

## 비행체의 자세와 GPS 재머의 상대적인 배치상태를 고려한 4소자 및 7소자 항재밍장치에 대한 성능분석

# 4 and 7 Element GPS Anti-jamming Algorithm Performance Analysis Considering the Relative Arrangement of the Multiple Jammers

최재건

국방과학연구소 3본부 4부

Jae-Gun Choi

Agency for Defense Development, Navigation Division, Daejeon 34186, Korea

### [요 약]

일반적으로 알려진 GPS 항재밍 기술로는 재밍 방향에 대한 감쇄효과를 얻는 널 스티어링 (null steering)과 위성방향으로의 추가 합성이득을 얻는 빔 스티어링 (beam steering) 방식이 있다. 이 신호처리 알고리즘을 소개하는 문헌에 의하면, 수학 공리에 따라 동시처리 가능한 재밍의 개수는 배열안테나 소자의 개수  $N$  에서 기준 안테나 1개를 제외한  $N-1$  개에 대해서만 유효하다는 표현을 하지만, 재머 배치나 비행체의 자세 그리고 둘 간의 상대적 배치 등 실질적인 운용 조건을 고려한 알고리즘 특성에 대한 분석은 알려져 있지 않다. 이에 본 논문에서는 4소자 및 7소자 표준 배열안테나가 적용된 항재밍 시스템을 모델링하여 비행체의 자세(수평, 수직)와 재머 배치, 그리고 안테나 소자 수를 고려한 두 항재밍 알고리즘(PM, LCMV)에 대한 성능 분석을 하였다. 결과적으로, 동일한 JSR 환경임에도 불구하고, 위성 신호와 재밍 신호 간 입사각이 상대적으로 큰 비행체의 수직 자세의 경우 수평 자세보다 약 10 dB 이상의 이득이 있음을 시뮬레이션을 통해 제시 하였다.

### [Abstract]

Null steering and beam steering are known well as anti-jamming methods in GPS anti-jamming system. Null steering gets a noise attenuation effect for the direction of jamming and beam steering earns additional gain synthesis for the direction of satellite signals. According to the research in the article for signal processing, it expresses that the  $N$  array antenna is effective for  $N-1$  number of jamming signal by math public interest, however, the two algorithms analysis is not unknown for the operating condition of the realistic vehicle. In this paper, we modeled anti-jamming system using 4 and 7 array antenna and showed the two algorithms performance (PM, LCMV) when considering the number of antenna array, jammers and vehicle position (horizontal, vertical). In result, we showed that the case of vertical position of the vehicle which has large tilt angle for the relative position of satellites and jammers, has about 10 dB gain more in comparison with one of vertical position in spite of same JSR condition.

**Key word** : Array antenna, Beam steering, Jammer, Null steering, Satellite.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2016.20.3.218>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 16 May 2016; Revised 25 May 2016  
Accepted (Publication) 29 June 2016 (30 June 2016)

\*Corresponding Author; Jae-Gun Choi

Tel: +82-42-821-0627

E-mail: jgchoi@add.re.kr

## 1. 서론

GPS (global positioning system)는 총 24개의 위성으로부터 위성의 위치, 시간 및 오차 보정 정보를 받아 사용자의 위치를 측정하기 위한 위치 측정 시스템이다. 사용자의 위치를 측정하기 위해서는 동시에 최소 4개의 이상의 위성으로부터 신호를 수신해야 하며, 더 많은 위성으로부터 신호를 수신 할 경우, 보다 정확한 사용자 위치 값을 얻을 수 있다. 이 24개의 GPS는 지상 20,000 km 이상 상공에서 서로 다른 궤도로 지구 대기권을 계속적으로 회전하며 항법 신호를 전달하기 때문에, 이 신호를 수신할 수 있는 수신기를 갖춘 사용자에겐 시간, 장소에 관계없이 4개 이상의 위성신호를 얻기 용이하도록 설계되어있다. 이러한 사용자의 접근성이 뛰어난 장점으로 GPS 시스템은 상용뿐만 아니라 군사 무기 체계에도 다방면으로 채택되어 운용되고 있고, 현재에는 관성항법장치와 결합하여 미사일이나 항공기, 함정 등 고정밀의 정확도를 요구하는 시스템에 사용되고 있는 추세이다[1].

그러나 20,000 km 이상 떨어진 거리에서 위성이 보내온 신호를 대상으로 이용하므로 위성신호가 지상에 도달할 때 그 신호 전력이 매우 미약하다는 특징이 있다. 따라서 사용자가 위성에서 보내온 전파를 수신함에 있어서 주위의 물리적인 환경에 쉽게 영향을 받고, 특히 상대적으로 세기가 큰 다른 전파 등에 의해 수신 방해를 받아 본래의 GPS 기능을 쉽게 상실하는 치명적인 단점이 있다. 따라서 군사적 목적으로 GPS를 운용할 경우에는 GPS 신호 수신기능을 의도적으로 방해하여 교란시키는 재밍 환경에 대해서도 정상적인 GPS 기능을 수행하기 위한 항재밍 시스템을 운용할 필요가 있다. 이의 해결을 위해 다양한 항재밍 기법이 개발되어 있으며[2], 이러한 기술들은 antenna, pre-filter, down-converter, anti-jamming signal processing, digital receiver processing 등 GPS 수신기의 여러 수신 신호 단계에서 적용될 수 있다 [3]. 그 중 배열안테나와 신호 처리 기술을 이용하여 안테나 패턴을 제어하는 기법이 가장 효과적인 재밍 대응 성능을 기대 할 수 있다[4],[5]. 이를 이용한 현재까지 잘 알려진 GPS 항재밍 기술로는 재머 방향에 대한 신호 감쇄효과를 얻을 수 있는 널 스티어링 (NS; null steering)과 이에 추가적으로 GPS 위성방향으로의 합성이득을 얻을 수 있는 빔 스티어링 (BS; beam steering) 방식이 있다. 이런 두 가지 항재밍 기술을 적용하는 신호처리 알고리즘을 소개하는 문헌에 의하면, 수학적 공리에 따라서 동시에 처리 가능한 재밍 신호의 개수는 배열안테나 소자의 개수 N에서 기준 안테나 1개를 제외한 N-1개에 대해서만 유효하다는 표현을 하고 있으나, 구체적인 운용 조건에 따른 알고리즘 동작 특성 분석 관련 연구는 현재까지 알려져 있지 않다[6].

