

신호 이격도에 따른 빔 제어 알고리즘 성능 분석

윤 선 희*, 오 중 찬*, 김 준 오**, 남 주 훈***, 최 상 욱**, 안 재 민°

Performance Analysis of Beam Steering Algorithm According to the Signal Separation

Seonhui Yun*, Jongchan Oh*, Jun O Kim**, Juhun Nam***, Sangwook Choi**, Jaemin Ahn°

요 약

배열 안테나를 이용한 빔 제어 알고리즘은 교란 신호의 대응을 위한 방식으로 주로 사용된다. 그러나 동일한 수신 전력 및 신호 개수라도 신호의 위치에 따라 성능이 변화한다. 본 논문에서는 신호의 위치관계가 빔 제어 알고리즘의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 원하는 신호와 간섭 신호들이 이루는 각도의 최소값을 ‘신호 이격도’로 정의하고, LCMV와 PM을 대상으로 하여 신호 이격도에 따른 빔 제어 알고리즘의 C/N0 성능 관계를 분석하였다. 모의실험을 위해 GPS 신호 및 교란 신호가 자유도에 비해 많이 존재하는 환경을 설정하고 수신기의 자세와 위치를 변경시켜 다양한 신호 이격도를 얻도록 하였다. 또한, 수신 전력의 손실 요인을 적용하여 JSR과 신호 이격도가 항재밍 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 연구를 통해 신호 이격도의 증가에 따라 빔 제어 알고리즘의 성능이 향상하는 경향성이 있으며, 신호 이격도가 신호 개수와 JSR에 비해 항재밍 성능에 더 큰 영향을 미치게 됨을 확인하였다.

Key Words : Signal Separation, Beam Steering, GPS, Anti-Jamming, Array Antenna

ABSTRACT

Beam steering algorithms using array antenna are mainly used in such a manner as anti-jamming method. However, the performance is changed according to the position of signals despite the same number of signals and the same received power. In this paper, we analyzed the effect of the position relationship of the signals on the performance of the beam steering algorithms. Therefore, we defined ‘signal separation’ as the minimum angle of the interference signals and the desired signal, and analysed the relationship between the C/N0 performance of beam steering algorithms as LCMV/PM and the signal separation. For simulation, we set many GPS signals and jamming signals compared to the degrees of freedom. And changed the position and the height of the receiver in order to obtain various signal separation angles. In addition, we examined the effects of signal separation and JSR on the anti-jamming performance by applying the loss factors of the received power. Through the research, there is a tendency that the performance of beam steering algorithms is increased with the increase of the signal separation, and signal separation is more severely affecting on the anti-jamming performance compared to the number of signals and JSR.

* First Author : Chungnam National University Department of Information and Communications, shyun@cnu.ac.kr, 정회원

° Corresponding Author : Chungnam National University Department of Information and Communications, jmahn@cnu.ac.kr, 종신회원

* Chungnam National University Department of Information and Communications, jcohc@cnu.ac.kr

** Agency for Defense Development 3rd Research and Development Institute, jokim@add.re.kr, swchoi@add.re.kr

*** Danam Systems Inc. Research and Development Center, jhnam@danam.co.kr

논문번호 : KICS2014-08-336, Received August 31, 2014; Revised October 27, 2014; Accepted October 27, 2014

