는 장비를 갖춘 미국 정부 또는 동맹국 군대, 특수한 임무의 사람에게만 허용되는 서비스인 PPS(Precise Positioning Service)와 일반인에게 제공되는 것으로 Selective Availability(SA)에 의해서 PPS보다는 정확도가 떨어지는 SPS(Standard Positioning Service)로 나뉜다. 그러나 2000 년대에 들어서는 의도적 오차를 발생시키는 SA의 사용은 하고 있지 않은 실정이다.

이러한 L1/L2C/L5 반송파에는 항법 메시지(navigation message)와 함께 C/A(Coarse/Acquisition) 코드, P-Code가 실려 전송되는데 각각의 특징은 다음과 같다[6~8].

### 1. C/A Code

C/A Code는 Coarse Acquisition Code 또는 Standard Code로 불리우며, 칩 속도(chip rate)는 1.023 Mcps 로서 고유한 PRN(Pseudo Random Noise, 의사 랜덤 잡음)을 반복하게 되는데, PRN은 랜덤하기 때문에 잡음처럼 보이지만, 실제로는 일정한 규칙성을 나타내는 알려진 신호이다. 이 PRN은 각 위성마다 값이 다르기 때문에 각각의 위성을 식별할 수 있는 코드 값이 되기도 한다.

### 2. P Code

P-Code는 Precision Code로 불리우며 칩 속도는 10.23 Mcps 로서 C/A 코드가 민간에게 개방된 것과는 달리 군사 목적으로 정밀도와 암호화를 위해 사용되는 코드이다. 이 코드는 AS(Anti-Spoofing) 모드로 동작하기 위해서 인가된 사람에게만 사용될 수 있도록 Y-Code로 부호화하여 송신한다.

부호화된 Y-Code는 사용자의 수신기 채널에서 AS 모듈을 분류하여 암호 해독을 수행한다. 아울러 암호화 되는 키는 1주일 단위로 갱신되며, PPS에서 사용된다.

## 3. 항법 메시지(Navigation Message)

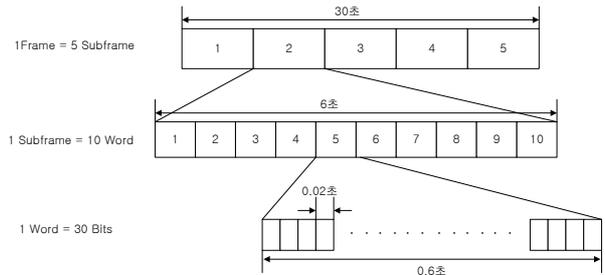


그림 2. GPS 항법 메시지 데이터 포맷

GPS 위성은 위성에 탑재된 시각 정보, 위성의 상태정보(almanac), 위성 궤도정보와 이력(ephemeris), 시스템 파라미터(system parameter) 등 항법 메시지(navigation message)를 50 bps(bit/sec)의 속도로 주기적으로 방송한다.

GPS 항법 메시지 프레임은 그림 2에 나타내었다. 항법 메시지 1 개의 프레임은 1500bit의 정보를 담고 있으며 30초 주기를 가진다. 하나의 프레임은 위성으로부터 5 개의 부프레임(subframe)으로 이루어진 연속적인 프레임(frame)들의 군집이다. 부프레임은 6초 간격이며 300bit 정보를 담고 있으며 10 개의 Word 로 구성되어 있다. 첫 번째 부 프레임에는 GPS위성 클럭, 두 번째와 세 번째 부 프레임에는 GPS위성 궤도 데이터를 담고 있다. 나머지 네 번째와 다섯 번째 부 프레임에는 다른 시스템 데이터(모든 위성들의 일지 데이터)를 담고 있다. 항법 메시지를 완성하기 위해선 25개의 프레임(125 개의 부 프레임, 12.5분의 주기)이 필요하다. 한 부 프레임(300 bits)에는 간단히 데이터 오류 및 정정을 할 수 있는 패리티 비트를 담고 있다. 50 bps의 전송률(data rate)을 갖는 항법 메시지를 1.023 Mcps의 chip rate을 갖는 C/A code로 확산한다면, 1 bit의 항법 메시지는 20,460 cps으로 확산된다.

