

부엽 수준 제어와 지향 공간 응답 주파수 변화량 최소화를 사용한 광대역 빔 형성기 설계법

임 준 석*, 편 용 국^o

A Study on the Broadband Beam Pattern Synthesis Using Steering Response Variation and Sidelobe Level Control

Jun-Seok Lim*, Yong-Guk Pyeon^o

요 약

본 논문은 부엽 수준 조절과 응답 변화량 (RV, Response Variation)을 사용한 광대역 빔 형성 방법을 제안한다. RV를 정규화 항으로 적용하여 목표하는 주파수 대역에서 빔의 주엽 변동이 적은 양질의 광대역 빔 패턴을 얻고 동시에 빔의 부엽 수준 조절을 통해서 일정 수준 이하의 부엽을 갖는 빔형성기를 설계하도록 하였다. 설계 실험에서 제안한 방법이 기존 방법보다 사용 주파수 내 빔 응답의 변이 정도나 빔의 부엽 수준 정렬 정도 면에서 우수함을 입증하였다.

Key Words : Broadband beamforming, Response variation (RV), Frequency invariant beampattern (FIBP),

ABSTRACT

In this paper, we propose a broadband beamforming method using side lobe level control and spatial response variation (RV). By applying RV as a regularization term, a high-quality broadband beam pattern with less main lobe fluctuation in the target frequency band was obtained, and at the same time, a beamformer having a side lobe below a certain level was designed by adjusting the side lobe level of the beam. It was demonstrated that the method proposed in the design experiment is superior to the existing method in terms of the degree of variation of the beam response within the frequency used or the degree of alignment at the side lobe level of the beam.

1. 서 론

빔형성기는 공간상의 특정 위치에서 방출되는 신호를 수신하고 다른 위치에서 다른 신호를 감쇠하기 위해 설계된 공간 필터이다¹⁾. 빔형성기는 레이더, 소나, 통신, 지진학, 지구물리학 등의 신호 처리에 널리 채택되고 있다²⁻³⁾. 빔형성기 중 넓은 주파수 대역에서 운용되는 광대역 빔형성기는 더 많은 정보를 다룰 수

있는 등의 광대역 신호의 장점으로 인해 최근 몇 년 동안 점점 더 주목을 받고 있다.

빔형성기에서는 빔형성기의 광대역 적용과 아울러 몇몇 응용에서는 형성된 빔의 지향각 빔 즉 주엽을 제외한 나머지 부엽 준위가 같은 수준이면서 가능한 한 낮게 유지하는 것이 바람직하다⁴⁻⁶⁾. 예로 감시용 레이더나 소나의 경우 감시하는 방향을 향하는 빔인 주엽 외의 방향에 형성되는 부엽 준위의 높낮이가 방향과

* First Author : Sejong University Department of Electrical Engineering, jslim@sejong.ac.kr, 종신회원

^o Corresponding Author : Gangwon State University Department of Drone Convergence, pyk12@naver.com, 정회원
 논문번호 : 202202-020-A-RN, Received February 13, 2022; Revised June 9, 2022; Accepted June 18, 2022

다 고르지 못한 경우에, 재머 등 방향성 방해 신호로부터 레이더나 소나가 방해받을 때 부엽 준위가 낮은 방향으로 재밍 신호가 들어오면 감쇄가 많이 되어 전체 수신 신호의 신호 대 잡음 비가 높게 유지되지만, 부엽 준위가 높은 방향으로 재밍 신호가 들어오면 감쇄가 덜 되어서 전체 수신 신호의 신호 대 잡음 비가 열화된다. 전체 시스템의 성능은 제일 취약한 경우에 의해서 결정되므로 부엽 준위가 높은 방향으로 재밍 신호가 들어오는 상황에 해당하는 수신 신호의 신호 대 잡음 비를 전체 시스템의 대표 신호 대 잡음 비로 평가하게 된다. 감시용 안테나나 소나 시스템에선 모든 부엽 방향에 대해서 가능한 한 같으면서 높은 신호 대 잡음 비를 보장하는 것이 요구된다. 이를 위해서 모든 부엽 준위가 편차 없이 같으면서도 낮게 유지하는 빔 설계가 바람직하다^{4,5)}.

