

Moving Least Squares 기법을 이용한 광대역 컨포멀 빔 형성 연구

A Study of Broad-band Conformal Beam Forming using Moving Least Squares Method

정 상 훈* · 이 강 인** · 정 현 교* · 정 용 식†

(Sang-Hoon Jung · Kang-In Lee · Hyun-Kyo Jung · Young-Seek Chung)

Abstract - In this paper, beam forming using moving least squares method (MLSM) is studied. In the previous research, the least squares method (LSM), one of the data interpolation methods, was used to determine the desired beam pattern and obtain a beam pattern that minimizes the square of the error with the desired beam pattern. However, LSM has a disadvantage in that the beam pattern can not be formed to satisfy the exact steering angle of the desired beam pattern and the peak sidelobe level (PSLL) condition. To overcome this drawback, MLSM is used for beam forming. In order to verify, the proposed method is applied in beam forming of Bezier platform array antenna which is one of conformal array antenna platform

Key Words : Beam forming, Broad band, Conformal array antenna, Data approximation, Moving least squares

1. 서 론

본 논문에서는 moving least squares method(MLSM)을 이용한 빔 형성 방법에 대한 연구를 진행하였다. 배열 안테나의 빔 형성에는 다양한 기법이 사용되는데 소자들의 거리에 따라 보상 해주어 빔을 형성하는 간단한 방법이 있으며, 컨포멀 표면의 경우는 거리에 따른 보상으로 빔을 형성하는 것이 쉽지 않기에 directivity를 최대화시키거나 sidelobe를 최소화시키거나, 원하는 형태의 빔을 형성하기 위해 최적화를 적용하는 방법들이 존재한다[1],[2]. 최적화를 이용한 빔 형성 방법 중 하나가 보간법 중 하나인 least squares method (LSM)을 이용하여 원하는 목표 빔 패턴을 정하고, 원하는 목표 빔 패턴과의 오차 제곱을 최소화 시키는 빔 패턴을 획득하는 방법이다[3]. LSM을 이용한 빔 형성 방법은 다른 최적화 알고리즘을 이용한 방법보다 더 적은 연산량을 가진다는 장점이 있다. 그러나 LSM의 경우 목표 빔 패턴의 정확한 조향각과 peak sidelobe level(PSLL) 조건을 만족하도록 빔 패턴을 형성할 수 없다는 단점이 있다. 이런 점을 개선하기 위해 빔 형성에 기존의 LSM에서 변형된 MLSM이 이용되었다. MLSM은 LSM에 특정 고정점을 중심으로 가중치를 적용한 weighted least squares method (WLSM)에서 다시 임의의 고정점을 중심으로 한 가중치를 적용하도록 변형한 보간법이다 [4]-[6]. MLSM을 이용하여 기존의 LSM을 이용한 빔 형성 방

법보다 정확한 조향각을 만족하며, 더 낮은 PSLL을 가지는 빔 패턴을 형성할 수 있다. 본 논문에서는 비평면 구조에 부착되어 재밍용으로 사용되는 컨포멀 배열 안테나의 최적 빔 형성을 목표로 설정하였으며, 제안된 MLSM을 이용한 빔 형성 방법을 검증하기 위해 컨포멀 배열 안테나 플랫폼 중 하나인 Bezier 플랫폼 배열 안테나에 적용시켜보았다. 그리고 전파 재밍을 위한 주파수 대역 2~6 GHz를 목표 대역으로 두고 소자의 위치 최적화를 수행하여 광대역에서의 빔 형성이 가능함을 보였다.

2. Moving Least Squares Method (MLSM)

2.1 Least squares method (LSM)

LSM는 주어진 데이터 점을 이용하여 보간된 데이터를 획득하는 방법의 하나로, 주어진 점과 보간된 데이터의 오차 제곱이 최소화되도록 하는 방법이다. 주어진 N 개의 데이터가 (\mathbf{x}_i, f_i) ($i = 1, \dots, N$)라고 하면 식 (1)을 만족시키는 함수 $f(x)$ 를 구하게 된다.

$$\min_f \sum_i \| f(\mathbf{x}_i) - f_i \|^2 \quad (1)$$

근사에 사용되는 basis 벡터를 B , basis 벡터의 계수를 a , 주어진 N 개의 데이터를 (\mathbf{x}_i, f_i) 라고 하면 다음과 같은 식 (2)를 만족시키는 해 a 를 구하는 문제가 된다.

$$\mathbf{B}a = \mathbf{f}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}^T(\mathbf{x}_1) \\ \vdots \\ \mathbf{b}^T(\mathbf{x}_N) \end{bmatrix}, \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

† Corresponding Author : Dept. of Electronic Convergence Engineering, Kwangwoon University, Korea.

