

선형 제한 조건을 갖는 적응 Escalator 빔 형성기

(An Adaptive Escalator Beamformer with Linear Constraints)

金熙昶*, 金基萬**, 朴商澤**, 車日煥**, 尹大熙**

(Hee Chang Kim, Ki Man Kim, Sang Tack Park, Il Whan Cha and Dae Hee Youn)

要約

공간 상에서 간섭 신호가 존재하는 경우 간섭 신호들로부터 원하는 신호를 분리해 내는 방법으로서 선형 제한 조건을 만족하면서 Escalator(Gram-Schmidt) 구조를 갖는 협 대역 적응 빔 형성기를 제안하였다. 각각의 필터 계수는 선형 제한 조건을 만족하면서 평균 출력 파워어를 최소로 하는 값으로 얻어진다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 Escalator 구조를 갖는 적응 빔 형성기와 기존의 Cascade 적응 빔 형성기의 성능을 비교하였다.

Abstract

As a method of separating the signal arriving from a desired direction in the presence of noise and interfering signals, a linearly constrained adaptive beamformer based on the escalator(Gram-Schmidt) structure is presented. The weights are chosen to minimize local output power subject to the response constraint. The performances of the proposed escalator adaptive beamformer are compared with those of cascade adaptive beamformer via computer simulations.

1. 서론

공간상으로 전파되는 신호를 받아들이는 시스템에서 원하는 신호와 간섭 신호들이 시간과 주파수 대역을 공유하는 경우 일반적인 시간 필터(temporal filter)로는 간섭 신호들로부터 원하는 신호를 분리해 낼 수가 없다. 그러나 원하는 신호와 간섭 신호들은 보통 공간상의 다른 위치에서 발생되기 때문에 수신

단에서 공간 필터(spatial filter)를 이용함으로써 원하는 신호를 분리해낼 수 있다. 이러한 공간 필터링을 하는 프로세서가 빔 형성기(beamformer)이다.^[1]

종종 입력 데이터의 통계적 성질은 잘 알려져 있지 않거나 혹은 간섭 신호들이 움직이는 경우와 같이 통계적 성질이 시간에 따라 변하기 때문에 적응 알고리즘을 사용한다. 이러한 적응 빔 형성기법은 레이다, 소나, 지진파 신호처리, 통신 시스템등에 응용될 수 있다.^{[2] [3] [4]}

선형 제한 조건을 만족하는 빔 형성기는 Frost^[5], Takao^[6] 등에 의해 제안되었으며 이는 원하는 신호에 대해서는 특정한 이득과 위상을 갖도록 제한하고 동시에 빔 형성기의 평균 출력 파워어를 최소화시키는 것이다. 또한 Khanna와 Madan^[9]은 국부적으

*正會員, Univ. of Polytechnique, Dept. of EECS, USA

**正會員, 延世大學校, 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

接受日字: 1991年 12月 28日

로 선형 제한 조건을 만족하면서 각 단의 파워를 최소화 시키는 Cascade 적응 빔 형성기를 제안하였다. 그러나 이 구조는 간섭 신호가 원하는 신호의 입사 방향과 비슷할때, 그리고 입사되는 간섭 신호들의 파워가 서로 비슷할때 성능이 저하된다. [12]

본 논문에서는 Escalator 필터 구조 [7]를 응용한 Escalator 구조를 갖는 협대역 적응 빔 형성기를 제안하였다. 제안된 빔 형성기는 국부적으로는 선형 제한 조건을 만족 하며 전체적으로 Escalator 구조를 갖는다.

본 논문에서 제안된 Escalator 적응 빔 형성기의 구조 및 Khanna 와 Madan [9]이 제안한 Cascade 구조에 대하여 설명하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 두 적응 빔 형성기의 일관성, 분해능 및 센서 갯수 변화에 따르는 성능을 조사한다.

II. 입사 신호의 모델링

M개의 등간격 선형 어레이에 입사되는 신호를 그림 1에 나타내었다. 각 센서들은 동일한 전방향 센서 (omnidirectional sensor)라고 가정한다. 즉 모든 방향에서의 이득이 동일하며 위상 지연이 없다고 가정한다.