## III. 항재밍 GPS 수신기 구조 분석

### 1. 적응형 안테나

적응형 안테나는 다수의 안테나로 구성된 어레이 안테나(array antenna)를 이용하여 원하는 안테나 빔 패턴을 생성한다. 일반적으로 어레이 수가 증가할수록 빔 패턴이 좁아져서 성능이 증가하지만 시스템의 복잡도도 따라서 증가하게 된다. 적응형 안테나는 원하는 사용자 신호 대 간섭 신호의 비를 최대화하도록 원하는 사용자의 위치에 따라서 안테나 어레이의 가중 벡터(weight vector)를 계속 갱신하는 적응형

안테나로서, 이를 적용하여 원하는 수신 신호에 대한 이득은 높이고 재밍 신호를 공간적으로 널링 시켜줌으로써 항재밍 효과를 최대화할 수 있다.

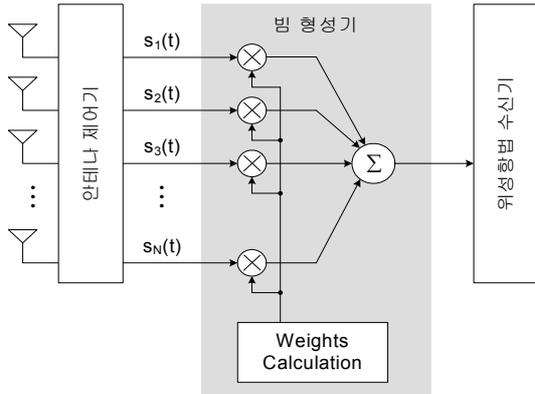


그림 3. 적응형 안테나 빔 형성기 구조

## 2. Uniform Linear Array 안테나

송신측에서  $s(t)$ 를 반송주파수  $f_c$ 에 실어서 보내고 수신측에서  $\theta$ 각을 갖는 신호가 입사할 때,  $m$ 번째 안테나에서 수신된 신호  $r_m(t)$ 는 식(1)과 같다[9].

$$r(t) = s(t)e^{j2\pi f_c(t-(m-1)\tau)} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\tau$ 는 인접한 어레이 소자간의 지연으로 식 (2)와 같다.

$$\tau = \frac{d \sin \theta}{c} = \frac{\sin \theta}{2f_c} \quad (2)$$

식 (2)에서  $\theta$ 는 신호의 입사각이고 이웃한 어레이 소자간의 위상차는 식 (3)와 같다.

$$\Phi = 2\pi f_c \tau = \pi \sin \theta \quad (3)$$

식 (1)의 신호가 기저대역으로 천이하여 복소 신호로 변환하여 생긴 신호는 식 (4)와 같으며, 이를 벡터 표기법으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$r_m(t) = s(t)e^{-j(m-1)\phi} + n(t) \quad (4)$$

$$R(t) = A(\theta)s(t) + N(t) \quad (5)$$

여기서,  $R(t)$  및  $N(t)$ 는  $R(t) = [r_1(t) \ r_2(t) \ \dots \ r_N(t)]^T$   
 $N(t) = [n_1(t) \ n_2(t) \ \dots \ n_N(t)]^T$ 를 나타낸다.  
 식 (5)에서  $A(\theta)$ 는 신호의 방향벡터(steering vector)로

서 아래와 같다.

$$A(\theta) = [1 \ e^{j\phi} \ \dots \ e^{(N-1)j\phi}]^T \quad (6)$$

방향벡터는 array manifold 라고 하며, DOA(Direction of Arrival)을 찾고, 빔 포밍과 어레이 동작 측면에서 중요하다. 수신된 신호 벡터  $X(t)$ 가 어레이의 가중 벡터  $W$ 를 거친 후의 출력  $Y(t)$ 는 아래 식과 같다.

$$Y(t) = W^H X(t) \quad (7)$$

이러한 적응형 안테나의 동작을 위해서는 가중 벡터 추정과 DOA 추정이 필요하다.