E-mail: yschung@kw.ac.kr

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Korea.

** Dept. of Electronic Convergence Engineering, Kwangwoon University, Korea.

Received : October 15, 2018; Accepted : December 7, 2018

이러한 식 (2)를 오차제곱을 최소화시키도록 풀면 다음 식 (3)의 결과를 얻을 수 있다[7].

$$\mathbf{a} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{f} \quad (3)$$

2.2 Weighted Least squares method (WLSM)

위에서 살펴본 LSM의 경우 보간에 사용되는 데이터들 간의 중요도의 차이가 없기에 이러한 문제를 해결하기 위해 나타난 것이 WLSM이다. WLSM는 중요한 데이터를 고정점으로 두고 그로부터 거리에 따른 가중치를 두어 오차를 계산하는 방법이다. 이러한 방법을 통해 보간 결과가 중요한 데이터를 좀 더 잘 따라가게 만들 수 있다. 가중치 함수를 $\mathbf{w}(\cdot)$ 라 두면 다음과 같은 식을 만족하는 함수 $f(x)$ 를 구하게 된다. 주어진 데이터는 (\mathbf{x}_i, f_i) , 고정점이 $\bar{\mathbf{x}}$ 라 두고 고정점과 데이터 간의 거리가 d_i 이다.

$$\min_f \sum_i \mathbf{w}(d_i) \|f(\mathbf{x}_i) - f_i\|^2, d_i = \|\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_i\| \quad (4)$$

가중치 함수는 대표적으로 식 (5)와 같이 gaussian 함수 \mathbf{w}_g 가 사용되며, 그 이외에도 Wendland 함수 \mathbf{w}_w , \mathbf{w}_e 등이 사용된다. 본 논문에서는 gaussian 함수를 사용하였으며, 가중치의 분포를 데이터 간의 거리에 따라 조절하는 파라미터 h 는 2로 두었다.

$$\mathbf{w}_g(d) = e^{-\frac{d^2}{h^2}}, \mathbf{w}_w(d) = (1-d/h)^4 / (4d/h+1), \mathbf{w}_e(d) = \frac{1}{d^2 + \epsilon^2} \quad (5)$$

식 (2)의 문제를 gaussian 가중치를 사용한 WLSM를 적용하여 풀면 다음과 같은 해를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{a} = (\mathbf{B}^T \mathbf{w}_g \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{w}_g \mathbf{f} \quad (6)$$

2.3 Moving Least squares method (MLSM)

WLSM에서 가중치를 두는 고정점을 특정한 하나의 점으로 두지 않고 임의의 점으로 두는 방법이 MLSM이다. 고정점을 전체 도메인에서 움직여가면서 각각의 점에서 개별적으로 WLSM을 수행한다. 주어진 데이터들을 모두 각각의 이동하는 고정점으로 두면 MLSM의 식은 수식 (7)과 같으며, 그 때의 해는 식 (8)과 같이 구해진다.

$$f(\mathbf{x}) = f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}), \min_{f_{\mathbf{x}}} \sum_i \mathbf{w}(d_i) \|f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_i) - f_i\|^2, d_i = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| \quad (7)$$

$$\mathbf{a} = (\mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{f},$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_g(\|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1\|) & \dots & \mathbf{w}_g(\|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_N\|) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{w}_g(\|\mathbf{x}_N - \mathbf{x}_1\|) & \dots & \mathbf{w}_g(\|\mathbf{x}_N - \mathbf{x}_N\|) \end{bmatrix} \quad (8)$$

본 논문에서는 거리 파라미터 $h=2$ 인 gaussian 가중치 함수를 가지는 MLSM를 적용하여 광대역 컨포멀 배열 안테나의 빔 형성을 수행하였다.