광대역 빔형성기 설계법 중 Frost⁷⁾는 각 센서마다 FIR (Finite Impulse Response) 필터 형식의 구조를 사용한 광대역 배열 빔 형성기 설계법을 소개하였다. 이 방법은 현재까지 많은 연구자에게 기본 방법으로 채택되고 있다. 그리고 Lebreton와 Boyd⁸⁾에 의해서 Convex 최적화법을 사용할 수 있도록 변형된 설계법이 만들어졌다. 그 외에도 Frost가 제안한 방법의 성능을 보완하기 위한 많은 방법이 존재한다⁹⁻¹³⁾. 그중에서 빔의 지향각에서 설계 주파수 범위에 걸쳐 광대역 빔 형성기의 일관성을 제어하기 위해 RV (Response Variation) 제약 조건도 도입되었다¹¹⁻¹³⁾. Zhao 등은 주파수 부 채널로 나뉜 광대역 빔형성기에 RV를 적용하여 최소 자승법으로 고정 빔 형성기를 설계하는 방법을 제안하였다¹¹⁾. 이는 Lebreton와 Boyd 방법을 여러 개의 주파수 부 채널로 바꾸고 RV 적용으로 지향각의 주 빔에 일관성을 더했다는 의의가 있다¹¹⁾. Chen 등은 RV와 잡음 상관 행렬을 일정 비율로 합하는 방법으로 광대역 적응 빔형성기를 제안하였다. 이 방법은 합하는 비율에 따라서 간섭 신호 제거 성능과 지향 빔의 일관성 사이에서 설계자가 더 선호하는 바를 선택하는 방법으로서 의의가 있었다¹²⁾. R. Du 등은 Chen의 방법을 좀 더 이론적으로 정리하여 간섭 신호 제거와 지향 빔 일관성을 동시에 유지하는 두 가지 고정 빔 설계법을 제안하였다. R. Du 등은 RV의 영향을 다양한 실험을 통해서 알렸다¹³⁾. 앞서 언급한 연구 결과들은 주로 특정 방향으로 도래하는 간섭 신호 제거에 방점을 두고, 이에 RV로 지향각의 주 빔의 일관성을 유지하는 방법들이라고 할 수 있다.

본 논문은 R. Du 등이 참고문헌 [13]에 소개한 RV를 적용한 광대역 빔형성기 설계법에다 형성된 빔의

부엽 준위를 제한하는 제약 조건을 추가하여, 넓은 주파수 폭에서 빔의 주엽의 변동이 적고, 빔의 부엽 준위가 원하는 수준으로 제한되는 새로운 최적화 식을 만든다. 또 그 최적화 식이 다양한 최적화 도구나 방법에 쉽게 적용될 수 있는 변형된 형태의 최적화 식도 만든다. 그리고 비교 실험을 통해서 제안한 방법으로 광대역 빔을 형성하여, RV 도입 전과 후 및 부엽 준위 제한 도입 전과 후의 광대역 빔 형성기의 빔 특성을 서로 비교하였다.

II. 최대 에너지 접근법을 통한 광대역 빔형성기 배경 이론

그림 1과 같이 M개 센서 및 J 탭이 있는 광대역 배열에서, 빔 형성기 출력은 모든 MJ개의 가중 탭 신호의 합입니다. 광대역 배열의 MJ×1 가중치 벡터 w 은 다음과 같이 정의된다.

$$w = [w_{1,1}, \dots, w_{M,1}, \dots, w_{1,J}, \dots, w_{M,J}]^T, \quad (1)$$

여기서 위첨자 T는 전치행렬을 나타낸다. 이를 이용한 배열의 응답은 다음과 같다.

$$G(f, \theta) = w^H s(f, \theta), \quad (2)$$

여기서 H는 복소수 행렬의 켈레 전치를 의미한다. $s(f, \theta)$ 는 공간 응답 벡터이고 다음과 같이 정의한다.

$$s(f, \theta) = s_r(f) \otimes s_t(f, \theta), \quad (3)$$

여기서 \otimes 는 코르넬커 곱이고, $s_r(f)$ 와 $s_t(f, \theta)$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$s_r(f) = [1, e^{-j2\pi f T_s}, \dots, e^{-j2\pi f (J-1)T_s}]. \quad (4)$$

$$s_t(f, \theta) = [e^{j2\pi f \tau_1(\theta)}, e^{j2\pi f \tau_2(\theta)}, \dots, e^{j2\pi f \tau_M(\theta)}]. \quad (5)$$

여기서 T_s 는 시간의 샘플링 간격이다. $\tau_i(\theta)$ 는 i번째 배열 요소에 대한 전파 지연 값이다. 위와 같은 광대역 배열에서의 원하는 방향에 지향성을 갖는 빔 패턴 합성은 신호 에너지와 잡음에너지 간의 비의 최대화로 나타낼 수 있다¹³⁾.

