

적용 SLC에서의 수렴속도 및 간섭제거의 성능 개선

The Performance Improvement Effect of the Convergence Rate and Interference Cancellation in SLC

김은정*, 김세연*, 이병섭*, 김진호**, 박성철**

Eun-Jung Kim*, Se-Yon Kim*, Byung-Seub Lee*, Jin-Ho Kim**, and Sung-Chul Park**

요 약

본 논문에서는 적응 sidelobe canceller에 Howells-Applebaum과 DMI 알고리즘을 적용하여 수렴속도와 간섭제거 성능을 알아보았다. Applebaum 알고리즘은 계산상의 간단함으로 많이 이용되어지지만 수렴속도가 느리고 eigenvalue spread에 영향을 받는다. 반면에 DMI는 Applebaum 알고리즘에 비해 빠른 수렴속도를 보이나 계산 및 구현이 복잡하다. 빠른 수렴속도와 우수한 간섭제거성능을 요구하는 적용 SLC(sidelobe canceller)에 이 두 알고리즘을 적용하여 성능 및 계산의 복잡성을 비교해 보고 적용 SLC에 DMI 알고리즘이 더 적합함을 보인다.

Abstract

This paper showed the convergence rate and the performance of interference cancellation using Applebaum and DMI algorithms in adaptive sidelobe canceller. Applebaum algorithm is used widely due to simplicity but it has a slow convergence rate and the problem of eigenvalue spread. DMI algorithm converges rapidly but has computational load and hardware complexity. We compared the performance and complexity using Applebaum and DMI algorithms in Adaptive SLC that requires rapid convergence rate and the performance and conclude that DMI algorithm is more efficient for adaptive SLC.

I. 서 론

탐색 레이더는 안테나의 방위각이 옳더라도, 안테나 방사 패턴의 sidelobe에 방해 신호가 수신되어 그 영향을 받게 된다. 적용 알고리즘은 레이더 시스템에서 적응배열이나 sidelobe canceller 기술을 통해 간섭의 효과를 줄일 수 있는 유용한 수단으로 고려되어져 왔다. 따라서 방사 패턴의 부엽을 통해 레이더에 수신되는 방해 신호의 영향을 줄이기 위해서,

적용 시스템은 안테나 패턴을 조절하여 방해 신호의 입사 방향으로 널(null)을 형성시킨다[1].

레이더 시스템에서 SLC를 수행하기 위해 제안된 주요 기술은 Closed-loop와 Open loop방식으로 나누어질 수 있다. Closed-loop에 해당하는 Howells-Applebaum 알고리즘은 계산이나 구현이 용이하여 많이 이용된다. 그러나 이 알고리즘의 순간응답은 입력상태에 영향을 받는데 수신된 신호의 공분산 행렬의 eigenvalue spread가 커질수록 수렴이 느려진다.

*한국항공대학교 항공통신정보공학과(Dept. of Telecom. & Inform. Eng., Hankuk Aviation Univ.)

** 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문번호 : 99-2-8

· 접수일자 : 1999년 11월 12일

이 eigenvalue의 변화를 해결하기 위해 제안된 방법으로 direct matrix inversion(DMI)과 RLS(Recursive Least Square)알고리즘이 있다. DMI는 배열의 가중치를 공분산 행렬을 추산함으로써 찾아낸다. 이 방법으로 적응에 요구되는 시간이 고정되어 eigenvalue의 변화에 영향을 받지 않게 되고 간섭 제거능력에도 뛰어나지만 최적의 가중치를 구하기 위해서는 계산이나 구성이 복잡해진다[1],[6],[7].

2장에서는 일반적인 SLC구조와 원리에 관해 살펴보고 3장에서는 SLC에서의 시스템 모델을 그리고 4장에서는 Howells-Applebaum 알고리즘과 DMI 알고리즘에 대해 살펴보고 5장에서는 각 알고리즘을 적용한 결과를 비교해 보고 6장에서 결론을 맺는다.

