

적응 오경보율을 가지는 CFAR 검파기법을 이용한 변환 영역 부분적응 어레이 알고리즘

문성훈[†], 한동석[†], 조명제^{††}

[†]경북대학교 전자전기공학부, ^{††}국방과학연구소

Frequency-domain Partially Adaptive Array Algorithm Using CFAR Detection Technique with adaptive false alarm rate

Sung-Hoon Moon[†], Dong-Seog Han[†], and Myeong-Je Cho^{††}

[†]School of Electronic & Electrical Engineering, Kyungpook National University, ^{††}Agency for Defense Development

E-mail: emdee@palgong.knu.ac.kr

요 약

본 논문에서는 주파수 영역 배열안테나의 계산량을 감소시키기 위한 센서링 부분적응 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 입력신호를 주파수 영역으로 변환한 후 CFAR(constant false alarm rate) 검파기법을 이용하여 간섭신호가 존재하는 주파수 대역을 찾아내고 이에 해당하는 가중치에 대해서만 적응 신호처리를 수행한다. 이때 CFAR 검파기의 오경보율은 출력신호의 전력 변화량을 이용하여 환경에 맞게 적응적으로 변화시켜서 최적 값으로 설정한다.

I. 서 론

많은 계산을 필요로 하는 적응 어레이(adaptive array)의 문제점을 해결하기 위하여 어느 정도의 성능 저하를 감수하며 일부의 가중치만을 갱신시키는 부분적응 알고리즘에 관한 연구가 광범위하게 진행되어 왔다[1-4]. 주요 성분 방법(principal component method)[1]은 가장 대표적인 부분적응 알고리즘으로 고유치 분해를 수행하여 고유치와 고유벡터를 획득한 후, 상대적으로 큰 값을 가지는 고유치들에 해당하는 고유벡터들로 이루어진 부분공간(subspace)을 선택하고, 선택된 부분공간에 해당하는 가중치만을 갱신시키는 알고리즘이다. 그러나 이 방법은 고유치를 계산하는데 많은 계산량을 필요로 하고 부분공간의 크기가 환경의 변화에 적응하지 못하는 단점이 있다. 또한 최근의 연구 결과에서 큰 값을 가지는 고유

치들에 해당되는 고유벡터들로 이루어진 부분공간이 항상 최적의 부분적응을 실시할 수 있는 부분공간이 아니라는 것이 밝혀지고 있다[4].

본 논문에서는 주파수 영역의 적응 어레이[5]의 계산량 문제를 해결하기 위하여 센서링(censoring) 부분적응 알고리즘을 제안한다. 센서링 부분적응 알고리즘은 입력신호를 주파수 영역으로 변환한 후, CA-CFAR(cell averaging constant false alarm rate) 검출 알고리즘[6]을 사용하여 간섭신호가 존재하는 주파수 대역을 판별한다. 그리고 간섭신호가 존재한다고 판별된 주파수 대역에 해당하는 가중치만을 선택적으로 적용시킨다. 제안한 센서링 부분적응 알고리즘은 기존의 부분적응 알고리즘과 달리 부분공간을 선택할 때 고유치 및 고유벡터를 사용하지 않으므로 고유치 분해 과정이 필요 없고 환경의 변화에 적응적으로 최적의 오경보율을 설정하여 부분공간의 크기를 결정하므로 부분적응으로 인한 성능 열화를 최소화시킬 수 있다.

본 논문의 구성은 서론인 I장에 이어서 II장에서 기존의 주파수 영역 적응 어레이 알고리즘을 소개하고 III장에서 센서링 부분적응 어레이 알고리즘을 제안한다. 그리고 IV장에서 모의실험을 통하여 제안 알고리즘의 성능분석을 실시하고 V장에서 결론을 맺는다.

II. 주파수 영역 적응 어레이 알고리즘

일반적으로 입력 공분산 행렬의 고유치가 넓게 확산된 경우 적응 어레이는 간섭신호를 빠르게 제거하지 못

하여 아주 느리게 수렴하는 문제점이 있다[5]. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 주파수 영역의 적응 신호처리를 수행하는 적응 어레이가 제안되었다[5]. 그림 1은 Griffiths와 Jim이 제안한 주파수 영역 GSC(generalized sidelobe canceller)이다.