또한 각 센서에 입사되는 신호들간에는 서로 상관 관계가 없으며 센서 첨가 잡음도 서로 상관 관계가 없는 백색 가우시안 잡음이다. 원하는 신호의 입사각과 스펙트럼은 알고 있다고 가정한다.

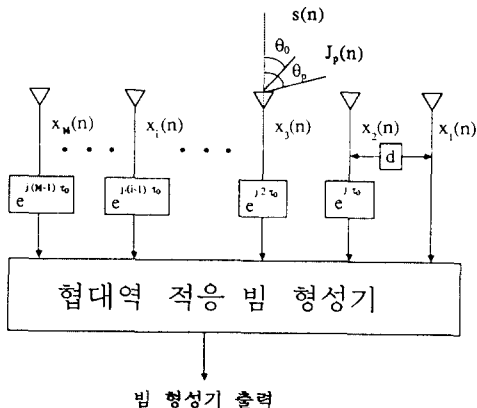


그림 1. 선형 어레이 모델
Fig. 1. Linear array model.

원하는 신호 $s(n)$ 이 센서 어레이 축의 수직 방향을 기준으로 θ_0 의 각으로 입사하고 P개의 간섭 신호 $J_p(n)$ ($p=1, 2, \dots, P$)이 각각 θ_p 의 각으로 입사하는 경우 $i(i=1, 2, \dots, M)$ 번째 센서 출력 $x_i(n)$ 은 다음과 같이 나

타낼 수 있다.

$$x_i(n) = s(n)\exp\{-j(i-1)\tau_0\} + \sum_{p=1}^P J_p(n)\exp\{-j(i-1)\tau_p\} + \eta_i(n) \quad (1)$$

$\eta_i(n)$ 은 i 번째 센서의 첨가 잡음을 나타내고 τ_0 와 τ_p 는 각각 원하는 신호와 p 번째 간섭 신호의 센서 출력간에 생기는 위상차를 나타내며 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_0 = 2\pi f_0(d/c)\sin\theta_0 \quad (2)$$

$$\tau_p = 2\pi f_p(d/c)\sin\theta_p \quad (3)$$

여기서 f_0 는 입사 신호의 중심 주파수이고 c ($=f_0\lambda$)는 전파 속도, d 는 센서 간격을 나타낸다.

III. 선형 제한 조건을 만족하는 Cascade 적응 빔 형성기

선형 제한 조건을 만족하는 적응 빔 형성기는 Frost [5]에 의해 처음 제안되었다. 그림 2는 선형 제한 조건을 만족하는 TSC(Two-element Sidelobe Canceller)를 나타낸 것이다. TSC의 두 필터 계수는 두 입력의 상관행렬로써 구해지는데 원하는 방향의 신호 이득을 1로 유지하는 선형 제한 조건을 만족 하면서 평균 출력 파워를 최소화시키는 값으로 얻을 수 있다. TSC를 구성하는 2×1 입력 벡터 $X(n)$ 과 계수 벡터 $W(n)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\underline{X}(n) = [x_1(n) x_2(n)]^T \quad (4)$$

$$\underline{W}(n) = [w_1(n) w_2(n)]^H \quad (5)$$

그러면 출력 $y(n)$ 은 $X(n)$ 과 $W(n)$ 을 이용해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n) = \underline{W}(n)^H \underline{X}(n) = \underline{X}(n)^T \underline{W}(n) \quad (6)$$

여기서 T, H, *는 각각 Transpose, Hermitian, complex conjugate 를 나타낸다. 이때 평균 출력 파워는 다음과 같이 주어진다.

$$E[y(n)^2] = E[y(n)y(n)^*] = \underline{W}(n)^H R(n) \underline{W}(n) \quad (7)$$

여기서 $R(n)$ 은 2×2 상관행렬이고 Hermitian.

positive definite^[10] 성질을 만족한다. 원하는 방향에서 이득을 1로 유지하기 위하여 제한 벡터 C 와 제한조건을 다음과 같이 정의한다.

