

# Support Vector Regression을 이용한 컨포멀 배열 안테나의 빔 형성 연구

## Study on Beamforming of Conformal Array Antenna Using Support Vector Regression

이강인 · 정상훈\* · 유홍균\*\* · 윤영중\*\*\* · 남상욱\* · 정용식

Kang-In Lee · Sang-Hoon Jung\* · Hong-Kyun Ryu\*\* · Young-Joong Yoon\*\*\* ·  
Sang-Wook Nam\* · Young-Seek Chung

### 요 약

본 논문에서는 SVR(Support Vector Regression)을 이용한 컨포멀 배열 안테나의 빔 형성 알고리즘을 제안한다. 기존의 최소자승법 기반 알고리즘은 모든 샘플의 오차를 고려하는 반면에, SVR은 정해진 오차 한계를 벗어나는 샘플들을 통해 가중치를 결정하여 희소(sparse)한 해를 가지며 과적합(over-fitting) 문제를 최소화하는 장점을 갖고 있다. 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 실험적으로 측정된 컨포멀 배열 안테나 능동 소자 패턴을 SVR에 적용하여 목적 빔 패턴으로 근사시키는 가중치를 구하였으며, SVR로 얻은 가중치와 최소자승법을 통해 얻은 가중치를 실측한 소자패턴에 적용하여 빔 형성 성능을 비교하였다.

### Abstract

In this paper, we propose a new beamforming algorithm for a conformal array antenna based on support vector regression(SVR). While the conventional least squares method(LSM) considers all sample errors, SVR considers errors beyond the given error bound to obtain the optimum weight vector, which has a sparse solution and the advantage of the minimization of the overfitting problem. To verify the performance of the proposed algorithm, we apply SVR to the experimentally measured active element patterns of the conformal array antenna and obtain the weights for beamforming. In addition, we compare the beamforming results of SVR and LSM.

Key words: SVR, LSM, Conformal Array Antenna, Beamforming

### I. 서 론

최근 항공기나 고속열차 등과 같은 고속 이동 플랫폼  
의 기동에 의한 공기저항을 줄이기 위해 돌출된 안테나

「본 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비의 지원으로 연구되었음.」

광운대학교 전자융합공학과(Department of Electronic Convergence Engineering, Kwangwoon University)

\*서울대학교 전기정보공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University)

\*\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

\*\*\*연세대학교 전기전자공학부(School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University)

· Manuscript received September 7, 2018 ; Revised October 19, 2018 ; Accepted November 2, 2018. (ID No. 20180907-094)

· Corresponding Author: Young-Seek Chung (e-mail: yschung@kw.ac.kr)

구조물을 플랫폼의 외부 형상에 맞게 설계하는 컨포멀 배열 안테나에 대한 연구가 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>. 컨포멀 배열 안테나는 공기역학적 장점뿐만 아니라, 곡면 배치에 따른 넓은 각도범위를 가지며 원하는 곳에 안테나를 배치시킬 수 있고, 잠재적으로 이동 플랫폼의 자체 RCS를 감소시키는 장점을 갖고 있다<sup>[2]</sup>. 그러나 컨포멀 배열안테나의 소자 배치 특성으로 인해 배열소자의 위치에 따라서 동일 위상 파면에 이르는 위상지연과 각 소자의 지향방향이 소자마다 상이하기 때문에 평면형 배열 안테나 빔 형성 알고리즘 적용시 더 많은 조건들이 요구된다. 특히, 균일분포 평면형 배열(uniform planar array)의 경우 빔 조향을 위한 가중치 벡터를 계산할 수 있는 Taylor, 체비셰프 등의 해석적 기법들을 이용할 수 있으나, 컨포멀의 경우 배열소자 위치의 비균일성으로 인하여 이러한 기법을 사용할 수 없다. 또한, 컨포멀 배열 안테나 시스템에서는 소자간의 비주기적 상호간섭 영향, 배열소자 배치 오차, 배열소자 지향각도 차이 및 편파 방향의 차이 등에 의해서 평면형 구조 대비 성능열화가 발생한다<sup>[3][4]</sup>.

실제 컨포멀 배열 안테나 시스템의 빔 형성은 능동소자패턴(active element pattern: AEP)과 정의된 목적 빔 패턴(desired beampattern)으로부터 오차함수를 정의하고 최소 자승법(least square method: LSM)을 적용하여 얻어진 최적가중치를 통해 수행된다<sup>[5]</sup>. 하지만 최소자승법은 정의된 오차함수의 총합을 최소화하는 해를 탐색하는 기법의 특성으로 일부 위치에서 상대적으로 큰 오차를 갖는 이상점(outlier)이 발생하게 되면, 원하는 성능을 만족시키지 못하는 근사결과를 낼 수 있다.

본 논문에서는 최소자승법이 갖고 있는 한계를 해결하고 빔 형성 성능을 향상시키기 위하여 SVR(Support Vector Regression)을 적용하였다. 모든 샘플의 오차를 최소화하기 위한 목적을 갖는 최소자승법과는 다르게 SVR은 모든 샘플의 오차가 정해진 오차한계  $\varepsilon$  보다 작게 하는 동시에 가중치의 norm을 최소화하는 목적을 갖는다. 이 목적을 표현하기 위해 SVR은  $\varepsilon$ -무감도 손실함수( $\varepsilon$ -insensitive loss function)을 도입하여 오차한계를 벗어나는 샘플들을 통해 빔형성을 위한 가중치를 추정한다<sup>[6]</sup>. 이러한 과정을 통해 SVR은 희소성(sparse) 해를 구할 수 있으며, 가중치의 norm을 최소화함으로써 과적합(over-fitting) 문제를 해결

할 수 있다<sup>[7]</sup>.