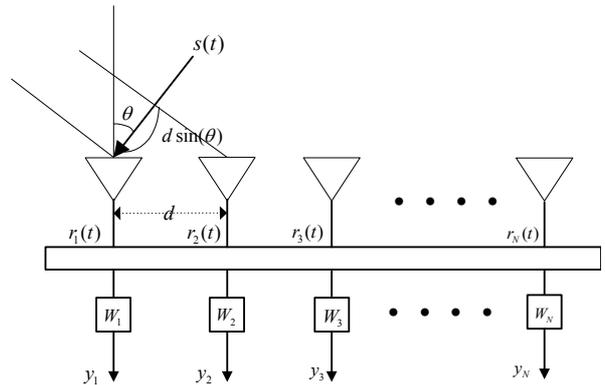


그림 4. 균일 선형 어레이 안테나

## 3. MMSE(Minimum Mean Square Error) 방식

가중벡터 추정 방식으로 널리 사용되는 MMSE는 다음과 같다[2,10]. 수신된 신호와 훈련 열(training sequence) 사이의 오차 제곱 평균값인 비용 함수(cost function)은 식 (8)과 같다.

$$J = E[|d(n) - y(n)|^2] \quad (8)$$

여기서,  $d(n)$ 은 원하는 신호이고,  $y(n)$ 은 수신된 신호이다. 식(8)을 풀어서 정리하면 비용함수는 식 (9)과 같다.

$$\begin{aligned} J &= E[|d(n) - y(n)|^2] \\ &= E[|d(n) - W^H X(n)|^2] \\ &= E[(d(n) - W^H X(n))(d(n) - W^H X(n))^*] \\ &= W^H E[X(n) X(n)^H] W - E[d(n) X(n)^H] W \\ &\quad - W^H E[X(n) d(n)^*] + E[d(n) d(n)^*] \end{aligned} \quad (9)$$

비용함수를 최소화하기 위해 식(9)을 미분한 결과를 0으로 설정하면 식 (10)과 같다.

$$\nabla J = -2P + 2RW = 0 \quad (10)$$

여기서,  $R$ 은 안테나에 대한 입력 신호  $X(n)$ 에 대한 자기 상관 행렬(auto correlation matrix)로서  $R = E[X(n)X(n)^H]$  이고  $P$ 는 어레이 안테나에 대한 입력 신호  $X(n)$ 과 원하는 신호  $d(n)$ 간의 상호 상관 행렬(cross correlation matrix)  $P = E[X(n)d(n)^*]$ 이다. 식 (10)에서 비용함수를 최소화 하는  $W$ 가 최적의 가중 계수로서 MMSE로 구해진 최적의 가중 계수  $W_{opt}$  는 식 (11)과 같다.

$$W_{opt} = R^{-1}p \quad (11)$$

## VI. 항재밍 GPS 수신기 성능 분석

본 절에서는 선형 어레이 안테나 구조의 항재밍 GPS 성능 평가를 수행하였다. 여기서 DOA(Direction of Arrival) 추정 알고리즘은 적용하지 않았으며, 수신 신호의 DOA는 알고 있다는 가정하에 성능 평가가 수행되었다.

### 1. 어레이 수에 따른 이득 분석

이상적인 경우 어레이 안테나 출력 신호의 신호대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)는 아래와 같다[9].

$$SNR_{out} = \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} |w_n|^2} \frac{S_s}{S_n} \quad (12)$$

여기서,  $N$ 은 안테나 어레이 수,  $w_n$  은 가중 벡터이며,  $S_s$ 와  $S_n$  은 각각 수신 신호의 신호전력과 간섭전력이다.