I. 서 론

위성항법시스템은 인공위성을 이용하여 지상에 있는 목표물의 위치를 정확히 추정하는 시스템으로 공식적인 명칭은 GNSS(Global Navigation Satellite System)이다. 위성항법시스템은 우리에게 잘 알려진 GPS(Global Positioning System)가 시초이며, 이것은 1970년대 미국 국방부가 지구상에 있는 물체의 위치를 측정하기 위해 만든 군사 목적의 시스템이었으나 오늘날에는 민간용으로 특정 부분이 허용되어 우리 생활에 널리 활용되고 있다^[1]. 특히 군 현대화 및 첨단화 필요성에 따라 위성항법시스템을 사용하는 군 장비의 종류가 지속해서 증가하고 있다. 고도 2만 km 이상에서 운용되는 GPS 위성에서 송신한 측위 신호는 두꺼운 대기권을 거쳐 지상에 위치한 수신기로 수신되며, GPS는 이를 극복하기 위해 처리 이득(processing gain)이 있는 직접 수열 확산 대역(Direct Sequence Spread Spectrum) 시스템을 통신 물리계층으로 사용하고 있다. 그러나 상용 수신기에서 주로 사용하는 GPS L1 C/A(Coarse/ Acquisition) 신호는 처리 이득이 30dB밖에 되지 않아 의도적인 교란 신호가 없을 때에도 여유 재밍 전력(marginal jamming power)이 약 14.5dB밖에 되지 않는다^[2]. 따라서 교란 신호가 존재할 경우 GPS 성능에 치명적인 영향을 끼칠 수 있으며 상용 GPS 코드를 사용하는 군 장비의 경우 특히 심각한 문제를 야기할 수 있다. 이의 해결을 위하여 다양한 항재밍 방법들이 개발되어 있으며^[3], 이러한 기술들은 GPS 수신기의 여러 수신 신호 단계에서 적용된다^[4]. 그중 안테나와 디지털 신호 처리 기술을 이용하여 빔(beam)을 제어하는 기법이 가장 큰 재밍 대응 성능을 기대할 수 있다^[5,6]. 일반적으로 배열 안테나를 이용한 빔 제어 알고리즘으로 선형 제약 최소 분산(Linearly Constrained Minimum Variance, LCMV) 빔 형성 알고리즘과 전력 최소화(Power Minimization, PM) 널 제어 알고리즘에 대한 연구가 많이 진행되어 있으며 이러한 항재밍 신호 처리 알고리즘 성능은 안테나 개수와 배치, 그리고 신호의 개수, 배치와 전력 세기 등에 영향을 받는다. 특히 안테나 개수나 JSR(Jammer-to-Signal Ratio), 신호의 개수와 같은 요소들이 동일해도 각 신호의 위치 관계에 따른 항재밍 성능이 크게 변화하는 것을 다수의 실험 결과를 통해 확인하였다.

따라서 본 논문에서는 각각의 다른 신호들이 같은 시간, 동일한 주파수 대역 상에 존재할 때 공간상에 배치된 상태에 따라 성능이 어떻게 차이가 나는지 확

인하였다. 즉 배열안테나에 입사된 원하는 신호(위성 신호)가 간섭 신호(교란 신호)와 이루는 각도들의 최소값을 '신호 이격도'라고 정의하고, 이에 따라 다수의 신호를 공간상에 배치하고 배열 안테나에 입사된 각각의 신호가 서로 이루는 각도를 계산한 후 최소 각도를 도출하였다. 신호 이격도와 항재밍 알고리즘의 C/N_0 성능의 비교를 통해 어떠한 연관성을 갖는지 확인하고, 신호 이격도가 통상적으로 항재밍 성능에 영향을 미친다고 생각되는 JSR에 비해 어느 정도 영향을 주는지 살펴보았다.

먼저 2장에서 배열 안테나 및 수신 신호의 모델링에 관하여 기술하고, 3장에서 본 논문의 대상 알고리즘인 LCMV와 PM에 관련하여 간략히 정리하였다. 4장에서 신호 이격도의 영향을 검증하기 위한 모의실험 시나리오 및 결과를 기술하였으며 5장에서 결론을 맺는다. 연구를 통하여 신호 이격도 증가에 따라 항재밍 알고리즘의 C/N_0 의 성능이 증가하는 추세를 보이며 JSR보다 더 민감한 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 신호 이격도가 빔 제어 알고리즘의 성능 분석에 있어 중요한 요소가 됨을 확인하였다.

II. 배열 안테나 및 수신 신호 모델링

단일 안테나 소자로 얻을 수 없는 방사 패턴이 요구될 때 두 개 이상의 안테나 소자들을 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 배열하여 사용한다. 동일한 위상의 신호가 수신되었을 때 각 단위 안테나 간 거리에 의해 안테나에 도달하는 신호의 수신 시간 지연이 발생하며 이에 의해 각 안테나에서의 수신 신호 위상차가 발생한다. 본 논문에서는 중앙 안테나와 6개의 안테나가 정육각형으로 배열된 7 소자 배열 안테나를 대상으로 하였다. 그림 1은 7 소자 평면 배열 안테나를 가정하였을 때 거리 차에 의한 수신 시간 지연을 나타낸 것이다.