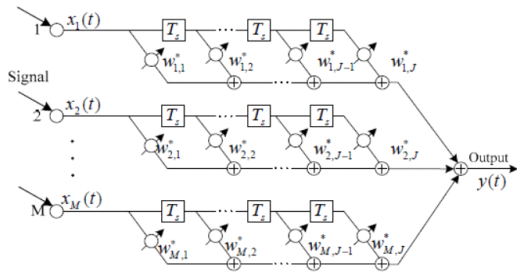


그림 1. 광대역 빔형성기 구조
Fig. 1. Broadband beamformer structure.

$$\max_{\mathbf{w}} \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{ML} \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{SL} \mathbf{w}}, \tag{6}$$

s.t. $G(f, \theta_0) = 1, f_L \leq f \leq f_U,$

여기서 f_L 은 배열 사용 주파수의 하한이고 f_U 는 배열 사용 주파수 상한을 의미한다. θ_0 는 지향각이다. 또 $\mathbf{R}_{ML} = \int \int_{\Omega_{PB} \theta_{SL}} \mathbf{s}(f, \theta) \mathbf{s}(f, \theta)^H d\theta df$ 이고, $\mathbf{R}_{SL} = \int \int_{\Omega_{PB} \theta_{SL}} \mathbf{s}(f, \theta) \mathbf{s}(f, \theta)^H d\theta df$ 이다. Ω_{PB} 는 f_L 부터 f_U 에 이르는 사용 주파수 대역이고, θ_{ML} 는 빔형성기 주엽이 존재하는 각도 범위이고, θ_{SL} 는 빔형성기 부엽이 존재하는 각도 범위이다.

III. 부엽 제한 기능과 응답 변화량 최소화가 적용된 광대역 빔형성기 설계법

참고문헌 [13]에서는 지향각에 대해서 넓은 설계 주파수대에서 빔형성기의 응답의 변화량을 조절하기 위해서 다음 식과 같은 응답 변화량(RV)이 제안되었다.

$$RV = \int \int_{\Omega_{PB} \theta_{ML}} \left| \mathbf{w}^H \mathbf{s}(f, \theta) - \mathbf{w}^H \mathbf{s}(f_0, \theta) \right|^2 d\theta df \tag{7}$$

$$= \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{RV} \mathbf{w}$$

여기서

$$\mathbf{R}_{RV} = \int \int_{\Omega_{PB} \theta_{ML}} (\mathbf{s}(f, \theta) - \mathbf{s}(f_0, \theta)) (\mathbf{s}(f, \theta) - \mathbf{s}(f_0, \theta))^H d\theta df \text{ 이다.}$$

RV의 의미는 기준 주파수에서 주 빔에 해당되는 모든 각도에서의 빔 응답과 관심 있는 모든 주파수에서 주 빔에 해당하는 모든 각도에서의 빔 응답 간의 차이 에너지의 평균을 의미한다. 이는 마치 기준 주파

수에서 주 빔에 해당하는 모든 각도에서의 빔 응답을 평균으로 삼았을 때의 분산과 같다. RV은 주 빔이 존재해야만 하는 범위를 정확하게 유지하는 역할을 한다. 이는 앞 절에서 소개된 광대역 빔 형성기를 위한 식인 식(6)에서 부엽이 존재하는 각도 영역과 지향각만을 지정하여 주 빔의 영역을 간접적으로 표시하는 것보다 훨씬 많은 정보를 최적화를 위해 제공하고 있다고 할 수 있다.

참고문헌 [13]에서는 위 응답 변화량을 적용하여 식(6)을 수정한 새로운 광대역 빔 패턴 합성을 위한 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\max_{\mathbf{w}} \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{ML.ref} \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H (\mathbf{R}_{SL.ref} + \alpha \mathbf{R}_{RV}) \mathbf{w}},$$

s.t. $G(f_0, \theta_0) = 1,$ (8)

$$\mathbf{R}_{ML.ref} = \int_{\theta_{SL}} \mathbf{s}(f_0, \theta) \mathbf{s}(f_0, \theta)^H d\theta,$$

$$\mathbf{R}_{SL.ref} = \int_{\theta_{SL}} \mathbf{s}(f_0, \theta) \mathbf{s}(f_0, \theta)^H d\theta.$$

그리고 α 는 RV의 영향을 조절하는 상수로써 주엽의 주파수간 변화량이 적도록 하는 데 영향을 미친다. 보통은 1보다 큰 수로 설정한다^[13].

