

등간격 선형 안테나배열에서 적응형 빔포밍 알고리즘의 성능 향상 연구

황 찬 호*

A Performance Improvement Study of Adaptive Beamforming Algorithm in Uniform Linear Antenna Array

Chan-ho Hwang*

요 약

본 논문에서는 적응형 빔포밍에 사용되는 알고리즘 가운데 훈련신호를 이용하는 LMS, RLS, CGM 알고리즘과 블라인드 알고리즘인 CMA를 소개하고, CMA step size를 추정하는 방법을 제안한다. 그리고 제안된 CMA의 성능을 확인하기 위해 등간격 선형 안테나 배열을 모사하고, SINR에 따라 알고리즘별 Array Factor를 확인하였다.

Key Words : Adaptive Beamforming Algorithm, LMS, RLS, CGM, CMA, step size

ABSTRACT

In this paper, we introduce LMS, RLS, CGM algorithm using training signal and CMA which is blind algorithm for adaptive beamforming. And we propose a method to update CMA step size. In order to analysis the performance of the proposed CMA, Array factor for each beamforming algorithm is verified according to SINR in an uniform linear antennas array.

I. 서 론

무인항공기의 사용이 늘어남에 따라 공대지 통신에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 공중이라는 환

경적인 특성상 간섭에 노출되기 쉽기 때문에 간섭원의 영향을 줄여 통신의 신뢰성을 확보할 필요가 있다. 여러 방법들 중 적응형 빔포밍 기술도 하나에 속한다.

적응형 빔포밍 안테나 시스템은 다수의 안테나를 기반으로 원하는 방향으로 빔을 조향하거나, 간섭원의 방향으로 안테나 이득을 줄이는 형태로 빔패턴을 형성할 수 있다. 이것을 가능하게 하는 것이 적응형 빔포밍 알고리즘이다.

적응형 빔포밍 알고리즘은 적응적으로 빔 패턴을 형성하기 위해 최적의 배열 가중치를 추정하는 것으로 알고리즘의 동작에 개입하는 기준신호의 유무에 따라 훈련신호 기반 알고리즘과 블라인드 알고리즘으로 분류할 수 있다.

본 논문에서는 훈련신호를 기반으로 동작하는 알고리즘과 블라인드 알고리즘을 소개하고, 블라인드 알고리즘의 하나인 CMA(Constant Modulus Algorithm)를 기반으로 step size를 추정하는 방법을 제안한다. 그리고 등간격 선형안테나 배열을 모사해 SINR (Signal to Interference and Noise Ratio)에 따른 알고리즘별 AF(Array Factor)를 분석함으로써 제안된 방법의 성능을 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 등간격 선형 안테나 배열 시스템을 가정한다. 등간격 선형 배열은 그림 1과 같다.

수신되는 신호들이 협대역 신호인 경우, 배열시스템으로 입력되는 신호는 다음과 같이 정리된다^[2].

$$x_N(t) = s(t)\exp(-j(N-1)\frac{2\pi ds\sin\theta_s}{\lambda}) + \sum_{m=1}^M i_m(t)\exp(-j(N-1)\frac{2\pi ds\sin\theta_{im}}{\lambda}) + n_N(t) \quad (1)$$

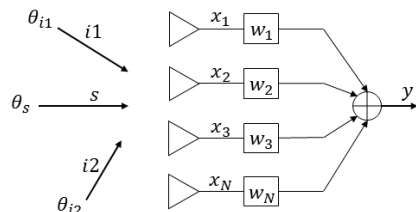


그림 1. 등간격 선형 배열
Fig. 1. Uniform Linear Array

* First Author : (ORCID:0000-0001-8807-7210)The 2nd R&D Institute, Agency for Defense Development, hchmad@nate.com, 정희원
 논문번호 : 201902-455-A-LU, Received February 8, 2019; Revised March 11, 2019; Accepted March 13, 2019

x_N 은 N 번째 배열로 입력되는 신호로 우리가 원하는 신호인 s , m 개의 간섭원 신호인 i_m , 그리고 배열로 인입되는 잡음 n_N 의 합으로 표현된다. d , θ 는 배열간격과 신호의 도래각을 뜻한다. 이러한 배열 입력 신호는 배열가중치가 곱해져 최종적으로 다음과 같이 출력된다.