$$\underline{C} = [1 \ 1]^T \tag{8}$$

$$\underline{W}(n)^H \underline{C} = 1 \tag{9}$$

식(9)의 제한 조건을 만족하면서 평균 출력 파워를 최소화하는 최적 계수를 구하기 위하여 Lagrange multiplier^[11] 를 이용한다. 최적 계수 벡터를 $W_{opt}(n)$ 이라고 하면 $W_{opt}(n)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\underline{W}_{opt}(n) = R(n)^{-1} \underline{C} (\underline{C}^T R(n)^{-1} \underline{C})^{-1} \tag{10}$$

실제로 최적 필터 계수를 구하기 위하여 다음과 같이 정의되는 추정된 2x2 상관행렬을 사용한다.

$$\hat{R}(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \underline{X}(i) \underline{X}(i)^H \tag{11}$$

식(11)을 (n-1)번째 상관행렬을 이용하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{R}(n) = \frac{n-1}{n} \hat{R}(n-1) + \frac{1}{n} \underline{X}(n) \underline{X}(n)^H \tag{12}$$

이 식에서 초기값 $\hat{R}(0)$ 은 이다. 만약 입사 신호의 통계적 특성이 시간에 따라 조금씩 변하는 경우에는 forgetting factor β 를 이용하여 다음과 같이 정의되는 2x2 상 관행렬을 사용한다.

$$\hat{R}(n) = \beta \hat{R}(n-1) + (1-\beta) \underline{X}(n) \underline{X}(n)^H \quad (0 < \beta < 1) \tag{13}$$

여기서는 $\hat{R}(n)$ 을 구할 때 시간 영역에서 $\underline{X}(n) \underline{X}(n)^H$ (n)에 대한 저역 통과 필터를 취한 것이며 β 값이 시 상수(time constant)를 결정한다.

Khanna와 Madan^[9]은 국부적으로 선형 제한 조건을 만족하면서 Cascade 구조를 갖는 협대역 적응 빔 형성기를 제안하였다. 이 빔 형성기는 모든 이웃하는 두 개의 센서 어레이 출력들에 선형 제한 조건을 만족하는 필터 계수가 곱해져 각기 하나의 출력을 내며, 이것은 다음 단(stage)의 입력으로 가해진다. 같은 방법으로 각 단에서 이웃 하는 두개의 입력들은 각기 하나의 출력을 내어 최종적으로 빔 형성기의 출력을 얻게 된다. 각 단의 필터 계수는 상위 두 개 입력의 상관행렬로써 구해지는데 원하는 방향의

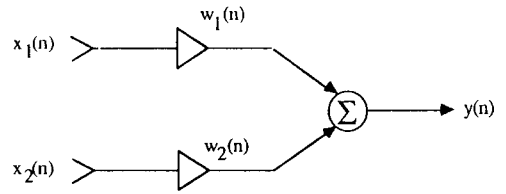


그림 2. TSC의 블럭도
Fig. 2. Block diagram of a TSC.

신호 이득을 1로 유지하는 선형 제한 조건을 만족하면서 평균 출력 파워를 최소화 시키는 최적값을 얻는다. 각 단에서 이렇게 얻은 최적값은 그 단의 모든 이웃하는 입력의 필터 계수에 그대로 사용된다.

그림 3은 4개의 센서 어레이로 구성되는 Cascade 구조를 나타낸다. 이 빔 형성기는 3개의 단으로 이루어지며, 각 단에서 맨 위 두개의 입력을 이용하여 선형 제한 조건을 만족하면서 평균 출력 파워를 최소화시키는 최적 필터 계수를 구한다.