식(8)을 보면 지향성과 광대역에서 주파수 응답 변동이 적게 하는 것이 있지만 빔의 부엽 준위를 일정 수준 이하로 유지할 수 없다. 이렇게 부엽 준위를 제한하지 않으면, 주파수마다 부엽 준위가 달라지게 되고 이는 서론에서 기술한 것과 같이 형성된 부엽 중에서 제일 나쁜 부엽 준위를 형성하는 주파수대에 의해서 전체 빔 형성기의 신호 대 잡음 비가 좌우되게 된다. 따라서 식(8)에 형성된 빔의 부엽 준위를 일정 수준 이하로 유지하도록 변형할 필요가 있다. 본 논문에서는 다음 식(9)과 같이 변형하여 목적에 맞는 부엽 준위 조절 기능이 있는 광대역 주파수 빔 설계식을 만들었다.

$$\max_{\mathbf{w}} \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{ML.ref} \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H (\mathbf{R}_{SL.ref} + \alpha \mathbf{R}_{RV}) \mathbf{w}},$$

s.t. $\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{SL} \mathbf{w} \leq SLL, G(f_0, \theta_0) = 1, f_L \leq f \leq f_U,$ (9)

$$\mathbf{R}_{ML.ref} = \int_{\theta_{SL}} \mathbf{s}(f_0, \theta) \mathbf{s}(f_0, \theta)^H d\theta,$$

$$\mathbf{R}_{SL.ref} = \int_{\theta_{SL}} \mathbf{s}(f_0, \theta) \mathbf{s}(f_0, \theta)^H d\theta.$$

여기서 SLL (sidelobe level)은 회망 부엽 준위의 상

한값이다.

위 식(9)는 두 개의 제한 조건이 있는 일반 고유치 문제로 볼 수 있다. 좀 더 구체적으로 말하면 두 개의 제한 조건이 있는 일반 고유치 중 최댓값에 해당하는 고유벡터를 구하는 문제라고 할 수 있다. 따라서 다중 제한 조건이 있는 일반 고유치 최대화 문제로 풀어야 한다. 이 식을 다양한 최적화 문제 풀이에 많이 사용되는 CVX 툴^[14]이나 또는 적응 알고리즘과 같은 제차 식으로 만들기 위해서는 식(9)의 형태를 변형할 필요가 있다. 본 논문에서는 이를 위해 식(10)과 같이 변형하였다.

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{w}} \left[\mathbf{w}^H (\mathbf{R}_{\text{SL,ref}} + \alpha \mathbf{R}_{\text{RV}}) \mathbf{w} - \ln(\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{\text{ML,ref}} \mathbf{w}) \right], \\ & \text{s.t. } \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{\text{SL}} \mathbf{w} \leq \text{SLL}, G(f_0, \theta_0) = 1, \\ & \mathbf{R}_{\text{ML,ref}} = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} s(f_0, \theta) s(f_0, \theta)^H d\theta, \\ & \mathbf{R}_{\text{SL,ref}} = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} s(f_0, \theta) s(f_0, \theta)^H d\theta. \end{aligned} \quad (10)$$

이런 변형을 식(6)과 같은 일반 고유치 문제에 적용할 때, 수렴성과 정확성이 우수한 것으로 알려져서 여러 연구자에 의해서 성공적으로 사용된 바 있다^[15-17]. 따라서 식(9)와 같은 제한 조건이 있는 일반 고유치 최적화 문제의 경우에 바람직한 변형이라고 할 수 있다.

IV. 실험

본 실험에서는 그림 2와 같은 선형 배열에 대해서 광대역 빔형성기를 설계한다. 특히 총 20개의 무지향성 센서를 사용한 선형 배열에 대해서 각 센서 후단에 4탭 FIR 필터를 사용한 광대역 빔을 형성하였다.

사용 주파수 상한이 사용 주파수 하한의 두 배가

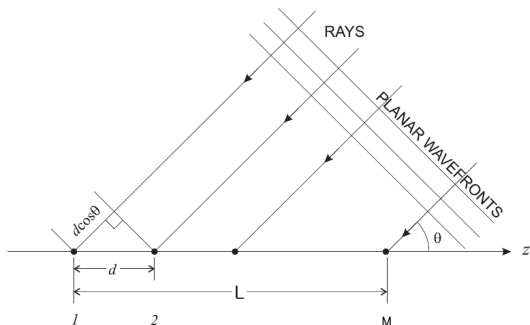


그림 2. 선배열 모델
Fig. 2. Line array model.