본 논문에서는 4, 7소자 배열안테나를 적용하는 항재밍 시스템을 Matlab을 이용하여 PM (power minimization) 기반의 널 스티어링 알고리즘과 LCMV (linear constraint minimum variance) 기반의 빔 스티어링 알고리즘을 모델링 후 비행체의 고도 및 자세변화에 따라 배열안테나에 입사된 위성신호와 재밍 신호간

의 상대적인 입사각도에 따른 항재밍 알고리즘의 성능 변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 주요 성능 분석 요소로는 각 위성에 대한 수신감도인 C/No [dB] 및 상대적인 재밍 신호의 수신 세기를 나타내는 JSR [dB]변화에 대해 결과를 제시하였으며, 배열안테나에 입사되는 두 신호 간 이루는 각도가 벌어짐에 따라 항재밍 성능 C/No [dB]의 성능이 증가함을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2-1장에서는 전체적인 항재밍 시스템의 흐름도와 대상 안테나인 4, 7소자 배열안테나 및 수신 신호의 모델링을 기술 하였고 2-2장에서는 대상 알고리즘인 PM과 LCMV에 대해 간략히 설명하였다. 3장에서는 4, 7 소자 배열안테나에 대해 비행체 자세와 재밍 신호 개수의 변화에 따른 항재밍 성능을 수신 가능 위성의 개수 그래프로 보여주었고, 7소자 배열안테나에 대해서 위성과 재밍의 입사각 변화에 따른 항재밍 알고리즘의 영향성 분석을 하였다.

본 연구를 통하여 4, 7소자의 배열안테나에 대해서 7소자 배열안테나가 4소자 배열안테나에 비해 재밍의 영향에 더 안정적인 성능을 보장함을 직관적으로 확인 하였으며, 배열안테나에 입사되는 위성신호와 재밍 신호 간 이루는 상대적 각도 증가함에 따라 항재밍 알고리즘의 C/No 성능이 증가하는 추세를 보여주었고, 이 입사 각도가 빔 제어 알고리즘의 성능에 있어서 중요한 요소가 됨을 시뮬레이션을 통해 보여주었다.

## II. 항재밍 시스템 및 시나리오 설정

### 2-1 시스템 모델링(배열 안테나 및 수신신호)

시스템 모델링을 위한 전체 구조는 그림1과 같다. 먼저 GPS 신호의 모델링을 위해 신호 개수, 수신신호 전력, 입사각, 신호의 대역폭을 입력 파라미터로 받아 위성신호를 생성한다. 재머 신호 마찬가지로 재머 신호 개수, 수신신호 전력, 입사각, 대역폭을 입력 파라미터로 받아 재밍 신호를 생성한다. 생성된 두 신호를 더한 후, 위성 신호 대역폭에 해당하는 가우시안 잡음을 추가하여 안테나에 입사되는 수신신호  $x$ 를 모델링한다. 배열 안테나의 각 안테나에서 위상 지연을 계산하여 수신 신호에 적용하고 빔 제어 알고리즘 구동에 따른 가중치 벡터  $w$ 를 생성한다.

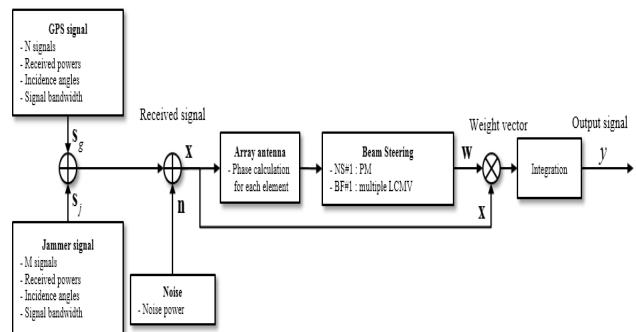


그림 1. 시스템 모델링  
Fig. 1. System modeling.

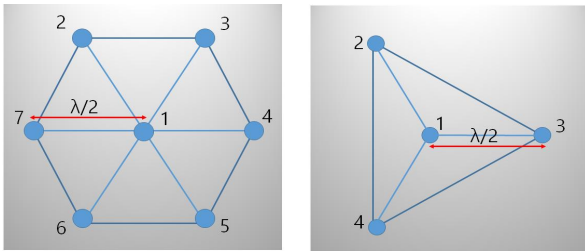


그림 2. 안테나 모델링  
Fig. 2. Antenna modeling.

최종적으로 계산된 가중치 벡터를 수신신호에 곱한 후, 이 수치를 누적하여 원하는 신호인 출력 신호  $y$ 를 얻는다.