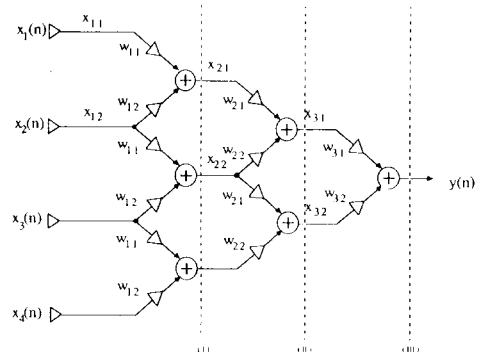


그림 3. 4개의 센서로 이루어진 Cascade 구조
Fig. 3. Schematic diagram of a cascade structure for 4-sensor.

M개의 센서 어레이로 이루어진 Cascade 구조에서 k(k=1,2, ..., M-1)번째 단의 상위 두개의 입력으로 구성되는 2x1 입력 벡터 $\underline{X}_k(n)$ 과 계수 벡터 $\underline{W}_k(n)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\underline{X}_k(n) = [x_{k,1}(n) \ x_{k,2}(n)]^T \tag{14}$$

$$\underline{W}_k(n) = [w_{k,1}(n) \ w_{k,2}(n)]^H \tag{15}$$

그러면 k번째 단의 최적 계수 벡터는 식(10)을 이

용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_k^{opt}(n) = R_k(n)^{-1} C(C^T R_k(n)^{-1} C)^{-1} \quad (16)$$

IV. Escalator 구조를 갖는 협대역 적응 빔 형성기

본 논문에서는 국부적으로 선형 제한 조건을 만족하며 Escalator 구조를 갖는 협대역 적응 빔 형성기를 제안하였다. 이 빔 형성기는 TSC를 기본으로 Escalator 구조를 이루고 있다. 제안된 구조는 Escalator 필터^[7] 구조를 이용한 것으로 Cascade에서와 같이 기본적으로 각 단에서 두개의 입력이 하나의 출력을 생성할 때 선형 제한 조건을 만족해야한다.

Cascade나 Escalator는 모두 두개의 입력이 하나의 출력을 생성하는 기본 단위인 TSC로 구성되는데, Cascade의 경우 이웃하는 두개의 입력으로 TSC를 구성하게 되는 반면 Escalator에서는 모든 두개의 입력으로 TSC가 구성되므로 많은 통계적 성질을 이용한다는 것이 특징이다. 따라서 Cascade의 경우 각 단에서 선형 제한 조건을 만족하는 2×1 필터 계수 벡터를 하나만 구하게 되지만 Escalator에서는 각 단에서 모든 입력 쌍으로 구성되는 TSC의 필터 계수를 구하게 된다.

그림 4는 4개의 센서 어레이로 구성되는 Escalator를 나타낸다. 이 빔 형성기는 3개의 단으로 이루어지며 각 단에서 모든 TSC는 선형 제한 조건을 만족하면서 평균 출력 과우어를 최소화하는 2×1 필터 계수 벡터를 구하게 된다.

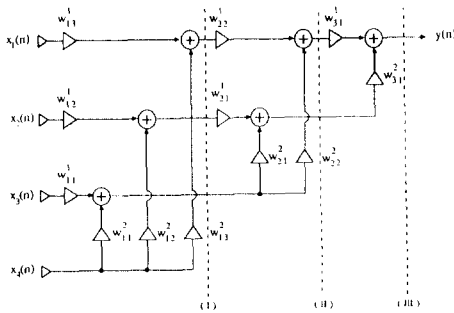


그림 4. 4개의 센서로 이루어진 Escalator(Gram-Schmidt) 구조

Fig. 4. Schematic diagram of a escalator (Gram-Schmidt) structure for 4-sensor.

일반적으로 M개의 센서 어레이로 구성되는 Escalator는 M-1개의 단으로 이루어지는 데 k(k=1,2, ..., M-1)번째 단의 h(h=1,2, ..., M-k)번째 2×1 입력 벡터 $X_{k,h}(n)$ 과 계수 벡터 $W_{k,h}(n)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$X_{k,h}(n) = [x_{k,M-k-h+1}(n) x_{k,M-k+1}(n)]^T \quad (17)$$

$$W_{k,h}(n) = [w_{k,h}^1(n) w_{k,h}^2(n)]^H \quad (18)$$

k번째 단에서 출력은 다음과 같이 된다.

