

GPS 수신기에서 간섭신호에 대응하기 위한 배열 안테나 기반 능동 간섭 제거 방안

정의림^{1*} · 원현희² · 조성우² · 안병선²

An Active Interference Cancellation Technique for Removing Jamming Signals in Array Antenna GPS Receivers

Eui-Rim Jeong^{1*} · Hyun-Hee Won² · Sung-Woo Cho² · Byoung-Sun Ahn²

^{1*}Department of Information and Communication Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

²LIG Nex1 Co., Ltd., 207, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 446-798, Korea

요 약

GPS (global positioning system)는 지구 궤도를 도는 여러 GPS 위성의 신호를 수신하여 이들 신호의 수신 시간 차이를 이용하여 자신의 절대 위치를 알아내는 시스템으로 민간 목적뿐만 아니라 군용 목적으로도 널리 사용되고 있다. 특히 군용 시스템에서는 무기 등에도 사용되기 때문에 안정적인 GPS 수신은 민간보다 더 중요하다. 하지만 GPS는 사용 주파수가 알려져 있기 때문에 나쁜 의도로 인위적인 재밍신호를 송출하여 GPS 시스템을 무력화시킬 수 있다는 문제가 있다. 이에 재밍신호를 제거하고 GPS 신호만을 안정적으로 수신하기 위해 GPS 수신기에 다중 안테나를 설치하고 빔 널링 기술을 이용하여 재머만을 제거하는 기술이 많이 연구되어 왔다. 이러한 기술 중에서 본 논문에서는 MVDR (minimum variance distortionless response) 기술에 기반하여 새로운 적응형 빔 제어 기술을 제안한다. 제안하는 방식은 위성 방향으로의 빔은 훼손하지 않으면서 재머 방향으로는 적응적으로 널을 형성하여 재머를 효과적으로 제거한다. 제안하는 방식의 성능은 컴퓨터 모의실험을 통해 검증한다.

ABSTRACT

GPS (global positioning system) is a popular system that provides location information by measuring arrival time difference at the receiver between several GPS satellite signals. GPS is widely used in commercial area as well as military systems. Reliable GPS signal reception is more important in the military systems. However, since the carrier frequencies of the GPS signals are well known, the GPS receivers are vulnerable to intentional jamming attacks. To remove jammers but maintain GPS signals at the received signals, a popular technique is an adaptive beam steering method based on array antenna. Among adaptive beam steering techniques, this paper considers MVDR (minimum variance distortionless response) algorithm, and proposes a new adaptive technique that preserves the received signals at desired direction, but removes the jamming signals adaptively. The performance of the proposed method is verified through computer simulation.

키워드 : GPS 수신기, 어레이 안테나, 적응 빔 제어, MVDR

Key word : GPS receiver, array antenna, adaptive beam steering, MVDR

Received 08 April 2015, Revised 04 May 2015, Accepted 18 May 2015

* Corresponding Author Eui-Rim Jeong(E-mail:erjeong@hanbat.ac.kr, Tel:+82-42-821-1752)

Department of Information and Communication Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.7.1539>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