3. 광대역 컨포멀 플랫폼 배열 안테나

3.1. 컨포멀 플랫폼 배열 안테나

배열 안테나의 빔 형성에 대한 연구들이 다양하게 이루어지고 있는데, 그 중 하나가 목표 빔 패턴을 정하고 그 빔 패턴과 유사한 빔 패턴을 합성하게 하는 소자 별 가중치를 LSM를 적용하여 구하는 방법이다. 이 방법을 이용하여 광대역을 만족하면서 컨포멀한 플랫폼에 부착된 배열 안테나의 빔 형성을 수행할 수 있다. 본 논문에서는 컨포멀 플랫폼으로 Bezier 함수를 통해 얻어지는 임의의 곡선을 선택하였으며, 주파수 대역으로 2-6 GHz 대역을 선택하였다.

Bezier 함수는 프랑스의 수학자 Bezier에 의해 만들어진 함수로, 제어점을 이용하여 임의의 곡선을 나타낼 수 있다[8]. 제어점이 많을수록 더 복잡한 곡선을 표현할 수 있는데 본 논문에서는 제어점이 4개인 3차원 Bezier 곡선을 이용하여 컨포멀 플랫폼을 표현하였다. 식 (9)에 나타난 3차원 Bezier 함수와 표 1의 4개의 제어점을 이용하여 그려진 컨포멀 플랫폼은 그림 1과 같다.

$$P(x) = (1-x)^3 P_0 + 3x(1-x)^2 P_1 + 3x^2(1-x) P_2 + x^3 P_3, 0 \leq x \leq 1 \quad (9)$$

표 1 3차원 Bezier 곡선의 제어점

Table 1 Control points of the 3-D Bezier curve

제어점	P0	P1	P2	P3
위치 X,Y [m]	(-0.4,0.15)	(-0.3,0.3)	(0.3,0.25)	(0.4,0.15)

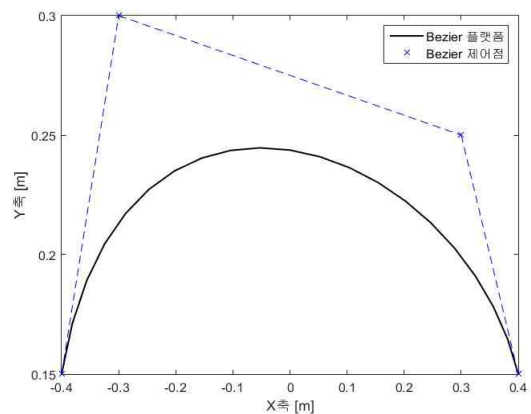


그림 1 Bezier 플랫폼과 제어점

Fig. 1 Bezier platform and control points

이와 같은 Bezier 플랫폼에 8개의 소자 안테나를 두고 빔 형성을 할 때의 빔 패턴은 다음과 같다.

$$B_B = W_B A_B, \quad W_B = [w_1, \dots, w_8], \quad A_B = \begin{bmatrix} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(x_1 \sin\theta + y_1 \cos\theta)} \\ \vdots \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(x_8 \sin\theta + y_8 \cos\theta)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

- B_B = Bezier 플랫폼 배열 안테나의 빔 패턴
- W_B = 소자의 가중치 벡터
- A_B = Bezier 플랫폼 배열 안테나의 manifold 벡터
- x_k, y_k = k 번째 배열 소자의 x, y 위치
- θ = 방위각 벡터(-90 DEG SIM 90 DEG)

여기서 소자의 가중치 벡터 W_B 를 어떻게 주는가에 따라 합성된 빔 패턴이 변하게 되는데, 목표 빔 패턴 B_d 와 유사한 빔을 합성할 수 있는 가중치 벡터를 LSM을 이용하여 구하면 다음과 같다. 먼저 식 (11)처럼 목표 빔 패턴과 Bezier 플랫폼 배열 안테나의 빔 패턴을 같다고 두고, 위의 2.1에서 보았던 LSM의 개념을 적용하여 가중치 벡터 W_B 를 구하면 수식 (12)를 얻을 수 있다.

$$B_d = W_B A_B \quad (11)$$

$$W_B = B_d A_B^H (A_B A_B^H)^{-1}, \quad (\cdot)^H : \text{Conjugate transpose} \quad (12)$$

식 (12)에 입력 전력을 고려한 가중치 최적화를 위해 diagonal loading을 추가하면 최종적으로 수식 (13)을 얻을 수 있다[9]. 본 논문에서는 경험을 토대로 $\alpha = 0.1$ 로 두었다.

$$W_B = B_d A_B^H (A_B A_B^H + \alpha I)^{-1} \quad (13)$$

이와 같은 수식 전개를 MLSM 개념을 적용하면 식 (14)와 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$W_B = B_d W A_B^H (A_B W A_B^H + \alpha I)^{-1} \quad (14)$$