어레이 안테나 출력 신호의 SNR이 위와 같다면 안테나 이득  $G$ 는 아래와 같다.

$$G = \frac{SNR_{out}}{SNR_{in}} = \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} |w_n|^2} = \|W\|^{-2} \quad (13)$$

$\|W\|^{-2} = (w^H w)^{-1}$ 로서, 안테나 어레이 수  $N$ 이 된다. 즉, 적응형 안테나 적용시  $10 \log_{10}(N)$  [dB]의 SNR 이득을 얻을 수 있다.

그림 5는 SNR=7dB 에서 안테나 어레이 수에 따른 측정된 SNR을 이상적인 값과 시뮬레이션한 값을 나타낸 것이다. 안테나 어레이수가 1개에서 2개로 늘어나면 3dB 증가하지만, 1개에서 3개 늘어나면 4.77dB 수준으로 증가함을 알 수 있다. 안테나 어레이 수가 7개가 된다면 8.5dB 정도의 SNR 개선을 가져오게 됨을 알 수 있다. 본 시뮬레이션을 통해 적응형 안테나를 적용하게 되면, 안테나 어레이 수에 따른 안테나 이득  $G$  만큼의 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

그러나 포화 곡선(saturation curve)의 형태로 좋아지므로 DF(Direction Finding)을 고려한 적절한 어레이 수의 선정이 필요함을 알 수 있다.

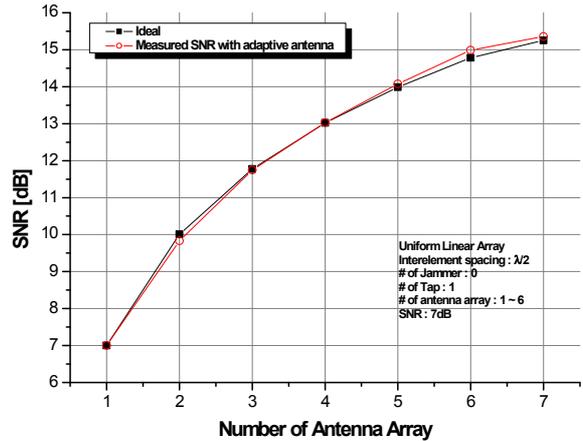


그림 5. 안테나 어레이수에 따른 SNR 성능

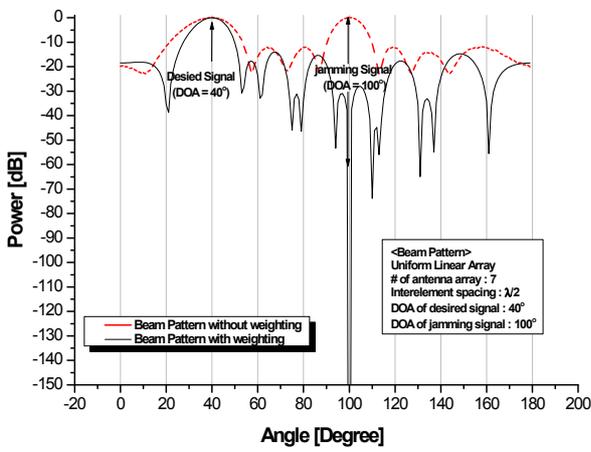
### 2. MMSE 적용 성능 분석

본 절에서는 선형 어레이 안테나에 MMSE 방식을 적용하여 안테나 빔 패턴 성능을 제시하였다. 먼저 성능평가를 위한 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