본 논문에서는 8개 소자가 곡률 3인 원 상에 대칭으로 배치된 실제 컨포멀 배열 안테나 시스템에 제안된 알고리즘을 적용하였다. 오차함수에 필요한 능동소자패턴은  $-90^\circ \sim 90^\circ$ 의 방위각에서 1도 간격으로 획득하였으며, 목적 빔 패턴은 실제 시스템과 동일한 소자수를 갖는 선형 배열 안테나 빔 패턴에서 주엽부분은 유지하고, 부엽부분은 원하는 수준으로 설정한 trimmed 선형배열안테나 빔 패턴을 사용하였다.

제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 동일한 능동소자패턴과 목적 빔 패턴을 최소자승법과 SVR에 적용하여 형성된 빔 패턴의 이득, HPBW(Half Power Beam Width), PSLL(Peak Sidelobe Level), 각도 조향 오차를 비교하여 성능 향상을 확인하였다. 결과분석시 조향오차 등 각도 분해능을 향상시키기 위해 1도 간격으로 계산된 결과를 내삽(interpolation)을 이용하였다.

본 논문의 II 장에서는 최소자승법과 SVR을 소개하고, III 장에서는 SVR을 이용한 빔 형성 알고리즘에 대해 설명한다. IV 장에서는 실험 결과를 보이고, 마지막으로 V 장에서 결론을 맺는다.

## II. 관련 이론

### 2-1 선형회귀와 최소자승법

$N$ 차원의 입력변수 벡터  $\mathbf{x}$ 와 1차원의 출력변수  $y$ 로 이루어진 신호는  $\{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_m, y_m)\}$ 으로 표현할 수 있다. 이때, 아래첨자  $m$ 은 신호샘플의 순차를 의미한다.

입력변수  $\mathbf{x}$ 와 출력변수  $y$ 의 관계가 근사적으로 선형인 경우 해당 모델은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + b \quad (1)$$

선형 회귀 문제는 일반적으로 최소자승법을 통해 풀어낼 수 있다. 최소자승법의 목적함수는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\min_{\mathbf{w}} \sum_{i=1}^m (y_i - (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b))^2 \quad (2)$$

위의 식은 최소 자승법이 전체 샘플 오차의 제곱합을 최소화 하기 위한 가중치 벡터  $\mathbf{w}$ 를 구하는 과정을 나타낸다. 추정가중치 벡터  $\hat{\mathbf{w}}$ 는 행렬식을 통해 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.<sup>[8]</sup>

$$\hat{\mathbf{w}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$$

$$\mathbf{X}: [M \times N], \mathbf{Y}: [M \times 1] \quad (3)$$

식 (3)의  $M$ 과  $N$ 은 각각 신호 샘플수와 입력 차원의 수를 의미한다.  $\mathbf{X}$ 는 모든 샘플에 대한 입력을 포함하는 행렬이며,  $\mathbf{Y}$ 는 모든 샘플에 대한 출력을 포함하는 벡터이다. 최소자승법은 전체 샘플의 오차의 자승의 합을 최소화 하기 때문에 정상적인 데이터 분포에서 동떨어진 샘플인 이상점(outlier)이 발생한 경우, 해당 이상점의 오차도 함께 줄이려고 하면서 작은 오차를 갖고 있는 정상적인 샘플에도 영향을 미치게 된다. 이러한 경우, 평균적인 오차가 감소하는 방향으로 가면서 성능이 감소된 근사 결과를 갖게 된다. 본 논문에서는 이러한 최소자승법에서 발생하는 문제를 해결하기 위해 support vector regression (SVR)을 적용하였다.

## 2-2 Support Vector Regression(SVR)

SVR(Support Vector Regression)은 모든 샘플의 오차가 정해진 오차한계  $\epsilon$ 보다 작게 하며, 동시에 추정가중치의 norm인  $\|\mathbf{w}\|^2$ 을 최소화하는 목적을 갖는다. 이 목적함수는 primal 함수이며, 아래 수식으로 표현할 수 있다.

$$\min \left\{ L_p = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \right\} \quad (4)$$

식 (4)의  $\xi_i$ 과  $\xi_i^*$ 는 오차한계  $\pm \epsilon$ 에서 벗어난 샘플들의 오차를 의미하는 슬랙변수(slack variable)이다. 첫 번째 항은 가중치 벡터의 norm을 최소화 하는 목적을 갖는 항이며, 두 번째 항의 파라미터  $C$ 는 SVR의 일반화 기능과 경험적 위험 최소화 성능 간의 균형을 조절하는 파라미터이다.

$C$ 가 큰 경우, 최소화 목적에 대하여 슬랙변수에 대한 강조가 커지며, 이는 경험적 위험(empirical risk)을 더 강조하여 최소화함을 의미한다. 이 경우 모델 복잡도가 높아지고, 과적합(over-fitting)한 해를 가능성이 높아진다.

그러나  $C$ 가 작은 경우, 가중치 벡터의 norm이 더 강조되며, 더 좋은 일반화 기능(generalization ability)을 갖게 된다. 이 경우 모델 복잡도가 낮아지고, 과소적합(under-fitting)한 해를 가질 가능성이 높아진다.  $\epsilon$  또한 희소(sparse)한 해를 갖기 위해 위와 같은 과정이 필요하다. 실제 SVR을 적용하는 과정에 있어서  $C$ 와  $\epsilon$ 은 사용자가 정해야 하는 파라미터가 된다.