$$x_{k+1,h}(n) = W_{k,h}(n)^H X_{k,h}(n) \quad (19)$$

k번째 단의 h번째 최적 계수 벡터는 식(10)를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$W_{k,h}^{opt}(n) = R_{k,h}(n) - 1C(C^T R_{k,h}(n)^{-1} C)^{-1} \quad (20)$$

M개의 센서로 이루어진 Escalator는 M-1개의 단으로 구성되며, M(M-1)개의 적응 계수를 갖게 된다. 최종 출력 y(n)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$y(n) = A_{M-1}(n)A_{M-2}(n) \cdots A_2(n)A_1(n)X(n) \quad (21)$$

여기서 $A_i(n)$ 은 첫번째단에서 얻어지는 (M-1)×M 이득 행렬로서 각각 다음과 같이 표현 된다.

$$A_i(n) = \begin{bmatrix} w_{1,M-1}^1(n) & 0 & \cdots & 0 & w_{1,M-1}^2(n) \\ 0 & w_{1,M-2}^1(n) & \cdots & 0 & w_{1,M-2}^2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & w_{1,1}^1(n) & w_{1,1}^2(n) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$= \sum_{j=1}^{M-1} (w_{1,M-i}^1(n)E_{M-1,j} + w_{1,M-i}^2(n)E_{M-1,i})$$

여기서 $E_{M-1,i}$ 는 i번째 행의 i번째 열 값이 1이고 나머지가 모두 0인 (M-1)×M 행렬이고 $E_{M-1,i}$ 는 i번째 행의 M번째 열 값이 1이고 나머지는 모두 0인 (M-1)×M 행렬로 정의한다. 이때 k번째 이득 행렬 $A_k(n)$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$A_k(n) = \sum_{i=1}^{M-k} (w_{k,M-k-i+1}^1(n)E_{M-k,i} + w_{k,M-k-i+1}^2(n)E_{M-k,i}) \quad (23)$$

V. 실험 결과 및 고찰

제안된 Escalator 적응 빔 형성기의 성능을 고찰

하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 원하는 신호와 간섭 신호는 백색 가우시안 랜덤 신호를 8차의 Butterworth 대역 통과 필터에 통과시켜 발생하였다. 원하는 신호는 대역 통과 필터의 차단 주파수를 50Hz-60Hz로 하였으며, 간섭 신호는 대역 통과 필터의 차단 주파수를 52Hz-58Hz로 하였다. 표본화 주파수는 1kHz로 하였고 센서들간의 지연된 신호는 보간법(Interpolation)을 통하여 얻었다.^[11] 원하는 신호의 분산은 0.1, 첨가 잡음도 분산이 0.1인 백색 가우시안 잡음을 사용하였다. 센서 간격은 공간상에서 aliasing이 발생하지 않도록 입사 신호의 반파장 ($d/\lambda = 0.5$)으로 하였으며 일관성을 알아보기 위해 10번의 독립 시행을 하였다. 원하는 신호의 입사각은 항상 어레이 축의 수직방향, 즉 0° 로 입사한다고 가정하였다.

그림 5는 간섭 신호가 입사 신호와 비슷한 각도로 입사하는 경우 분해능을 알아보기 위해서 분산이 2.0인 간섭 신호가 $+2^\circ$ 로 입사하는 경우의 빔 패턴을 나타내었다. 이 경우 4개의 센서를 사용하였다. 제안된 Escalator 적응 빔 형성기가 Cascade 구조보다 분해능이 우수함을 알 수 있다.

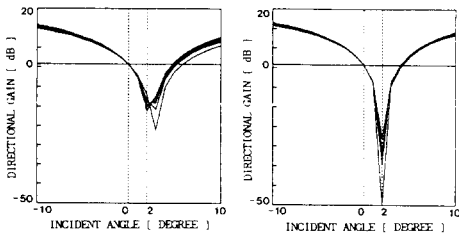


그림 5. 간섭 신호의 입사각이 $+2^\circ$ 일때 빔 패턴 (a) Cascade (b) Escalator 구조
 Fig. 5. Beam patterns when the incident angle of interference is $+2^\circ$. (a) Cascade, (b) Escalator structure.