되도록, $f_U = 2f_L$ 인 한 옥타브 대역에서 동작하고 지향

각은 $\theta = 90^\circ$ 인 빔 형성기를 식(6), 식(8)과 식(9)를 사용하여 각각 설계하고 그 결과를 비교하였다. 설계할 때에 기준 주파수는 $f_o = (f_L + f_U)/2$ 로 하였고, 샘플링 주파수는 f_U 의 4배인 것으로 설정하였다. 또 식(9)와 식(10)에서 α 값을 정하기 위해서 제안한 빔형성 식(9)와 식(10)에서 RV에 대한 가중치 α 에 따라 전체 사용 주파수 폭 안에서 주 빔의 변화폭 및 신호 대 잡음비를 최대로 하며 얻을 수 있는 최대 부엽 준위를 조사하기 위해서 가중치 α 값을 0.1, 1, 10, 100, 1000으로 바꿔가면서 설계 결과를 얻었다. 그리고 그 결과를 RV만 사용하는 빔형성 방법인 식(8)^[13]의 결과와 비교하여 표 1에 정리하였다.

식(9)와 식(10)과 같이 RV와 부엽 수준을 동시에 고려한 광대역 빔형성기의 경우 가중치 α 가 0.1에서 α 가 10으로 증가할 때 주파수간 주 빔폭의 편차가 식(9)는 -5.3 dB만큼 줄고, 식(10)은 -4.3dB만큼 주는 데 비해 가중치 α 가 10에서 1000으로 증가할 때 주 빔 폭의 편차가 식(9)는 -1.3 dB만큼 줄고, 식(10)은 -0.2dB만큼 준다. 즉 주 빔폭 편차의 축소 정도가 확연히 작아진다. 그러나 모든 가중치에서 식(9)와 식(10) 두 방법 모두 얻을 수 있는 부엽 준위의 최고

표 1. RV 가중치 변화에 따른 광대역 빔형성 결과 비교
Table 1. Comparison of broadband beamforming results according to RV weight change

Broadband Beam - forming Algorithm	weight α	Max SLL ¹⁾ [dB]	Standard deviation of HPBW ²⁾ [deg]
Beamform -ing only with RV in (8)[13]	0.1	-28.6	0.252
	1	-27.8	0.19
	10	-27.1	0.151
	100	-26.5	0.128
Beamform -ing with RV and SLL constraint in (9)	0.1	-31.6	0.35
	1	-31.6	0.28
	10	-31.6	0.19
	100	-31.6	0.175
Beamform -ing with RV and SLL constraint in (10)	0.1	-31.6	0.186
	1	-31.6	0.135
	10	-31.6	0.113
	100	-31.6	0.112
	1000	-31.6	0.111

1) SLL: sidelobe level. 2) HPBW: half power band width.

치는 -31.6으로 같다. 반면에 식(8)과 같이 RV만을 고려한 광대역 빔형성기는 가중치 α 가 0.1에서 α 가 10으로 증가할 때 주 빔폭의 편차가 -4.5dB만큼 줄고 가중치 α 가 10에서 1000으로 증가할 때 주 빔폭의 편차가 -5.4dB만큼 준다. 즉 편차는 계속 줄어들음을 알 수 있다. 그렇지만 얻을 수 있는 부엽 준위의 최고값은 -28.6dB에서 -25.4로 점점 커지는 경향도 동반되고 있다. 따라서 우리는 가중치 α 가 10을 요소수 20인 경우에 쓰기에 가장 좋은 가중치로 선택하였다. 또 부엽 준위 상한은 -31dB로 설정하였다. 표 1로부터 하나 더 알 수 있는 것은 제한한 식(10)을 사용한 경우 식(9)를 사용하였을 때보다 같은 가중치에 대해서 더 적은 주 빔폭 변화가 나타났다. 이는 앞서 언급하였듯이 식(10)이 좀 더 좋은 품질의 최대 고유치를 얻기 때문에 풀이할 수 있다¹⁵⁻¹⁷. 그리고 가능한 고른 부엽 준위를 얻기 위해서 -31dB보다 높은 부엽 준위로부터 순차적으로 내려가면서 최적화를 반복하였다. 또 식(10)의 최적화를 위해서 CVX 툴¹⁴을 사용하였다. 그뿐만 아니라 결과를 서로 비교하기 위해서 식(6)과 식(8)도 CVX 툴¹⁴을 사용하여 최적 해를 구하였다. 제한한 광대역 빔 설계 방법의 유용성을 보이기 위해서 RV 없이 전통적인 방식으로 광대역 빔형성 최적화 방법인 식(6)을 이용한 광대역 빔 형성기 설계법

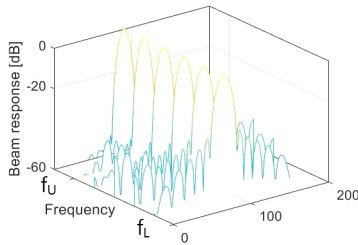
을 사용하여 결과를 그림 3에 보였다.

