

레이더 시스템에서 목표물 위치추정 알고리즘에 대한 연구

이 관 형*, 송우영**

A Study on the Target Position Estimation Algorithm to Radar System

Kwan-Houng Lee *, Woo-Young Song **

요 약

레이더 시스템은 간섭채널에서 목표물을 신속, 정확하게 예측하여야 한다. 무선채널의 간섭요소로는 인공구조물, 자연구조물에 의해서 다중경로가 형성되어 신호의 추정이 어렵다. 이러한 간섭신호를 제거하기 위해서 디지털 빔형성, 적응배열안테나 등 많은 연구가 지속 되어왔다. 본 논문에서는 적응배열 안테나와 코히어런트 간섭신호를 제거하는 SPT-SALCMV 빔형성 알고리즘을 제안 하였다. 적응 배열은 간섭신호의 방향에 대해서는 널 패턴을 형성하여 이득을 감소시킨다. 그리고 표적신호 방향으로는 빔 패턴의 이득을 일정하게 유지함으로써 원하는 신호를 추정 한다. 본 논문에서 제안한 SPT-SALCMV 알고리즘은 목표물에 대한 위치를 정확히 수신하였다. 그러나 기존의 SPT-LCMV 알고리즘은 약 30 정도의 빔 오차가 생겼다. 따라서 본 논문에서 제안한 SPT-SALCMV 알고리즘이 기존의 SPT-LCMV 알고리즘보다 우수함을 입증하였다.

Abstract

Radar system must estimate exactly quickness and target in interference channel. Because interference of radio channel is multipath channel by artificial structure and nature structure, signal estimation is difficult. As long as, get rid of interference signal have been study digital beamforming, adaptive array antenna and so on. In this paper, proposed SPT-SALCMV beamforming algorithm get rid of coherent interference algorithm and adaptive array antenna. Adaptive array forms null pattern and reduces gains for direction of interference signal. And estimate signal that want by keeping gains of beam pattern changelessly to target signal direction. In this paper, proposed SPT-SALCMV algorithm was exactly received position of target. But general SPT-LCMV algorithm resulted beam error about 30degrees. Therefore, proved that SPT-SALCMV algorithm that propose in this paper is more excellent than general SPT-LCMV algorithm.

▶ Keyword : SPT-SALCMV, Adaptive Array, RADAR, Beamforming

• 제1저자 : 이관형

• 접수일 : 2008. 6. 16, 심사일 : 2008. 8. 16, 심사완료일 : 2008. 9. 25.

* 국방과학연구소 ** 청주대학교

I. 서론

레이더는 주변의 환경 및 적의 방해전파 등의 방해신호가 있는 환경에서 목표물을 신속, 정확하게 예측하여야 한다. 이러한 간섭요소로는 자연적으로 지상 및 공중 클러터(Clutter)가 있고, 인위적으로는 재머(Jammer)등이 있다. 이러한 간섭신호를 제거하기 위해서 디지털 빔형성, 적응배열안테나 등 많은 연구가 지속 되어왔다.[1][2] 본 논문에서는 적응배열 안테나와 코히어런트 간섭신호를 제거하는 변형된 SPT-SALCMV(spilt polarity transformation- Subarray Linearly constrained minimum variance)빔형성 알고리즘을 제안하였다. 적응 배열 안테나는 간섭신호의 방향에 대해서는 널 패턴을 형성하여 이득을 감소시키고 표적신호 방향으로는 빔 패턴의 이득을 일정하게 유지함으로써 원하는 신호를 추정한다.[3][4] 그러나, 다중경로 페이딩 채널에서 원하는 신호와 상관도가 있는 코히어런트 간섭신호가 입사된다면 배열 출력에서 원하는 신호를 추정하기가 어렵다.[5] 코히어런트 간섭신호는 다중경로 환경이나 원하는 신호와 상관도가 매우 높은 교의적인 재밍신호에 의하여 발생할 수 있다. 이러한 현상은 적응배열안테나 신호처리에서 가장 해결하기 어려운 문제중의 하나로서 이를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다.[6][7]