GPS (global positioning system)는 GPS 위성신호가 수신되는 시간 차이를 이용하여 정확한 3차원 위치와 속도를 알려주는 시스템으로 민간에서뿐만 아니라 군용 목적으로 널리 사용되고 있다[1]. 하지만 GPS 수신 신호의 전력은 열 잡음보다도 10dB 이상 작을 정도로 미약하게 수신되기 때문에 GPS 수신기에서는 의도적이던 의도적이지 않던 간섭신호의 영향을 심각하게 받을 수 있다. 특히 적은은 의도적으로 GPS 신호의 수신을 방해하고자 GPS 신호와 동일한 대역에 강한 재머를 송출하기도 하며 실제 휴전선 부근에서 이러한 재머로 인해 GPS 수신이 방해를 받기도 하였다. 현재 군에서는 GPS 항법 장치를 다양한 비행체, 유도무기 등에 탑재하기 때문에 안정적인 작전 운용을 위해 재머에 의한 간섭을 제거하는 기술은 대단히 중요하다고 할 수 있다. 이러한 GPS 재머 제거 기술에 대해서 많은 연구가 이루어져 왔는데, 특히 다중안테나에 기반하여 어레이 신호처리를 이용한 재머 제거 기술이 많이 연구되어왔다. 지금까지 연구되어 왔던 재머 제거를 위한 어레이 신호처리 기술에 대해서는 [2]에 잘 정리되어 있다. 이러한 어레이 신호처리 기술은 널 제어 기술 (null steering) [3], MVDR (minimum variance distortionless response) [4], 최소 평균 자승 에러 (minimum mean square error) [5] 와 최대 신호 대 간섭 및 잡음 비율 (maximum signal to interference and noise ratio)[6]에 기반한 방법으로 분류할 수 있다. 열거한 방법 중에서 본 논문은 MVDR 방법에 기반한 새로운 재머 제거 기술을 제안하고자 한다. 전통적인 MVDR 방법에서는 위성 신호는 천정 (zenith) 방향으로 도착하지만 재머는 지평선 방향 부근으로도 착한다는 점에 착안하여 천정 방향으로는 빔을 만드는 제한 조건 하에서 널의 위치를 조정하여 재머를 공간적으로 제거한다. 이 방식은 재머 제거와 위성 신호 방향으로의 빔 형성을 동시에 수행하기 때문에 우수한 GPS 수신 성능이 장점으로 알려져 있다.

재머의 종류로는 단일 정현파를 이용하는 협대역 재머도 있지만 넓은 대역폭을 갖는 광대역 재머도 존재한다. 이러한 광대역 재머의 환경에서는 어레이 신호처리를 이용한 공간적인 신호처리와 함께 시간 영역 신호처리를 이용한 주파수 영역 재머 제거 기능을 추가하여 보다 우수한 재머 제거 성능을 기대할 수 있다[7]. 이리

한 신호처리 방식을 공간-시간 적응형 신호처리 (STAP: space-time adaptive processing)라고 부른다. 공간-시간 적응형 신호처리를 이용함으로써 협대역 재머 뿐만 아니라 특히 광대역 재머도 효과적으로 제거가 가능하다.

본 논문에서는 MVDR에 기반한 재머 제거 기술을 제안한다. 구체적으로 빔을 만들고자 하는 원하는 신호 방향을 기존 논문과 같이 천정으로 한정하지 않고 임의의 방향으로 설정할 수 있도록 설계한다. 이렇게 설계하면 여러 개의 어레이 프로세서를 동시에 이용하되 각 프로세서가 개별 위성 방향을 향하도록 다중 빔 시스템을 만들 수 있기 때문에 복잡도는 증가하겠지만 보다 우수한 GPS 수신 성능을 기대할 수 있다. 또한 제안하는 방식을 공간-시간 적응형 신호처리를 기반으로 개발하여 협대역 및 광대역 재머에도 모두 효과적으로 대응할 수 있도록 한다. 제안하는 방식은 구속 조건을 가지는 최소 평균 자승 기법 (CLMS: constrained least mean squares)을 바탕으로 개발되며, 적응형 알고리즘으로 유도된다. 재머 제거 성능은 컴퓨터 모의실험을 통해 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 시스템 모델에 대해 기술하고 3절에서는 제안하는 공간-시간 적응형 재머 제거 알고리즘에 대해 설명하며 마지막으로 4절에서는 컴퓨터 모의실험 환경 및 결과에 대해 설명한다.

II. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 GPS 수신기 모델을 보인다. 이는 기저대역 등가 모델이며 수신기에서의 공간-시간 신호처리의 구조를 보이고 있다. 안테나 개수는 M개 이며 각 안테나에서의 시간영역 필터의 길이는 L이라고 가정한다. 수신되는 GPS 신호는 Q개가 있으며 이 중 q번째 GPS 신호를 $x_q(n)$ 이라고 하고 수신되는 입사 방향의 방위각을 ϕ_q , 고도각을 θ_q 이라고 한다. 방위각과 고도각의 의미는 그림 2와 같다. 수신신호를 평면파라고 가정하면, q번째 GPS 수신신호의 웨이브 벡터 k_q 는 다음과 같이 표현한다.