그림 1의 배열 안테나에서 각 안테나 소자는 반 파장 간격으로 배치되어 있으며, m 번째 안테나의 시간 지연 τ_m 은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

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

여기서 f 는 수신 신호의 중심 주파수, λ 는 수신신

III. 빔 제어 알고리즘

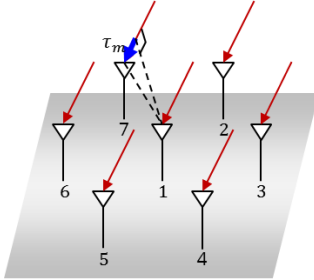


그림 1. 7 소자 평면 배열 안테나의 소자 간 거리 차에 의한 시간 지연
 Fig. 1. Time delay due to the differences of distance between the elements on the 7 elements planar antenna

호의 파장이다. θ 는 고도각이며 범위는 $0 < \theta \leq 90^\circ$, ϕ 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° 이상에서 입사된 신호는 $z=0$ 평면에 대칭 시킨 각도의 신호가 입사된 것처럼 인식된다. 이를 그림 2에 나타내었다.

$d_{m/x}$ 과 $d_{m/y}$ 은 각각 기준 안테나 소자 1번에서 m 번째 안테나 소자까지의 x, y 축 거리이며 이를 식 (2)에 행렬로 나타내었다.

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

이에 따라 송신 신호를 $s(t)$ 라 할 때, m 번째 안테나에서의 수신 신호는 식 (3)과 같이 모델링할 수 있다.

$$x_m(t) = s(t)e^{j2\pi f(t-\tau_m)} \quad (3)$$

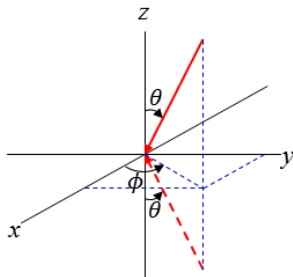


그림 2. 고도각, 방위각 및 고도각 대칭 관계
 Fig. 2. Elevation, azimuth angle, and symmetric relation of elevation angles

본 논문에서는 배열 안테나를 이용한 빔 제어 알고리즘 중 일반적으로 많이 연구 및 사용되고 있는 LCMV 빔 형성 알고리즘과 PM 널 제어 알고리즘을 대상으로 하였다. 두 알고리즘은 출력 전력을 최소화 하는 가중치를 얻는다는 점에서 동일하나 LCMV는 원하는 신호의 방향, 즉 GPS 신호 방향으로 일정 값의 안테나 이득을 고정하도록 제한 조건을 두며, PM은 특정 신호방향으로의 제한 조건을 두지 않는다. LCMV의 경우 다중(multiple) LCMV와 단일(single) LCMV가 있다.

다중 LCMV는 관찰 가능한 각각의 GPS 위성 방향에 대하여 빔 패턴을 생성할 수 있도록 식 (4)와 같이 제한 조건을 둔다.

$$\min_w E \left\{ \left| \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) \right|^2 \right\} \quad s.t. \quad \mathbf{a}_s^H \mathbf{w} = g \quad (4)$$

여기서 입력 신호 벡터는 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_7(t)]^T$ 이며 가중치 벡터는 $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_7]^T$ 이고 위성 방향 벡터는 $\mathbf{a}_s = [a_{s_1} \ a_{s_2} \ \dots \ a_{s_7}]^T$, g 는 안테나 이득이다. 즉 다중 LCMV는 식 (4)의 조건에 따라 출력 신호 전력을 최소화 하되 각 위성 방향(\mathbf{a}_s)으로 안테나 이득(g)을 갖는 가중치 벡터(\mathbf{w})를 구하는 알고리즘이며 이에 따라 위성 방향으로는 특정 안테나 이득값, 즉 빔 형성을 하게 되고 간섭 신호 방향으로는 적은 안테나 이득, 즉 널 제어가 이루어지는 알고리즘이다. 식 (4)를 라그랑주 승수법에 따라 구하면 최적 가중치 벡터는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{w}_{LCMV} = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{a}_s \left(\mathbf{a}_s^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{a}_s \right)^{-1} g \quad (5)$$

여기서 \mathbf{R}_x 은 상관 행렬이며 $\mathbf{R}_x = E[\mathbf{x}^H \mathbf{x}]$ 와 같이 정의된다.