위의 목적 함수는 아래와 같은 제약조건을 갖는다.

$$y_i - \mathbf{w}^T \mathbf{x}_i - b \leq \epsilon + \xi_i$$

$$-y_i + \mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b \leq \epsilon + \xi_i^*$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0 \quad (5)$$

위의 제약조건은 오차의 절대값이  $\epsilon$ 보다 큰 샘플은 양수 오차인 경우에는  $\epsilon + \xi_i$ 보다 작은 오차를 가져야 하며, 음수 오차인 경우에는  $\epsilon + \xi_i^*$ 보다 작은 오차를 가져야 함을 의미한다. 또한 오차의 절대값이  $\epsilon$ 보다 작은 경우에는 해당 슬랙변수는 0이 되어야 함을 의미한다.

목적함수 식 (4)와 제약조건 식 (5)를 이용하면 아래 식과 같이 primal-dual 라그랑지안 함수로 표현할 수 있다.

$$L_{pd} = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*)$$

$$+ \sum_{i=1}^N \alpha_i (y_i - \mathbf{w}^T \mathbf{x}_i - b - \xi_i - \epsilon)$$

$$+ \sum_{i=1}^N \alpha_i^* (-y_i + \mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b - \xi_i - \epsilon)$$

$$- \sum_{i=1}^N \mu_i \xi_i - \sum_{i=1}^N \mu_i^* \xi_i^* \quad (6)$$

위 식의  $\alpha_i, \alpha_i^*, \mu_i, \mu_i^*$ 는 라그랑지안 승수를 의미한다. 식 (6)은 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 조건을 이용하면 아래와 같이 dual 라그랑지안 함수로 표현할 수 있다<sup>[7]</sup>.

$$\max \left\{ L_d = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j (\alpha_j - \alpha_j^*) \right\}$$

$$\left\{ -\epsilon \sum_{i=1}^N (\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^N y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) \right\}$$

$$s.t. \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0, 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C \quad (7)$$

그리고 가중치 벡터  $\mathbf{w}$ 는 KKT 조건을 통해 다음의 식

과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) \mathbf{x}_i \quad (8)$$

그리고 식 (7)은 아래와 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_d = & -\frac{1}{2}(\boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{\alpha}^*)^T \mathbf{R}(\boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{\alpha}^*) + (\boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{\alpha}^*)^T \mathbf{y} \\ & - (\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\alpha}^*)^T \mathbf{1}\epsilon \\ s.t. \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0, & 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C \end{aligned} \quad (9)$$

위 식에서 공분산행렬  $\mathbf{R}$ 의  $i, j$ 번째 element  $R_{ij}$ 는  $\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j$ 의 값을 갖는다. 또한  $\mathbf{1}$ 은 1로 구성된 열벡터를 의미한다. 위의 최적화 문제는 convex optimization 문제로서 Quadratic Program(QP)에 적용하여 풀어낼 수 있으며, 그에 대한 결과로 라그랑지안 승수  $\boldsymbol{\alpha}$ 와  $\boldsymbol{\alpha}^*$ 를 얻어낼 수 있다. 얻어진  $\boldsymbol{\alpha}$ 와  $\boldsymbol{\alpha}^*$ 을 식 (8)에 적용하면 가중치 벡터를 얻어낼 수 있다.

### III. SVR을 이용한 빔 형성 알고리즘

임의의 곡면상에 소자들이 배치되는 컨포멀 배열 안테나는 소자의 좌표가  $(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ 인 경우에 아래 식과 같이 빔 패턴 수식으로 표현할 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$B_{ideal}(\theta) = \sum_{n=1}^N w_n \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda} (u_n \sin \theta + v_n \cos \theta) \right] \quad (10)$$

위의 식에서  $N$ 은 배열 소자의 총 개수,  $\lambda$ 는 동작주파수에 대한 파장,  $w_n$ 은  $n$ 번째 배열소자의 가중치를 의미한다. 그러나 실제 시스템에서는 배열소자 간의 상호간섭, 소자 배치 오차, 소자의 지향 방향 오차, 편파로 인한 손실 등의 열화요소들이 존재하기 때문에 위의 모델을 적용할 수 없다. 실제 시스템에서 발생하는 열화현상을 고려한 빔 형성을 위해서는 능동소자패턴이 필요하다. 능동소자패턴은 정해진 각도 범위 내에서 각 소자별로 빔 패턴을 측정하여 얻어낼 수 있다. 능동소자패턴을 고려한 최종 빔 패턴은 임의의 가중치 벡터가 주어졌을 때 다음

과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$F(\theta_m) = \mathbf{w}^H \mathbf{a}_{active}(\theta_m), \quad m = 1, \dots, N_\theta \quad (11)$$

위의 식 (11)에서  $(\cdot)^H$ 는 Hermitian transpose를 의미하며,  $N_\theta$ 는 각도 샘플 개수를 의미한다. 그리고  $\mathbf{a}_{active}(\theta_m)$ 은 각도  $\theta_m$ 에서의 능동소자패턴을 의미한다.