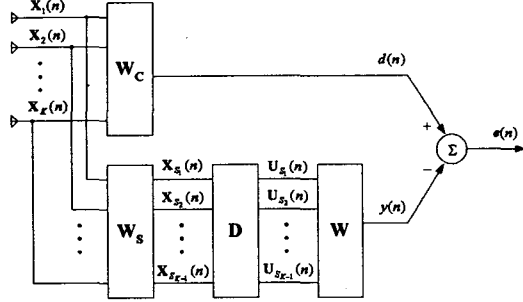


그림 1. 주파수 영역 GSC

여기서, W_c 와 W_s 는 각각 기존 빔 형성기(conventional beamformer)와 신호차단행렬(blocking matrix)이고, $d(n)$ 과 $y(n)$ 은 각각 주채널과 보조채널의 출력신호, $e(n)$ 은 최종 출력신호이다. 시간 영역의 LMS(least mean square) 알고리즘을 사용하는 GSC와 달리 주파수 영역 GSC는 표적신호를 제거하는 신호차단행렬 다음에 DFT(discrete Fourier transform)나 DCT(discrete cosine transform)를 통하여 입력신호를 주파수 영역으로 변환시킨다. 입력신호를 변환하는 목적은 신호사이의 상관도를 제거하여 고유치 확산 효과를 감소시킴으로써 수렴속도를 향상시키는 것이다[5].

주파수 영역 GSC의 n 번째 신호처리시의 출력신호 $e(n)$ 은 주채널과 보조채널의 출력신호 사이의 차로 다음과 같다.

$$e(n) = (W_c^H - W^H D W_s) X(n) \quad (1)$$

여기서, $X(n)$ 은 n 번째 신호처리시의 입력신호 행렬이고, D 와 W 는 각각 변환행렬과 가중치 행렬을 나타낸다. 그리고 H 는 행렬의 헤르미트(Hermitian transpose)이다. 주파수 영역 GSC의 최적 가중치 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$W_{opt}^H = R_{U_s}^{-1} P_{U_s} \quad (2)$$

여기서, R_{U_s} 와 P_{U_s} 는 각각 보조채널에서 주파수 영역으로 변환된 신호 $U_s(n)$ 의 자기상관도 행렬과 $U_s(n)$ 과 $d(n)$ 사이의 교차상관도 행렬로서 다음과 같다.

$$R_{X_s} = E[U_s(n) U_s^H(n)] = D R_{X_s} D^H \quad (3)$$

$$P_{U_s} = E[U_s(n) d^*(n)] = D P_{X_s} \quad (4)$$

주파수 영역 적응 알고리즘을 사용할 경우 시스템의 수

렴특성을 결정짓는 행렬의 고유치는 모두 같은 값을 가지게 된다. 따라서 모든 시상수가 같은 값이 되므로 수렴속도가 크게 향상된다. 이때, 평균자승오차는 다음과 같이 주어진다[5].

$$\zeta_{FLMS} = E[e(n)^2] = \sigma_d^2 - P_{U_s}^H R_{U_s}^{-1} P_{U_s} \quad (5)$$

식 (3)과 (4)를 식 (5)에 대입하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \zeta_{FLMS} &= \sigma_d^2 - P_{U_s}^H R_{U_s}^{-1} P_{U_s} \\ &= \sigma_d^2 - (D P_{X_s})^H (D R_{X_s} D^H)^{-1} (D P_{X_s}) \\ &= \sigma_d^2 - P_{X_s}^H R_{X_s}^{-1} P_{X_s} = \zeta_{LMS} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 주파수 영역의 GSC와 시간 영역의 GSC의 평균 자승오차는 서로 같은 값을 가짐을 알 수 있다.

그러나, 주파수 영역의 적응 신호처리를 사용하는 적응 배열안테나는 입력 신호에 대한 변환을 수행하는데 많은 계산을 필요로 하는 단점이 있다.

III. 센서링 알고리즘

주파수 영역 적응 어레이 시스템은 입력신호를 주파수 영역으로 변환한 후 적응 신호처리를 수행하므로 입력신호는 자신의 특성에 따라서 해당되는 주파수 대역으로 변환된다. 센서링 알고리즘은 이러한 원리를 이용하여 각 주파수 대역에서 간섭신호의 존재 여부를 검출하여 간섭신호가 존재하는 주파수 대역의 가중치만을 선택하여 갱신시키는 주파수 영역 부분적응을 수행한다. 센서링 부분적응 알고리즘은 각 주파수 대역에 대하여 간섭신호의 존재 여부를 판별하기 위하여 그림 2와 같은 CA-CFAR 신호처리기를 사용한다.