그림 6은 분산이 각각 2.0, 8.0인 두 개의 간섭 신호가 -25° 와 $+20^\circ$ 로 입사할 경우 정상 상태($n=3000$)에서 빔 패턴을 나타낸 것이며, 그림 7은 시간 변화($n=50, 100, \dots, 3000$)에 따른 빔 패턴 형성 과정을 나타낸다. 이 경우 역시 4개의 센서를 사용하였다. 역시 제안된 Escalator 적응 빔 형성기가 Cascade 구조보다 일관성 있는 널(null)을 형성하며 빠른 수렴 속도를 볼 수 있다.

제안된 방법이 기존의 것보다 성능이 우수한 이유는 다음과 같다. 즉 일반적인 선형 어레이(linear

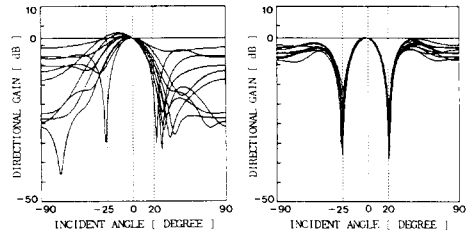
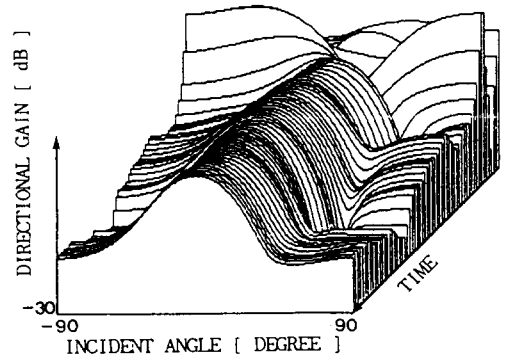
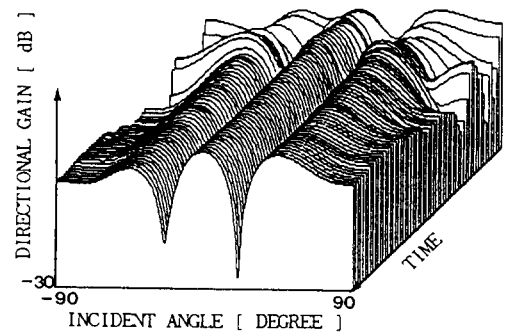


그림 6. 간섭 신호가 2개 일때 정상 상태에서의 빔 패턴 (a) Cascade (b) Escalator
 Fig. 6. Beam patterns in steady state for 2 interferences. (a) Cascade, (b) Escalator.



(a)



(b)

그림 7. 간섭 신호가 2개 일때 시간 변화에 따른 빔 패턴 (a) Cascade (b) Escalator 구조
 Fig. 7. Beam patterns vs. time for 2 interferences. (a) Cascade, (b) Escalator.

array)의 경우 원하는 분해능을 얻기 위해서는 센서 수를 늘려야만 하는 단점을 갖고 있다. 그러나 이런 문제는 비주기 어레이(aperiodic array)를 사용함으로써 극복될 수 있다. 즉 제안된 방법의 형태는 선형 어레이 구조를 지니고 있으나 실제적으로 계산될 때 d/λ 값은 0.5, 1.0, \dots , 0.5(M-1)로 변화함으로써 비주기 어레이의 특성을 갖게 된다. 따라서 제안된 방법은 원하는 방사 패턴(radiation pattern)을 얻기 위해서 기존의 cascade 구조보다 적은 수의 센서가 요구된다.