위의 수식의 빔 패턴을 정의된 목적 빔 패턴  $D(\theta)$ 로 변경하면 식 (1)의 선형회귀모델에서  $b = 0$ 인 경우와 동일해진다.  $\mathbf{a}_{active}(\theta_m)$ 은  $m$ 번째 샘플의 입력변수가 되며, 목적 빔 패턴  $D(\theta_m)$ 은 출력변수가 된다. 또한 각도 샘플은 데이터의 샘플과 동일하다. 입력변수가 실수인 경우에는 식 (9)에 바로 적용할 수 있지만 본 문제의 입력변수인  $\mathbf{a}_{active}(\theta_m)$ 는 복소수 값을 갖기 때문에 모델의 변형이 필요하다. 복소수 모델에 대한 목적함수와 제약함수는 아래와 같이 나타낼 수 있다<sup>[7][10]</sup>.

$$\begin{aligned} L_d = & -\frac{1}{2} \boldsymbol{\psi}^H \mathbf{R} \boldsymbol{\psi} + \text{Re}[\boldsymbol{\psi}^H \mathbf{y}] - (\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\alpha}^* + \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\beta}^*)^T \mathbf{1}\epsilon \\ s.t. \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^* + \beta_i - \beta_i^*) = 0, & 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)의  $\boldsymbol{\psi} = \boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{\alpha}^* + j(\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}^*)$ 이며, 가중치 벡터  $\mathbf{w}$ 는 아래의 식을 통해 구할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{w}} = \sum_{i=1}^N \psi_i^* \mathbf{x}_i^* \quad (13)$$

추정된 가중치를 식 (11)에 적용하면 최적화된 빔 패턴을 얻을 수 있다.

### IV. 실험 결과

본 논문에서는 제작된 컨포멀 배열 안테나 시스템을 무반사실(anechoic chamber) 내에서 실험하였다.

그림 1은 컨포멀 배열안테나 시스템을 이용한 빔 형성에 대한 블록도이다. 제작된 컨포멀 배열 안테나의 능동소자 패턴을 측정한 후, 측정된 능동소자 패턴을 이용하여 빔 형성을 위한 가중치를 계산한다. 계산된 가중치를 빔 조향 네트워크에 적용한 후 출력을 통해 빔 패턴을 얻어낸다.

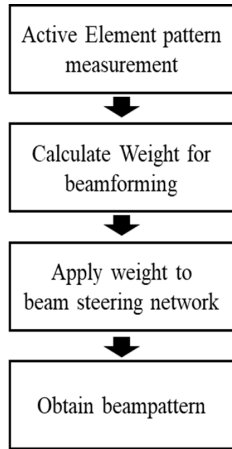


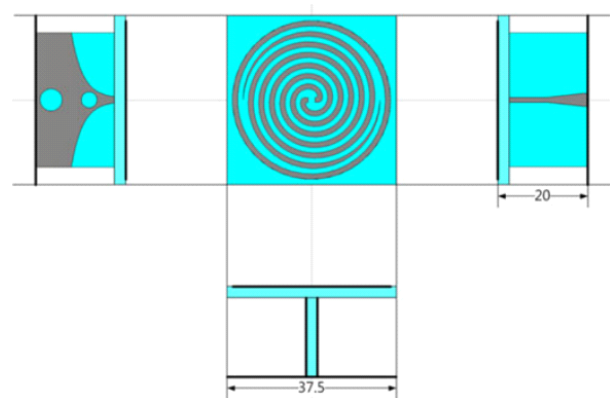
그림 1. 컨포멀 배열 안테나 시스템 빔 형성 순서도  
Fig. 1. Flow chart of conformal array antenna system.

그림 2는 컨포멀 배열 안테나에 사용된 배열소자 및 발룬의 형상과 빔 패턴을 나타낸 그림이다. 배열소자는 소형화를 위해서 팔 끝 연장구조와 고리 결합 구조를 혼합한 modified spiral patch antenna를 사용하였으며, 방사체의 크기는 35.1 mm이고, FR4 기판을 포함한 전체 크기는 37.5 mm×37.5 mm의 크기를 갖는다<sup>[11]</sup>. 또한 사용된 발룬(balun) 구조는 안테나와 동일한 비유전율과 두께를 갖는 기판을 사용하였으며, 일반적인 발룬 변환기 구조를 기본으로 하여 설계하였고, 결함 접지면 구조(defected ground structure: DGS)를 적용하여 소형화를 구현하였다. 전체 크기는 길이 20 mm×폭 30 mm로 설계하였다. 또한 측정된 단일소자의 반사계수는 -35 dB를 갖는다.

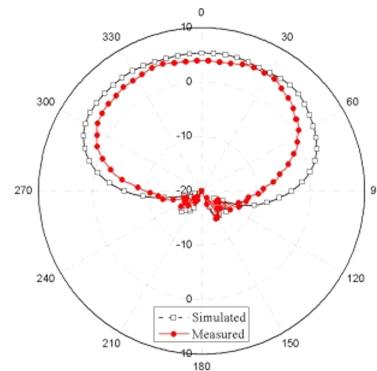
그림 3은 제작된 컨포멀 배열 안테나의 구조를 나타낸 그림이다. 본 논문에서 실험한 컨포멀 배열 안테나 시스템은 곡률 3의 원 상에 8개의 소자를 대칭으로 배치한 구조이며, 소자 간의 간격  $d$ 는 37.5 mm로 배치하였다. 동작 주파수는 3 GHz로 설정하였다.

그림 4는 제작된 1×8 컨포멀 배열 안테나의 사진이다.