그림 3을 보면 주엽의 지향각은 원하는 곳을 향하고 있지만, 전 주파수 대역에서 주엽의 폭의 변화가 많음을 알 수 있다. 또 주엽을 제외한 부엽의 준위가 고르지 못할 뿐만 아니라 일부 빔의 최대 부엽 준위는 약 -29dB에 이르렀다. 따라서 이 빔에 의해서 전체 빔의 잡음에 대한 성능이 나빠지게 됨을 알 수 있다.

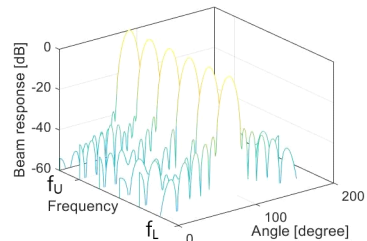
다음은 RV를 가중치를 적용하여 사용하는 광대역 빔형성 최적화 방법인 식(8)을 이용한 빔 형성기 설계 결과를 그림 4에 보인다. 그림 4를 보면 부엽 준위는 그림3과 유사하여 일부 부엽 최대 준위가 -27dB에 이르는 것을 알 수 있으나, 주 빔의 변화는 설계식에서 RV를 고려함으로써 훨씬 일정하게 형성되어 있음을 볼 수 있다.

다음은 RV 없이 전통적인 방식으로 광대역 빔형성 최적화 방법인 식(6)에 식(9)에서 사용한 부엽 준위 제한 조건을 더한 경우의 결과를 그림 5에 보인다. 그림 5를 보면 부엽 준위는 잘 조절하고 있으나 주 빔의 폭의 그림 3처럼 많은 변동이 있음을 알 수 있다.

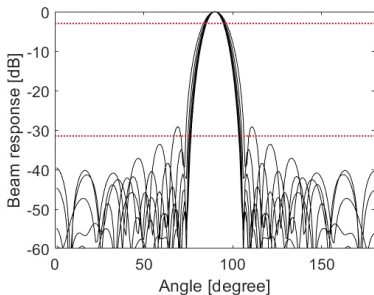
다음은 본 논문이 제안한 첫 번째 최적화 방법인 식(9)을 이용한 빔 형성기 설계 결과를 그림 6에 보인다. 그림 6을 보면 부엽 준위는 설계 목표에 가깝게 제어되고 있으며, 주 빔의 변화도 RV를 고려함으로써



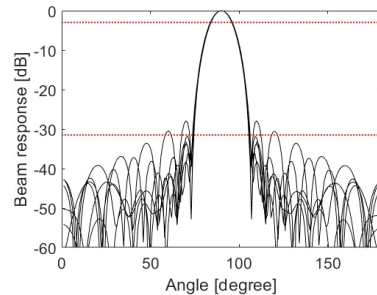
(a) waterfall plot for beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$.



(a) waterfall plot for beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$.



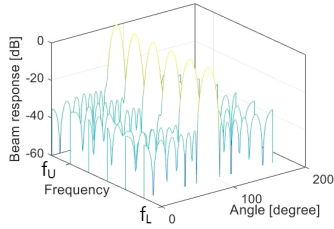
(b) beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$.



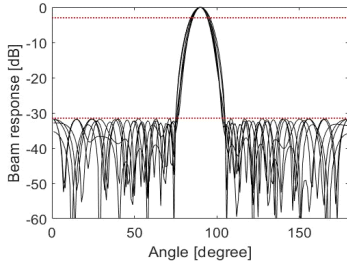
(b) beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$.

그림 3. 식 (6)을 사용한 광대역 빔형성 결과.
Fig. 3. Result of broadband beampattern by Eq.(6).

그림 4. 식 (8)을 사용한 광대역 빔형성 결과.
Fig. 4. Result of broadband beampatter by Eq.(8).

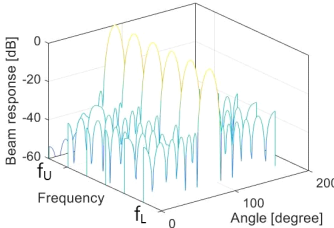


(a) waterfall plot for beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$.

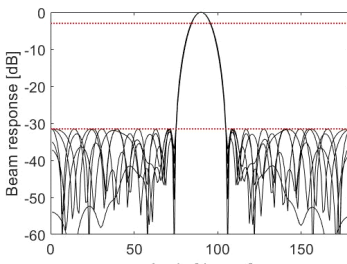


(b) beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$.