단일 LCMV는 출력 전력을 최소화 조건은 동일하나 모든 관찰 가능한 GPS 신호 방향에 대해 빔 패턴을 생성할 수 있도록 제한 조건을 설정하며 이는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{A}^H \mathbf{w} = g \quad (6)$$

여기서 \mathbf{A}_s 는 L 개의 모든 위성 방향에 대한 행렬이며 $\mathbf{A}_s = [\mathbf{a}_{s_1} \mathbf{a}_{s_2} \dots \mathbf{a}_{s_L}]$ 와 같이 각각의 위성 방향 벡터의 조합으로 구성되어 있다. $\mathbf{g} = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_L]^T$ 는 각 위성 방향에 대한 안테나 이득값이며 모든 위성 방향에 대해 빔 형성을 하므로 널 제어의 자유도는 L 개 만큼 감소한다.

다중 LCMV는 각각의 위성에 대하여 안테나 가중치를 연산해야 하므로 단일 LCMV에 비해 복잡도가 약간 높으나 상관 행렬을 한 번만 계산하므로 복잡도가 크게 증가하지 않는다. 또한 각 연산에서 하나의 위성에 대해서만 빔을 형성하므로 널 제어에 대한 자유도가 상대적으로 높고 빔 제어를 통한 항재밍 성능 면에서 더 우수하여^[7] 본 논문에서는 다중 LCMV 알고리즘을 대상으로 하였다.

PM 알고리즘은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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.

$$\mathbf{c} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{w}_{PM} = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{c} (\mathbf{c}^T \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{c})^{-1} \quad (9)$$

식 (4)~(9)를 통해 두 알고리즘 모두 수신 신호의 상관 행렬과 제한 벡터를 이용한 최적 가중치 계산 알고리즘임을 알 수 있다.

IV. 모의실험

신호원이 동일한 위치에 존재하더라도 GPS 수신기의 위치에 따라 수신기에 입사하는 신호의 위치가 크게 달라진다. 이는 동일한 외부적 조건에서도 수신기가 받아들이는 신호 상태가 달라지며, 이에 따라 신호 이격도가 달라지고 항재밍 알고리즘의 성능이 달라질 수 있음을 의미한다. 따라서 신호 이격도가 항재밍 알고리즘에 미치는 영향을 확인하기 위하여 다음과 같

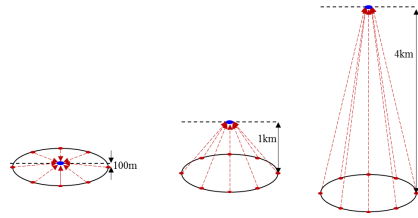


그림 3. 비행체 고도에 따른 교란 신호 입사각
Fig. 3. Incidence angles of jamming signals according to the height of flight vehicle

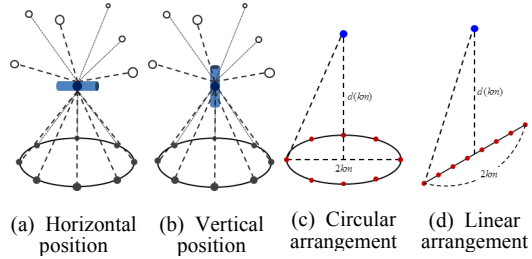


그림 4. 비행체 자세 및 교란자 배치 시나리오
Fig. 4. Position of flight vehicle and arrangement of jammers scenarios