그림 5는 측정된 8개 소자의 능동소자 빔 패턴을 나타낸 그림이다. 그림을 통해 대칭되는 위치에 있는 소자들의 빔 패턴이 대칭성을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 5의 측정번호는 그림 4의 좌측에서 우측순의 안테나를 나타낸다. 그림 6은 컨포멀 배열 안테나 시스템을 이용한 실험 구성도이다. 본 논문에서는 해당 시스템을



(a) 안테나 소자 형상  
(a) Geometry of antenna element



(b) 빔 패턴  
(b) Beampattern

그림 2. 안테나 소자 형상(a), 빔 패턴(b)  
Fig. 2. Geometry of antenna element(a), beampattern(b).

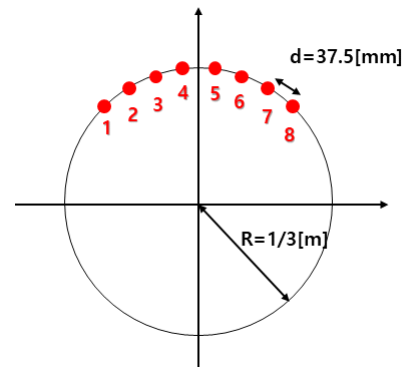


그림 3. 1×8 원형 컨포멀 배열 안테나 구조  
Fig. 3. Geometry of circular conformal array antenna with 1×8.

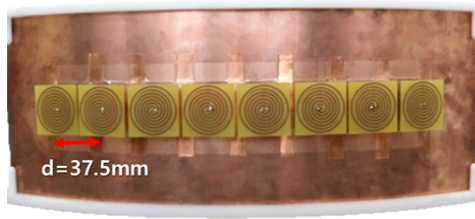


그림 4. 1×8 원형 컨포멀 배열 안테나 사진  
Fig. 4. Photograph of circular conformal array antenna with 1×8 elements.

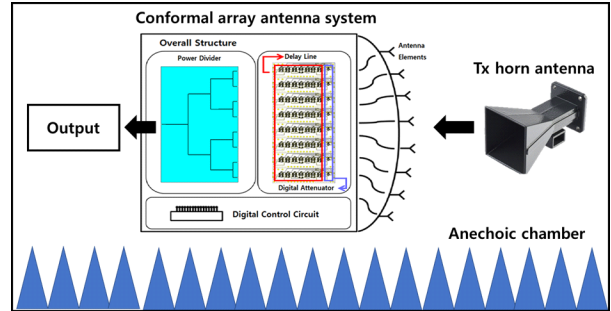


그림 6. 컨포멀 배열 안테나 시스템 실험 구성도  
Fig. 6. Experiment configuration of conformal array antenna system.

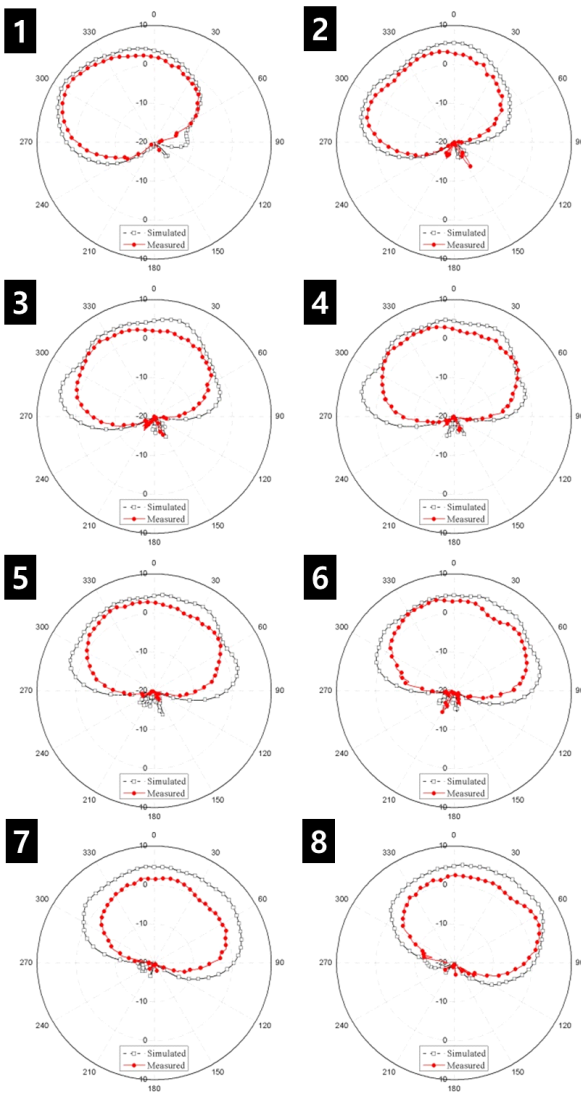


그림 5. 측정 및 시뮬레이션 능동소자패턴  
Fig. 5. Measured and simulated active element patterns.

무반사실 내에서 실험하였다. 해당 시스템은 각도 범위  $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 에서  $1^{\circ}$  간격으로 수신하여 빔 패턴을 측정하였다. 이때, 컨포멀 배열안테나는 수신 빔패턴을 측정하는 방식을 선택하였다. 이를 위하여 계산된 빔 조향 가중치 값을 구현하기 위하여 위상에 해당되는 정보는 실시간 지연선로(true time delay: TTD)를 이용하고, 가중치의 크기는 감쇄기(attenuator)를 이용하여 구현하였다. 이때 실시간 지연선로와 감쇄기의 제어는 디지털 제어보드를 통해 수행하였다. 위상과 크기가 제어된 각 배열소자의 출력은 전력 전력합성기를 통해 합성된다. 그림 7과 그림 8은 각각 제작된 지연선로, 감쇄기와 디지털 제어보드의 사진이다.

