한국군사과학기술학회지 제13권 제2호, pp. 313~319, 2010년 4월

학술논문 센서 · 신호처리 부문

5소자 배열안테나의 공간 적응 널패턴 제어 알고리즘 성능분석

Performance Analysis of Spatial Adaptive Null Pattern Control Algorithm for 5 Elements Array Antenna

안 승 관* 이 상 정**
Seung-Gwan Ahn Sang-Jeong Lee

Abstract

GNSS receiver which uses the weak satellite signal is very vulnerable to the intentional jamming or non-intentional electromagnetic interference. One of the best method to overcome this disadvantage is to use an adaptive array antenna which has the capability of beamforming or nulling to the certain direction. In this paper, the performance of spatial adaptive null pattern control algorithm of 5 element array antenna is analyzed. A control algorithm which is designed in the 5 element array antenna is OPM(Output Power Minimization) which is eliminating the correlation characteristics between a reference antenna and the others. This algorithm can be applied effectively to the satellite navigation's CRPA because the satellite direction is not considered and GNSS signal power is below the thermal noise. The feature of the OPM algorithm is analyzed and the performance is compared with other null pattern control algorithm.

Keywords : GNSS(위성항법 시스템), Adaptive Array antenna(적응배열안테나), Beam Pattern Control(빔형상조정), OPM (Output Power Minimization)(출력 최소화)

1. 서 론

고도 2만km의 중궤도 위성을 사용하는 GNSS 수신기는 항체의 위치/속도/시각 등의 항법정보를 비교적 저렴하고 정확하게 측정할 수 있다[1]. 그러나 GNSS 위성은 장거리에서 전지구적으로 전송하기 때문에 지상에서 수신전력이 -130dBm 정도로 자연상태에서 발생하는 열잡음보다 작다. 따라서 의도적인 재밍신호나 비의도적인 간섭신호가 안테나에 수신될 경우 쉽게 위성신호를 잃어버린다[2]. 이러한 재밍취약성을 극복하기 위해서 크게 3가지의 기술이 개발되고 있는데, 첫번째는 가장 효과적인 배열안테나를 이용하는 기술이다[3~5]. 배열안테나 기술은 여러 개의 Element를 사용하여 특정방향의 원하는 신호를 증폭시키거나 원하지 않는 재밍신호를 감쇄시키는 기술이다. 이 기술은 고가이

† 2010년 12월 20일 접수~2010년 2월 4일 게재승인
* 국방과학연구소(ADD)
** 충남대학교(Chungnam National University)
책임저자 : 안승관(ahnseung@add.re.kr)

며, 신호처리가 복잡하고, 안테나의 크기가 커지는 단점이 있는데 비해 광대역 재밍신호를 포함한 대부분의 재밍신호에 가장 효과적으로 대항할 수 있는 기술이다. 두번째 기술은 협대역 재밍신호를 효과적으로 제거할 수 있는 신호처리 기술로서, 시간영역의 ATF (Adaptive Transversal Filter)와 주파수영역의 OFFT (Overlap Fast Fourier Transform) 등의 방식이 존재한다. 세번째 기술은 GNSS 수신기의 신호추적루프 성능을 향상시키는 기술로, 다차원적 신호추적을 가능케하는 Vector DLL 기술, Velocity aiding 방식의 강결합 기술, I/Q 데이터를 이용하는 초강결합 및 심층결합 기술 등이다[1,2].

본 논문에서는 광대역 재밍신호에 가장 효과적으로 대응할 수 있는 배열안테나의 제어 알고리즘을 연구하며, 특히 5소자 원형배열안테나의 공간 적응 널패턴 제어 알고리즘을 설계한다. 설계한 제어 알고리즘은 출력최소화(OPM : Output Power Minimization) 기법으로 특정 안테나 Element를 기준신호로 가정하여 타 안테나 Element와의 상관특성을 제거해주는 알고리즘이다[6,7]. 이러한 OPM 알고리즘의 널패턴 제어 성능을 타 알고리즘과 비교하여 분석한다.