VI. 결론

본 논문에서는 선형 제한 조건을 만족하는 Escalator 적응 빔 형성기를 제안하였다. 간섭 신호가 원하는 신호와 근접한 각도로 입사하는 경우 제안된 구조는 기존의 Cascade 구조보다 분해능면에서 우수한 성능을 나타내었다. 또한 간섭 신호가 2개인 경우 Cascade는 제기능을 발휘하지 못하는 반면 Escalator는 비교적 우수한 성능을 발휘함을 알 수 있다. 이상의 결과로 비주기 어레이의 특성을 갖는 Escalator 적응 빔 형성기는 Cascade 구조보다 분해능, 일관성 면에서 우수한 성능을 가짐을 알 수 있다.

앞으로의 과제는 제안된 Escalator 구조가 많은 계산량을 갖고 있으므로 이를 효율적으로 감소시키는 방법에 대해서 연구되어야 할 것이다.

參 考 文 獻

- [1] B.D. Van Veen and K.M. Buckley, Beamforming : A Versatile Approach to Spatial Filtering, *IEEE ASSP Magazine*, pp.4-24, May 1988.
- [2] R.T. Lacoss, Adaptive Combining of Wideband Array Data for Optimal Reception, *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, vol.GE-6, no.2, pp.78-86, May 1968.
- [3] W.C. Knight, R.G. Pridham, and S. M. Kay, Digital Signal Processing for Sonar, *Proc. IEEE*, vol. 69, pp.1451-1506, Nov. 1981.
- [4] R.T. Compton, Jr., An Adaptive Array in a Spread-Spectrum Communication System, *Proc. IEEE*, vol.66, pp.289-298, Mar. 1978.
- [5] O.L. Frost, An Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Array Processing, *Proc. IEEE*, vol.60, pp.926-935, Aug. 1972.
- [6] K. Takao, M. Fujita, and T. Nish, An Adaptive Antenna Array under Directional Constraint, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.AP-24, no.5, pp.662-669, Sept. 1976.
- [7] N. Ahmed and D.H. Youn, On a Realization and Related Algorithm for Adaptive Prediction, *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Proc.*, vol. ASSP-28, no.5, pp.493-497, Oct. 1980.
- [8] D.E.N. Davies, Independent Angular Steering for Each Zero of Directional Pattern for a Linear Array, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.AP-26, no.3, pp.396-402, May 1978.
- [9] R. Khanna and B.B. Madan, Adaptive Beamforming using a Cascade Configuration, *IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Proc.*, vol.ASSP-31, no.4, pp.940-945, Aug. 1983.
- [10] G. Strang, *Linear Algebra and its application*, New York : Academic Press, 1980.
- [11] D.H. Youn, N. Ahmed, and G.C. Carter, A Method for Generating a Class of Time-Delayed Signals, *Proc. Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Proc.*, pp.1257-1260 Apr. 1981.
- [12] R.T. Compton, Jr., On the Davies Tree for Adaptive Array Processing, *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Proc.*, vol.ASSP-33, no.4, pp.1019-1021, Aug. 1985.

著者紹介



金熙昶(正會員)

1965年 3月 19日生. 1988年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업. 1990年 8月 연세대학교 전자공학과 석사 학위 취득. 1992年 9月 ~ 현재 미국 Univ. of Polytechnique 박사과정 재학중 주관심 분야는 스펙트럼 추정 및 적응 신호 처리 등임.

분야는 스펙트럼 추정 및 적응 신호 처리 등임.



金基萬(正會員)

1965年 11月 24日生. 1988年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업. 1990年 8月 연세대학교 전자공학과 석사 학위 취득. 1990年 9月 ~ 현재 연세대학교 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심 분야는 레이더 및 소나 신호 처리 등임.

레이더 및 소나 신호 처리 등임.



朴尙澤(正會員)

1958年 10月 23日生. 1984年 2月 홍익대학교 전자공학과 졸업. 1987年 8月 연세대학교 전자공학과 석사 학위 취득. 1992年 8月 연세대학교 전자공학과 박사 학위 취득. 주관심 분야는 스펙트럼 추정, 소나 신호 처리 및 하드웨어 구현 등임.

정, 소나 신호 처리 및 하드웨어 구현 등임.

尹大熙(正會員) 第 26卷 3號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 교수

車日煥(正會員) 第 26卷 3號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 교수