$$y(t) = \bar{w}^H(t) \bar{x}(t) \tag{2}$$

$$\bar{w}(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_N(t)]^T \tag{3}$$

$$\bar{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T \tag{4}$$

\bar{w} , \bar{x} 는 배열 가중치 벡터, 배열입력 벡터를 의미하며 배열의 출력 y 는 배열가중치 벡터와 배열입력 벡터의 내적으로 표현된다. 특히 \bar{w} 는 복소 가중치이며, 간섭원의 영향을 줄이는 가중치를 추정하는 것이 적응형 빔포밍 알고리즘의 목적이다.

각 알고리즘을 통해 구해진 복소 가중치를 기반으로 등간격 선형 안테나 배열의 AF는 식(5)와 같이 표현된다.

$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^N w_n \exp(j(n-1) \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda}) \tag{5}$$

III. 적응형 빔포밍 알고리즘

적응형 빔포밍 알고리즘은 신호의 간섭과 채널변화 극복을 위한 배열안테나의 빔패턴을 적응적으로 변화시키는 역할을 한다. 알고리즘이 동작될 때, 기준신호의 사용유무에 따라 훈련신호 기반 알고리즘과 블라인드 알고리즘으로 분류된다.

3.1 훈련신호 기반 알고리즘

훈련신호란 송수신부가 서로 약속한 기준신호로 수신되는 신호와의 오차를 추정하고 그 오차 값이 최소가 되도록 각 배열 path의 복소가중치를 조정하도록 한다. 훈련신호를 이용하는 대표적인 알고리즘으로는 LMS(Least Mean Square), RLS(Recursive Least Square), CGM(Conjugate Gradient Method)이 있다.

첫 번째, LMS 알고리즘은 오차 제곱의 평균을 최소화하는 비용함수를 가진다. 알고리즘 연산에 있어 복잡한 연산이 필요치 않아 구현이 간단하다는 특징이 있다^[3].

두 번째, RLS 알고리즘은 오차 제곱의 누적 합을 최소화하는 비용함수를 가진다. 알고리즘 연산에 있어

행렬 연산이 필요하므로 계산량이 늘어나지만 수렴속도가 빠른 특징이 있다^[4].

세 번째, CGM은 연속적인 기준신호 샘플과 배열 출력 샘플 간 오차들의 제곱 합을 최소화하는 비용함수를 가지며, 잔류벡터로 불리는 연속적인 샘플 오차들을 연산에 이용하므로 행렬연산이 이루어진다^[5].

3.2 블라인드 알고리즘

알고리즘 동작에 있어 기준신호가 필요치 않고 오로지 배열입력 신호만을 이용하는 것이 블라인드 알고리즘이다. CMA가 대표적인 블라인드 알고리즘에 속한다. CMA는 변조된 신호들이 대부분 일정한 진폭을 가지는 성질을 이용한다^[5]. 따라서 수신되는 신호를 강제적으로 일정한 진폭을 갖도록 함으로써 배열 출력을 원하는 신호와 유사하게 복구할 수 있다. CMA는 다음과 같이 CM(Constant Modulus)비용함수를 이용한 최적의 가중치를 구하는 것을 목적으로 한다.

$$J(\bar{w}) = E(|y| - 1)^2 \tag{6}$$

식(6)을 만족하는 최적의 가중치를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$\bar{w}(0) \simeq \mathbf{0} \quad \text{for } n=0, 1, 2, \dots \tag{7}$$

$$y(n) = \bar{w}^H(n) \bar{x}(n) \tag{8}$$

$$e(n) = \frac{y(n)}{|y(n)|} - y(n) \tag{9}$$

$$\bar{w}(n+1) = \bar{w}(n) + \mu e^*(n) \bar{x}(n+1) \tag{10}$$

식(7)은 초기 가중치벡터로 0에 가까운 임의의 상수를 가지며, 식(8)은 배열출력, 식(9)는 일정한 진폭을 가지는 신호와의 오차를 뜻한다. 그리고 식(10)은 가중치를 갱신함을 뜻한다. CMA의 비용함수로부터 신호의 진폭은 1로 일정하다는 가정이 있으므로 ±1로 정규화된 값이 곧 간섭이 없는 기준신호로 간주된다. 따라서 실제 간섭원 신호로 인한 오차를 무시할 수 없어 수신신호의 영향을 많이 받고 정확한 추정을 보장하기 힘들다. 하지만 연산이 간단해 다양한 분야에서 사용된다.