2. 배열안테나 구조

배열안테나의 성능은 안테나 Element 개수 및 배치에 따라 기본적으로 좌우된다. 이론적으로 안테나 소자 개수가 N일 때, 재밍대응 가능한 재머 개수는 N-1로 알려져 있다. 또한 배치형태에 따라 일자형인 ULA(Uniform Linear Array), 격자형인 URA(Uniform Rectangular Array), 원형인 UCA(Uniform Circular Array), 원통형인 SRCA(Single Ring Cylindrical Array) 등이 존재한다. 본 논문에서는 2~4개 재밍신호를 처리할 수 있으며 가급적 작은 크기를 고려하여 Fig. 1과 같은 5소자 원형 배열안테나를 고려한다. 현재 GPS L1 및 L2 대역과 GLONASS L1 대역을 수신하기 위해서 Stacked Microstrip Patch 형태로 개발 하였다. 안테나 Element 사이 간격 또한 주요 설계요소인데, Mutual Coupling 및 널형성 가능 영역을 고려하여 일반적으로 널리 적용되는 반파장(λ/2) 간격 원리로 설계되었다. Mutual Coupling은 인접한 안테나의 영향을 받아 추가로 전파신호가 여기되는 안테나 특성인데, 현재 -15dB 이하의 설계사양을 갖고 있다. 이러한 Mutual Coupling은 배열안테나의 주요 성능결정 요소로 재밍대응 알고리즘에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[8,9]. 다음 장에서 공간 적응 널패턴 제어 알고리즘의 성능을 분석할 때 Mutual Coupling 영향을 시뮬레이션하여 설계사양의 타당성을 파악한다.

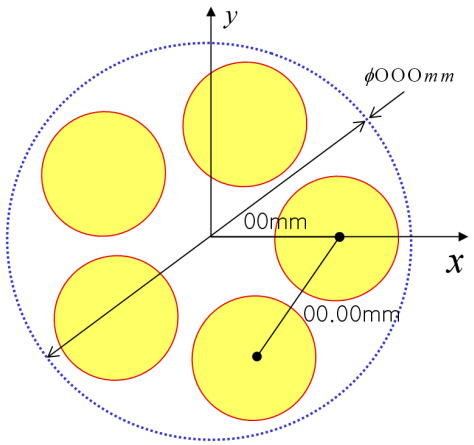


Fig. 1. 5소자 원형 배열안테나

3. OPM 알고리즘 설계 및 분석

가. OPM알고리즘 설계

5소자 배열안테나의 재밍대응 알고리즘으로 설계된 OPM은 특정 안테나 Element를 기준 신호로 가정하여 타 안테나 Element와의 상관특성을 제거하여 출력을 최소화시키는 알고리즘이다. 이러한 재밍대응 알고리즘 구현시 위성신호 손실을 최소화하기 위해서 Fig. 2와 같이 아날로그 부분을 최소화하고 대부분을 디지털 방식으로 신호처리하는 알고리즘을 설계하였다.

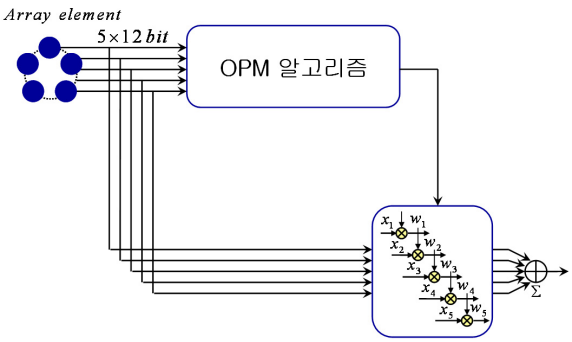


Fig. 2. 5소자 원형 배열안테나

즉 안테나 소자에 입력된 L밴드 대역의 위성신호를 RF단에서 수십MHz의 저주파수로 낮춘 후 12 bit로 A/D변환한 I/Q신호가 입력되며, OPM알고리즘에 의해 각 안테나 소자의 가중치(Weight Vector)가 결정된 후 입력된 I/Q 신호에 곱해진다. 가중치가 곱해진 5소자의 입력은 합해진 후 2bit Level로 조정되어 GNSS 수신기의 상관기에 직접 전달된다.