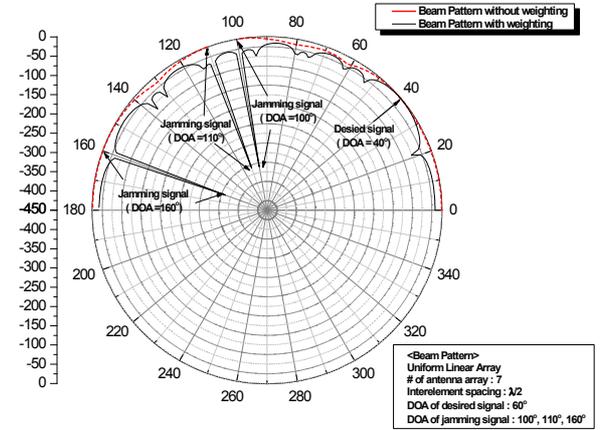
표 1. 항재밍 GPS 시뮬레이션 주요 파라미터

Parameters	Value
Chip Rate	1.023Mcps
PRN Code	C/A code
Modulation	BPSK
Sample Rate	16 samples/chip
Spreading Factor	1023
Antenna Array	Uniform Linear Array
Length of Inter-element Spacing	$\lambda/2$
# of antenna Array	7
DOA of Desired Signal	$40^\circ$

실제 GPS 시스템은 50 bps의 전송률을 갖는 항법 메시지(navigation message)를 1.023 Mcps의 칩 속도(chip rate)를 갖는 C/A code로 확산하게 되므로 실제 1 bit의 항법 메시지는 20,460 chips으로 확산된다. 그러나 1 bit 를 20460 chips으로 확산하여 시뮬레이션을 수행하면 시뮬레이션 수행 시간(run-time)이 매우 오래 걸리기 때문에 본 논문에서는 1 bit를 1023 chips로 확산시켰다. 적용된 안테나 어레이는 일반적으로 적용되는 안테나 어레이간 간격이  $\lambda/2$  로 동일한 균일 선형 어레이 안테나(uniform linear array antenna)를 고려하였으며, 안테나 어레이 수는 7개로 설정하였다. 또한 수신 신호의 DOA는 추정을 통해 설정해야 하지만, 본 논문에서는 수신 신호의 DOA를  $40^\circ$  로 알고 있는 값으로 설정하였다.