목표 빔 패턴을 어떻게 선택하는지도 빔 형성 결과에 영향을 주게 되는데, 본 논문에는 선형배열 안테나 (ULA : Uniform linear array)가 형성하는 빔 패턴에 side-lobe를 낮추기 위해 Taylor 가중치를 적용한 빔 패턴을 목표 빔 패턴으로 사용하였다. 빔 형성에 있어 side-lobe는 특정 수준 아래로만 내려가면 되므로, Taylor 가중치를 사용하면 side-lobe를 원하는 수준으로 낮출 수 있다[10]. 선형 배열 안테나로 형성한 목표 빔 패턴과 그 빔 패턴에 Taylor 가중치를 적용한 빔 패턴의 형태는 그림 2에 나타나 있다.

또한, 목표 빔 패턴은 complex 값이므로, 절대값이 같더라도 위상 값들의 차이가 날 수 있다. 그러므로 목표 빔 패턴의 위상 값이 실제 Bezier 플랫폼 배열 안테나의 위상 값들과 차이가 크

게 날 경우 제대로 소자 가중치를 구하지 못하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 목표 빔 패턴의 위상을 Bezier 플랫폼 배열 안테나의 위상과 유사하게 보상해주었으며, Bezier 배열 안테나의 y축의 평균값만큼 위상을 더해주었다.

그림 3은 목표 빔 패턴과 목표 빔 패턴에 위상 보상을 하지 않은 Bezier 배열 안테나의 빔 형성 결과와 위상 보상을 한 결과를 비교한 것이다. 결과를 보면 위상 보상을 해준 결과가 그렇지 않는 결과에 비해 목표 빔 패턴을 훨씬 정확하게 근사하는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 광대역 배열 안테나

본 논문에서는 2~6 GHz 대역과 조향각 30도를 만족하는 빔 형성을 연구하였다. 먼저, 수식 (10)을 보면 Bezier 플랫폼 배열 안테나의 빔 패턴에 소자의 위치와 주파수가 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

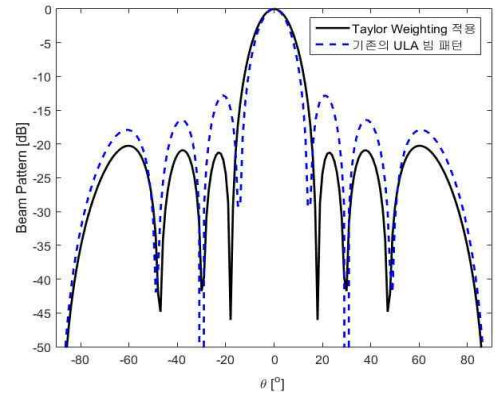


그림 2 선형 배열 안테나의 빔 패턴과 Taylor 가중치를 적용한 빔 패턴

Fig. 2 Beam pattern of linear array antenna and its Taylor weighted beam pattern

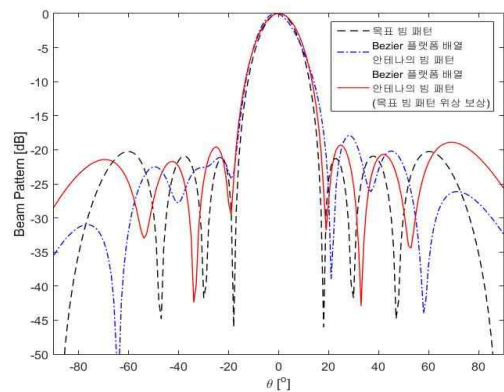


그림 3 목표 빔 패턴의 위상 보상 결과

Fig. 3 Phase compensation result of the desired beam pattern

소자의 위치는 결정되면 바꾸지 못하는 요소이므로, 고려하고자 하는 조향각, 주파수 대역에 대하여 최적의 빔 패턴을 형성할 수 있는 소자 위치를 구할 필요가 있다. 이 문제는 수식 (15)와 같이 N_f 개의 주파수, N_θ 개의 조향각에 N 개의 소자위치 \mathbf{X} 를 통해 형성된 빔 패턴들과 목표 빔 패턴과의 모든 오차제곱 합들이 최소가 되게 하는 최적화 문제로 볼 수 있다.