IV. 제안하는 CMA step size 추정

본 논문에서는 블라인드 빔포밍 알고리즘인 CMA의 step size를 적응적으로 추정, 이용하는 방법을 제

안한다. CMA의 step size 갱신에 대한 연구는 등화기에 사용하기 위해 연구가 이루어졌으며^{6,7)}, 그 중에서도 수렴속도가 빠르고 오차가 적은 VSS-CMA (Variable Step Size Constant Modulus Algorithm)를 기반으로 다음과 같은 추정방법을 제안한다.

그림 2는 제안하는 CMA의 블록도이다. CMA는 이론적으로 수렴성을 보장할 수 없으며⁸⁾, 환경과 알고리즘 동작 반복횟수에 따라 성능차이가 발생한다. 따라서 μ 를 구함에 있어 최적의 동작을 위한 반복횟수 결정보다는 유동적인 μ 값을 구하는 구간과 앞서 구해졌던 μ 값의 평균을 취하는 구간으로 나누는 것에 초점을 맞추었다.

기존 CMA와 다른 점은 step size μ 를 초기 값으로

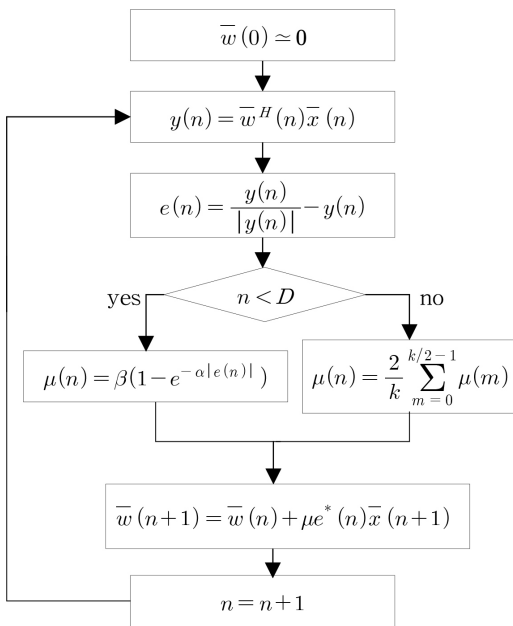


그림 2. 제안하는 CMA 블록도
Fig. 2. Block diagram of proposed CMA

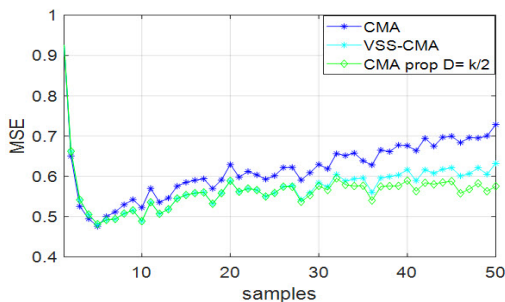


그림 3. 알고리즘 MSE 비교
Fig. 3. Comparison of the MSE by algorithm

고정하지 않는다. 그리고 VSS-CMA의 특성인 $0 \leq \mu(n) \leq \beta$ 값을 보장하므로 급격한 step size 증가를 피할 수 있다. α 는 오차 값의 영향성을 나타내는 매개변수로 1 이상의 상수 값을 가진다. 또한, 구간 D 까지 μ 값을 적응적으로 구하고, D 이후엔 그동안 구해진 μ 의 평균을 취함으로써 오차가 발산할 경우를 대비하여 상대적으로 낮은 오차범위를 가지도록 하였다.