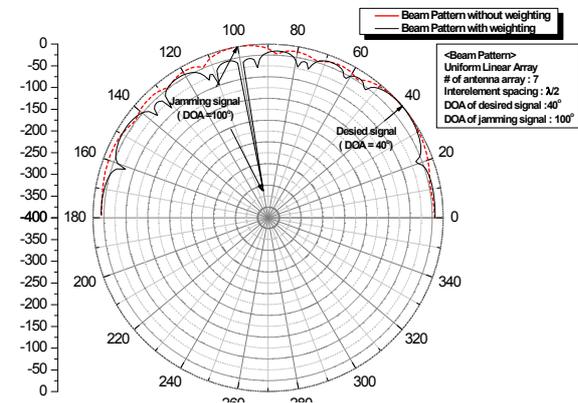


(a) 부분방위 좌표 성능



(b) 전방위 좌표 성능

그림 7. 재머가 3개인 경우 성능



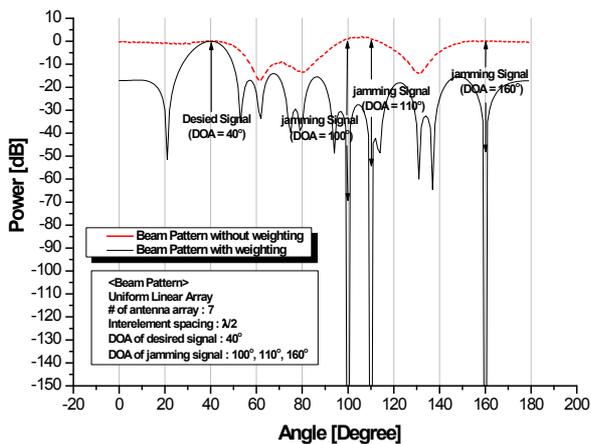
(b) 전방위 좌표 성능

그림 6. 재머가 1개인 경우 성능

그림 6과 그림 7은 재머가 1개인 경우(재밍 방향 100°)와 재머가 3개인 경우(재밍 방향 100°, 100°, 160°)에 대하여 논문에서 설계한 항재밍 GPS 수신기 시뮬레이터의 어떻게 동작하는지를 나타낸 결과이다. 위의 빔 패턴은 수신 어레이 안테나의 관점에서의 빔 패턴이며, 송신 신호를 모두 안다는 가정하에서의 이상적인 빔 패턴이다. 그림 6 및 그림 7에서 MMSE에 의한 가중 벡터를 적용하지 않으면 재밍 신호에 의해 원하는 신호뿐 아니라 재밍 신호의 방향으로 수신 안테나 빔 패턴 전력 역시 커지게 되나, 가중 벡터를 적용하게 되면, 원하는 방향으로만 빔 포밍(beam forming)을 하게 되며, 재밍 신호의 방향으로의 널링이 됨을 확인할 수 있다.

### 3. 어레이간 지연을 고려한 성능평가

안테나 어레이에 수신된 신호는 이상적으로 동일한 시점을 가져야 하지만, 실제 하드웨어 구현 시 어레이 안테나에 수신되는 신호는 각 안테나에 시간 지연에 의해 동일한 시점이 아닌 서로 다른 시점을 갖게 되어 디지털 신호 처리 시 샘플 오프셋(sample offset)이 존재하게 된다. 따라서 캘리브레이션(calibration) 작업이 매우 중요한 요소로 작용하는데, 본 절에서는 안테나 어레이에 도달하는 신호에 대해 샘플 오프셋이 존재하는 경우의 빔 패턴 분석을 통해 어레이간 지연 문제가 성능에 얼마만큼 영향을 미치는지를 성능 분석하였다. 아래의 빔 패턴 성능은 안테나 어레이 7개를 고려하였으며, 샘플 오프셋은 작은 샘플 오프셋인 경우(각각 -3 샘플, -2 샘플, -1 샘플, 0 샘플, 1 샘플, 2 샘플, 3 샘플인 경우), 큰 샘플 오프셋인 경우(-12 샘플, -8 샘플, -4 샘플, 0 샘플, 4 샘플, 8 샘플, 12 샘플)에 대해 샘플 오프셋이 발생하지 않은 경우와의 비교 성능이다.



(a) 부분방위 좌표 성능

그림 8에서 보는 바와 같이 빔패턴 성능을 통해 각 안테나 어레이에 수신된 신호의 샘플 오프셋이 존재하여도 재밍 신호는 제거되고 원하는 방향으로 안테나 빔이 형성되는 빔 패턴 성능을 보임을 확인할 수 있다. 그러나 재밍 방향에서는 널링 효과가 샘플 오프셋이 큰 것이 작은 것보다 약 13dB 정도

열화되는 것을 알 수 있는데 이것은 어레이간 지연 문제가 항재밍 효과에 부정적 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 아울러 DOA 추정을 고려한 항재밍 GPS 시스템인 경우 DOA 추정 성능을 더욱 열화시키게 되므로 항재밍 성능에 더 큰 열화를 가져올 것이 예상된다. 따라서 안테나 어레이 간 지연 요소를 보정하여야 정확한 항재밍 GPS 수신기 성능을 기대할 수 있을 것이다.