그림 9는 제작된 8-to-1 전력합성기의 사진이다.

그림 10은 제작된 컨포멀 배열 안테나 시스템의 사진이다. 해당 시스템은 무반사실 내의 로테이터에 고정되며, 제어 PC를 통해 각도별 데이터를 수집한다.

본 논문에서는 주파수 3 GHz, 각도 범위  $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 에서  $1^{\circ}$  간격으로 측정하여 얻어진  $8 \times 181$  크기의 능동소자

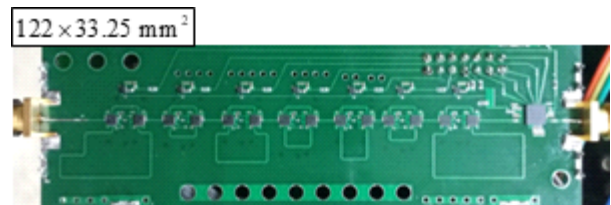


그림 7. 지연선로 및 감쇄기 사진  
Fig. 7. Photograph of true time delay circuit and attenuator.

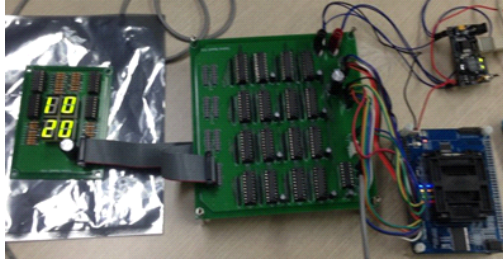


그림 8. 디지털 제어보드 사진  
Fig. 8. Photograph of digital control board.

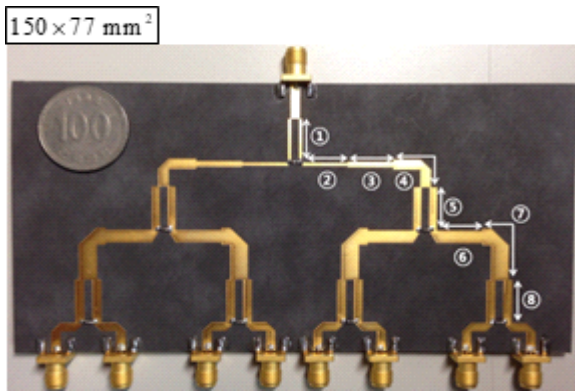


그림 9. 전력 합성기 사진  
Fig. 9. Photograph of power combiner.

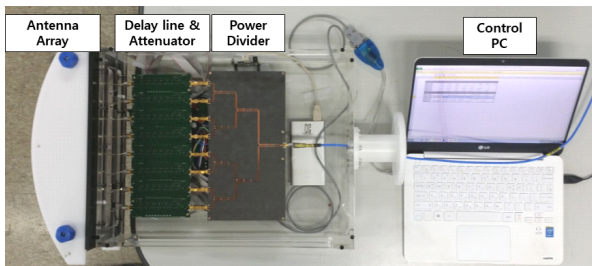


그림 10. 컨포멀 배열 안테나 시스템 사진  
Fig. 10. Photograph of conformal array antenna system.

패턴데이터를 SVR의 입력으로 하고, 목적 빔 패턴을 출력으로 하여 최적 가중치 벡터를 획득하였다. 목적 빔 패턴은  $N$ 개의 선형 안테나 빔 패턴에 주 빔 이외의 부분은  $\rho$ [dB]의 SLL 값을 갖게 한다. 또한 빔의 조향은 목적 빔 데이터를 원하는 방향으로 조향하여 구현하였다.

그림 11은  $N=8$ 이며,  $\rho=-20$  dB, 조향각  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$

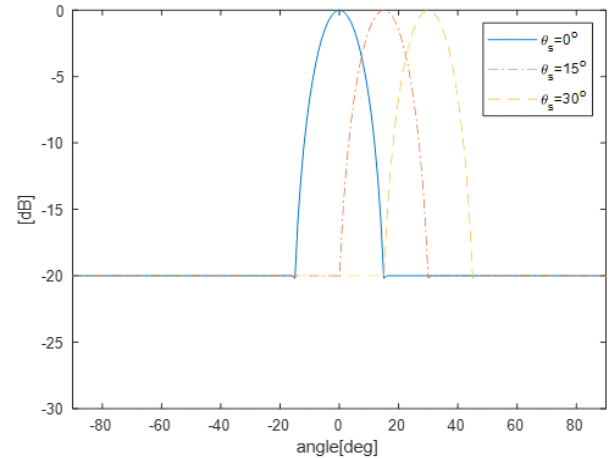


그림 11. 정규화된 목적 빔 패턴  
Fig. 11. Normalized desired beam pattern.

인 경우에 대한 목적 빔 패턴을 나타낸 그림이다. 해당 빔 패턴은 약  $14^\circ$ 의 HPBW를 갖는다.

적용한 SVR의 오차한계  $\epsilon$ 은 0.02,  $C$ 는 100의 값을 적용하였다. SVR의 출력인 라그랑지안 계수  $\psi$ 는 Quadratic Program(QP)를 통해 구하였으며, 라그랑지안 계수  $\psi$ 를 식 (13)에 적용하여 가중치 벡터를 획득하였다.