그림 3은 알고리즘별 실제 기준신호와의 MSE (Mean Squared Error)를 표현한 것으로 알고리즘 반복횟수가 늘어남에 따라 오차가 지속적으로 증가하는 기존의 CMA에 비해 제안한 방법이 상대적으로 낮은 오차 값을 유지한다는 사실을 알 수 있다.

V. 모의시험 결과

빔포밍 알고리즘의 성능을 분석하기 위해 등간격 선형 안테나 배열 환경에서 모의시험을 수행하였다. 모의시험을 위한 매개변수는 표 1과 같다.

알고리즘별 성능은 SINR -3에서 +3dB에 따른 array factor로 비교하며, main lobe를 기준으로 정규화를 수행한 결과를 확인하였다. 그림 4는 SINR에 따른 알고리즘별 array factor를 표현한 것으로 원하는 신호 방향과 간섭원의 방향을 쉽게 파악하기 위해 파란 수직선과 빨간 수직선으로 표시를 하였다.

혼련신호 기반 알고리즘의 경우에는 간섭원 방향으로 약 -20dB 이상의 이득열화를 보였으며, 특히 RLS와 CGM은 null을 형성하였다. LMS는 step size의 영향으로 최적의 값에 수렴하지 못했으나 SINR이 낮은 환경에서는 상대적으로 뚜렷한 null이 형성되었다. 이것은 SINR에 따라 요구되는 step size가 다르다는 것을 의미한다.

표 1. 모의시험 매개변수
Table 1. Simulation parameter

Item	Value	
Antenna element	$N=20$	
Distance between elements	$d = \lambda/2$	
DOA	Target signal	0°
	Interference	$-15^\circ, 20^\circ$
Algorithm	LMS	$\mu = 0.001$
	RLS	$\delta_0 = 0.99$
	CGM	$k=50$
	CMA	$\mu = 0.01$
	proposed CMA	$\beta = 0.01, \alpha = 3$
	$D = k/2$	
Algorithm Iteration	$k = 50$	
Simulation Iteration	1000	