OPM 알고리즘은 목적함수 $f(w)$에서 독립변수 W의 제한조건에 따른 목적함수 $f(w)$의 최소화를 위한 최적해(Constrained Optimization) 문제로 귀결된다.

$$\min_{\mathrm{w}} f(\mathrm{w}) \; subject\ to\ g(\mathrm{w}) = 0 \tag{1}$$

이러한 최적해 문제의 해는 Lagrangian의 Stationary 점 중에 하나인 Lagrangian multiplier로 구해질 수 있다[3]. 먼저 수식 (1)의 Lagrangian을 구하면 다음 수식 (2)와 같고, 이의 Stationary점인 Lagrangian multiplier λ_0는 수식 (3)과 같다.

$$L(\mathrm{w},\lambda) = f(\mathrm{w}) + \lambda g(\mathrm{w}) \tag{2}$$

$$\nabla_{\mathrm{w}} L(\mathrm{w}_0, \lambda_0) = 0 \tag{3}$$

5소자 배열안테나의 I/Q 채널에서 측정되는 입력값을 $\mathrm{x}=[\mathrm{x}_1\ \mathrm{x}_2\ \mathrm{x}_3\ \mathrm{x}_4\ \mathrm{x}_5]^T$로 정의하고, Weight vector w의 제한조건을 다음 수식 (4)와 같이 정의한다.

$$C\mathrm{w} = c \tag{4}$$

여기서 C는 constraint matrix, c는 constraining column vector이다. 배열안테나의 출력은 $f(\mathrm{w}) = \mathrm{w}^H\mathrm{x}$ 이므로 출력의 Power 기대치는 다음 수식 (5)와 같다.

$$Output\ Power = E\left[\left|\mathrm{w}^H\mathrm{x}\right|^2\right] = \mathrm{w}^H R\mathrm{w} \tag{5}$$

여기서 $E[\cdot]$는 기대치, $R = E\left[\mathrm{x}\mathrm{x}^H\right]$, x^H는 Conjugate transpose이다. 지금까지 정의된 변수로써 출력의 Power를 최소화시키는 최적해 문제를 구하면 다음 수식 (6)과 같다.

$$\min_{\mathrm{w}} \mathrm{w}^H R\mathrm{w} \quad subject\ to\ C\mathrm{w} = c \tag{6}$$

$w^H Rw$의 해를 구하기 위해서, Lagrangian 및 Gradient을 계산하면 수식 (7), (8)과 같고, 최적의 Weight vector w_o는 수식 (9)와 같이 계산된다.

$$L(\mathrm{w},\lambda) = \mathrm{w}^H R\mathrm{w} + \lambda(C\mathrm{w} - c) \tag{7}$$

$$\nabla_{\mathrm{w}} L = 2R\mathrm{w} + \lambda C = 0 \tag{8}$$

$$\mathrm{w}_o = -\lambda_o R^{-1} C/2 \tag{9}$$

수식 (9)와 제한조건인 수식 (4)를 이용하면 Lagrangian multiplier는 다음 수식 (10)과 같이 계산된다.

$$\lambda_0 = 2(CR^{-1}C^H)^{-1}c \tag{10}$$

따라서 최적의 Weight vector w_o와 배열안테나의 출력 Power P는 수식 (11) 및 (12)와 같이 계산된다.

$$\mathrm{w}_o = R^{-1}C^H\left(CR^{-1}C^H\right)^{-1}c \tag{11}$$

$$P = c^H\left(CR^{-1}C^H\right)^{-1}c \tag{12}$$

배열안테나의 재밍대응 알고리즘은 기본적으로 위 최적해 유도식을 따르며, 크게 3가지 정도로 구분될 수 있다. 첫번째는 입력값의 상관행렬 R을 추정한 후 제한조건 수식 (4)에서 특정방향(위성방향)으로 이득을 보존하기 위해 Steering vector e를 고려하여 Weight vector를 계산하는 MSIR(Maximum Signal to Interference Ratio)방식이다. Beamforming 방식인 MSIR의 Weight vector는 수식 (13)과 같이 계산된다.

$$\mathrm{w}_o = \frac{R^{-1}e}{e^H R^{-1}e} \tag{13}$$

이 방식은 가장 재밍대응 성능이 높지만 배열안테나의 자세 및 위성위치 정보가 필요하며 여러 개의 출력을 취급해야 한다. 두번째는 상관행렬 R의 측정없이 LMS(Least Mean Square) 알고리즘에 의해 출력을 최소화하도록 Weight vector를 추정하는 방식이다[7]. 마지막 세번째는 본 논문에서 주로 연구할 OPM 알고리즘으로 제한조건 수식 (4)를 간단하게 다음과