비선형 배열에서 사용할 수 있는 방법으로 코히어런트 간섭신호의 입사각을 추정한 후 추정된 입사각에 널 패턴을 형성시키고, 배열 출력신호의 전력을 최소화시키는 MCMV(multiply constrained minimum variance)빔 형성기법을 제안하였다.[8][9] 제안된 MCMV빔형성기법은 추정 입사각과 실제 간섭신호의 입사각에 오차가 발행 할 경우 간섭신호를 효과적으로 제거 할 수 없다. Lu는 간섭신호의 입사각을 추정할 필요 없이 다수의 코히어런트 간섭신호를 제거할 수 있으며 비선형 배열에 적용할 수 있는 방법으로 SPT-LCMV(spilt polarity transform ation- Linearly constrained minimum variance)빔형성 기법을 제안하였다.[10] SPT-LCMV빔형성기는 SPT행렬을 이용하여 원하는 신호와 코히어런트 간섭신호의 상관도를 제거한 후, 상관도가 제거된 입력 공분산행렬을 LCMV 빔형성기에 적용하여 최적 가중치를 획득하는 방법이다. SPT-LCMV 빔형성기는 간섭신호의 입사방향을 추정하지 않고 임의로 설정된 표본 입사각에 대한 제한 조건을 이용하여 간섭신호를 제거한다. 그러나 표본 입사각이 실제 코히어런트 간섭신호의 입사각과 일치하지 않을 경우 입력 공분산 행렬의 표적신호와 간섭 신호간의 상관도를 제거할 수 없다.[11] 본 논문에서는 변형된 SPT-SALCMV(spilt polarity

transformation- Subarray Line array constrained minimum variance)알고리즘을 제안하여 입력 공분산 행렬의 표적신호와 간섭 신호간의 상관도를 제거하고, 최적의 가중치를 추정하여 원하는 신호를 추정하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 SPT-LCMV 대해서 서술하고, III장에서는 SPT-LCMV를 변형한 SPT-SALCMV를 제안하여 최적가중치를 나타내었다. IV장에서는 모의실험을 통한 알고리즘과 본 논문에서 제안한 알고리즘을 모의 실험을 통하여 비교 분석하였고, 마지막으로 V장에서는 결론을 맺었다.

II. SPT-LCMV 빔 형성기

그림1은 적응배열 안테나 시스템이다.[3]

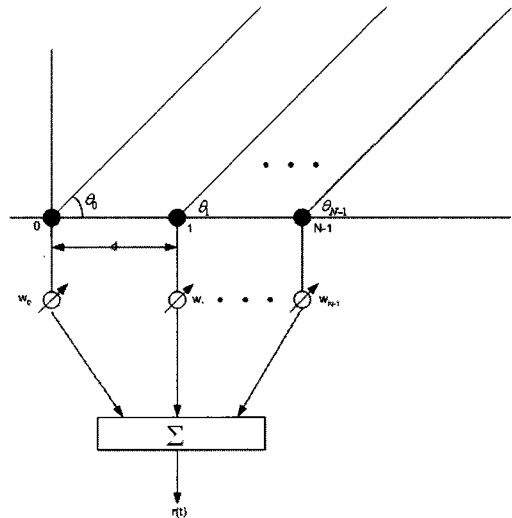


그림 1. 적응 배열 안테나 시스템
Fig 1. Adaptive Array Antenna system

N 개의 배열소자에 원하는 신호와 l 개의 간섭신호가 입사한 수신신호는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$r(t) = A(\theta)x(t) + n(t) \dots\dots\dots (2.1)$$

여기서 $x(t)$ 는 신호벡터, $A(\theta)$ 는 지향벡터, $n(t)$ 는 백색 잡음이다. 이때, 출력 신호는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$y(t) = w^H r(t) \dots\dots\dots (2.2)$$

여기서, w^H 는 복소공액전치 가중치벡터(Hermitian transpose weight vector)이다. 배열 출력 신호전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[|y(t)|^2] = w^H R_{xx} w \dots\dots\dots (2.3)$$

여기서 R_{xx} 는 배열 수신신호의 공분산 행렬로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{xx} = E[r(t)r^H(t)] \dots\dots\dots (2.4)$$