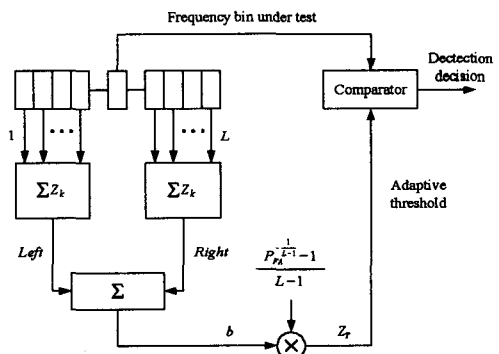


그림 2. CA-CFAR 신호처리기

그림 2의 P_{fa} 는 오경보율로서 검출과정에서 다음과 같

이 표현되는 적응적인 문턱값 Z_r 를 결정짓는 매개변수이다.

$$Z_r = bT = b \frac{P_{FA}^{-\frac{1}{L-1}} - 1}{L-1} \quad (7)$$

CA-CFAR 신호처리는 오경보율을 일정하게 유지하기 위하여 검사를 수행하고자 하는 변환 대역의 신호를 제외한 주위의 모든 변환 대역의 전력 합 b 를 구하고 이를 P_{FA} 와 TDL의 길이인 L 에 의하여 결정되는 조절 상수 T 와의 곱을 통하여 적응적으로 Z_r 를 결정한다 [6]. Z_r 를 결정된 다음 각 변환 대역에 대하여 검사를 수행하는데 검사를 수행하는 변환 대역의 전력이 Z_r 보다 클 경우에는 간섭신호가 존재하는 것으로 판단하고, 해당하는 가중치를 적응시킨다. 반대로 검사를 수행하고 있는 변환 대역의 전력이 Z_r 보다 작을 경우에는 간섭신호가 존재하지 않는 것으로 결정을 내리고 해당하는 가중치의 갱신을 중단한다. 이와 같이 간섭신호가 존재하는 변환 대역에 해당하는 가중치에 대한 적응 신호처리 과정만을 수행함으로써 갱신할 가중치의 수가 작아지므로 가중치 갱신에 필요한 계산량도 크게 줄일 수 있다.

오경보율 P_{FA} 를 환경에 맞게 적응적으로 변화시키기 위하여 센서링 알고리즘은 출력신호의 전력 변화량을 이용한다. 출력신호의 전력 변화를 관찰하기 위하여 그림 3과 같이 N 번의 신호처리를 주기로 하는 관찰구간을 설정한다. 그리고 다음과 같이 각 관찰구간의 평균 전력 P_k 를 얻는다.

$$P_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N O_{(k-1)N+n} \quad (8)$$

여기서 O_i 는 i 번째 신호처리시의 출력 신호의 전력을 나타낸다.

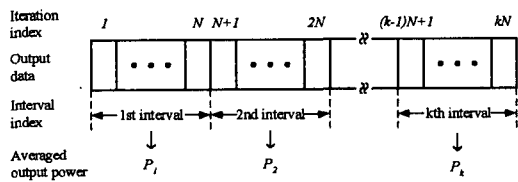


그림 3. 출력 신호의 전력 관찰

평균전력의 변화량을 이용하여 다음과 같이 오경보율을 변화시킨다.

$$P_{FA}(k+1) = P_{FA}(k) + \gamma \delta_k \quad (9)$$

여기서 γ 와 δ_k 는 각각 평균전력의 변화량을 반영하는 정도를 결정하는 상수와 k 번째 관찰구간과 $k-1$ 번째 관찰구간의 평균전력차이다.

$$S_k = P_k - P_{k-1} \quad (10)$$

제안한 센서링 부분적응 알고리즘은 기존의 부분적응 알고리즘과 달리 부공간을 선택할 때 고유치 및 고유벡터를 사용하지 않으므로 고유치 분해 과정이 필요 없고 환경의 변화에 적응적으로 부공간의 크기를 결정할 수 있는 장점을 가지며 부분적응으로 인한 성능 열화를 최소화시킬 수 있다.

한편, 간섭신호가 존재하는 주파수 대역을 판별할 때 어떤 종류의 CFAR 신호처리기도 사용 가능하다. 하지만 제안된 CA-CFAR 신호처리기는 구조가 간단하여 구현이 가장 용이하다. 그림 4는 센서링 알고리즘을 사용한 GSC이다. 그림 1의 주파수 영역 GSC에서 센서링 부분적응을 수행하기 위한 C블록이 추가되어 있다.