같이 설정한다.

$$\delta^H \mathrm{w} = 1 \tag{14}$$

여기서 $\delta = [1\,0\,0\,0\,0]^T$ 이다. 따라서 w = $[1\ w_2\ w_3\ w_4\ w_5]^T$ 이 되는데, 특정 소자의 신호를 기준으로 다른 소자의 신호들의 상관특성을 제거시키는 알고리즘으로 Sidelobe canceling과 유사하다. 최적의 Weight vector는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathrm{w}_o = \frac{R^{-1}\delta}{\delta^H R^{-1}\delta} \tag{15}$$

이러한 알고리즘은 위성방향을 고려하지 않으며, GNSS 위성신호가 열적잡음보다도 매우 작기 때문에 위성항법용 적응배열안테나에 효과적으로 적용할 수 있다.

나. OPM 알고리즘 분석

배열안테나는 위성의 미약한 전파신호를 여러 RF단 채널에서 독립적으로 처리하기 때문에 채널별로 Gain, I/Q Phase, Time delay, Element phase center 등의 차이(Channel Mismatch)가 존재하고, 안테나 소자 사이가 가깝기 때문에 Mutual coupling 효과가 발생한다. 본 절에서는 이러한 오차들이 OPM 알고리즘에 미치는 영향을 분석한다. 배열안테나의 I/Q 입력은 각각의 안테나 소자 및 RF단의 Gain 및 Phase 차이에 의해서 변형된다. 이를 수식으로 표현하면 다음 수식 (16)과 같다.

$$\tilde{\mathrm{x}} = D\mathrm{x} \tag{16}$$

여기서 D는 5 x 5 Diagonal matrix이고 첫번째 요소 d_{11}=1이다. 즉 입력 Vector의 Amplitude와 Phase를 변형시키는 복소수 값이 곱해진다. 이때 입력 Vector의 상관행렬은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}\tilde{R} &= E\left[\tilde{\mathrm{x}}\tilde{\mathrm{x}}^H\right] = E\left[(D\mathrm{x})\cdot(D\mathrm{x})^H\right] \\ &= E\left[D\cdot\mathrm{x}\cdot\mathrm{x}^H\cdot D^H\right] \\ &= D\cdot R\cdot D^H\end{aligned} \tag{17}$$

위 수식 (17)을 OPM 알고리즘의 Weight vector에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{\mathrm{w}}_o = \tilde{R}^{-1}\delta = (D^H)^{-1}R^{-1}D^{-1}\delta = (D^H)^{-1}R^{-1}\delta \tag{18}$$

배열안테나의 최종 출력은 채널 Mismatch에 의해 변형된 위 수식 (18)의 Weight vector와 입력값을 곱한 출력으로 다음 수식 (19)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\tilde{y} &= \tilde{\mathrm{w}}_o^T\cdot\tilde{\mathrm{x}} = \left((D^H)^{-1}R^{-1}\delta\right)^T D\mathrm{x} \\ &= \delta^T D\left(R^{-1}\right)^T\mathrm{x} \\ &= y\end{aligned} \tag{19}$$

즉 채널 Mismatch에 의해 Gain과 Phase가 변해도 첫째 요소만 갖는 δ Vector 특징에 의해 최종적인 출력은 채널 Mismatch의 영향이 전혀 없게 된다. 채널 Mismatch 항목에서 Time delay는 GNSS 수신기에서 위치오차 유발요인이 되고, Element phase center 오차는 Beamforming시 Steering vector 오차를 유발시킨다.

Mutual coupling은 채널 Mismatch의 Gain과 Phase 영향을 분석한 방식과 유사하게 나타낼 수 있으며, Mutual coupling matrix에 의해 수식 (20)과 같이 계산된다.

$$\tilde{\mathrm{x}} = M\mathrm{x} \tag{20}$$

위 수식을 이용하여 Weight vector를 구하면 다음 수식 (21)과 같이 계산된다.

$$\tilde{\mathrm{w}}_o = (M)^{-1}R^{-1}\left(M^H\right)^{-1}\delta \tag{21}$$

위 수식에서 알 수 있듯이 Mutual coupling은 Steering vector에 해당하는 δ Vector를 변형시키며, 또한 Weight vector의 gain과 phase를 변형시킨다. 따라서 Mutual coupling은 OPM 알고리즘에 영향을 미치며, 일반적 사양으로 알려진 -15dB 및 그 이상의 Mutual coupling 영향을 다음 장의 시뮬레이션에 의해 분석한다.