$$k_q = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos\theta_q \sin\phi_q, \sin\theta_q \sin\phi_q, \cos\phi_q]^T \quad (1)$$

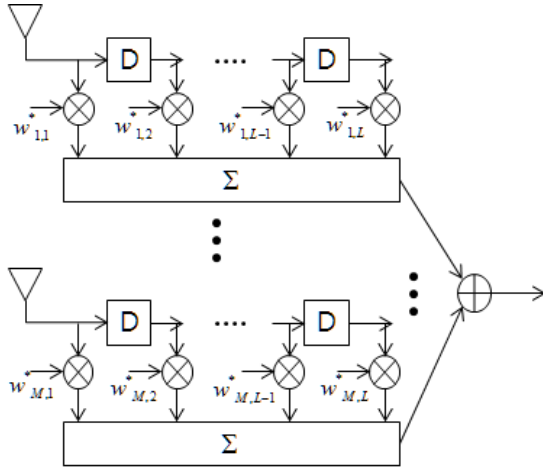


그림 1. 공간-시간 어레이 신호처리 모델
Fig. 1 Model for space-time signal processing

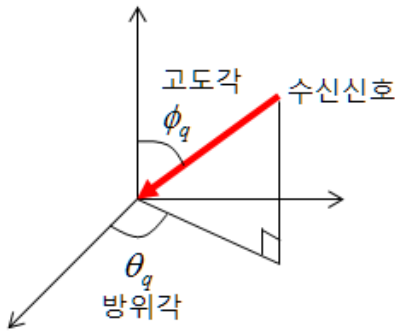


그림 2. 방위각과 고도각에 대한 설명
Fig. 2 Description of azimuth and elevation angles

M개의 안테나를 전방향(Omni)의 빔 패턴을 가지는 점 안테나로 가정하자. m번째 안테나가 설치된 x, y, z 좌표를 $\underline{u}_m = [x_m, y_m, z_m]^T$ 라고 하면 q번째 GPS 신호에 대한 스티어링 벡터는 크기가 M x 1이며 다음과 같이 표현된다.

$$\underline{v}(k_q) = [\exp(jk_q^T \underline{u}_1), \exp(jk_q^T \underline{u}_2), \dots, \exp(jk_q^T \underline{u}_M)]^T \quad (2)$$

q번째 GPS 위성 신호를 $s_q(n)$ 이라고 한다면 q번째 GPS 수신 신호 벡터는 $s_q(n)\underline{v}(k_q)$ 와 같이 쓸 수 있다. 만약 P 개의 재머가 존재하고, 이중 p번째 재머 신호를 $\psi_p(n)$ 이라고 하고 이 재머의 입사각에 대한 스티어링 벡터를 $\underline{v}(k_p)$ 라고 한다면 p번째 수신 재머 신호는

$\psi_p(n)\underline{v}(k_p)$ 와 같이 표현된다. 결과적으로 최종 수신 신호는 다음 식으로 표현된다.

$$y(n) = \sum_{q=1}^Q s_q(n)\underline{v}(k_q) + \sum_{p=1}^P \psi_p(n)\underline{v}(k_p) + \underline{z}(n) \quad (3)$$

(3)에서 $\underline{z}(n)$ 은 잡음 벡터를 나타낸다. 수신신호가 (3)과 같이 표현될 때 그림 1의 수신 공간-시간 필터의 출력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$r(n) = \sum_{l=1}^L \underline{w}_{:,l}^H y(n-l+1) = \underline{w}^H \tilde{\underline{y}}(n) \quad (4)$$

위 식에서 $\tilde{\underline{y}}(n) = [y^T(n), y^T(n-1), \dots, y^T(n-L+1)]^T$ 이며, $\underline{w}_{:,l}$ 과 \underline{w} 는 각각 크기가 M x 1, ML x 1의 벡터로써 다음과 같이 정의된다.

$$\underline{w}_{:,l} = [w_{1,l}, w_{2,l}, \dots, w_{M,l}]^T$$

$$\underline{w} = [\underline{w}_{:,1}^T, \underline{w}_{:,2}^T, \dots, \underline{w}_{:,L}^T]^T$$

본 논문의 목적은 \underline{w} 를 잘 설계하여 공간-시간 필터 출력 $r(n)$ 에서 재머는 제거하고 원하는 방향의 GPS 신호는 훼손하지 않도록 하는 것이다.