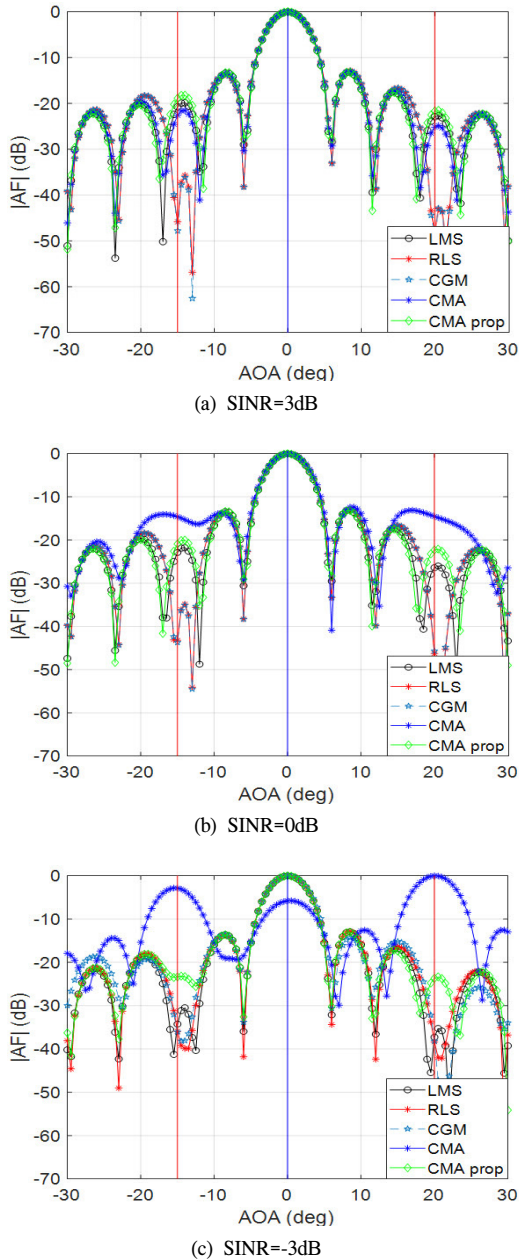


그림 4. 알고리즘 AF 비교
Fig. 4. Comparison of the AF by algorithm

블라인드 알고리즘인 CMA의 경우, 높은 SINR 환경에서는 LMS와 유사한 성능을 보이거나 간섭원과 잡음이 증가할수록 side lobe 레벨이 높아졌다. 특히 SINR - 3dB인 경우에는 간섭원 방향으로 main lobe가 형성됨을 알 수 있는데, 이것은 CMA의 특성상 수신되는 신호의 진폭에 영향을 받을 수밖에 없으므로 잘못된 방향으로 가중치를 추정했음을 의미한다.

$D = k/2$ 를 적용한 제안 CMA방법을 이용할 경우에는 SINR이 높은 환경에선 기존의 CMA와 큰 성능 차이를 보이지 않았다. 하지만 간섭신호가 큰 환경에서는 기존의 CMA와는 달리 원신호 방향으로 main lobe를 유지하면서 간섭원 방향으로 -20dB 수준으로 이득을 억제하고 있음을 알 수 있다. 따라서 간섭신호가 높은 환경에서 블라인드 알고리즘을 이용할 때는 배열의 가중치를 갱신하기 위한 step size를 고정 값을 이용하기 보단 적응적으로 추정, 이용하는 것이 성능 향상에 도움이 된다는 사실을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 적응형 빔포밍 알고리즘을 훈련신호 기반 알고리즘과 블라인드 알고리즘으로 분류하고 대표 알고리즘인 LMS, RLS, CGM, 그리고 CMA를 소개하였다. 그리고 CMA의 step size를 적응적으로 추정하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 성능을 분석하기 위해 소개된 알고리즘을 포함하여 20개 안테나로 구성된 등간격 선형 안테나 배열을 가정해 SINR에 따른 array factor를 비교하였다. 그 결과, 훈련신호 기반 알고리즘은 LMS를 제외한 모든 알고리즘이 간섭원 방향으로 null이 형성되었으며, LMS 또한 step size에 따라 null이 생겼다. 그리고 블라인드 알고리즘인 CMA는 간섭신호가 높은 환경에서는 간섭원의 방향으로 main lobe를 잘못 형성했으나 제안한 CMA 방법을 이용할 경우, 원신호 방향으로 main lobe를 유지하면서 간섭원의 방향으로 -20dB 수준으로 이득을 억제할 수 있음을 확인하였다.

추후 지속적인 연구를 통해 알고리즘 반복횟수와 구간 D에 따른 성능차이를 분석할 예정이다.

References

- [1] C. H. Hwang, J. S. Kim, and Y. J. Ryu, "Performance of channel estimation and frequency-domain equalization for UAV command and control links," *J. KICS*, vol. 42, no. 7, pp. 1316-1324, Jul. 2017.
- [2] A. P. Rao and N. Sarma, "Adaptive beam forming algorithms for smart antenna systems," *WSEAS Trans. Commun.*, vol. 13, pp. 44-50, 2014.
- [3] S. N. Shinde and U. A. Bongale, "A review paper on adaptive beamforming algorithms for smart antenna," *Int. J. Res. in Technol. Stud.*,

vol. 3, pp. 14-18, Dec. 2015.

- [4] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th Ed., Prentice hall, 2001.
- [5] L. C. Godara, "Application of antenna arrays to mobile communications, Part II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations," in *Proc. IEEE*, vol. 85, pp. 1195-1245, Aug. 1997.
- [6] M. A. Demir and A. Ozen, "A novel variable step size adjustment method based on autocorrelation of error signal for the constant modulus blind equalization algorithm," *Radioengineering*, vol. 21, no. 1, pp. 37-45, Apr. 2012.
- [7] Z. Liyi, C. Lei, and S. Yushan, "Variable step-size CMA blind equalization based on non-linear function of error signal," in *Proc. Int. Conf. Commun. and Mob. Comput. 2009*, pp. 396-399, Yunnan, China, Jan. 2009.
- [8] J. Litva and T. K. Lo, *Digital Beamforming in Wireless Communications*, Artech House, Boston, 1996.