4. OPM 알고리즘 성능분석

가. 성능분석 환경

OPM 알고리즘의 재밍대응 성능을 분석하기 위해서 Matlab으로 시뮬레이션을 수행하였다. 위성신호는

Spread spectrum 방식으로 전송되고 GNSS 수신기에서 상관값(Correlation Value)을 체크하여 위성신호 크기를 측정한다. 따라서 다음 Fig. 3과 같이 열적잡음, 위성신호, 재머신호를 생성한 후 배열안테나 및 알고리즘을 통과한 신호의 상관값 크기를 분석할 수 있도록 시뮬레이션 환경을 구성하였다.

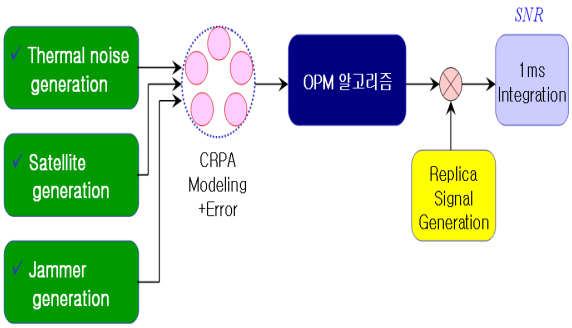


Fig. 3. OPM 알고리즘 시뮬레이션 환경

재밍신호는 광대역 30dB J/N의 2개 재머를 설정하였고 아래 Fig. 4 및 5는 OPM 알고리즘이 동작한 후의 배열안테나 Gain Pattern과 1ms 적분한 위성신호이다. 재밍신호 방향으로 이득이 줄어있고 1chip delay에 따라 삼각형 모양으로 상관값이 나타남을 알 수 있다. 이때 SNR은 16dB 정도이다. 재밍신호가 10dB J/N 정도일 때, 상관값의 Peak를 찾을 수 없었으므로 이때의 J/S 향상은 20dB 정도 임을 알 수 있다.

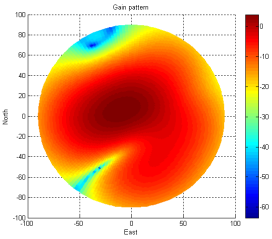


Fig. 4. 이득 형상

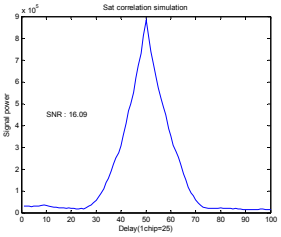


Fig. 5. 상관값

나. 채널 이득 영향분석

배열안테나 소자별로 구성된 RF단은 각각 신호증폭 또는 감쇄크기가 다르다. 이러한 채널 Gain mismatch에 의한 영향은 앞장에서 분석된 바와 같이 OPM 알고리즘에서 상쇄된다. 이를 검증하기 위해서 5소자 채널별로 다음 Table 1같은 Gain을 설정하여 시뮬레이션 하였다. 실제 Gain mismatch는 3dB 내외로 예상되지만 그 영향을 파악하기 위해 증가시켰다. 시뮬레이션 결과 Gain pattern은 채널 Gain mismatch가 없는 Fig. 4와 같으며, 상관값의 SNR 또한 15.3dB로 비슷하다.