$$E_{\min} = \min_{\mathbf{X}} \left[\sum_{j=1}^{N_f} \sum_{k=1}^{N_\theta} \left\{ \sum \left\| \mathbf{W}_B(f_j, \theta_k) \mathbf{A}_B - \mathbf{B}_d \right\|^2 \right\} \right], \quad (15)$$

$$\mathbf{X} = \{x_1, \dots, x_N\}$$

이러한 최적화 문제에 주로 사용되는 것이 생물의 진화 과정에서 영감을 받아 만들어진 최적화 알고리즘 중 하나인 genetic algorithm (GA)이다[11],[12]. GA는 초기해 생성 후 교차, 변이를 거쳐 새로운 해를 생성하고, 그 해가 기존의 해보다 좋으면 기존의 해 집단으로 대체되는 알고리즘이다[13],[14]. 교차, 변이, 대체 방법에 따라 GA의 성능이 달라지는데, 본 논문에서는 두 해의 평균을 구하는 산술 교차를 사용하였으며 변이 비율을 10%로 두었고 대체는 가장 좋은 해 집단만 남기는 방법을 선택하였다. 8개의 소자 위치들을 설계변수로 두고 식 (15)의 E_{\min} 을 최소화하였는데, GA의 파라미터는 표 2와 같이 설정하였다.

표 2 GA 파라미터

Table 2 Parameters of GA

GA 인구수	300
GA 세대수	1000
교차	산술 연산
변이 비율	10 %

3.3. 광대역 컨포멀 플랫폼 배열 안테나 빔 형성 결과

MLSM을 이용한 빔 형성의 우수성을 확인하기 위하여, 앞서 설명한 과정을 거쳐 광대역 Bezier 플랫폼 배열 안테나의 빔 형성을 수행한 결과를 LSM을 수행한 결과와 비교하여 보았다. 결과는 matlab을 이용한 시뮬레이션을 통해 획득하였으며, 시뮬레이션 조건은 표 3과 같다.

표 3 시뮬레이션 조건

Table 3 Condition of simulation

플랫폼	Bezier 플랫폼
주파수	2~6 GHz (0.2 GHz 간격)
조향각	-30°, 0°, 30°
배열 소자수	8개
소자 패턴	Gaussian
MLSM 가중치 함수	Gaussian

먼저 소자들의 위치 최적화를 수행한 결과 그림 4와 같은 최적 소자 위치를 획득하였다. 다음으로 최적의 소자 위치에서의 주파수, 조향각에 따른 빔 조향을 수행한 결과 다음의 그림들과 같은 결과를 얻었다. 주파수 2~6 GHz 대역에서 조향각 -30, 0, 30도 결과를 나타냈다. 그림 5는 조향각 -30도일 때 LSM을 이용한 최적 빔 형성 결과이며, 그림 6은 MLSM을 이용한 최적 빔 형성 결과이다. 그림 7은 조향각 0도일 때 LSM을 이용한 최적 빔 형성 결과이며, 그림 8은 MLSM을 이용한 최적 빔 형성 결과이다. 그림 9는 조향각 30도일 때 LSM을 이용한 최적 빔 형성 결과이며, 그림 10은 MLSM을 이용한 최적 빔 형성 결과이다. 2~6 GHz 대역에서 0.2 GHz 간격으로 빔 패턴을 형성하였으나, 표기상의 문제로 1GHz 간격으로 나타내었다.