단일 안테나 소자로 얻을 수 없는 방사 패턴이 요구될 때 두 개 이상의 안테나 소자를 동시에 사용하여 원하는 방사 패턴을 얻을 수 있다. 이를 배열 안테나라고 하며 일반적으로 반파(half-wave) 안테나 소자를 반 파장( $\lambda/2$ ) 거리로 여러 개 배치하여 사용한다. 본 논문에서는 1개의 중심안테나를 기준으로 3개의 안테나가 삼각형 형태로 배치되어 있는 4소자 배열안테나와 1개의 중심안테나를 기준으로 6개의 안테나가 육각형 형태의 배치를 가지는 7소자 배열안테나를 그림2와 같이 모델링하였다. 동일한 위상의 신호가 수신되었을 때 각 단위 안테나 간 거리에 의해 안테나에 도달하는 신호의 수신 시간 지연이 발생하며 이에 의해 각 안테나에서의 수신 신호 위상 차이가 발생한다.

그림3은 7 소자 평면 배열 안테나를 가정하였을 때 거리 차에 의한 수신 시간 지연을 나타낸 것이다. 그림 3의 배열 안테나에서 각 안테나 소자는 반 파장 간격으로 배치되어 있으므로  $m$  번째 안테나의 시간 지연  $\tau_m$ 은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_m = \frac{d_{m/x} \sin\theta \cos\phi + d_{m/y} \sin\theta \sin\phi}{f\lambda} \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 수신 신호의 중심 주파수,  $\lambda$ 는 수신신호의 파장이며,  $\theta$ 는 고도 각이며 범위는  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ ,  $\phi$ 는 방위각이며 범위는  $0 \leq \phi \leq 360^\circ$  이다. 고도각의 경우 평면 안테나이므로  $z$ 축 값의 영향을 받는 코사인 함수에는 영향을 받지 않으며 사인 함수에 의해  $0 \sim 90^\circ$ 와  $90^\circ \sim 180^\circ$ 가 우함수 대칭을 이룬다. 이 때문에 항재밍 알고리즘 처리 시 고도각  $90^\circ$  이상에서 입사된 신호는  $z=0$  평면에 대칭 시킨 각도의 신호가 입사된 것처럼 인식된다. 이를 그림 4에 나타내었다.

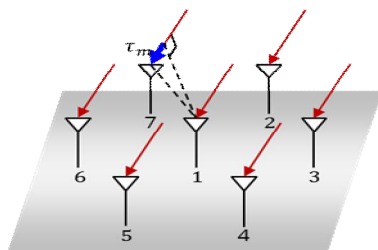


그림 3. 공간상 GNSS 시스템 신호 수신 개념  
Fig. 3. Concept of zoned GNSS system.

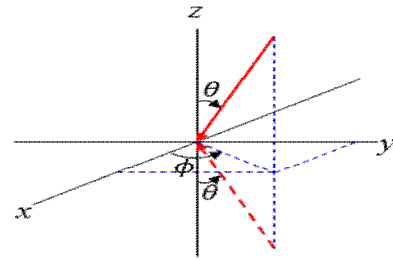


그림 4. 13-존 배치 (탑 뷰)  
Fig. 4. 13-Zone arrangement (top view).

$d_{m/x}$ 과  $d_{m/y}$ 은 각각 기준 안테나 소자 1번에서  $m$ 번째 안테나 소자까지의  $x, y$  축 거리이며 4소자 배열안테나와 7소자 배열안테나에 대해서 이를 각각 식 (2)와 (3)으로 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} 0 - \cos(\pi/3) & 1 - \cos(\pi/3) \\ 0 \sin(\pi/3) & 0 - \sin(\pi/3) \end{bmatrix}^T \times \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} 0 - \cos(\pi/3) & \cos(\pi/3) & 1 & \cos(\pi/3) & -\cos(\pi/3) & -1 \\ 0 \sin(\pi/3) & \sin(\pi/3) & 0 & -\sin(\pi/3) & -\sin(\pi/3) & 0 \end{bmatrix}^T \times \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

이에 따라 송신 신호를  $s(t)$ 라 할 때,  $m$ 번째 안테나에서의 수신 신호는 식 (4)과 같이 모델링 할 수 있다.

$$x_m(t) = s(t)e^{j2\pi f(t - \tau_m)} \quad (4)$$

### 2-2 항재밍 알고리즘 모델링

본 논문에서는 배열 안테나를 이용한 알고리즘 중 일반적으로 연구 및 사용되고 있는 LCMV 빔 형성 알고리즘과 PM 널 제어 알고리즘을 대상으로 한다. 두 알고리즘은 출력 전력을 최소화하여 가중치를 얻는다는 점에서 동일하나 LCMV는 원하는 신호의 방향, 즉 위성 신호 방향으로 일정 값의 안테나 이득을 고정하도록 제한 조건을 두는 반면, PM은 특정 신호방향으로의 어떠한 제한 조건을 두지 않는다. 여기서 고려하는 LCMV는 관찰 가능한 각각의 위성에 대해 빔 패턴을 생성할 수 있도록 조건을 두는 다중 LCMV 알고리즘이며, 이 알고리즘은 위성의 방향으로는 안테나 이득 값을 고정하는 반면, 간섭신호 방향에 대해서는 안테나 출력 신호를 최소화 하여 안테나 이득을 낮춘다. 다중 LCMV 알고리즘은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\min_w E \left\{ \left| \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) \right|^2 \right\} \quad s.t. \quad \mathbf{a}_s^H \mathbf{w} = g \quad (5)$$

여기서 입력 신호벡터는  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_7(t)]^T$ 이며  $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_7]^T$ 는 가중치 벡터를 나타낸다. 위성 방향 벡터는  $\mathbf{a}_s = [a_{s_1} \ a_{s_2} \ \dots \ a_{s_7}]^T$ 이며,  $g$ 는 안테나 이득 값이다. 다중 LCMV는 식 (6)의 조건에 따라 출력 신호 전력을 최소화하고, 각 위성 방향( $\mathbf{a}_s$ )으로 안테나 이득 값( $g$ )을 갖는 가중치 벡터 ( $\mathbf{w}$ )를 구하는 알고리즘이며 이에 따라 위성방향으로는 특정