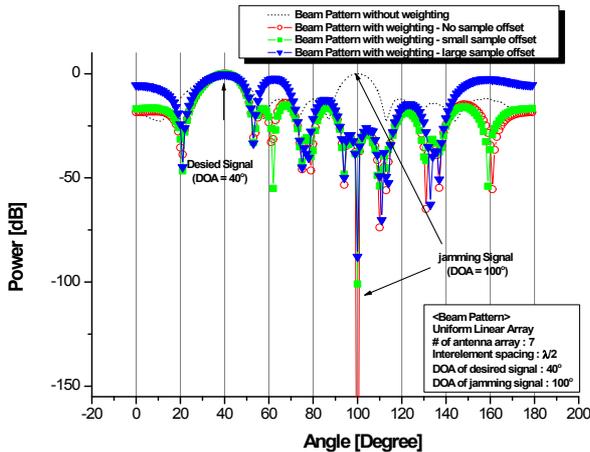


그림 8. 어레이간 지연을 고려한 성능

## V. 결론

본 논문에서는 항재밍 GPS 시스템을 위한 선형 어레이 안테나 시뮬레이터를 설계하고 다양한 성능 평가를 수행하였다. 잡음 환경하에서의 선형 안테나의 어레이 수에 따른 SNR은 어레이 수가 늘어날수록 좋아지지만 포화 곡선 (saturation curve)의 형태로 좋아지므로 DF(Direction Finding)을 고려한 적절한 어레이의 갯수의 선정이 필요함을 알 수 있었다. 아울러 MMSE 방식의 신호처리 시스템을 통해 가중 벡터를 구하고 이를 적용하면, 원하는 방향으로만 빔 포밍 (beam forming)을 하게 되며, 재밍 신호의 방향으로 널링이 됨을 확인할 수 있었다. 또한 어레이 간 지연이 발생하는 경우는 재밍 방향에 13dB 정도의 항재밍 성능을 열화 시키는 것을 알 수 있었으며, 따라서 안테나 어레이 간 지연 요소를 보정하여야 함을 알 수 있었다.

향후 DOA 추정이 결합된 항재밍 GPS 시스템에 대한 항재밍 성능평가와 다양한 신호처리 알고리즘들을 적용한 경우의 성능평가가 필요하다.

## 참고 문헌

[1] 김기윤, "위성항법시스템을 위한 항재밍 기술 분석", 한국통신학회논문지, 제38권 12호, pp. 1216-1227, 2013. 12.  
 [2] 한정수, 김기윤, 김석중, 김현도, 최형진, "Anti-Jamming GPS

시스템을 위한 적응형 디지털 신호처리에 관한 분석", 한국통신학회논문지, 제32권 8호, pp. 745-757, 2007. 8.  
 [3] 임덕원, "GPS 전파교란 피해사례와 감시기술 동향", 항공우주산업기술동향, 제11권 1호, pp. 169-176, 2013.  
 [4] X. H. Wang, X. W. Shi, P. Li, Y. F. Bai, B. Liu, R. Li, and H. J. Lin, "Smart antenna design for GPS/GLONASS anti-jamming using adaptive beamforming," IEEE 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT), pp. 1149-1152, May 2010.  
 [5] L. Li, X. Xi, and J. Wang, "Research on GPS anti-jamming algorithm based on adaptive antennas," 2010 International Symposium on Signals Systems and Electronics(ISSSE), vol. 1, pp. 1-4, Sept. 2010.  
 [6] 김명돈, 정영태, 김해식, 김민호, 홍성일, 박재원, 변진식, "GPS 수신기의 C/A 코드 발생기 제작 및 프로세서에 의한 수신기 제어에 관한 연구", 대한전자공학학회논문지, 제17권 1호, pp. 32-36, 1994.  
 [7] 최현호, 임덕원, 이상욱, 김지훈, 이상정, "GPS L1/L2C/L5 수신기를 위한 적응 코드추적루프 설계", 제어로봇시스템학회논문지, 제17권 3호, pp. 283-288, 2011. 3.  
 [8] <https://ko.wikipedia.org/wiki/GPS>  
 [9] Harry L. Van Trees, Optimum array processing, Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory, Wiley-Interscience, 2002.  
 [10] Fante, R. L. and Vaccaro, J. J, "WideBand cancellation of interference in a GPS receive array," IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, vol. 36, Issue. 2, pp. 549-564, April 2000.

## 저자

김기윤(Kim, Ki Yun)

정회원



- 2002년 2월 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터 공학과 공학박사
- 2007년 6월 : 미국 Univ. of California, Los Angeles(UCLA) Post-doctor.
- 2008년 2월 : 삼성탈레스 기술연구소 책임연구원

· 2008년 3월~현재 명지전문대학 공학·정보학부 전기과 부교수

<관심분야> : 통신/영상 신호처리, 군통신, 이동통신, 의용공학 시스템 등