II. 일반적인 SLC의 구조 및 원리

SLC란 반사기형태의 안테나 또는 위상배열안테나의 sidelobe에 수신되는 간섭신호를 제거하는 시스템으로 전형적인 SLC 시스템은 그림 1과 같다 [1].

보조 안테나의 목적은 주 안테나 방사패턴의 sidelobe에서 제거되어야 하는 간섭 신호들의 복제(replica) 신호를 찾아내는 것이다. 따라서, 보조 안테나의 위치는 그것에 수신되는 간섭 신호의 샘플이 레이더 안테나의 sidelobe에 수신되는 간섭 신호와 상관성이 있도록 하기 위해서 레이더 안테나의 phase center에 아주 가깝게 놓여져야 하며 보조 안테나의 이득은 주 안테나의 이득 패턴의 평균 side-

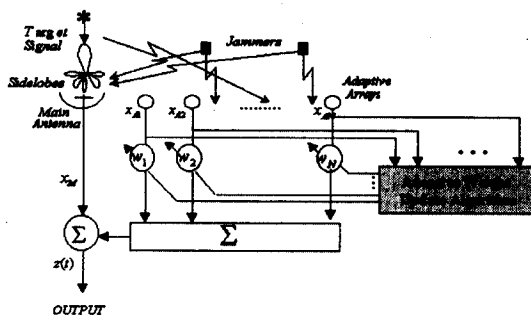


그림 1. 적응 SLC 구조

Fig. 1. The Structure of Adaptive SLC.

lobe level에 근사하도록 디자인되어진다. 가중치 w 에 의해서 제어되는 N 개의 보조 안테나들은 간섭 신호를 제거하기 위해 주 안테나의 방사패턴에서 N 개의 널을 구동시킬 수 있어 N 개의 간섭 신호를 제거하는데 유효하다. 보조 안테나의 방사 패턴 모양은 가중치 w 에 의해서 결정되어지고, 이러한 가중치는 적절한 수렴 시간을 통해서 생성된다. 그러므로 레이더 안테나에 수신된 신호로부터 보조 안테나에서 수신된 간섭 신호를 적절한 가중치에 의해 빼면 간섭 신호가 제거된 원하는 신호를 얻을 수 있다.

III. 시스템 모델

x_M 은 주 안테나의 신호이고 x_A 는 N 개의 보조 안테나의 신호들을 나타낸다.

$$x_a^T = [x_{A1} \ x_{A2} \ \dots \ x_{AN}] \quad (3.1)$$

공분산 행렬 Φ 와 N 차원 상호상관벡터 R 은 아래와 같다.

$$\Phi = E\{x_A^* x_A^T\} \quad (3.2)$$

$$R = E\{x_M x_A^*\} \quad (3.3)$$

N 차원 가중치 벡터 w 는 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$w^T = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_N] \quad (3.4)$$

주 채널상의 간섭신호의 제거는 x_M 으로부터 간섭 신호의 추정치를 뺌으로써 이루어지고 최적의 가중치 벡터 \hat{w} 은 출력전력의 평균자승에러(Mean Square Error)를 최소화함으로써 결정되어진다.

$$P_z = E\{|z|^2\} = E\{|x_M - w^T x_A|^2\} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \nabla_w P_z &= \left[\frac{aP_z}{aw_1} \ \frac{aP_z}{aw_2} \ \dots \ \frac{aP_z}{aw_N} \right] \\ &= 2[\Phi w - R] \end{aligned} \quad (3.6)$$

이때 z 는 SLC출력신호이다.