Table 1. 채널 Gain 설정

소자	1	2	3	4	5
Gain(dB)	0	6	12	-6	-14

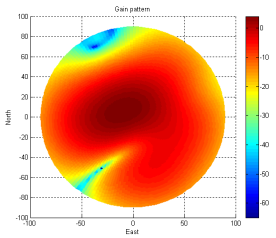


Fig. 6. 이득 형상

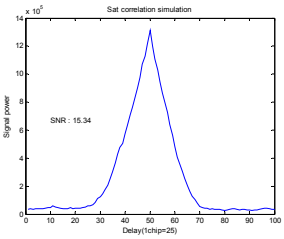


Fig. 7. 상관값

다. 채널 위상차 영향분석

두번째로 시뮬레이션한 항목은 채널간 I/Q phase mismatch 이다. 배열안테나 알고리즘은 Phase를 제어하여 재밍신호를 제거시키므로 이러한 Phase의 영향은 중요하다. Phase mismatch 또한 그 영향이 상쇄되는데 아래 Table 2와 같이 Phase를 설정하고 시뮬레이션하였다. Gain pattern은 입력의 phase를 보상하지 않고 도시하였는데, Fig. 4와 같은 재머방향으로 널이 형성되지 않고 다른 방향으로 널이 형성된 것처럼 보임을 알 수 있다. 이때 상관값의 SNR은 15.6dB로 재머신호를 정확히 제거하였음을 알 수 있다.

Table 2. 채널 Phase 설정

소자	1	2	3	4	5
Phase(deg)	0	10	20	90	-180

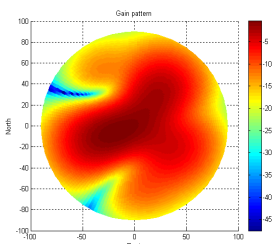


Fig. 8. 이득 형상

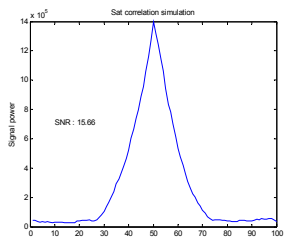
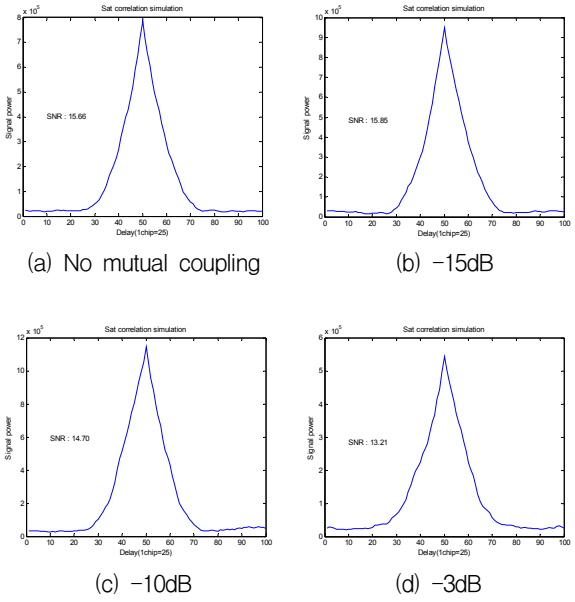


Fig. 9. 상관값

라. Mutual coupling 영향분석

인접한 안테나의 영향을 받아 직접 수신된 전파 이외에 추가적으로 신호가 여기되는 현상을 Mutual coupling으로 정의된다. 이러한 Mutual coupling은 수식 (20)과 같은 Matrix 형태로 신호를 왜곡시키며, 실험적으로 측정될 수 있다. Mutual coupling 오차요소를 고려하여 OPM 알고리즘을 시뮬레이션하였으며, Fig. 10은 간이적으로 측정된 Mutual coupling matrix(약 -15 dB)와 매우 강한 Mutual coupling을 고려한 -10dB 및 -3dB일 때 상관값을 나타낸 것이다.



(a) No mutual coupling (b) -15dB

(c) -10dB (d) -3dB

Fig. 10. Mutual coupling 시험시 상관값

시뮬레이션 결과 약 -15dB 내외로 측정된 Mutual coupling matrix를 이용할 경우 SNR 감소 영향이 거의 없었으나, -10dB Mutual coupling을 적용하면 SNR 1dB가 감소하였으며, -3dB Mutual coupling을 적용하면 SNR 2.5dB가 감소하였다. 이러한 수치는 무시할 수는 없는 수치이므로 하드웨어적으로 Mutual coupling을 -15dB 이하로 설계하고 또한 소프트웨어적으로 보상해주어 그 영향을 최소화하는 것이 필요하다.