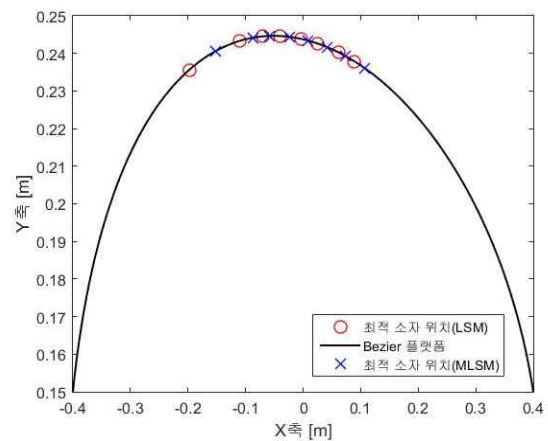


그림 4 GA를 이용하여 획득한 최적 소자 위치

Fig. 4 Optimum element positions obtained by GA

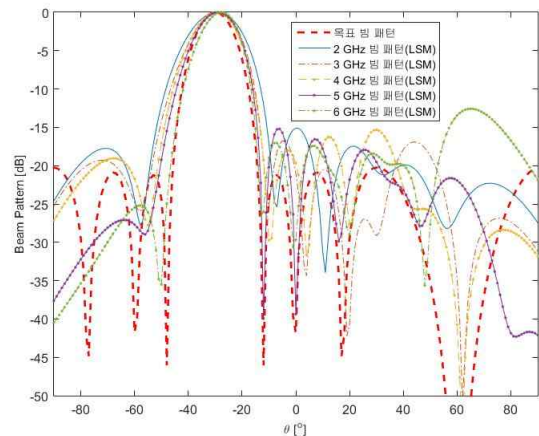


그림 5 LSM을 이용한 최적 빔 형성 결과(주파수 2~6GHz 대역, 조향각 -30°)

Fig. 5 Result of optimum beam forming using LSM (Frequency 2~6 GHz, Steering angle -30°)

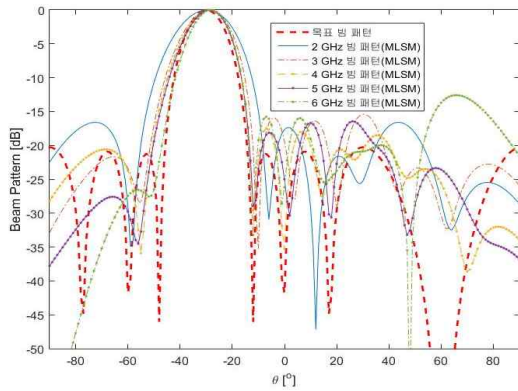


그림 6 MLSM을 이용한 최적 빔 형성 결과(주파수 2~6GHz 대역, 조향각 -30°)

Fig. 6 Result of optimum beamforming using MLSM (Frequency 2~6 GHz, Steering angle -30°)

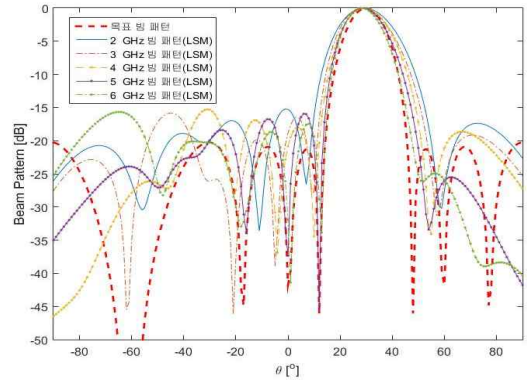


그림 9 LSM을 이용한 최적 빔 형성 결과(주파수 2~6GHz 대역, 조향각 30°)

Fig. 9 Result of optimum beam forming using LSM (Frequency 2~6 GHz, Steering angle 30°)

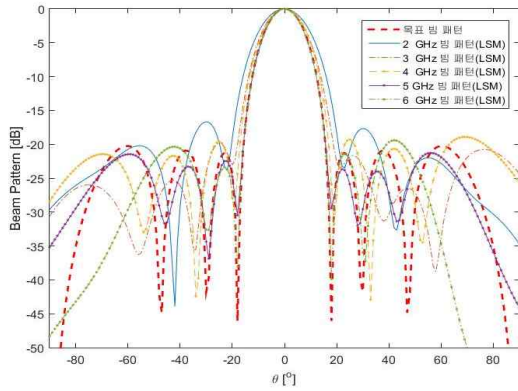


그림 7 LSM을 이용한 최적 빔 형성 결과(주파수 2~6GHz 대역, 조향각 0°)

Fig. 7 Result of optimum beam forming using LSM (Frequency 2~6 GHz, Steering angle 0°)

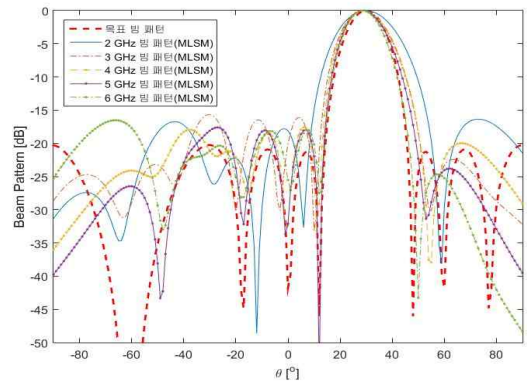


그림 10 MLSM을 이용한 최적 빔 형성 결과(주파수 2~6GHz 대역, 조향각 30°)