III. 제안하는 방안

3.1. 최적의 해 도출

먼저 \underline{w} 설계를 위한 비용함수를 정의해야 하는데, 수신신호에서 GPS 신호의 크기는 잡음보다도 많이 작다고 가정한다. 실제로 GPS 수신신호는 열잡음 전력 보다 15dB이상 작은 것으로 알려져 있다. 반면 재머의 전력은 잡음 보다 많이 크다고 가정한다. 잡음보다 작은 재머는 대역확산 방식을 사용하는 GPS 신호의 수신에 큰 영향을 미치지 않으므로 잡음보다 훨씬 큰 재머 제거만을 고려한다. 결국 수신신호는 재머 + 잡음으로 볼 수 있으며 재머를 제거하기 위해서는 비용함수를 공간-시간 필터 출력의 전력을 최소화 하도록 결정한다. 공간-시간 필터 출력 $r(n)$ 의 전력은 다음과 같이 나타난다.

$$E[r(n)^2] = E[\underline{w}^H \tilde{\underline{y}}(n) \tilde{\underline{y}}^H(n) \underline{w}] = \underline{w}^H R_{yy} \underline{w} \quad (5)$$

위 식에서 $R_{yy} = E[\tilde{\underline{y}}(n) \tilde{\underline{y}}^H(n)]$ 이다. 또한 빔을 만들고

싶은 방향의 스티어링 벡터를 $\underline{v}(k_d)$ 라고 하고 원하는 방향의 신호가 통과하는 시간 영역 필터의 특성을 $\underline{h}_d=[h_1, \dots, h_L]^H$ 라고 하자. $\underline{v}(k_d)$ 와 \underline{h}_d 는 사용자가 설정해야 하는 값이다. 일반적으로 \underline{h}_d 는 위성 신호만 통과시키고 그 밖에 주파수의 신호는 감쇄시키는 L개의 길이를 갖는 저역 통과 필터로 설계한다. 원하는 방향의 빔을 훼손하지 않는 제한조건을 만들기 위해서는 $\underline{v}(k_d)$ 의 방향으로 수신되는 신호의 등가적인 시간 영역 필터 특성이 \underline{h}_d 가 되도록 설정해야 한다. 원하는 방향에서 수신되는 신호가 통과하게 되는 등가적인 시간영역 필터는 그림 1에서 $[\underline{w}_{\cdot,1}^H \underline{v}(k_d), \underline{w}_{\cdot,2}^H \underline{v}(k_d), \dots, \underline{w}_{\cdot,L}^H \underline{v}(k_d)]^T$ 로 결정되고 이 벡터가 \underline{h}_d 가 되도록 만들어 주어야 한다. 이러한 내용을 종합하면 제한조건은 다음과 같이 주어진다.

$$[\underline{w}_{\cdot,1}^H \underline{v}(k_d), \underline{w}_{\cdot,2}^H \underline{v}(k_d), \dots, \underline{w}_{\cdot,L}^H \underline{v}(k_d)]^T = \underline{h}_d \quad (6)$$

$\underline{v}(k_d)$ 대신 길이 M의 모든 원소가 1인 벡터를 사용하게 되면 기존의 방식[7]과 같이 천칭 방향으로 빔을 형성하게 되며 풀어야 하는 문제가 단순해진다. 원하는 빔포밍 계수를 찾는 최적화 문제를 풀기 위해서는 제한조건을 \underline{w} 의 식으로 나타내야 한다. 이를 위해 먼저 크기 $1 \times ML$ 의 \underline{c}_l 라는 벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \underline{c}_1 &= \frac{[\underline{v}(k_d), \underline{0}_M, \underline{0}_M, \dots, \underline{0}_M]^T}{L \text{개의 } (1 \times M) \text{ 벡터로 구성}} \\ \underline{c}_2 &= [\underline{0}_M, \underline{v}(k_d), \underline{0}_M, \dots, \underline{0}_M]^T \\ \underline{c}_L &= [\underline{0}_M, \underline{0}_M, \underline{0}_M, \dots, \underline{v}(k_d)]^T \end{aligned} \quad (7)$$