안테나 이득 값,  $g$  즉 빔 형성을 하게 되고 간섭 신호 방향으로는 적은 안테나 이득 값, 즉 널 제어가 이루어지는 알고리즘이다. 식 (5)를 라그랑주 승수법에 따라 구하면 최적 가중치 벡터는 식 (6)와 같이 구할 수 있다.

$$w_{LCMV} = R_x^{-1} a_s (a_s^H R_x^{-1} a_s)^{-1} g \quad (6)$$

여기서  $R_x$ 은 상관 행렬이며  $R_x = E[x^H x]$ 와 같이 정의된다. PM 알고리즘은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min_w E \left\{ \left| \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) \right|^2 \right\} \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{c}^H \mathbf{w} = 1 \quad (7)$$

PM의 경우 출력 신호 전력을 최소화하되 특정 방향의 빔 형성이 없다는 점이 LCMV와 다르다. 단, 출력 신호 전력 최소화 과정에서 가중치 벡터가 0이 되는 것을 방지하기 위하여 첫 번째 가중치가 1이 되도록 제한 조건을 둔다. 제한벡터는 식 (8)과 같으며 이에 따른 최적 가중치 벡터는 식 (9)과 같다.

$$\mathbf{c} = [10 \dots 0]^T \quad (8)$$

$$w_{PM} = R_x^{-1} \mathbf{c} (\mathbf{c}^T R_x^{-1} \mathbf{c})^{-1} \quad (9)$$

식 (5)~(9)을 통해 두 알고리즘 모두 수신 신호의 상관 행렬과 제한 벡터를 이용하여 최적 가중치 계산을 함을 알 수 있다.

### III. 시뮬레이션 및 결과 분석

#### 3-1 재밍 신호 개수 변화에 따른 N 소자 배열안테나의 성능

3-1장에서는 PM, LCMV 알고리즘과 4, 7소자 배열안테나 그리고 동체에 의한 신호 감쇄를 적용하여 재밍 신호원 개수 변화에 따른 4, 7소자 배열안테나의 항재밍 성능 변화를 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 그림 5는 비행체의 수직 또는 수평 자세에 따라 비행체의 안테나가 받는 재밍 신호(빨간선)와 위성 신호(파란선)의 상대적 공간적 배치를 보여준다.

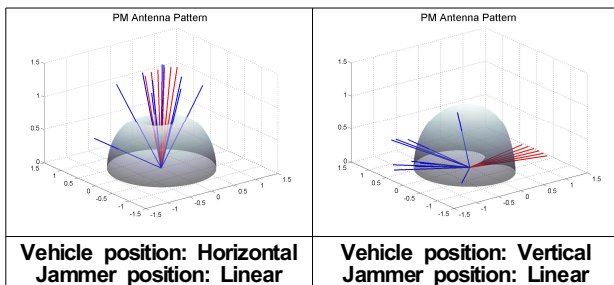


그림 5. 비행체 자세에 따른 위성 및 재밍 신호의 공간배치  
Fig. 5. The disposition of jamming and satellite signals according to position of flight vehicle.

그림에서 볼 수 있듯이 비행체의 자세가 수평상태일 경우 재밍 신호와 위성 신호가 이루는 각, 즉 두 신호 간 분리도가 비행체의 자세가 수직상태의 경우의 신호가 이루는 분리도에 비해 적은 것을 알 수 있다. 이러한 경우 수신기가 재밍 신호에 의해 위성 신호를 수신 하는데 있어 간섭을 크게 받을 수 있음을 예측 할 수 있고, 그 결과 위성 신호를 수신하는데 있어 성능 열화가 발생함을 그림 6의 결과로 확인하였다. 그림 6은 표 1의 모의신호 파라미터 하에서 C/No 30 dB 기준으로 검출 가능한 위성수를 보여준다. 반대로 비행체의 자세가 수직일 경우 두 신호 간 분리도가 매우 커 재밍에 의한 간섭이 상대적으로 적고 이로 인해 수신 가능한 위성의 개수가 많음을 볼 수 있다. 두 신호 간 분리도가 적을 경우 위성의 방향으로 안테나 이득을 얻는 LCMV의 성능이 PM 성능에 비해 우수하고, PM의 경우 성능 열화가 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 7소자 배열안테나를 사용하는 경우 4소자에 비해 재머 개수증가에 대한 항재밍 성능이 좋음을 확인하였다.

#### 3-2 위성과 재밍의 입사각 변화에 따른 항재밍 알고리즘 성능

위성 신호원이 동일한 위치에 존재하더라도 GPS 수신기의 위치나 자세가 변하게 되면 수신기에 입사되는 신호의 방향 또한 달라진다. 이는 동일한 환경일지라도 수신기가 받아들이는 신호의 상태가 달라짐을 의미하며, 항재밍 알고리즘의 성능 역시 달라질 수 있음을 추측 할 수 있다. 따라서 안테나에 입사되는 위성 신호와 재밍 신호 간 이루는 신호의 각도가 항재밍 알고리즘에 미치는 영향을 확인하기 위하여 다음과 같은 시나리오를 가정하였다. 7소자 배열 안테나는 비행체 위에 탑재되어 있으며, 수신기로 입사하는 신호 위치의 변화에 의한 영향을 관찰하기 위하여 표 1의 파라미터와 같이 A) 비행체의 고도를 변화시키거나 B) 비행체의 각도를 수평/수직으로 변화시키거나 C) 동일 개수의 재머를 원형/선형으로 배치하였으며, 이에 대한 설명을 그림 7, 8에 보였다. 먼저 비행체 고도에 따라 수신기에서 인식하는 신호의 입사각 변화는 그림 7과 같다. 그림에서 확인할 수 있듯이 저고도일 때 원형으로 배치된 재머의 재밍 신호는 수신기와 동일한 평면상에서 입사되는 것처럼 보이며 고고도로 갈수록 재밍 신호가 수신기 아래에서 좀 더 밀집된 형태로 수신됨을 알 수 있다.