그림 5. 식 (6)과 부엽 준위 제한을 사용한 광대역 빔형성 결과.
Fig. 5. Result of broadband beampatter by Eq.(6) with sidelobe level constraint.



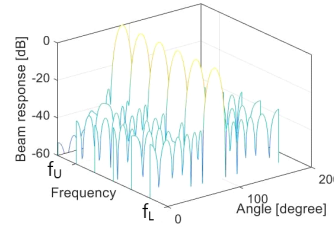
(a) waterfall plot for beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$.



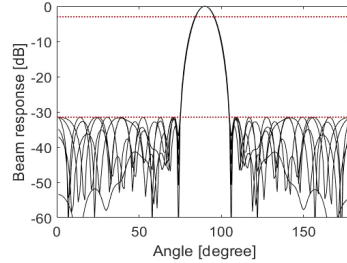
(b) beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$.

그림 6. 식 (9)을 사용한 광대역 빔형성 결과.
Fig. 6. Result of broadband beampatter by Eq.(9).

그림 4와 마찬가지로 설계 주파수 전 대역에 걸쳐서 상당히 일정하게 형성되어 있음을 볼 수 있다.



(a) waterfall plot for beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$.



(b) beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$.

그림 7. 식 (10)을 사용한 광대역 빔형성 결과.
Fig. 7. Result of broadband beampatter by Eq.(10).

다음은 본 논문이 제안한 두 번째 최적화 방법인 식(10)을 이용한 빔 형성기 설계 결과를 그림 7에 보인다. 그림 7을 보면 표 1에 정리한 것과 같이 식(9)를 적용한 그림 6과 외견상 같은 결과를 보임을 알 수 있다. 그러나 표 1에서 정리한 것과 같이 수치상의 주 빔의 변동은 식(9)를 적용한 것보다는 적다.

그림 6과 그림 7의 결과로부터 보면, 제안한 식 (9)와 식(10)을 사용한 빔 형성은 부엽 준위는 균등하게 낮게 유지하면서, 주 빔의 변화까지도 RV를 고려함으로써 설계 주파수 전 대역에 걸쳐서 고른 특성의 빔을 형성할 수 있음을 알 수 있다.

마지막으로 그림 3, 그림 4, 그림 5, 그림 6과 그림 7에 표시한 빔 형성 결과를 표로 정리하여 다음과 같이 정리하였다.

표 2를 보면 본 논문에서 제안한 식(9)와 식(10)을 통해서 주 빔폭 변화를 최소화하고, 그와 더불어 부엽 수준에 대한 제한을 통해서 전 부엽 수준이 일정 수준 이상 오르지 않도록 통제할 수 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 광대역 빔 형성기 설계법을 제안하였다. 관심 대역에서 좀 더 고른 주 빔 특성을 얻기 위해서 R. Du 등이 만든 빔형성기 설계식에 부엽 준위 제어

표 2. 알고리즘별 광대역 빔형성 결과 비교 ($\alpha=10$)
 Table 2. Comparison of broadband beamforming results by algorithm

Broadband beamforming algorithm	Max SLL [dB]	Standard deviation of HPBW [deg]
Beamforming in (6) in Fig. 3	-28.3	0.559
Beamforming with SLL constraint in (6) in Fig. 4	-32	0.62
Beamforming only with RV in (8) ^[13] ($\alpha=10$) in Fig. 5	-27.1	0.151
Beamforming with RV and SLL constraint in (9) ($\alpha=10$) in Fig. 6	-31.6	0.19
Beamforming with RV and SLL constraint in (10) ($\alpha=10$) in Fig. 7	-31.6	0.113

를 도입하여 사용 주파수 대역에서 주 빔 특성의 변동이 적응과 동시에 부엽의 수준을 제어할 수 있게 되었다. 또 실험을 통해서 제안한 방법이 목표한 부엽 준위 제어 특성과 주 빔 변화 최소화를 같이 갖추고 있음을 보였다.

References

[1] V. Veen and K. M. Buckley, "Beamforming: a versatile approach to spatial filtering," *IEEE ASSP Mag.*, vol. 5, no. 2, pp. 4-24, Apr. 1988. (<https://doi.org/10.1109/53.665>)

[2] S. Yan, "Optimal design of FIR beamformer with frequency invariant patterns," *Appl. Acoust.*, vol. 67, no. 6, pp. 511-528, Jun. 2006. (<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.09.008>)

[3] E. L. Hixson and K. T. Au, "Wide-bandwidth constant beamwidth acoustic array," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 48, no. 1, p. 117, Jan. 1970. (<https://doi.org/10.1121/1.1974937>)

[4] B. D. Steinberg, *Principles of aperture & array system design*, John Wiley & Sons, pp. 110-111, 1976.