위의 수식에서 $\underline{0}_M$ 은 $1 \times M$ 크기의 벡터로 모든 원소가 0이다. (7)에서 정의한 \underline{c}_l 벡터를 이용하여 다음과 같이 $ML \times L$ 크기의 C 행렬을 정의한다.

$$C = [\underline{c}_1, \underline{c}_2, \dots, \underline{c}_L] \quad (8)$$

따라서 원하는 빔이 만족해야 하는 제한조건은 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$C^H \underline{w} = \underline{h}_d \quad (9)$$

(5)와 (9)를 참고하면 빔에 대한 제한조건을 만족하면서 재머를 제거하는 \underline{w} 를 구하는 최적화 문제는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \arg \min \quad & \underline{w}^H R_{yy} \underline{w}, \\ \text{subject to} \quad & C^H \underline{w} = \underline{h}_d \end{aligned} \quad (10)$$

위의 최적화 문제는 라그랑주 승수법 (lagrange multiplier)을 이용하여 풀 수 있다. 크기 $L \times 1$ 의 라그랑주 승수 $\underline{\lambda}$ 를 도입하여 (10)식의 최적화 문제를 다시 쓰면

$$H(\underline{w}) = \frac{1}{2} \underline{w}^H R_{yy} \underline{w} + \underline{\lambda}^T (C^H \underline{w} - \underline{h}_d) \quad (11)$$

이고, (11)을 \underline{w} 에 대하여 미분하여 기울기를 구하면 다음과 같다.

$$\nabla H(\underline{w}) = R_{yy} \underline{w} + C \underline{\lambda} \quad (12)$$

최적의 해를 구하기 위해 $\nabla H(\underline{w}) = 0$ 을 만족하는 \underline{w} 를 구하면 $\underline{w}_{opt} = -R_{yy}^{-1} C \underline{\lambda}$ 와 같이 얻어지고 이 해를 (10)에 대입하면, $\underline{\lambda} = -[C^H R_{yy}^{-1} C]^{-1} \underline{h}_d$ 와 같이 라그랑주 승수가 구해진다. $\underline{\lambda}$ 를 \underline{w}_{opt} 에 대입하면 최종 해는 다음과 같다.

$$\underline{w}_{opt} = R_{yy}^{-1} C [C^H R_{yy}^{-1} C]^{-1} \underline{h}_d \quad (13)$$

3.2. 적응형 알고리즘 유도

(13)의 해는 역행렬을 필요로 하기 때문에 계산량이 많이 소요되며 이를 해결하기 위해서는 적응형 알고리즘의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 대표적인 적응형 알고리즘인 LMS (least mean square) 방식을 고려한다. 적응형 알고리즘을 통해 공간-시간 계수를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \underline{w}(n+1) &= \underline{w}(n) - \mu \nabla_w H(\underline{w}(n)) \\ &= \underline{w}(n) - \mu (R_{yy} \underline{w}(n) + C \underline{\lambda}(n)) \end{aligned} \quad (14)$$

(14)에서 (12)의 결과를 이용하였고, μ 는 스텝 사이즈를 나타내며 적응형 알고리즘에서 계수는 시간에 따라 변하기 때문에 시간 변수 n이 추가되었다. 라그랑주 승산기는 $\underline{w}(n+1)$ 이 (10)의 조건을 만족하는 것으로 선택한다.

$$\underline{h}_d = C^H \underline{w}(n+1) = C^H \underline{w}(n) - \mu C^H R_{yy} \underline{w}(n) - \mu C^H C \underline{\lambda}(n) \quad (15)$$

(15)에서 $\underline{\lambda}(n)$ 을 구하고 이를 (14)에 대입하면,

$$\begin{aligned} \underline{w}(n+1) &= \alpha \{ \underline{w}(n) - \mu R_{yy} \underline{w}(n) \} + \underline{\beta} & (16) \\ \alpha &= I_{ML} - C(C^H C)^{-1} C^H \\ \underline{\beta} &= C(C^H C)^{-1} \underline{h}_d \end{aligned}$$