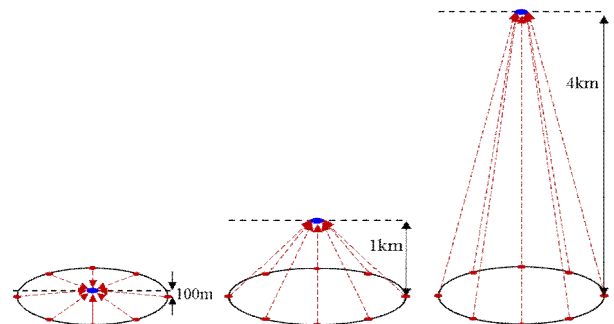


그림 7. 비행체 높이에 따른 재밍 신호의 입사각  
Fig. 7. Incidence angles of jamming signals according to the height of flight vehicle.

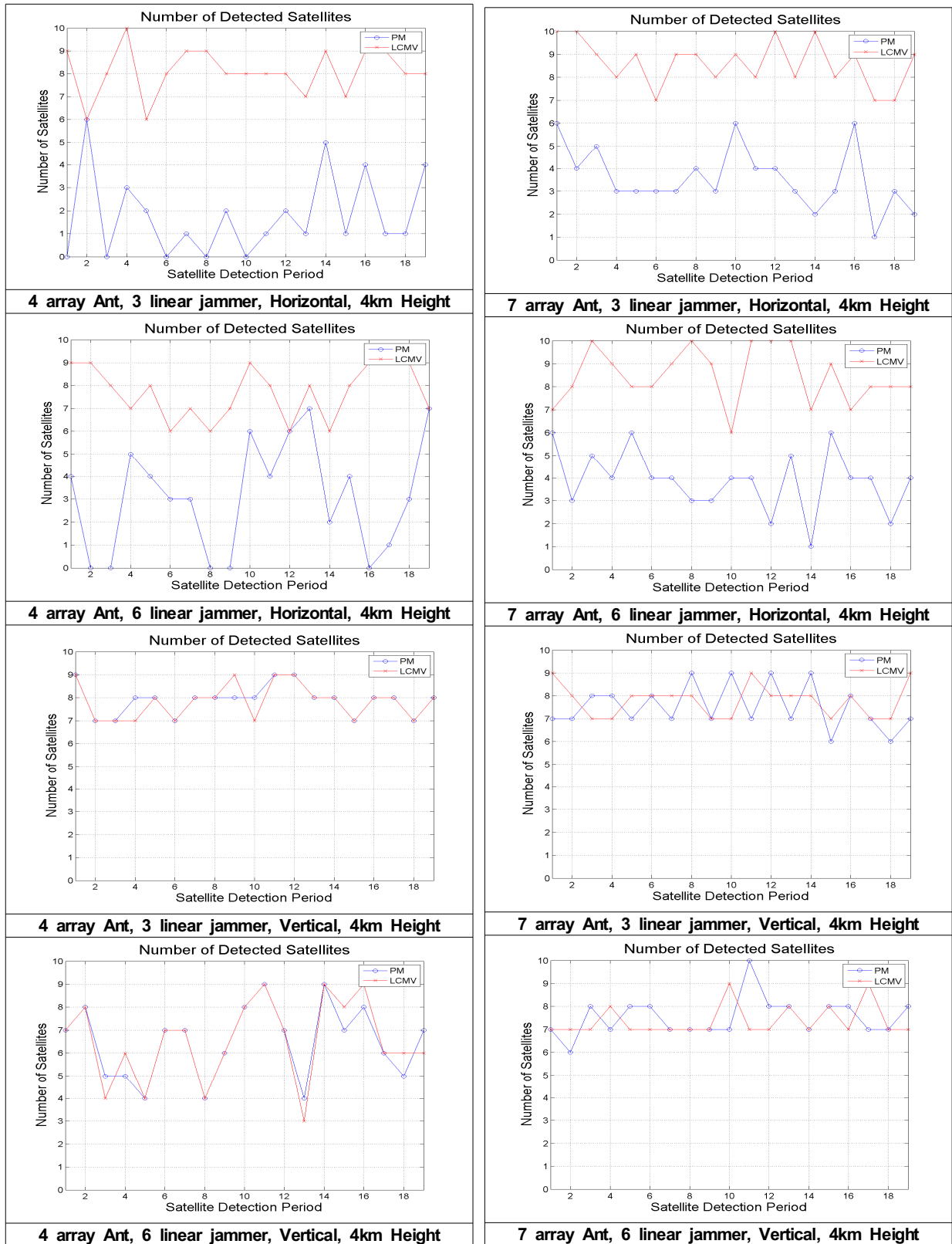


그림 6. 비행체 자세에 따른 항재밍 알고리즘 위성 수신 성능  
 Fig. 6. The anti-jamming algorithm satellite reception performance of according to position of flight.

표 1. 시뮬레이션 파라미터 (시나리오 A, B, C)  
Table 1. Parameters for simulation (scenario A, B, C).