그러므로 식 (3.6)에서 gradient가 0이 되는 해인 최적의 가중치를 구할 수 있다.

$$\hat{w}_{opt} = \mu \Phi^{-1} R \quad (3.7)$$

SLC를 사용할 때의 성능은 간섭 신호의 제거 비 (CR : Cancellation Ratio)로써 나타내어지고, 이는 보조 안테나가 존재할 때와 존재하지 않을 때의 출력 잡음 전력의 비율로 정의된다.

$$CR = \frac{E\{|x_M|^2\}}{E\{|x_M - \hat{w}^T x_A|^2\}} \cdot \frac{E\{|x_M|^2\}}{E\{|x_M|^2 - R^H \Phi^{-1} R\}} \quad (3.8)$$

IV. Howells-Applebaum 및 DMI 알고리즘

4-1 Howells-Applebaum 알고리즘

이산적인 Howells-Applebaum(이하 Applebaum) 적응알고리즘을 고려해 볼 때 가중치에 대한 갱신식은 식 (4.1)과 같다[1],[3].

$$w(n) = w(n-1) + k \nabla_w E[|e(n-1)|^2] \quad (4.1)$$

위의 식에서 기대치 $E[|e(n-1)|^2]$ 를 순간값으로 대치하면 아래와 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$w(n) = w(n-1) + 2ke^*(n-1) x_A(n-1) \quad (4.2)$$

$$\nabla |e(n-1)|^2 = -2e^*(n-1) x_A(n-1) \quad (4.3)$$

4-1-1 수렴 속도 및 계산의 복잡성

식 (4.4)는 Applebaum 루프에서의 가중치 응답으로 Applebaum 알고리즘의 수렴속도는 공분산 행렬인 Φ 의 모든 eigenvalue λ_i 값들에 의해 영향을 받는다[3].

표 1. Applebaum에서 계산량

Table 1. Computational complexity of Applebaum.

Calculation	Add	Multiply
$z(n) = w^H x_A$	N-1	N
$e(n)x_M(n) - z(n)$	1	.
$w(n+1) = w(n) + \mu e^*(n)x_A(n)$	N	N+1
Total(K samples)	K(4N+2)	

$$\bar{w}(n) = \left[\sum_{i=1}^N C_i (1 - k\lambda_i)^n \right] + \mu \Phi^{-1} T \quad (4.4)$$

즉 eigenvalue spread가 클 경우 최대 eigenvalue에 의해서 가중치는 정상상태에 빠르게 도달하게 되지만 최소 eigenvalue에 의해서 가중치는 정상상태에 느리게 도달하는 요인이 되어 eigenvalue spread가 큰 경우에는 eigenvalue spread가 작은 경우에 비해 수렴속도가 느려지게 된다는 것을 알 수 있다. 표 1은 각 단계에서의 요구되는 연산량을 나타낸 것으로 N은 안테나의 소자수를 나타낸다.

4-2 DMI 알고리즘

DMI 알고리즘은 참조신호와 배열출력사이의 평균자승오차를 최소화하도록 하는 최적의 가중치를 구하기 위해 간섭신호의 공분산 행렬의 maximum likelihood estimate를 구하는데 기초한다.

공분산 행렬이나 상호상관벡터는 미리 알려져 있지 않기 때문에 신호들의 샘플들로부터 상관을 추정해야 하는데 충분한 샘플이 주어져 상관 행렬의 적절한 추정치를 구할 수 있다면 최적의 Wiener solution에 가까이 갈 수 있다.

K개의 샘플에 의한 공분산 행렬과 상호 상관 벡터의 추정치는 아래와 같다.

$$\hat{\Phi} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^K x_A^*(k) x_A^T(k) \quad (4.5)$$

$$\hat{R} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^K x_M(k) x_A^*(k) \quad (4.6)$$

그러므로 SLC 시스템에서의 DMI 알고리즘을 이용한 최적 가중치의 추정치는 아래와 같다.

$$\hat{w} = \mu \hat{\Phi}^{-1} \hat{R} \quad (4.7)$$

4-2-1 수렴속도 및 계산의 복잡성

추정치에 사용된 샘플수가 증가할수록 상관 행렬의 추정치는 개선되어 최적의 가중치에 가까이 가지만 더욱 복잡한 계산을 필요로 하게 된다. 이론적으로 최적의 SINR의 3 dB내에 수렴하기 위해서는 최소 배열 소자수의 2배의 샘플이 요구된다. 표 2는 표 1과 마찬가지로 각 단계에서의 요구되는 연산량을 나타낸 것으로 K는 요구되는 샘플수이다.