(16)는 공간-시간 영역 필터 계수를 찾는 steepest descent에 기반한 최종적인 적응형 알고리즘을 보인다. α 나 $\underline{\beta}$ 는 알고리즘 동작 전에 미리 구할 수 있기 때문에 실제 (16)의 계산에 소요되는 계산량은 (13)과 비교하여 훨씬 적다. 하지만 (16)에서는 안테나 수신신호에 대한 자기상관 행렬 R_{yy} 를 필요로 하는 것이 부담스럽다. 자기상관 행렬을 구하기 위해서는 긴 시간 수신신호 벡터에 대한 평균을 취해야 하고, 이 과정에서 시간에 따라 재머의 방향이 변한다면 제대로 자기상관 행렬을 구할 수 없기 때문이다. 따라서 자기상관 행렬 대신 현재의 샘플 값으로 대체한다. 이 경우 $R_{yy} \approx \tilde{\underline{y}}(n) \tilde{\underline{y}}^H(n)$ 가 되므로 이를 (16)식에 대입하면 다음과 같이 최종적인 LMS 알고리즘이 완성된다. 이 알고리즘은 원하는 방향에 대한 빔의 조건을 만족하는 LMS 알고리즘이기 때문에 constrained LMS 알고리즘으로 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} \underline{w}(n+1) &= \alpha \{ \underline{w}(n) - \mu \tilde{\underline{y}}(n) \tilde{\underline{y}}^H(n) \underline{w}(n) \} + \underline{\beta} & (17) \\ &= \alpha \{ \underline{w}(n) - \mu \tilde{\underline{y}}(n) r^*(n) \} + \underline{\beta} \end{aligned}$$

IV. 컴퓨터 모의실험 환경 및 결과

제안하는 방식에 대한 성능 검증은 컴퓨터를 이용한 모의실험을 통해 수행하였다. GPS신호는 1.5GHz의 L1 대역을 가정하였으며, 수신 안테나의 개수는 7개로 가정하였고 그림 3과 같이 x, y 평면에 배치하였다. 인접 안테나 소자 사이의 거리는 1/4 파장인 5cm로 설정하였다.

GPS 위성 신호는 12개를 가정하였으며 개별 위성신호의 수신 SNR은 각각 -15dB로 설정하였다. 위성신호의 방위각은 12개의 위성이 30도의 간격으로 360도에 등간격으로 배치되었다고 가정하였으며 고도각은 모든 GPS 위성신호에서 70도로 설정하였다. 간섭 신호인 재머 신호는 협대역 재머 1개와 광대역 재머 1개를 생성하였으며 협대역 재머는 단일 주파수를 가지는 정현파로 생성하였고 광대역 재머는 2MHz의 대역폭을 가지는 신호로 생성하였다. 각 재머의 JNR (jammer to noise ratio)은 50dB로 설정하였다.

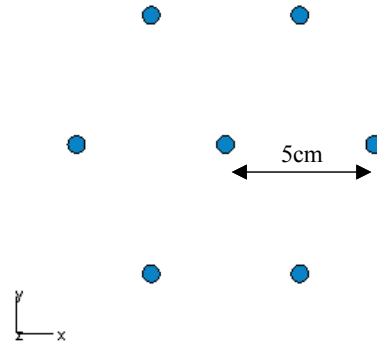


그림 3. 안테나 배열의 모양
Fig. 3 Geometry of array antenna

즉, 재머의 전력은 잡음보다 50dB 높다고 가정하였다. 이 경우 재머의 전력은 GPS 위성 신호의 전력보다 65dB 높게 된다. 따라서 일반 GPS수신기를 이용해서는 제대로 GPS 위성 신호를 인식할 수 없는 상황이다. 재머가 수신되는 방향은 두 재머 모두 방위각 -90도, 고도 10도로 설정하였다. 일반적으로 재머 신호는 지상에서 송출하므로 GPS 위성신호에 비해 낮은 고도각으로 설정하였다.