Satellite signals	
Received PW	-130 dBm for each satellite
# of satellites	10
Incidence angle	$\theta$ 16.2, 47.3, 16.8, 21.1, 65.2
	$\phi$ 294.0, 9.8, 50.0, 47.1, 170.5
	$\theta$ 13.2, 32.3, 25.5, 59.2, 16.1
	$\phi$ 154.6, 142.8, 265.9, 60.1, 210.3
Bandwidth	2.046 MHz
Noise (AWGN)	
Power	-110.87 dBm
Jamming signals	
Total JSR	60/100 dB
Bandwidth	2.046 MHz
# of jammers	8
C) Arrangement	Circular, diameter 2 km Linear, total length 2 km
Receiver	
Antenna	Array antenna with 7(1+6) elements
Anti-jamming algorithm	Beam steering PM, LCMV
	STAP, 5 Tap
B) Position	Horizontal, Vertical
A) Height	100 m, 1 km, 4 km

비행체의 각도가 수평일 경우 위성 신호는 수신기 위쪽에서, 재밍 신호는 아래쪽에서 입사하게 된다. 수직일 경우 위성 신호는 비행체 꼬리 방향, 재밍 신호는 비행체 머리 방향에서 입사한다. 이에 따라 수평 자세의 경우 2-1장에서 언급한 평면 안테나의 고도 각 대칭성에 따라 재밍 신호가 xy 평면에 대하여 대칭되는 위치에서 입사된 것으로 인식하게 되며, 이에 따라 위성 신호와 재밍 신호의 입사각 차이가 줄어들게 되는 반면, 수직 자세의 경우 위성 신호와 재밍 신호의 방위각이 반대가 되므로 위성, 재밍 신호 간 이루는 각도가 증가한다. 그림 9는 시나리오 조합(지면에 대한 비행체의 수직&수평 자세, 지면에 위치한 재머의 원형&선형 배치)에 따른 위성 신호와 재밍 신호의 위치 관계 및 PM 알고리즘 사용에 따른 안테나 빔 패턴을 보여준다. 그림 9의 파란색 선은 위성 신호의 입사 방향이며 빨간색 선은 재밍 신호의 입사 방향이다. 그림에서 확인할 수 있듯 수평 자세일 경우 위성 신호와 재밍 신호의 입사각이 유사하게 되며 수직 자세일 경우 위성 신호와 재밍 신호의 방향이 반대가 된다. 재머의 배치가 선형일 경우 원형 배치보다 재밍 신호가 좀 더 한 방향으로 밀집하여 비행체의 수신기에 수신됨을 확인할 수 있다. 이상의 시나리오에 따른 모의신호의 구체적인 파라미터는 표 1과 같다. 수신되는 GPS 위성 신호의 세기의 경우 각각의 위성에 대해서 -130 dBm으로 설정을 하였고 관찰되는 위성의 개수는 10개로 가정하였다.

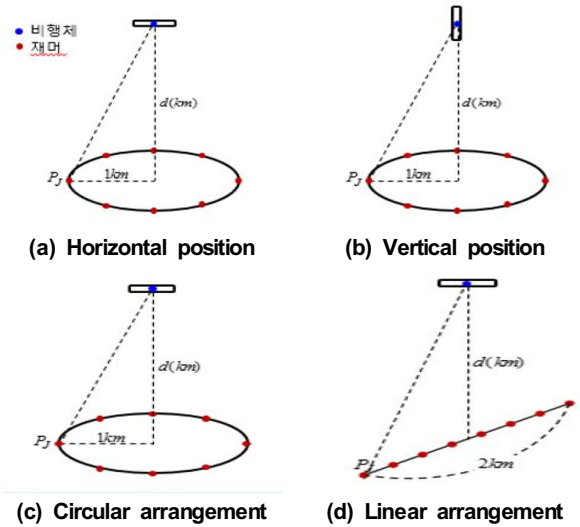


그림 8. 비행체의 자세와 재머 배치 시나리오  
Fig. 8. Position of flight vehicle and arrangement of jammers scenarios.

수신기에 존재하는 가우시안 잡음의 세기는 -110.87 dBm으로 설정하였고, 재밍 신호의 대역폭은 GPS 신호의 대역폭과 동일하게 하였다. 수신기의 안테나의 경우에는 2-1장에서 모델링한 7소자 배열안테나를 대상으로 하였으며, 2-2장에서 언급한 PM과 LCMV 알고리즘을 적용하여 비행체의 자세와 고도에 따른 항재밍 알고리즘의 성능 분석을 하였다. 표 1의 JSR 60 dB 일 때 위성 및 재머의 위치 그리고 비행체 자세와 고도에 따른 위성, 재밍 신호 간 이루는 평균 신호 입사각 및 이에 따른 항재밍 알고리즘의 성능(C/N<sub>0</sub>)은 표 2와 같다.

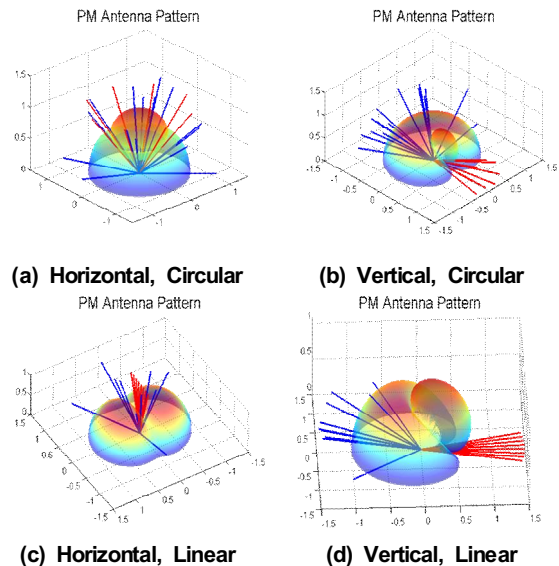


그림 9. 재머 배치와 비행체 자세에 따른 신호 입사각과 그에 대한 PM 알고리즘의 빔 패턴  
Fig. 9. Beam pattern of PM algorithm and incidence direction of signals according to position of flight vehicle and jammer arrangement.