적용배열 수신신호 공분산 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{xx} = A(\theta) \begin{bmatrix} s_{00} & s_{01} & \dots & s_{0l} \\ s_{01}^* & s_{11} & \dots & s_{1l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{0l}^* & s_{1l}^* & \dots & s_{ll} \end{bmatrix} A^H(\theta) \dots\dots\dots (2.5)$$

s_{ij} ($0 \leq i, j \leq l$)는 신호 i 와 j 사이의 교차 상관도를 의미한다. 원하는 신호의 자기상관도 s_{00} 를 제외한 모든 첫 번째 행과 첫 번째 열의 값 s_{0j}, s_{0j}^* 을 0으로 만들면 표적신호와 간섭신호 간의 상관도가 제거된다. s_{00} 를 제외한 첫 번째 행과 첫 번째 열의 모든 원소의 위상이 반전된 공분산 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{zz} = A(\theta) \begin{bmatrix} s_{00} & -s_{01} & \dots & -s_{0l} \\ s_{01}^* & s_{11} & \dots & s_{1l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -s_{0l}^* & s_{1l}^* & \dots & s_{ll} \end{bmatrix} A^H(\theta) \dots\dots\dots (2.6)$$

원하는 신호와 간섭신호 간의 상관도를 제거한 입력 공분산 행렬($\overline{R_{xxzz}}$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{R_{xxzz}} = \frac{1}{2}(R_{xx} + R_{zz}) \dots\dots\dots (2.7)$$

$$= A(\theta) \begin{bmatrix} s_{00} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_{11} & \dots & s_{1l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & s_{1l}^* & \dots & s_{ll} \end{bmatrix} A^H(\theta) \dots\dots\dots (2.8)$$

식(2.8)에서 원하는 신호와 간섭신호의 교차상관도인 S_{00} 를 제외한 모든 첫번째 행과 첫번째 열의 값이 0이 되었으므로, 원하는 신호와 간섭신호 간의 상관도가 제거된 것을 알 수 있다. 이때, R_{zz} 는 $z(t)$ 의 공분산 행렬로 정의되고, $z(t)$ 는 SPT행렬로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z(t) = T(\theta_0)r(t) \dots\dots\dots (2.9)$$

여기서 $T(\theta_0)$ 는 SPT행렬로서 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$T(\theta_0)a(\theta) = \begin{cases} -a(\theta_0), & \theta = \theta_0 \\ a(\theta), & \theta \in \theta_j \end{cases} \dots\dots\dots (2.10)$$

여기서, θ_0 는 원하는 신호의 입사각이고, θ_j 는 간섭신호에 대한 추정 입사각의 집합이다. θ_j 의 방향에서 수신되는 신호와 원하는 신호간의 상관도를 제거하기 위해서는 코히런트 간섭신호의 수신방향을 모두 포함하여야 한다. 즉, 고차 제한조건을 적용하지 않을경우 표본 입사각은 실제 코히런트 간섭신호의 입사각과 일치하는 값을 가져야 한다. 이 조건을 만족하는 $z(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z(t) = T(\theta_0)r(t) \dots\dots\dots (2.11)$$

$$= -s_0(t)a(\theta_0) + \sum_{j=1}^l s_j(t)a(\theta_j) \dots\dots\dots (2.12)$$

식(2.12)에서 원하는 신호의 위상이 반전되는 $z(t)$ 를 구할 수 있다. 그러나, 실제 코히런트 간섭신호의 입사각을 알지 못하므로, 임의로 설정된 표본 입사각으로 제한행렬 \hat{A} 를 형성하여 사용한다. 식(2.10)에서 SPT행렬 $T(\theta_0)$ 는 다음 식을 만족하여야 한다.

$$\arg \min \| T(\theta_0)\hat{A} - \hat{A}J \|^2 \dots\dots\dots (2.13)$$

여기서 J 는 $(L+1)$ 행 $(L+1)$ 열차원의 대각행렬로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \text{diag}\{-1, 1, 1, \dots, 1\} \dots\dots\dots (2.14)$$

\hat{A} 는 원하는 신호의 방향과 임의로 설정된 표본입사각

$\hat{\theta}_i (i=1,2,\dots,L)$ 로 이루어진 제한행렬로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{A} = [a(\hat{\theta}_0), a(\hat{\theta}_1), \dots, a(\hat{\theta}_L)] \dots\dots\dots (2.15)$$