공간-시간 신호처리가 수행되는 신호처리부의 동작 클럭은 20MHz로 설정하였다. GPS신호의 칩 속도가 1MHz인 것을 감안하면 약 20배 과표본 상황에서 모의 실험이 수행되었다. 또한 시간 영역의 필터 길이를 $L=5$ 로 설정하였다. 따라서 공간-시간 필터의 총 길이는 $7 \times 5 = 35$ 이다. 실험에 사용된 수신신호의 길이는 0.2초이다. 이는 0.2초 정도의 시간에 제안하는 적응형 알고리즘이 충분히 수렴하여 원하는 성능을 보이는지 확인하기 위함이다. 제약조건 설정에 필요한 (9)의 시간 영역 필터 특성은 $\underline{h}_d = [1, 1, 1, 1, 1]^T$ 로 설정하였다. 또한 제약 조건에 필요한 원하는 신호의 방향으로 방위각 0도, 고도각 70도로 설정하였다.

그림 4의 왼쪽 그림은 수신신호의 스펙트럼을 보인다. 잡음에 비해 광대역 재머가 50dB 높게 수신된 것을 확인할 수 있고 협대역 재머도 높은 전력을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 5는 제안하는 (17)의 적응형 알고리즘이 동작할 때 공간-시간 필터 출력 $r(n)$ 의 전력의 변화를 시간에 따라 보이고 있다. 재머로 인해 상당히 높은 값으로 시작한 전력 값이 알고리즘 동작 후 급격히 줄어들기 시

작하며 약 0.4ms 이후에는 안정적인 모습을 보인다. 수렴 후에는 전력 값이 약 1을 보이고 있다. 모의실험 시 잡음의 전력을 1로 설정했기 때문에 정상적으로 재머를 제거한 것으로 볼 수 있다. 이러한 수렴 특성 커브를 통해 동적으로 움직이는 재머 환경에서의 성능도 예측할 수 있다. 그림 4의 오른쪽 그래프는 알고리즘 동작 후 0.2초 후에 공간-시간 필터 출력의 스펙트럼을 보이고 있다. 광대역 재머 및 협대역 재머가 완벽히 제거된 것을 확인할 수 있다. 최종 스펙트럼의 전체적인 모양은 $\underline{h}_d = [1, 1, 1, 1, 1]^T$ 의 주파수 응답과 동일한 특성을 보이고 있다.

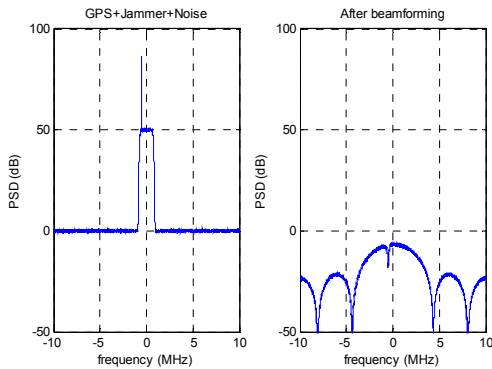


그림 4. 수신 신호의 스펙트럼(좌) 및 공간-시간 적응형 알고리즘 동작 후 스펙트럼(우)
 Fig. 4 Spectrum of received signal (left) and spectrum of space-time adaptive filter output (right)

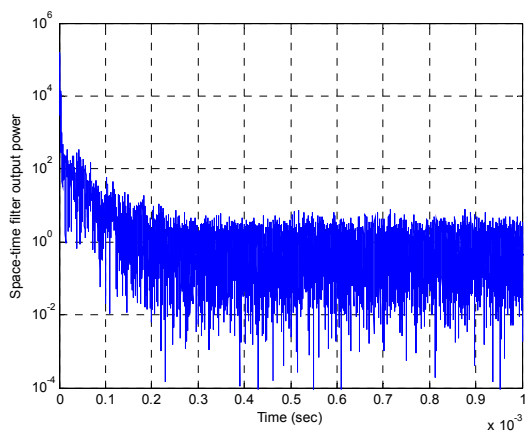


그림 5. 시간에 따른 공간-시간 필터 출력 전력
 Fig. 5 Power change at space-time adaptive filter output