그림 12은  $N=8$ ,  $\rho=-20$ [dB], 조향각  $30^\circ$ 인 목적 빔 패턴에 대하여 제안된 SVR과 최소자승법을 통해 구한 가중치 벡터를 적용한 결과이다. 동일한 전력조건을 위하여 각

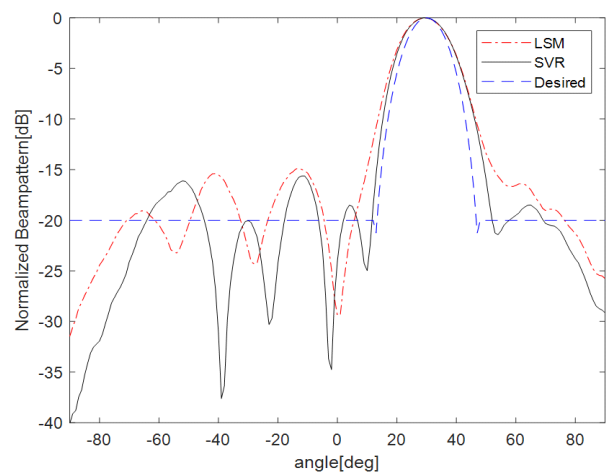


그림 12 SVR과 LSM 알고리즘의 빔 형성 결과  
Fig. 12. Beamforming result of SVR and LSM algorithm.



가중치 벡터의 전력은 1로 정규화 하였다. 그림 9의 결과를 통해 최소자승법으로 얻어진 빔 패턴과 비교하여 제안된 알고리즘으로 얻어진 빔 패턴은 Gain, PSLL(Peak Sidelobe Level), HPBW(Half Power Beam Width), 조향오차 측면에서 더 좋은 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

제안된 알고리즘의 성능 평가를 위해  $0^\circ \sim 30^\circ$ 의 조향범위에서 Gain, PSLL, HPBW 및 조향오차를 최소자승법의 결과와 비교하였다. 이때, 성능의 각 분해능이 측정 분해능보다 좋은 이유는 계산된 결과에 내삽(interpolation)을 적용하여 추정하였기 때문이다. 본 논문에서는 Gain, PSLL, HPBW를 위한 연산을 위해 얻어진 빔 패턴에 cubic spline interpolation에 적용하였다.

그림 13은 조향각에 따라서 SVR과 최소자승법을 통해 형성된 빔의 Gain과 PSLL을 나타낸 그림이다. 별 마커는 SVR의 결과이며, 원 마커는 최소자승법의 결과이다. 실선은 Gain을 나타내며, 왼쪽 Y축에 해당된다. 또한 점선은 PSLL을 나타내며, 오른쪽 Y축에 해당된다. 그림 14는 조향각에 따른 조향 오차와 HPBW를 나타낸 그림이다. 실선은 조향오차를 나타내며, 왼쪽 Y축에 해당되고, 점선은 HPBW를 나타내며, 오른쪽 Y축에 해당된다.

그림 13과 그림 14를 통해, 모든 조향각에서 SVR의 빔 형성 결과가 최소자승법과 비교하여 높은 Gain과 좁은 HPBW를 갖는 것을 확인할 수 있다.  $0^\circ$  조향에서 제안된

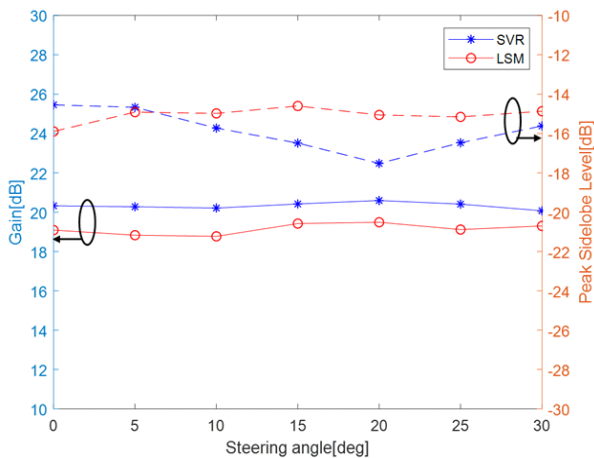


그림 13. 조향각에 따른 빔 형성 결과(gain 및 PSLL)  
Fig. 13. Beamforming results according to steering angles (gain and PSLL).

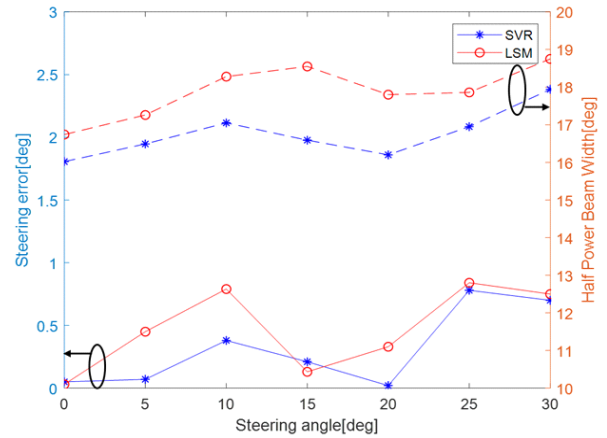


그림 14. 조향각에 따른 빔 형성 결과(조향오차 및 HPBW)  
Fig. 14. Beamforming results according to steering angles (steering error and HPBW).