식(2.13)을 만족하는 SPT대각행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(\theta_0) = \hat{A} J \hat{A}^+ \dots\dots\dots (2.16)$$

여기서 \hat{A}^+ 는 \hat{A} 의 의사역행렬(pseudo inverse)이다. 제한행렬 \hat{A} 는 원하는 신호와 코히런트 간섭신호의 상관도를 제거하는데 사용된다. 제한행렬 \hat{A} 를 구성하는 표본입사각과 코히런트 간섭신호의 입사방향 사이에 오차가 존재하면 빔 형성기의 성능은 크게 저하된다. 이때 고차제한조건을 이용하여 입사각의 범위를 증대시키면 실제 값과 임의로 설정된 값 사이에 발행하는 오차를 보상 할 수 있다. 고차 제한조건을 적용한 제한행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{A} = [a(\theta_0), a(\hat{\theta}_1), a^1(\theta_1), \dots, a(\hat{\theta}_g), a^1(\theta_g), \dots, a^D(\hat{\theta}_g)] \dots\dots\dots (2.17)$$

여기서 g 는 임의로 설정한 표본 입사각 개수이고, $a^D(\hat{\theta}_g)$ 는 각각 θ_g 방향의 지향벡터에 대한 D 차 미분을 의미한다. SPT행렬로 상관도를 제거한 입력 공분산 행렬의 최적 가중치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_{opt} = \gamma [\overline{R_{xxx}} + \lambda_0 I]^{-1} a(\theta_0) \dots\dots\dots (2.18)$$

여기서, γ 와 λ_0 는 상수이다.

III. 제안 SPT-SALCMV 빔 형성기

3.1 SPT-SALCMV 빔 형성기

SPT-SALCMV빔형성기는 g 개의 표본입사각과 미분차수가 D 인 고차 제한조건을 이용할 경우 제한요소의 수가 $[g(D+1)+1]$ 개이므로 $[g[D+1]+2]$ 개 이상의 배열소자를

필요로 한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 방법을 제안하였다. 미분차수가 D 인 고차 제한조건을 사용할 경우, 전체 제한행렬 \hat{A} 은 표본입사각수 만큼의 부분제한행렬로 나타낼 수 있다.

$$\hat{A}_1 = [a(\theta_0), a(\hat{\theta}_1), a^1(\hat{\theta}_1), \dots, a^D(\hat{\theta}_1)] \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\hat{A}_2 = [a(\theta_0), a(\hat{\theta}_2), a^1(\hat{\theta}_2), \dots, a^D(\hat{\theta}_2)] \dots\dots\dots (3.2)$$

⋮

$$\hat{A}_g = [a(\theta_0), a(\hat{\theta}_g), a^1(\hat{\theta}_g), \dots, a^D(\hat{\theta}_g)] \dots\dots\dots (3.3)$$

이 경우 SPT행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{i\theta_0} = \hat{A}_i J_{D+2} \hat{A}_i^+ \dots\dots\dots (3.4)$$

여기서 $i=1,2,\dots,g$ 이고, J_{D+2} 는 $(D+2)$ 행, $(D+2)$ 열차원의 대각행렬이다. 첫 번째 표본입사각으로 이루어진 부분제한행렬 \hat{A}_1 으로부터 생성된 위상이 반전된 공분산 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{zz1} = T_1(\theta_0) R_{xx} T_1(\theta_0)^H \dots\dots\dots (3.5)$$

3.2 SPT-SALCMV 빔 형성 알고리즘 제안

본 논문에서 제안한 방식으로 원하는 신호와 간섭신호 간의 상관도를 제거한 입력 공분산 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{R_{zzz}}(1) = \frac{1}{2} (R_{xx} + R_{zz1}) \dots\dots\dots (3.6)$$

$$= A_1(\theta) \begin{bmatrix} s_{oo} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{s}_{1,11} & \hat{s}_{1,12} & \hat{s}_{1,13} \\ 0 & \hat{s}_{1,12}^* & \hat{s}_{1,22} & \hat{s}_{1,23} \\ 0 & \hat{s}_{1,13}^* & \hat{s}_{1,23}^* & \hat{s}_{1,33} \end{bmatrix} A_1^H(\theta) \dots\dots (3.7)$$