은 시나리오를 가정하였다. 7 소자 배열 안테나는 비행체 위에 탑재되어 있으며, 수신기로 입사하는 신호 위치의 변화에 의한 영향을 관찰하기 위하여 a) 비행체의 고도를 변화시키거나 b) 비행체의 각도를 수평/수직으로 변화시키거나 c) 동일 개수의 재머를 원형/선형으로 배치하였으며, 이에 대한 설명을 그림 3, 4에 보였다. 먼저 비행체 고도에 따라 수신기에서 인식하는 신호의 입사각 변화는 그림 3과 같다. 그림에서 확인할 수 있듯 저고도일 때 원형으로 배치된 교란자의 신호는 수신기와 동일한 평면상에서 입사되는 것처럼 보이며 고고도로 갈수록 교란 신호가 수신기 아래에서 좀 더 밀집된 형태로 수신됨을 알 수 있다. 비행체의 각도가 수평일 경우 위성 신호는 수신기 위쪽에서, 교란 신호는 아래쪽에서 입사하게 된다. 반면 수직일 경우 위성 신호는 비행체 꼬리 방향, 교란 신호는 비행체 머리 방향에서 입사한다. 이에 따라 수평 자세의 경우 2장에서 언급한 평면 안테나의 고도각 대칭성에 따라 교란 신호가 xy 평면에 대하여 대칭되는 위치에서 입사된 것으로 인식하게 되며, 이에 따라 위성 신호와 교란 신호의 입사각 차이가 줄어들게 되고 신호 이격도도 줄어들게 된다. 반면 수직 자세의 경우 위성 신호와 교란 신호의 방위각이 반대가 되므로 위성-교란신호 간 각도가 큰 편이며 이에 따라 신호 이격도도 증가한다. b), c)의 시나리오 조합에 따른 신호 위치 관계 및 PM 알고리즘 사용에 따른 안테나

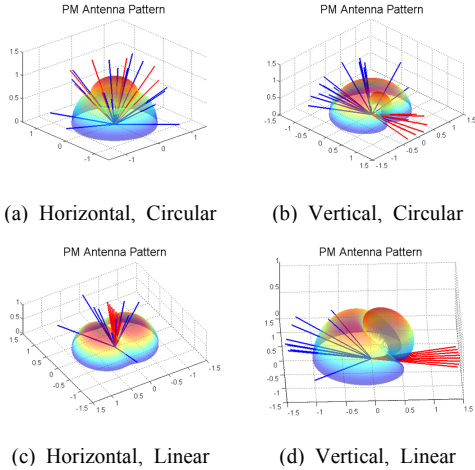


그림 5. 비행체 자세 및 교란자 배치에 따른 PM 알고리즘 빔 패턴, 신호 입사 방향

Fig. 5. Beam pattern of PM algorithm and incidence direction of signals according to position of flight vehicle and jammer arrangement

빔 패턴을 그림 5에 보였다. 여기서 시나리오의 신호 입사각 및 자세에 의한 영향을 관찰하기 위하여 배열 안테나가 완벽한 구형의 이득을 갖는다고 가정하고 안테나 패턴이나 비행기 동체에 의한 감쇄를 고려하지 않은 환경에 대하여 모의실험을 수행하였다. 그림 5의 파란색 선은 위성 신호의 입사 방향이며 빨간색 선은 교란 신호의 입사 방향이다. 그림에서 확인할 수 있듯 수평 자세일 경우 위성 신호와 교란 신호의 입사각이 유사하게 되며 수직 자세일 경우 위성 신호와 교란 신호의 방향이 반대가 된다. 또한, 원형 배치보다 선형 배치의 경우 교란 신호가 좀 더 모여 있음을 확인할 수 있다.

한편, 이론적으로 빔 제어 알고리즘은 $N-1$ 자유도 (N : 배열 안테나 소자 개수)에 따라 제어할 수 있는 빔/널 개수의 제한이 있다. 일반적으로는 각각 다른 방향에서 수신된 신호에 대해 빔 제어를 하므로 $N-1$ 개의 신호에 대한 처리를 하게 되나 교란 신호가 유사한 방향에서 입사될 경우 해당 방향에 널을 하나만 생성해도 여러 개의 교란 신호를 처리할 수 있다. 반대로 위성 신호와 교란 신호가 동일한 방향에서 입사될 경우 신호수가 적더라도 항재밍 성능이 매우 악화될 것이다. 따라서 $N-1$ 개 이상의 신호가 존재하더라도 신호 간 위치 관계에 따라 매우 좋은 항재밍 성능을 보일 수도 있고 항재밍 처리가 불가능한 경우도 있을 것임을 유추할 수 있다. 본 논문에서 대상으로 한 PM 알고리즘은 큰 수신 전력으로 입사된 신호, 즉 교란 신호에 대하여 널 제어를 함으로써 출력 전력을 최소