알고리즘의 PSLL이 약 2 dB 정도 크지만, 동일 각도에서 Gain이 약 1.5 dB 크고 HPBW가  $1^\circ$  작기 때문에 주 빔 형성 성능이 더 좋음을 확인할 수 있다. 또한  $5^\circ$  조향에서도 제안된 알고리즘의 PSLL이 0.2 dB 정도 크지만 나머지 성능 파라미터는 더 뛰어남을 확인할 수 있다. 또한  $15^\circ$  조향에서는 SVR의 빔 조향 오차가 최소자승법과 비교하여 약  $0.1^\circ$  정도 크지만, 나머지 성능 파라미터는 더 뛰어남을 확인할 수 있다. 결과적으로 그림 13과 그림 14의 성능 파라미터를 통해 제안된 알고리즘의 빔 형성 성능이 더 뛰어남을 확인할 수 있다.

연산량 측면에서 최소자승법과 제안된 알고리즘의 연산량을 비교하기 위해 Inter(R) Core(TM) i7-6700K CPU @ 4 GHz 프로세서에서 10,000회의 시행에 대한 평균 연산 시간을 구하였다. 수행 결과, 최소자승법은 0.4 ms, 제안된 알고리즘은 80 ms의 평균 수행시간을 가졌다. 해당 결과를 통해 성능 향상에 대한 trade-off로 수행시간이 늘어남을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 SVR(Support Vector Regression)을 이용한 컨포멀 배열 안테나의 빔 형성 알고리즘을 제안하였다. SVR의 입력변수로는 능동소자패턴을 적용하였으며, 출력변수로는 제안된 목적 빔 패턴을 적용하여 빔 형성을



위한 가중치 벡터를 획득하였다. 알고리즘의 성능 분석을 위해 실제 컨포멀 배열 안테나 시스템 상에서 목적 빔 패턴의 조향각에 따라서 SVR과 최소자승법을 이용하여 빔 형성을 수행하였고, Gain, HPBW, 조향오차, PSLL의 관점에서 빔 형성 성능을 평가하였다. 그 결과, 주어진 조향각에서 제안된 알고리즘의 성능이 우수함을 확인하였다.

## References

- [1] L. Josefsson, P. Persson, *Conformal Array Antenna Theory and Design*, John Wiley and Sons, 2006.
- [2] T. E. Morton, K. M. Pasala, "Pattern synthesis of conformal arrays for airborne vehicles," in *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings(IEEE Cat. No.04TH-8720)*, Big Sky, MT, Mar. 2004, vol. 2, pp. 1030-1039.
- [3] R. Karimzadeh, M. Hakkak, A. Haddadi, and K. Fororaghi "Conformal array pattern synthesis using the weighted alternating reverse projection method considering mutual coupling and embedded-element pattern effects," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 6, no. 6, pp. 621-626, 2012.
- [4] X. S. Yang, H. Qian, B. Wang, and S. Xiao, "Radiation pattern computation of pyramidal conformal antenna array with active-element pattern technique, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 53. no. 1, pp. 28-37, Feb. 2011.
- [5] S. Burintramart, *Methods for Direction of Arrival Estimation using a Single Snapshot of the Data*, Syracuse University, 2009.
- [6] V. N. Vapnik, *Statistical Learning Theory*, John Wiley & Sons, 1998.
- [7] M. Martínez-Ramón, C. Christodoulou, "Support vector machines for antenna array processing and electromagnetics," *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, vol. 1, no. 1, pp. 1-120, 2005.
- [8] N. Andrew, "An as-short-as-possible introduction to the least squares, weighted least squares and moving least squares methods for scattered data approximation and interpolation," 2004. Available: <http://www.nealen.com/projects>.
- [9] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, John Wiley & Sons, 2004.
- [10] J. L. Rojo-Alvarez, M. Martinez-Ramon, M. de Prado Cumplido, A. Artes-Rodriguez, and A. R. Figueiras-Vidal, "Support vector method for robust ARMA system identification," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 1, pp. 155-164, Jan. 2004.
- [11] J. Ahn, S. H. Cha, S. G. Cha, and Y. J. Yoon, "Compact spiral element for wideband beam-steering arrays, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1994-1997, 2017.

이 강 인 [광운대학교/석·박사 통합과정]



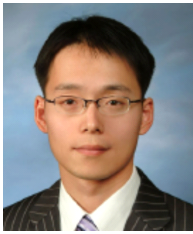
2011년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)  
2011년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 석·박사 통합과정  
[주 관심분야] 능동 위상 배열 시스템, 레이다 신호처리

정 상 훈 [서울대학교/석·박사 통합과정]



2010년 8월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)  
2014년 9월~현재: 서울대학교 전기정보공학부 석·박사 통합과정  
[주 관심분야] 전자장 수치해석 및 최적화, 레이다 신호처리

유 홍 균 [국방과학연구소/선임연구원]



2005년 2월: 목원대학교 정보통신공학과 (공학사)  
2007년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
2012년 8월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)  
2012년 10월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 안테나

남 상 욱 [서울대학교/교수]



1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
1983년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)  
1989년: Electrical Engineering at the University of Texas at Austin (공학박사)  
1990년~현재: 서울대학교 전기공학부 교수

2016년: 한국전자과학회 학회장

[주 관심분야] 마이크로파 능동/수동 회로 설계, 안테나 및 전파전파, 전자파 수치해석 등

윤 영 중 [연세대학교/교수]



1981년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)  
1986년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)  
1992년~1993년: 한국전자통신연구원 위

성통신기술연구단 교수

1993년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수

2011년: 한국전자과학회 학회장

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파

정 용 식 [광운대학교/교수]



1989년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
2000년 8월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)  
2003년 3월~2006년 2월: 명지대학교 통

신공학과 조교수

2006년 3월~현재: 광운대학교 전자융합공학과 교수

[주 관심분야] 전자파수치해석 및 EMI/EMC, Radar 신호처리