여기서 $\hat{s}_{1,11}, \hat{s}_{1,22}, \hat{s}_{1,33}$ 은 각각 첫 번째 표본 입사각 방향과 지향벡터의 1차 및 2차 미분에 해당하는 방향으로 입사신호의 자기상관도이다. 식(3.7)에서 원하는 신호와 첫 번째 표본입사각에 입사되는 신호 간의 상관도 $\hat{s}_{1,01}$. 원하는 신호와 첫 번째 표본입사각에 대한 지향벡터의 1차, 2차 미분방향

으로 입사하는 신호간의 상관도 $\hat{s}_{1,02}, \hat{s}_{1,03}$ 이 모두 0이므로 첫 번째 표본입사각 및 그 주변에서 입사되는 신호와 원하는 신호간의 상관도가 제거된다. 이러한 과정을 g 개의 표본입사각에 대해 모두 적용하면 표본입사각의 방향으로 입사하는 신호와 원하는 신호간의 상관도를 제거하여 최종 입력 공분산 행렬의 최적가중치 벡터는 식(3.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_{ospt} = \gamma [R_{xx22}(1) + \lambda_0 I]^{-1} a(\theta_0) \dots\dots\dots (3.8)$$

IV. 시뮬레이션

본 논문에서는 무선채널에서 코히런트 간섭신호가 존재할 때 기존의 SPT-LCMV 알고리즘과 본 논문에서 제안한 SPT-SALCMV 알고리즘을 비교 분석하기 위해서 모의실험을 하였다. 모의실험에서 안테나의 크기와 시스템의 효율성을 고려하여, 배열 안테나 소자는 19개를 사용하였고, 배열간격은 그레이팅 로브를 피하기 위해서 1/2파장으로 하였다. 또한, 균일 선형 배열 안테나를 고려하였다. SPT-SALCMV 빔형성기에서 원하는 신호와 간섭신호 간의 상관도를 제거하기 위해 표본 입사각을 -20°, 0°, 20°로 설정하였고, 코히런트 간섭신호 입사각은 30°로 하였다. 표본 입사각과 실제 코히런트 간섭신호 입사각의 오차는 7°이고, 제한행렬에 2차 미분을 적용하였다. 그림2는 본 논문에서 제안된 알고리즘으로 [-20°, 0°, 20°]에서 3개의 목표물에 대한 위치를 정확하게 수신하고 있다. 그러나 그림3은 기존의 SPT-LCMV기법으로 [-20°, 0°, 20°]에서는 목표물에 대한 위치를 정확히 수신하고 있지 못하다.

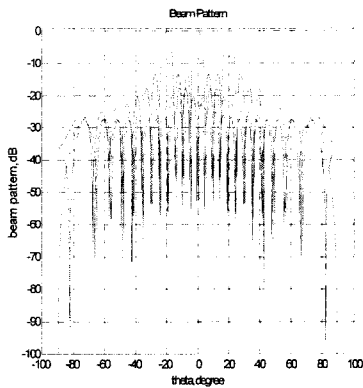


그림 2. 제안 알고리즘 빔 패턴 (dB)
Fig 2. Beam pattern of proposed algorithm (dB)

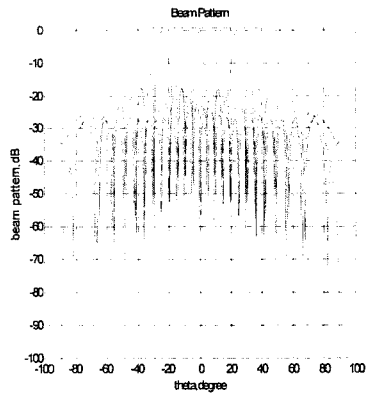


그림 3. SPT-LCMV 알고리즘 빔 패턴(dB)
Fig 3. Beam pattern of SPT-LCMV Algorithm (dB)