표 2. DMI에서의 계산량

Table 2. Computational complexity of DMI.

Calculation	Add	Multiply
$K\hat{\Phi} = \sum_{k=1}^K x_A x_A^H$	$\frac{KN(N+1)}{2}$	$\frac{KN(N+1)}{2}$
$[K\hat{\Phi}]^{-1}$	$\frac{N^3}{2} + N^2$	$\frac{N^3}{2} + N^2$
$K\hat{R} = \sum_{k=1}^K x_M x_A^H$	KN	KN
$\hat{w} = [K\hat{\Phi}]^{-1} K\hat{R}$	N^2	N^2
Total (K samples)	$K(N^2+3N)+N^3+4N^2$	

V. 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션 모델은 Applebaum 알고리즘을 이용한 SLC와 DMI를 이용한 SLC이다. 시뮬레이션 환경은 표 3과 같다.

그림 2는 Applebaum 알고리즘을 적용한 SLC에서의 MSE(Mean Square Error) 값을 나타내고 있다. a의 경우가 b보다 eigenvalue spread가 크다. 그림 2에서 보면 eigenvalue spread가 큰 a의 경우가 수렴속도가 늦어짐을 볼 수 있다. 그림 3은 Applebaum 알고리즘을 적용한 SLC의 간섭제거비(Cancellation Ratio)를 나타내고 있다. eigenvalue spread

표 3. 시뮬레이션 환경

Table 3. Simulation environment.

SLC배열 개수	5
메인안테나의 mainlobe방향	0°
간섭신호수	3
간섭신호방향	30°, 60°, -45°

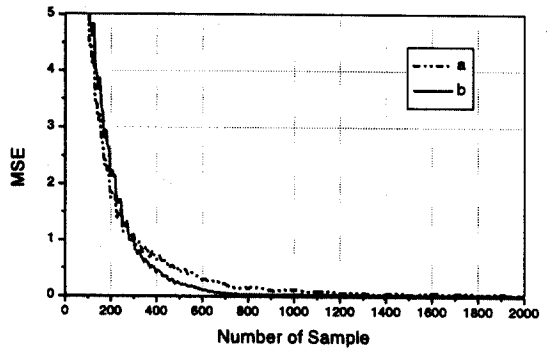


그림 2. Applebaum에서의 MSE

Fig. 2. Mse of Applebaum.

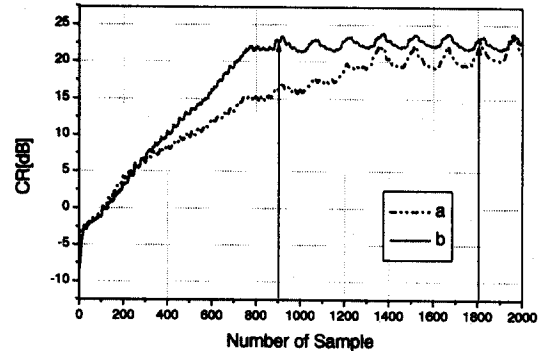


그림 3 Applebaum에서의 간섭제거비

Fig. 3. CR of Applebaum.

가 큰 경우 약 1700번째 샘플에서부터 정상상태에 도달함을 알 수 있으며 1900번째 샘플에서 22.3 dB의 간섭제거비를 얻을 수 있다. 그리고 b의 경우일 때는 900번째 샘플에서 동일한 간섭제거비를 얻을 수 있다.

그림 4는 SMI 알고리즘을 적용한 경우에서의 샘플수에 의한 간섭제거비를 나타낸 것이다. 샘플의

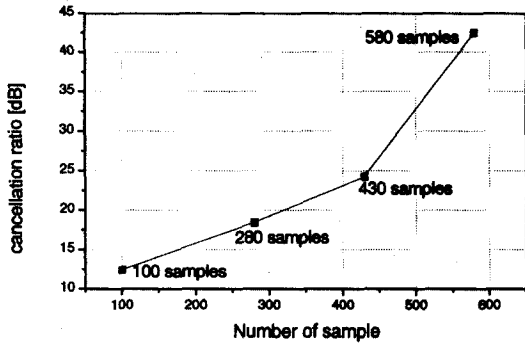


그림 4. DMI에서의 간섭제거비
Fig. 4. Cancellation ratio of DMI.