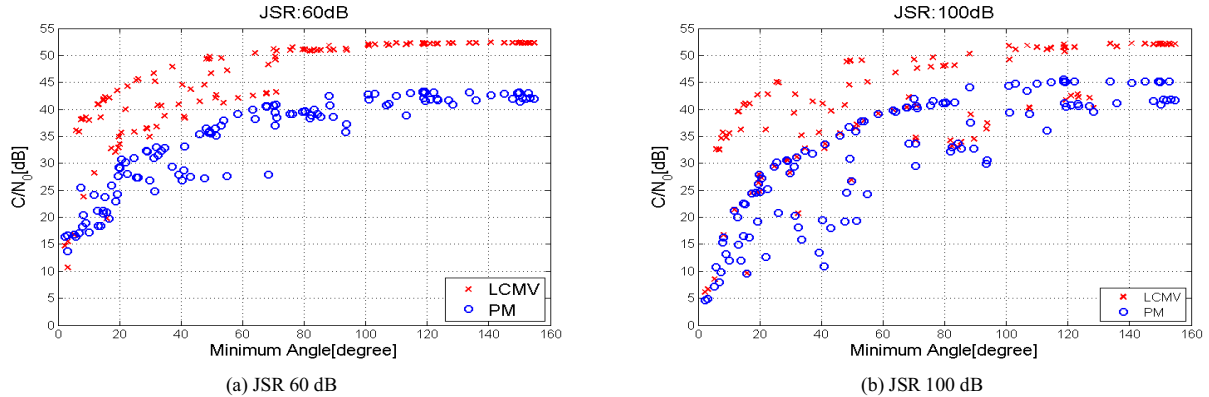


그림 10. 신호 분리 각에 따른 C/No  
 Fig. 10. C/No values according to separation angles of signals.

모의실험으로 동일한 JSR 환경임에도 불구하고 두 신호 간 입사각이 상대적으로 큰 수직 자세의 경우 수평 자세보다 약 10 dB 이상의 성능 이득이 있음을 알 수 있다. GPS 위성 10개에 대하여 표2의 12가지 시나리오를 적용하였을 때의 신호 입사각 대비 C/No의 관계는 그림 10과 같다. 결과로부터, LCMV와 PM의 알고리즘 상의 성능 차이는 존재하지만 신호 입사각이 증가할수록 항재밍 알고리즘의 성능이 향상되는 경향성을 동일하게 보이고 있다. 신호 입사각 60° 미만에서는 JSR 60 dB일 때가 JSR 100 dB일 때보다 성능이 우수하며 신호 입사각 60° 이상에서는 재밍 신호에 대한 충분한 제어가 가능하므로 각 알고리즘의 성능이 포화 값에 도달하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 함께 동일한 시나리오에 동체의 감쇄 및 안테나 패턴 및 경로손실을 적용하여 신호 감쇄가 항재밍 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 모델링 간략화를 위해 안테나 하부, 즉  $z < 0$ 으로 입사되는 신호는 동체 및 안테나 패턴에 의하여 30 dB의 감쇄가 일어난다고 가정하였다. 이를 위한 파라미터 설정은 표 3과 같으며 생략한 파라미터는 표 1과 같다. 위 파라미터를 적용하였을 때 평균 JSR 및 C/No 성능은 표 4와 같으며 이를 그래프로 정리하면 그림 11과 같다. 고도가 낮을수록 경로 손실이 적어 JSR이 증가하며, 수직 자세의 경우 동체에 의해 위성 신호까지 가려지므로 안테나 하부에서 교란 신호만 감쇄되어 입사되는 수평 자세보다 JSR이 높다. 그러나 JSR이 더 높음에도 불구하고 수직 자세의 항재밍 성능이 더 좋을 수 있다. 이는 평면 배열 안테나의 고도 각 대칭성에 의하여 수평 자세의 위성-재밍 신호 간 입사각이 상대적으로 낮아졌기 때문이다. 이에 따라 JSR에 비해 신호 간 이루는 입사각의 차이가 항재밍 성능에 더 큰 영향을 미치게 됨을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

표 4. 경로손실, 안테나 패턴, 비행체 자세에 대한 C/No 성능  
 Table 4. C/No performance with fuselage, antenna pattern, and pathloss.

C/No (dB)			Horizontal			Vertical		
dist. (km)	Separation (deg.)	JSR (dB)	LCMV	PM	Separation (deg.)	JSR (dB)	LCMV	PM
0.1	53.94	82.68	39.87	39.85	65.10	111.22	43.94	38.49
1	23.68	62.68	31.63	31.33	104.07	91.22	48.99	43.59
4	18.55	50.64	34.36	29.85	134.75	79.18	50.58	44.27

표 2. 평균 신호 분리도와 C/No  
 Table 2. Average signal separation and C/No.