V. 실험결과

본 논문에서는 적응배열 안테나와 빔형성 알고리즘을 제안하여 목표물의 위치를 추정하였다. 코히런트 간섭신호는 다중 경로 환경에서 원하는 신호와 상관도가 매우 높은 고의적인 제밍신호, 클러스터 등에 의하여 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 적응배열안테나에 빔형성기법을 적용하여 코히어런트 간섭신호를 제거하는 SPT-SALCMV(spilt polarity transfor mation - Linearly constrained minimum variance) 빔형성 알고리즘을 제안 하였다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 부분행렬을 이용하여 최적의 가중치를 추정하고 원하는 신호를 추정한다. 기존의 SPT-LCMV 빔형성 기법에서 전체 제한 행렬 \hat{A} 는 $[g(D+1)+1]$ 개의 제한 조건을 가지는 반면에, 본 논문에서 제안한 SPT-SALCMV 알고리즘은 각 표본 입사각을 기준으로 나눈 부분제한행렬의 제한 조건 수가 $[D+2]$ 감소함을 입증하였다. 또한 본 논문에서 제안한 알고리즘은 목표물을 정확히 추정하지만, 기존의 알고리즘은 목표물을 추정할 때 약 30의 오차가 발생하였다. 오차 범위를 감소시키기 위해서 배열 안테나 개수를 증가시키고, 송신전력을 증가시키면 오차범위를 더욱더 감소시킬 수 있지만 시스템적으로는 비효율적이다.

본 논문에서 제안된 SPT-SALCMV 알고리즘의 빔은 목표물에 대한 위치를 정확히 수신하지만, 기존의 SPT-LCMV 알고리즘은 약 30 정도의 빔 오차가 생겼다. 따라서 본 논문에서 제안한 SPT-SALCMV 알고리즘이 기존의 SPT-LCMV 알고리즘보다 우수함을 입증하였으며, 경제적으로도 효율적인 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Merrill. Skolnik, "Radar Handbook", McGraw-Hill Publishing Co, N.Y, 1990.
- [2] R.A.Monzingo,T.W.Miller, "Introduction to Adaptive Arrays,"NY:A wiley-inter,1980
- [3] 이관형,김학운,송우영."가중치를 이용한 CDMA 시스템 성능분석", 한국컴퓨터정보학회 제11권 제3호, pp. 213-220, 7월. 2006.
- [4] 이관형, 이사원,"스마트 안테나를 이용한 CDMA 시스템 성능분석", 한국컴퓨터정보학회 제4권 제3호, pp. 101-113, 9월, 1999.
- [5] 이관형,이명호,"다중경로 페이딩 채널에서 멀티캐리어 코드분할다중접속시스템 성능분석", 한국컴퓨터정보학회 제11권 제3호,pp.271-280, 7월. 2006
- [6] K.B.Yu and D.J.Murrow, "Adaptive digital beamforming for range estimation in jamming,"IEEE Trans. Aersop. Electro, Vo.37, No.2, pp.508-523, Apr.2001
- [7] S.P.Applebaum and R. Wasiewicz,"Main beam jammer cancellation for monopulse sensors,"Final technical report, DTIC RADC-TR-86-267,Dec.1984
- [8] Asker M. Bazen, "Elastic Minutiae Matching by Means of Thin-Plate Spline Model", IEEE1051-4651, pp.985-988, 2002.
- [9] C.C.Yeh,W.D.Wang,"Coherent interference suppression by an antenna array of arbitrary geometry", IEEE Trans, Vol.AP-37, pp.1317-1322,Oct.1989
- [10] M.Lu and Z.he, "Adaptive beam forming using split-polarity transformation for coherent signal and interference", IEEE Trans. AP,Co.41,No.3, pp.314-324, Mar, 1993
- [11] L.J.Griffiths and C.W.Jim, "An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming,"IEEE Trans AP, Vo.30,pp-27-34, Jan.1982

저자소개



이 관 형(Kwan-Houng Lee)
 1994년 2월 : 청주대학교 전자공학과(공학사)
 1996년 8월 : 청주대학교 전자공학과(공학석사)
 2004년 8월 : 청주대학교 전자공학과(공학박사)
 2007년 3월~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
 관심분야 : 레이더, 무선통신, 안테나



송 우 영(Woo-Young Song)
 1977년 2월 : 연세대학교 전자통신과(공학사)
 1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학석사)
 1988년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학박사)
 1982년 3월~ 현재 : 청주대학교 전자정보공학부 교수
 관심분야 : 안테나, 초고주파공학, 무선통신