화 하는 방식이므로 위성 신호 개수에 크게 영향을 받지 않으며, 다중 LCMV 알고리즘 또한 하나의 위성 신호에 대해서만 빔 형성을 하고 나머지 위성 신호와 교란 신호에 대하여 널 제어를 하되, 위성 신호의 수신 전력이 매우 작으므로 결국 교란 신호에 대한 널 제어를 하는 것이 되어 두 알고리즘 모두 위성 신호 개수에는 크게 영향을 받지 않고 교란 신호의 개수에 영향을 받는다. 따라서 위성 신호는 특정 시간에 GPS 수신기에서 보이는 모든 위성의 위치에 대하여 모델링을 하고 교란 신호는 신호의 위치 관계, 즉 신호 이격도에 따른 성능 영향을 좀 더 명확히 확인하기 위하여 $N-1$ 자유도를 넘는 다소 악화된 신호 개수 환경을 가정하였다. 이상의 시나리오에 따른 모의실험 파라미터는 표 1과 같다.

표 1의 JSR 60dB일 때 위성위치, 교란자위치 및 비행체자세와 고도에 따른 평균 신호 이격도 및 C/N_0 는 표 2와 같다.

모의실험으로 동일한 JSR 환경임에도 불구하고 신호 이격도가 상대적으로 큰 수직 자세의 경우 수평 자세보다 약 10dB 이상의 성능 이득이 있음을 알 수 있다. GPS 위성 10개에 대하여 위의 12가지 시나리오를 적용하였을 때의 신호 이격도 대비 C/N_0 의 관계는 그

표 1. 모의실험 파라미터 (시나리오 a, b, c)
Table 1. Parameters for simulation (scenario a, b, c)

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

림 6과 같다

결과로부터, LCMV와 PM의 알고리즘 상의 성능 차이는 존재하지만 신호 이격도가 증가할수록 항재밍

표 2. 평균 신호 이격도 및 C/N₀
Table 2. Average signal separation and C/N₀

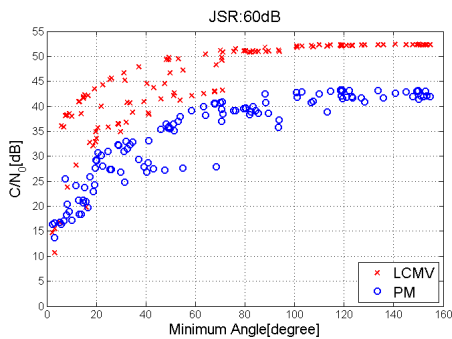
Arrangement	Position	Height	Separation	C/N ₀ (JSR 60dB)	
			degrees	LCMV	PM
Circular	Horizontal	4km	18.55	36.1	30.2
		1km	23.68	35.3	30.8
		100m	53.94	41.4	38.6
	Vertical	4km	134.75	52.3	42.9
		1km	104.07	52.0	42.3
		100m	65.10	50.3	38.2
Linear	Horizontal	4km	24.30	43.7	30.3
		1km	18.44	43.3	28.7
		100m	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

알고리즘의 성능이 향상되는 경향성을 동일하게 보이고 있다. 신호 이격도 60° 미만에서는 JSR 60dB일 때가 JSR 100dB일 때보다 성능이 우수하며 신호 이격도 60° 이상에서는 교란 신호에 대한 충분한 제어가 가능하므로 각 알고리즘의 성능 포화 값에 도달하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 N-1 자유도를 넘는 신호 개수가 존재하는 상황에서도 신호 위치 관계에 따라 항재밍 성능이 달라질 수 있으며 위성 신호와 교란 신호 간 충분한 신호 이격이 이루어지면 알고리즘이 잘 동작할 수 있음도 확인할 수 있다.