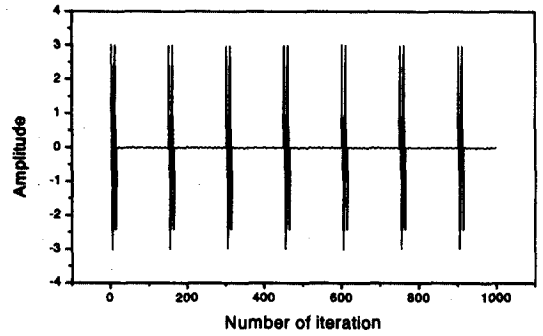


그림 6. SLC출력(DMI 적용시)
Fig. 6. SLC output(using DMI).

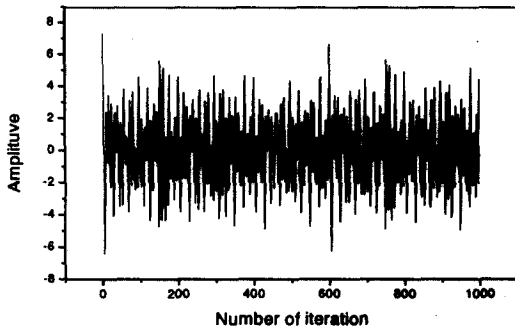


그림 5. 메인안테나로 수신되는 신호
Fig. 5. Signal received at main antenna.

수를 증가시킬수록 간섭제거성능이 좋아짐을 알 수 있다. 430개의 샘플을 취한 경우 간섭제거비는 24.28 dB로 정상상태(1900번째의 샘플)에서의 Applebaum과 비슷한 간섭제거성능(22.3 dB)을 가지는데 이는 DMI가 Applebaum에 비해 빠른 수렴속도를 가짐을 보여준다. 그리고 580개의 샘플을 취했을 경우 42.47 dB의 간섭제거비를 얻을 수 있는데 이는 Applebaum과 약 20 dB의 성능차를 보인다.

그림 5는 원하는 신호인 펄스와 서로 다른 방향으로의 3개의 간섭신호가 주 안테나에서 수신된 파형을 나타내고 있으며 그림 6은 DMI를 적용하여 580개의 샘플을 취했을 때 얻어진 가중치에 의해 적용된 SLC 최종 출력을 나타낸 것으로 간섭신호가 제거되고 원하는 신호만을 얻을 수 있다.

VI. 결 론

Applebaum 알고리즘은 계산의 용이성이나 구현의 간단한 장점으로 널리 사용되어지는 알고리즘이지만 느린 수렴속도 때문에 실제에 있어서 빠른 수렴속도를 요구하는 시스템에는 적용하기 부적당하다. 반면에 DMI는 최적의 가중치에 가까이 도달하기 위해 요구되는 샘플수에 의한 공분산이나 상호상관벡터의 계산과 역행렬을 구함에 있어 계산의 복잡성이 증가하고 구현도 복잡해지지만 Applebaum에 비해 빠른 수렴속도를 얻을 수 있으며 eigenvalue spread의 영향을 받지 않는 장점이 있다. 본 논문에서 5개의 보조 안테나를 가지는 SLC 시스템에서 다른 방향으로부터 수신되는 간섭신호를 제거하기 위해 Applebaum과 DMI 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션을 행하였다. 수렴속도를 비교해보면 eigenvalue spread가 크지 않은 경우(시뮬레이션에 그림 2에서 a의 경우) Applebaum 알고리즘을 적용할 때는 900번째 샘플수에서 DMI 알고리즘을 적용하는 경우는 430개의 샘플수를 취했을 때 비슷한 간섭제거성능을 나타내어 DMI 알고리즘을 적용하는 경우가 수렴속도가 빠름을 알 수 있었다. 또한 eigenvalue spread가 큰 경우에는 Applebaum 알고리즘을 적용하였을 때 수렴속도가 더 느려지기 때문에 eigenvalue spread에 영향을 받지 않는 DMI의 경우와 비교하면 약 4배정도 느림을 알 수 있다. 그리고 DMI의 경우 계산 및 시스템 구현이 복잡하나 표 1, 2에서와 같이 총계산량을 비교해보았을 때 Applebaum의 경우 느리게