Fig. 10 Result of optimum beam forming using MLSM (Frequency 2~6 GHz, Steering angle 30°)

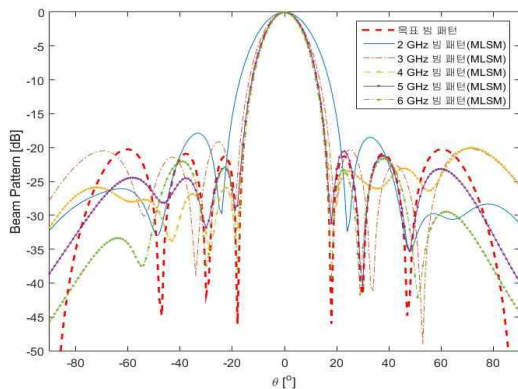


그림 8 MLSM을 이용한 최적 빔 형성 결과(주파수 2~6GHz 대역, 조향각 0°)

Fig. 8 Result of optimum beam forming using MLSM (Frequency 2~6 GHz, Steering angle 0°)

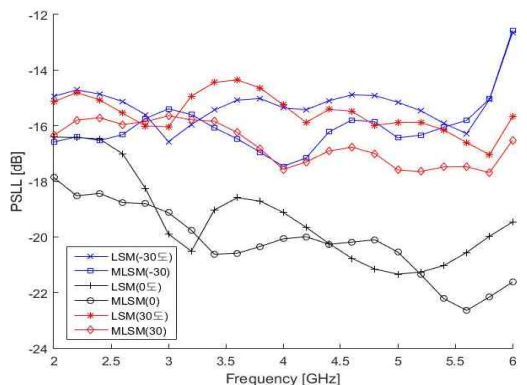


그림 11 조향각과 주파수에 따른 LSM과 MLSM의 PSLL 비교

Fig. 11 PSLL comparison between LSM and MLSM according to steering angle and frequency

두 결과 모두 육안으로는 성능 구별이 어려우므로, 정량적인 비교를 위해 PSLL과 조향각을 다음과 같이 정리하였다. 그림 11을 보면 대부분의 조향각, 주파수에서 LSM보다 MLSM이 더 낮은 PSLL을 가지는 것을 확인할 수 있다.

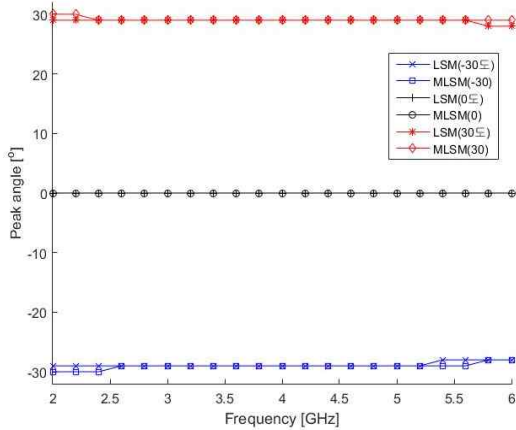


그림 12 조향각과 주파수에 따른 LSM과 MLSM의 조향각 비교
Fig. 12 Steering angle comparison between LSM and MLSM according to steering angle and frequency

표 4 LSM과 MLSM의 평균 PSLL, 메인 빔의 조향각 비교
Table 4 Mean PSLL and steering angle comparison of LSM and MLSM

	평균 PSLL (dB)	평균 조향 오차 (°)
LSM	-16.6942	0.7619
MLSM	-17.6327	0.6190

그림 12는 메인 빔의 조향각이 목표 조향각에 얼마나 잘 맞는지를 나타낸 것으로 MLSM이 LSM 보다 좀 더 정확한 조향이 되는 것을 확인할 수 있다. 표 4는 PSLL과 메인 빔의 조향각을 평균으로 정리한 것이다. MLSM을 적용한 빔 조향의 경우가 더 나은 성능을 보임을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 LSM을 이용한 빔 형성 연구에서 발생하는 단점을 보완한 MLSM을 적용한 빔 형성에 대하여 연구하였다. MLSM은 LSM에서 변형된 보간법으로 LSM보다 더 정확한 보간을 수행할 수 있다. 이런 MLSM을 컨포멀 플랫폼의 하나인 Bezier 플랫폼 배열 안테나의 빔 형성에 적용하였으며, GA를 이용한 소자 최적화를 수행하여 2~6 GHz에서도 빔 형성이 가능한 최적의 소자 위치를 구하였다. 이를 바탕으로 -30, 0, 30도 조향을 수행하여 그 결과를 기존의 LSM을 이용한 결과와 비교하여,

PSLL을 더 낮출 수 있으며, 보다 정확한 조향이 가능함을 확인하였다. 이와 같이 제한한 MLSM을 이용하면 항공기의 표면과 같은 컨포멀 구조에 부착되는 배열 안테나의 최적 빔 형성이 가능하며, 재밍을 위한 광대역 주파수 2~6 GHz에서도 잘 적용되므로, 향후 전자전에서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비의 지원으로 연구되었음.