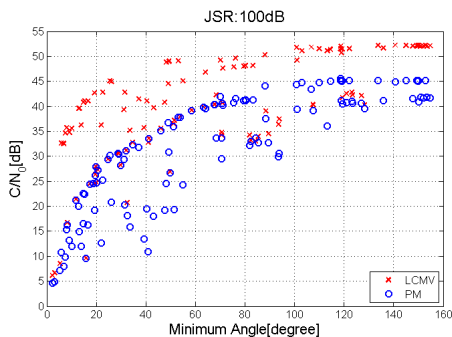
이와 함께, d) 동체 감쇄, 안테나 패턴 및 경로 손실이 있는 환경에서 JSR과 신호 이격도가 항재밍 알고리즘 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 모델링 간략화를 위해 안테나 하부, 즉 z < 0 공간으로 입사되는 신호는 동체 및 안테나 패턴에 의하여 30dB의 감쇄가 일어난다고 가정하였다. 이를 위한 파라미터 설정은 표 3과 같으며 생략한 파라미터는 표 1과 같다. 위 파라미터를 적용하였을 때 평균 JSR 및 C/N₀ 성능은 표

표 3. 모의실험 파라미터 (시나리오 d)
Table 3. Parameters for simulation (scenario d)

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



(a) JSR 60dB



(b) JSR 100dB

그림 6. 신호 이격도에 따른 C/N₀
Fig. 6. C/N₀ values according to separation angles of signals

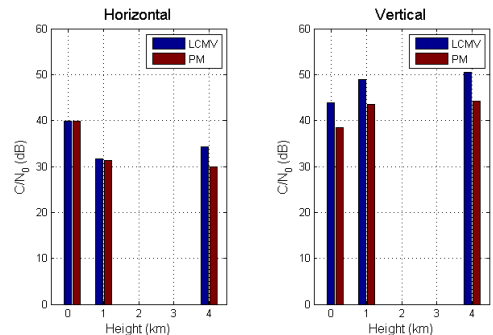


그림 7. 동체, 안테나 감쇄 및 경로 손실이 있을 때의 C/N₀ 성능
Fig. 7. C/N₀ performance with fuselage, antenna pattern, and path loss

표 4. 동체, 안테나 감쇄 및 경로 손실이 있을 때의 C/N_0 성능
Table 4. C/N_0 performance with fuselage, antenna pattern, and path loss

Aver. C/N_0 (dB)	Horizontal				Vertical			
	Distance(km)	Separation(deg)	JSR(dB)	LCMV	PM	Separation(deg)	JSR(dB)	LCMV
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

4와 같으며 이를 그래프로 정리하면 그림 7과 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 고도각 대칭성에 의하여 수평 자세의 신호 이격도가 상대적으로 낮아졌기 때문이며, 이에 따라 JSR에 비해 신호 이격도가 항재밍 성능에 더 큰 영향을 미치게 됨을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 배열 안테나로 입사하는 신호 방향에 따라 항재밍 성능이 변화함을 확인하고 신호 이격도에 대하여 정의한 후 신호 이격도와 항재밍 알고리즘의 성능 연관성을 분석하였다. 비행체에 부착된 7 소자 평면 배열 안테나를 대상으로 수신 신호를 모델링하고, 이에 적용할 항재밍 알고리즘으로써 다중 LCMV와 PM 알고리즘에 대하여 간략히 설명한 후 네 가지 시나리오에 따라 신호 이격도의 영향을 살펴 보았다. 신호의 위치가 동일해도 수신기의 자세 및 위치에 따라 입사되는 신호의 방향이 달라지며 이에 따라 각 위성 신호와 교란신호들이 이루는 신호 이격도가 달라진다. 이에 따라 동일한 수신 신호 전력과 신호 개수에도 불구하고 항재밍 알고리즘의 성능이 달라지는 것을 모의실험을 통해 확인하였다. 특히 신호 이격도와 C/N_0 성능은 비례하는 경향성을 보이며, 신호의 개수가 배열 안테나 소자 수에 따른 제한 자유도 값을 초과하여도 위성 신호와 교란 신호가 충분히 분리되면 교란 신호의 제어가 용이해져 알고리즘의 포화 성능에 근접하게 됨을 확인하였다. 또한 동체 및 안테나 패턴에 의한 신호 감쇄와 경로 손실을 적용한 모의실험을 통해 JSR이 증가하더라도 신호 이격도가 낮은 신호에 비해 신호 이격도가 높은 신호의 항재밍 성능이 우수함을 알 수 있었으며 이를 통해 신호 이격

도가 JSR보다 항재밍 성능에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다.