Arrangement	Position	Height	Separation	C/No (JSR 60 dB)	
			degrees	LCMV	PM
Circular	Horizontal	4km	18.55	36.1	30.2
		1km	23.68	35.3	30.8
		100m	53.94	41.4	38.6
	Vertical	4km	134.75	52.3	42.9
		1km	104.07	52.0	42.3
		100m	65.10	50.3	38.2
Linear	Horizontal	4km	24.30	43.7	30.3
		1km	18.44	43.3	28.7
		100m	37.00	44.7	29.1
	Vertical	4km	137.81	52.2	41.3
		1km	110.22	51.7	40.6
		100m	73.84	79.9	37.1

표 3. 시뮬레이션에 대한 파라미터 (시나리오 D)  
 Table 3. Parameters for simulation (scenario D)

Jamming signals	
Transmit PW	10 kW
Bandwidth	2.046 MHz
# of jammers	8
Arrangement	Circular, diameter 2km
Path loss model	Free space path loss
Receiver	
Fuselage+Ant. pattern loss	30 dB
Position	Horizontal, Vertical
Height	100 m, 1 km, 4 km

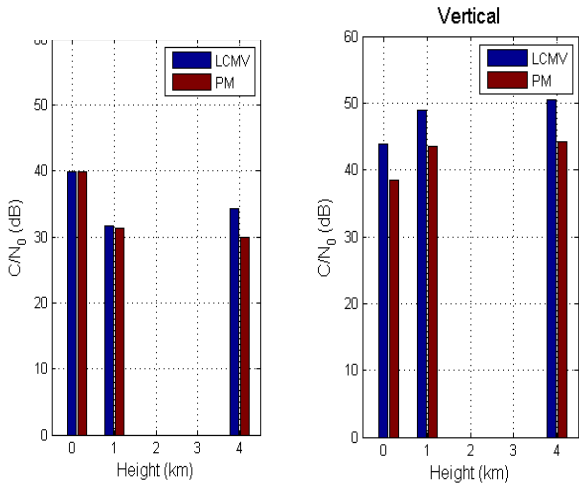


그림 11. 비행체 자세에 대한 C/N0 성능 그래프  
 Fig. 11. C/N0 performance with fuselage position.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 재밍 신호원 개수 변화에 따른 4소자 및 7소자 배열안테나의 항재밍 성능 변화와 배열안테나에 입사되는 위성 신호와 재밍 신호간의 상대적인 입사각도에 따른 항재밍 알고리즘의 성능 변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 분석결과에 의하면 7소자 배열안테나를 적용한 경우가 4소자 적용의 경우보다 항재밍 성능이 우수 하였고, 두 신호간의 입사각 변화가 좁아질수록 소자 개수에 따른 항재밍 알고리즘의 성능 열화수준이 높아짐을 확인하였다. 모의분석 결과를 종합하면, GPS 신호 및 재밍 신호의 근원지가 수신기의 자세 및 위치에 따라 입사되는 신호의 방향에 따라서 성능에 변화가 있음을 알 수 있었으며, 이는 두 가지 신호간의 입사각이 상대적인 배치에 따라서 입사각이 달라지는 효과에 의함을 확인 할 수 있었다. 신호 간 입사각이 커질수록 C/N0의 성능이 좋아지는 경향을 보이며, 위성 신호와 교란 신호가 충분히 분리되면 교란 신호의 제어가 용이해져 알고리즘의 포화 성능에 근접하게 됨을 확인하였다. 비행 시나리오에서 이러한 입사되는 신호의 모델링과 알고리즘을 적용하였을 때 동체의 자세에 따른 입사되는 신호들의 입사각이 변하기 때문에 항재밍 성능이 이에

영향을 받는다. 수신기가 지표면과 수직일 경우 위성 신호와 재밍 신호의 입사 방향이 반대됨으로 인해 특정 방향의 신호만 제거하면 되므로 신호 분리도 측면에서 유리하다.

하지만 수평 자세일 경우 특정 위치에서 평면 안테나의 한계로 인해 위성 신호와 재밍 신호의 입사 방향이 유사 한 것으로 보이게 되어 신호 분리도 측면에서 불리하였다. 결과적으로 수직 자세가 수평자세에 비해 상대적으로 C/N0 성능이 약 10dB 이상 우수한 것을 결과를 통해 보았으며 알고리즘 성능은 PM 보다 LCMV가 더 좋은 것으로 나타났다. 항재밍 알고리즘의 C/N0 성능은 JSR 증가에 따라 감소하게 되지만 신호 분리도가 JSR보다 항재밍 성능에 더욱 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

#### 참고 문헌

- [1] K. Y. Kim, "Analysis of anti-jamming techniques for satellite navigation systems," *The journal of Korea Information and Communications Society*, Vol. 38, No. 12, pp. 1216 - 1227, Dec. 2013.
- [2] J. Y. Kim, E. C. Kim, and J. M. Lee, "Jamming technologies in military communications," *Information and Communications Magazine*, Vol. 26, No. 3, pp. 32 - 40, Feb. 2009.
- [3] E. Kaplan and K. Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2nd ed, Bedford, MA: Artech House, 2005.
- [4] G. Dimos, T. Upadhyay, and T. Jenkins, "Low-cost solution to narrowband GPS interference problem," in *Proceedings of IEEE 1995 National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, Dayton: OH, pp. 145 - 153 vol. 1, May. 1995.
- [5] J. S. Han, K. Y. Kim, S. J. Kim, H. O. Kim, and H. J. Choi, "Analysis of adaptive digital signal processing for anti-jamming GPS system," *The Journal of Korea Information and Communications Society*, Vol. 32. No. 8, pp. 745-757, Aug. 2007.
- [6] R. L. Fante and J. J. Vaccaro, "Wideband cancellation of interference in a GPS receive array," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, INSPEC Accession Number: 6619038, pp. 549 - 564 , Apr. 2000.



최재건 (Jae-Gun Choi)

2004년 2월 : 인하대학교 전자과 (공학사)  
 2011년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학부 (공학석사)  
 2011년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 항법팀  
 ※ 관심분야 : 위성통신, 항재밍시스템, 항법시스템