References

- [1] Vaskelainen, Leo I., "Constrained least-squares optimization in conformal array antenna synthesis", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 55, No. 3, pp. 859-867, 2007.
- [2] Xie, Wenchong, et al., "Clutter suppression for airborne phased radar with conformal arrays by least squares estimation", *Signal Processing*, Vol. 91, No. 7, pp. 1665-1669, 2011.
- [3] Sang-Hoon Jung, et al, "Beam Forming Study and Optimum Antenna Location Selection for Wideband Conformal Array Antenna", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 27 No. 2, pp. 138-146, 2016.
- [4] Nealen, 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", URL: <http://www.nealen.com/projects>, 130.150 : 25, 2004.
- [5] Zadeh, Parviz M., Vassili V. Toropov, and Alastair S. Wood, "Use of moving least squares method in collaborative optimization", *6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, Brazil*, 2005.
- [6] Levin, David, "The approximation power of moving least-squares", *Mathematics of Computation of the American Mathematical Society*, Vol. 67, No. 224 pp. 1517-1531, 1998.
- [7] Conte, Samuel Daniel, and Carl De Boor, *Elementary numerical analysis: an algorithmic approach*, Vol. 78, SIAM, 2017.
- [8] Cinque, Luigi, Stefano Levialdi, and Alessio Malizia, "Shape description using cubic polynomial Bezier curves", *Pattern Recognition Letters*, Vol. 19, No. 9, pp. 821-828, 1998.

- [9] Ohsung Kwon, "A Study on Wideband Beam Synthesis Algorithm for Conformal Array", *Master Thesis, Kwangwoon University*, pp. 1-2, 17-20, 2014.
- [10] Harry L. Van Trees, "Detection, Estimation, and Modulation Theory", *Optimum Array Processing, John Wiley & Sons*, pp. 143-149, 2004.
- [11] Mitchell, Melanie, An introduction to genetic algorithms, *MIT press*, 1998.
- [12] Whitley, Darrell, "A genetic algorithm tutorial", *Statistics and computing*, Vol. 4, No. 2, pp. 65-85, 1994.
- [13] Jang-Ho Seo, et al, "Optimal design of electric machine by statistical method", *The Proceedings of KIEE*, Vol. 54, No. 9, pp. 16-23, 2005.
- [14] Chang-Seob Kwak, et al, "Shape Optimization of High Voltage Gas Circuit Breaker Using Kriging-Based Model and Genetic Algorithm", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 62, No. 2, pp. 177-183, 2013.

저 자 소 개



정 상 훈 (Sang-Hoon Jung)

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



이 강 인 (Kang-In Lee)

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



정 현 교 (Hyun-Kyo Jung)

1979년 2월: 서울대학교 전기공학과(공학사). 1981년 2월: 서울대학교 전기공학과(공학석사). 1984년 2월: 서울대학교 전기공학과(공학박사). 1985년~1994년: 강원대학교 교수. 1987년~1989년: Polytechnic University of Brooklyn, Brooklyn, NY 방문교수. 1999년~2000년: UC Berkeley 방문교수. 2002년~2008년: 기초전력연구원 원장. 1997년~현재: 서울대학교 전기·정보공학부 교수
 [주 관심분야] 전자장 수치해석 및 최적화, 고출력전자기파, 초고압 차단기 시스템, 전기기기



정 용 식 (Young-Seek Chung)

1989년 2월: 서울대학교 전기공학과(공학사). 1991년 2월: 서울대학교 전기공학과(공학석사). 2000년 8월: 서울대학교 전기공학부(공학박사). 2003년 3월~2006년 2월: 명지대학교 통신공학과 조교수. 2006년 3월~현재: 광운대학교 전자공학과 교수
 [주 관심분야] 전자파수치해석 및 EMI/EMC, Radar 신호처리