배열 안테나를 이용한 빔 제어는 통상적으로 안테나 소자의 개수가 많을수록 해상도가 향상되며, 이에 따라 신호 이격도가 항재밍 알고리즘에 영향을 주는 정도도 달라질 것으로 예상된다. 본 연구 내용과 더불어 추후 안테나 소자 수에 따른 신호 이격도 영향에 관한 연구를 추가함으로써, 배열 안테나와 항재밍 알고리즘의 연구 및 설계에 많은 도움이 될 것으로 기대 된다.

References

- [1] K. Kim, "Analysis of anti-jamming techniques for satellite navigation systems," *J. KICS*, vol. 38, no. 12, pp. 1216-1227, Dec. 2013.
- [2] S. Yoo and S. Y. Kim, "Jamming effects of GPS L1 C/A signal by knife-edge diffraction loss at Seoul metropolitan northwestern region," *J. KICS*, vol. 38C, no. 9, pp. 757-763, Sept. 2013.
- [3] J. Kim, et al., "Jamming technologies in military communications," *Inf. Commun. Mag.*, vol. 26, no. 3, pp. 32-40, Feb. 2009.
- [4] E. Kaplan and K. Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2nd Ed., Artech House, 2005.
- [5] G. Dimos and T. Jenkins, "Low-cost solution to narrowband GPS interference problem," in *Proc. IEEE 1995 National Aerospace and Electronics Conf.*, vol. 1, pp. 145-153, Dayton, OH, May 1995.
- [6] J.-S. Han, et al., "Analysis of adaptive digital signal processing for anti-jamming GPS system," *J. KICS*, vol. 32, no. 8, pp. 745-757, Aug. 2007.
- [7] J. Malmström, *Robust navigation with GPS/INS and adaptive beamforming*, System Technology Division, Swedish Defence Research Agency,

Stockholm, Sweden, Sci. Rep. FOI-R-0848-SE, Apr. 2003.

윤 선 희 (Seonhui Yun)



2006년 2월 : 충남대학교 전자
전파정보통신공학부 졸업
2008년 2월 : 충남대학교 정보
통신공학과 석사
2008년~2012년 : 한국전자통신
연구원 연구원
2009년 3월~현재 : 충남대학교

전자전파정보통신공학과 박사과정

<관심분야> 이동통신, 항재밍, 위성항법시스템

오 종 찬 (Jongchan Oh)



2012년 2월 : 충남대학교 전기
정보통신공학부 졸업
2012년 3월~현재 : 충남대학교
전자전파정보통신공학과 석사
<관심분야> 스마트 안테나,
MIMO, OFDM

김 준 오 (Jun O Kim)



2000년 2월 : 부경대학교 전자
공학과 졸업
2002년 2월 : 부경대학교 전자
공학과 석사
2002년 8월~현재 : 국방과학연
구소 선임연구원
<관심분야> 디지털 통신, 위성
항법 시스템

남 주 훈 (Juhun Nam)



1995년 2월 : 동아대학교 전자
공학과 졸업
1997년 2월 : 동아대학교 전자
공학과 석사
2010년 2월 : 고려대학교 전자
컴퓨터공학과 박사
2001년 1월~현재 : 단암시스
템(주) 수석연구원

<관심분야> 영상신호처리, 위성항법

최 상 욱 (Sangwook Choi)



1988년 2월 : 이주대학교 전자
공학과 졸업
1990년 2월 : 이주대학교 대학
원 전자공학과 석사
2011년 3월~현재 : 충남대학교
대학원 박사과정
1990년 3월~현재 : 국방과학연
구소 책임연구원

<관심분야> 항법시스템

안 재 민 (Jaemin Ahn)



1987년 2월 : 서울대학교 전자공
학과 졸업
1989년 2월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 석사
1994년 8월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 박사
1994년~1999년 : 삼성전자 선임
연구원

2007년~2008년 : 정보통신연구진흥원 차세대이동통신
사업단장, 정보통신부 차세대 이동통신 PM
1999년~현재 : 충남대학교 전기정보통신공학부 교수
<관심분야> 차세대 이동통신 물리계층 및 Radio
Resource management