수렴하므로 정상상태에 도달할 때까지 더 많은 샘플이 요구되어 DMI에 비해 많은 총 계산량을 가진다. 그러므로 eigenvalue spread가 큰 경우나 빠른 수렴 속도를 요구하는 탐색 레이더와 같은 시스템에 적용되는 SLC의 경우에는 어느 정도 경제적인 부담이나 계산상의 부하를 감수하더라도 수렴속도나 간섭제거측면에서 더 좋은 성능을 보이는 DMI 알고리즘을 적용하는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

[1] Bernar, Samuel D. Stearns, *Antenna-Based Signal Processing Techniques for Radar System*, Atech House, 1992.
 [2] Edmond Nicolau, Dragos Zaharia, *Adaptive Arrays*, Elsevier, 1989.
 [3] R. T. Compton, *Adaptive Antennas-Concept and Performance*, Prentice Hall, 1988.

[4] BLAIR D. CARLSON, "Covariance Matrix Estimation Errors and Digoal Loading in Adaptive Arrays", *IEEE Trans. on Aerospace & Electronic System vol 24, no 4, July, 1988.*
 [5] D.H.Brandwood, B.A., "Convergence Time Of Sidelobe Cancellation System", *IEE PROC., vol. 130, no. 1, Feb., 1983.*
 [6] Karl Gerlach, Frank F. Kretschmer, JR., "Convergence Properties of Gram-Schmidt and SMI Adaptive Algorithms", *IEEE. Trans. on Aerospace & Electronic System, Jan., 1990.*
 [7] Karl Gerlach, Frank F. Kretschmer, JR., "Convergence Properties of Gram-Schmidt and SMI Adaptive Algorithms: Part II", *IEEE. Trans. on Aerospace & Electronic System, Jan., 1991.*

김 은 정(金銀晶)



1975년 10월 2일생
 1994년 3월~1998년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과(공학사)
 1998년 3월~현재 : 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 재학중

관심분야 : 신호처리, Adaptive Array

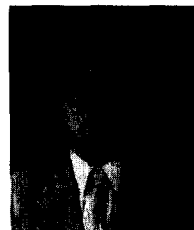
김 세 연(金世鍊)



1976년 11월 30일생
 1995년 3월~1999년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 졸업(공학사)
 1999년 3월~현재 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 재학중

관심분야 : 신호처리, Adaptive Array

이 병 섭(李炳燮)



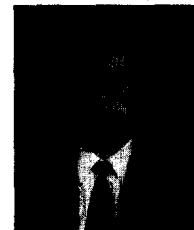
1957년 1월 1일생
 1979년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과(공학사)
 1981년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1981년 2월 1992년 1월 : 한국전자동신연구소

1990년 5월 : New Jersey Institute of Technology(공학박사)

1992년 9월 현재: 한국항공대학교 항공통신정보공학과 부교수

관심분야 : 위성통신, 신호처리, Adaptive Array

김 진 호(金辰昊)



1965년 2월 25일생
 1988년 2월 : 아주대학교 전자공학과(공학사)
 1990년 2월 : 아주대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1990년 3월 현재 : 국방과학연구소

관심분야 : 신호처리, Adaptive Array

박 성 철(朴成鐵)

1964년 5월 10일생

1988년 2월 : 광운대학교 전자공학과(공학사)

1990년 2월 : 광운대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1990년 3월~현재 : 국방과학연구소

관심분야 : 신호처리, Adaptive Array