마. Optimal MISM과 비교분석

배열안테나의 재밍대응 알고리즘에서 빔포밍 방식인 수식 (13)의 MSIM은 위성방향으로 이득을 최대로 유지하기 때문에 최적이라고 할 수 있다. 반면 OPM 알고리즘은 위성방향에 상관없이 출력을 최소화시키는 Weight vector를 계산하므로 재밍신호를 최소로 출력하지만 위성신호의 이득은 보장하지 않는다. 아래 Fig. 11, 12는 OPM 및 MSIM 알고리즘 적용시 배열안테나의 Gain pattern인데, MSIM 알고리즘에서는 위성방향으로 설정한 방위각 53° 및 앙각 10°로 Gain이 더 보장됨을 알 수 있다.

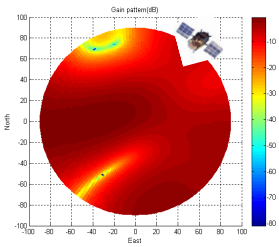


Fig. 11. OPM 적용시

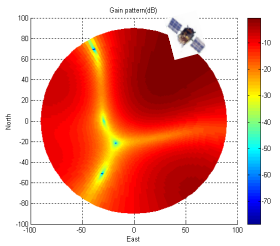


Fig. 12. MSIM 적용시

특정시간의 위성배치를 고려하여 재밍대응 알고리즘의 성능을 평균적으로 비교하면 아래 Table 3과 같다. 즉 위성방향을 고려하는 MSIM 알고리즘이 6.7dB 더 큰 SNR을 보여준다. 하지만 채널 Gain 및 Phase의 세밀한 Calibration이 필요하고, 또한 위성위치 및 배열안테나 자세가 필요하여 배열안테나 시스템이 복잡해지는 단점이 있다[10].

Table 3. MSIM과 OPM 성능

알고리즘	MSIM	OPM	차이
SNR(dB)	28.9	22.2	6.7

5. 결 론

본 논문에서는 5소자 배열안테나의 널패턴 제어 알고리즘으로 고려하고 있는 OPM 알고리즘을 설계하고 그 성능을 분석하였다. OPM은 채널 Gain 및 Phase mismatch 영향을 받지 않음을 증명하였으며 시뮬레이션 결과 확인하였다. 또한 Mutual coupling이 -10dB 이상일 경우 재밍대응 성능에 영향이 있었다. OPM은 MSIM에 비해 재밍대응 성능은 부족하지만 구현이 간단하다. 현재 OPM 알고리즘은 공간영역에서만 설계되었는데, 추후에는 공간 및 시간영역에서 OPM 등의 알고리즘을 적용한 STAP 기법의 개발이 필요하다.

References

[1] Kaplan, E. D., Understanding GPS Principles and Applications, ArtechHouse, Boston, London, 1996.

[2] Phillip W. Ward, "GPS Receiver RF Interference Monitoring, Mitigation, and Analysis Techniques," Journal of The Institute of Navigation, Vol. 41, No. 4, pp. 367～391, Winter 1994～1995.

[3] Don H. Johnson, Dan E. Dudgeon, Array Signal Processing Concepts and Techniques, PrenticeHall, 1993.

[4] R. L. Fante, and J. J. Vaccaro, "Wideband Cancellation of Interference in a GPS Receive Array," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, Vol. 36, No. 2, pp. 549～564, April, 2000.

[5] R. L. Fante, et al., "Cancellation of Jammers and Jammer Multipath in a GPS Receiver," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 622～625, 1998.

[6] Chung-Liang Chang, and Jyh-Ching Juang, "Analysis of Spatial and Temporal Adaptive Processing for GNSS Interference Mitigation," 2006 International Symposiumon GPS/GNSS, 2006.

[7] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, Third Edition, Prentice Hall, 1996.

[8] Gupta, I., and Ksienski, A. "Effect of Mutual Coupling on the Performance of Adaptive Arrays," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 785～791, 1983.

[9] Zhiyong Huang, Constantine A. Balanis, and Craig R. Birtcher, "Mutual Coupling Compensation in UCAs : Simulations and Experiment," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 3082～3086, 2006.

[10] Ung Suok Kim, "Analysis of Carrier Phase and Group Delay Biases Introduced by CRPA Hardware", IONGNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, pp. 635～642, September 2005.