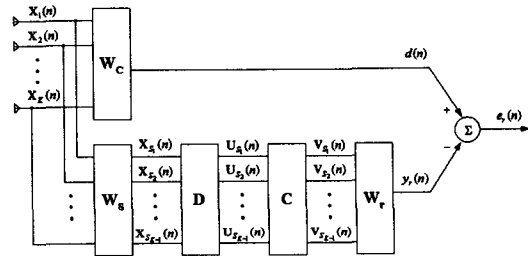
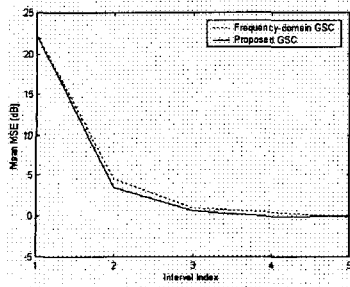


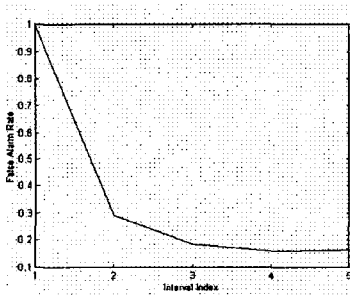
그림 4. 센서링 GSC

IV. 성능분석

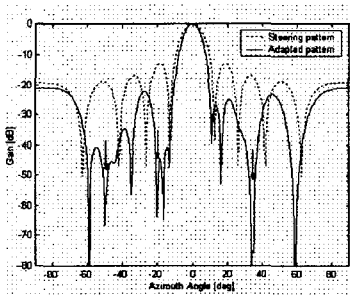
기존 주파수 영역 GSC 형태의 배열안테나와 제안한 센서링 부분적응 알고리즘을 사용하는 GSC 형태의 배열안테나의 성능을 모의실험을 통하여 분석하였다. 배열안테나는 선형적으로 등간격으로 배열된 15개의 안테나 소자를 사용하였다. 공간평활을 수행하기 위하여 각각 9개의 안테나 소자를 가지는 7개의 부어레이로 구성하였으며 TDL의 길이는 8이다. 센서링 알고리즘을 적용한 배열안테나의 초기 오경보율은 1, 관찰구간은 100번의 적응 신호처리 주기로 설정하였다. 표적신호는 샘플링 주파수에 대하여 표준화된 주파수인 0.25Hz의 주파수와 10dB의 신호대 잡음비를 가지면서 방위각 0° 로 배열안테나에 입사한다. 또한 표적신호와 같은 주파수를 가지는 3 방향의 간섭신호가 신호대 잡음비 40dB에서 각각 방위각 $-50^\circ, -20^\circ, 34^\circ$ 방향으로 입사한다.



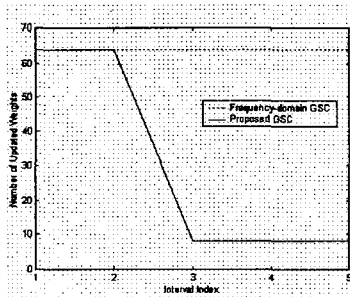
(a) 평균 MSE



(b) 오경보율



(c) 빔 패턴



(d) 적응시키는 가중치 수

그림 5. 실험결과

그림 5-(a)의 평균자승오차의 변화를 살펴보면 두 배열안테나의 수렴속도와 수렴값이 거의 같다. 그러나 그림 5-(d)의 갱신시키는 가중치의 수를 보면 기존 배열안테나는 64개의 모든 가중치를 갱신하는 반면에 제안 배열안테나는 점점 그 값이 감소하여 최적 값인 8개의 가중치만을 갱신한다.

V. 결론

본 논문에서는 기존 주파수 영역 배열안테나의 문제점인 계산량 문제를 해결하기 위하여 CFAR 검파기법을 이용한 센서링 부분적응 알고리즘을 제안하였다. 그리고 모의실험을 통한 성능분석을 실시하여 제안 알고리즘을 사용한 GSC가 적은 계산량으로 간섭신호를 제거할 수 있음을 확인하였다. 제안한 센서링 배열안테나는 향후의 이동통신 환경에서 간섭제거를 통한 채널용량의 확대를 위한 스마트 안테나와 고도의 첨단 전자전을 대비한 적응 배열레이다에서 직접적으로 적용 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] B. D. Van Veen, "Eigenstructure Based Partially Adaptive Array Design," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 36, no. 3, pp. 357-362, Mar. 1988.
- [2] W. F. Gabriel, "Using Spectral Estimation Techniques in Adaptive Processing Antenna Systems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 34, no. 3, pp. 291-300, Mar. 1982.
- [3] J. S. Goldstein and I. S. Reed, "Subspace Selection for Partially Adaptive Sensor Array Processing," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 539-544, Apr. 1997.
- [4] K. A. Byerly and R. A. Roberts, "Output Power Based Partially Adaptive Array Design," *Proc. 23rd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, pp. 576-580, Nov. 1989.
- [5] Y. H. Chen and H. D. Fang, "Frequency-domain Implementation of Griffiths-Jim Adaptive Beamformer," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 91, pp. 3354-3366, June 1992.
- [6] P. P. Gandhi and S. A. Kassam, "Analysis of CFAR Processors in Nonhomogeneous Background," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 24, pp. 427-445, July 1988.