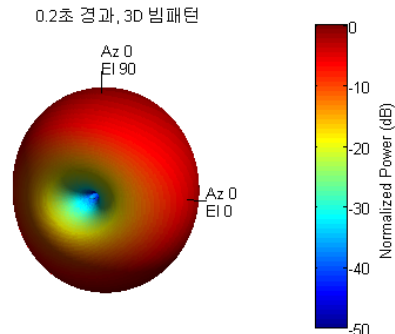


그림 6. 적응형 알고리즘 수렴 후 빔 패턴
 Fig. 6 Beam pattern after convergence of adaptive algorithm

그림 6은 0.2초 후에 수렴한 공간-시간 필터의 빔 패턴을 보이고 있다. 재머가 수신되는 방향인 방위각 -90도 고도각 10도에 널이 형성된 것을 볼 수 있다. 다만 안테나 소자가 7개 밖에 안 되고 인접 안테나와의 거리가 1/4 파장이라서 빔이 뚜렷하게 보이지는 않지만 원하는 방향으로 비교적 큰 빔이 형성된 것은 확인하였다. 안테나 개수를 늘리고 간격도 늘린다면 보다 분명한 빔이 나타날 것으로 예상된다.

이와 같은 실험결과를 통해 제안하는 방식이 큰 재머가 존재하는 모의실험 환경에서 원하는 방향의 신호는 잘 유지하면서 재머는 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 재밍신호와 같은 간섭신호가 있는 환경에서 재머를 제거하고 원하는 신호를 훼손하지 않는 배열안테나 기반 GPS 수신기에 대한 연구를 수행하였다. 제안하는 시간-공간 영역 적응형 알고리즘은 원하는 방향의 빔을 만족하면서 평균 자승 오차를 최소화하도록 하여 재머의 전력을 최소화하며 컴퓨터 모의실험 결과 GPS 신호 대비 70dB 큰 광대역 및 톤 재머를 잘 제거하는 것을 확인하였다. 본 연구결과는 특히 적의 인위적인 간섭신호가 심한 군용 환경에 적용하기 적합하다.

REFERENCES

- [1] C. -M. Choi and K. -S. Ko, "A study on the DOP improvement using hybrid satellite navigation system," *Journal of Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 15, no.9, pp. 2045-2049, Sept. 2011.
- [2] Yaohua Zehng, "Adaptive antenna array processing for GPS receivers," a thesis for the degree of master of science, the university of Adelaide, South Australia, July 2008.
- [3] S. P. Applebaum, "Adaptive arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol 24, pp. 585-595, Sept 1976.
- [4] R. L. Fante and J. J. Vaccaro, "Wideband cancellation of interference in a GPS receiver array," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 36, pp. 549-564, Apr. 2000.
- [5] B. D. Van Veen and K. M. Buckley, "Beamforming: a versatile approach to spatial filtering," *IEEE assp magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 4-24, Apr. 1988..
- [6] L. Zhao, M. G. Amin, A Lindsey, and Y. Zhang, "Subspace array processing for the suppression of FM jammers in GPS receivers," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, pp. 80-90, Jan. 2004.
- [7] O. L. Frost, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing," *Proceedings of the IEEE*, vol. 60, no. 8, pp. 926-935, Aug. 1972.



정의림(Eui-Rim Jeong)

1995년 : 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 학사
 1997년 : 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 석사
 2001년 : 한국과학기술원 전자 전산학과 박사
 2009년 1월 ~ 현재: 한밭대학교 정보통신공학과 부교수
 ※관심분야 : 통신신호처리, 전치왜곡, 모델설계



원현희(Hyun-Hee Won)

2009년 2월 : 한동대학교 전산전자공학부 학사
 2012년 1월 ~ 현재 : (주) LIG 넥스원 연구원
 ※관심분야 : Array signal processing, STAP



조성우(Sung-Woo Cho)

2011년 2월 : 세종대학교 정보통신공학과 학사
 2013년 8월 : 세종대학교 정보통신공학과 석사
 2014년 1월 ~ 현재 : (주) LIG넥스원 연구원
 ※관심분야 : Array signal processing, Direction of arrival



안병선(Byoung-Sun Ahn)

2002년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 학사
 2004년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 석사
 2008년 5월 ~ 현재 : (주) LIG 넥스원 연구원
 ※관심분야 : Digital beamforming, Adaptive processing