[5] Y. Albagory and F. Alraddady, "An efficient approach for sidelobe level reduction based on recursive sequential damping," *Symmetry*, vol.

13, no. 3, pp. 1-22, Mar. 2021. (<https://doi.org/10.3390/sym13030480>)

[6] L. Shi, Y. Deng, H. Sun, R. Wang, J. Ai, and H. Yan, "An improved real-coded genetic algorithm for the beam forming of spaceborne SAR," *IEEE Trans. AP*, vol. 60, no. 6, pp. 3034-3040, Jun. 2012. (<https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2194642>)

[7] O. L. Frost, "An algorithm for linearly cconstrained adaptive array processing," in *Proc. IEEE*, vol. 60, no. 8, pp. 926-935, Aug. 1972. (<https://doi.org/10.1109/PROC.1972.8817>)

[8] H. Lebreit and S. Boyd, "Antenna array pattern synthesis via convex optimization," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 45, no. 3, pp. 526-532, Mar. 1972. (<https://doi.org/10.1109/78.558465>)

[9] D. B. Ward, R. A. Kennedy, and R. C. Williamson, "Theory and design of broadband sensor arrays with frequency invariant far-field beam patterns," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 97, no. 2, pp. 1023-1034, Feb. 1995. (<https://doi.org/10.1121/1.412215>)

[10] D. B. Ward, R. A. Kennedy, and R. C. Williamson, "FIR filter design for frequency invariant beamformers," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 3, no. 3, pp. 69-71, Mar. 1996. (<https://doi.org/10.1109/97.481158>)

[11] Y. Zhao, W. Liu, and R. J. Langley, "Subband design of fixed wideband beamformers based on the least squares approach," *Signal Process.*, vol. 91, no. 4, pp. 1060-1065, Apr. 2011. (<https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.09.016>)

[12] P. Chen, Y. Zhao, and C. Liu, "A novel adaptive wideband frequency invariant beamforming algorithm for conformal arrays," in *Proc. Int. Radar Symp. 2017*, pp. 1-10, Prague, Czech Republic, Jun. 2017.

[13] R. Du, Y. Fan, and J. Wang, "Design of fixed wideband beamformer through improved maximum energy approach," *J. Electr. and Comput. Eng.*, vol. 2016, no. 7912364, pp. 1-7, Jun. 2016. (<https://doi.org/10.1155/2016/7912364>)

- [14] S. Boyd, *CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming*, Retrieved Dec. 2, 2021, from <http://cvxr.com>.
- [15] J. Yang, F. Yang, H. Xi, W. Guo, and Y. Sheng, "Robust adaptive modified newton algorithm for generalized eigendecomposition and its application," *EURASIP J. Advances in Signal Proc.*, vol. 2007, no. 38341 pp. 1-10, Dec. 2007.
(<https://doi.org/10.1155/2007/38341>)
- [16] J. Yang, H. Hu, and H. Xi, "Weighted non-linear criterion-based adaptive generalised eigen-decomposition," *IET SIGNAL Proc.*, vol. 7, no. 4, pp. 285-295 Jun. 2013.
(<https://doi.org/10.1049/iet-spr.2012.0212>)
- [17] J. Lim, "A study on robust recursive total least squares algorithm based on iterative wiener filter method," *J. Acoust. Soc. Kr.*, vol. 40, no. 3 pp. 213-218, May 2021.
(<https://doi.org/10.7776/ASK.2021.40.3.213>)

편 응 국 (Yong-Guk Pyeon)



1993년 2월: 강원대학교 전자공학과 학사 졸업
1996년 2월: 관동대학교 전자공학과 석사 졸업
2004년 2월: 세종대학교 전자공학과 박사 졸업
2004년 9월~현재: 강원도립대학 드론융합과 부교수

<관심분야> 신호 처리

임 준 석 (Jun-Seok Lim)



1986년 2월: 서울대학교 전자공학과 학사 졸업
1988년 2월: 서울대학교 전자공학과 석사 졸업
1996년 8월: 서울대학교 전자공학과 박사 졸업
1996년 7월~1997년 10월: LG 종합기술원

1998년 3월~현재: 세종대학교 전자정보통신공학과 교수

<관심분야> 신호처리