

공간 응답 변화량을 적용한 광대역 빔 형성기 설계법

A study on the broadband beam pattern synthesis using spatial response variation

임준석,^{1†} 이근화,² 안재균³

(Jun Seok Lim,^{1†} Keunhwa Lee,² and Jae-Kyun Ahn³)

¹세종대학교 전자정보통신공학과, ²세종대학교 국방시스템공학과, ³국방과학연구소
(Received February 11, 2020; revised March 23, 2020; accepted March 31, 2020)

초 록: 본 논문은 공간 응답 변화량(Spatial Response Variation, SRV)을 사용한 광대역 빔 형성 방법을 제안한다. SRV를 정규화 항으로 적용하여 목표하는 주파수 대역에서 주 빔 폭의 변동이 약 1도 이내로 적은 양질의 광대역 빔 패턴을 얻도록 하였다. 설계 실험에서 제안된 방법이 기존 방법보다 낫다는 것을 입증하였다.

핵심용어: 광대역 빔형성기, 공간 응답 변화량, 주파수 불변 빔패턴, 볼록 최적화

ABSTRACT: In this paper, we propose a broadband beamforming method using the Spatial Response Variation (SRV) which is defined to measure the fluctuation of the array spatial response within the desired frequency band. By applying the SRV to regularization term, we achieve a good quality main beam width variation less than 1 degree within the desired frequency band. In design experiments, we show that the proposed method is better than the existing method.

Keywords: Broadband beamforming, Spatial Response Variation (SRV), Frequency Invariant BeamPattern (FIBP), Convex optimization

PACS numbers: 43.60.Fg, 43.60.Vx

1. 서 론

일반적으로 마이크로폰 및 라우드 스피커 배열을 사용하는 원격 회의와 같은 응용에서는 일정폭의 관심 주파수 대역에 걸쳐 균일한 빔 폭을 갖는 빔 패턴이 요구된다.^[1,2]

관심 있는 주파수 범위에 걸쳐 일정한 빔 폭을 얻기 위해 많이 쓰는 고조파 네스팅 접근법^[1,3]은 적절하게 선택된 여러 개의 서브 어레이를 사용하고 각각의 출력들을 결합한다.

Frost^[4]는 각 센서마다 Finite Impulse Response(FIR) 필터 형식의 구조를 설치하여서 광대역 배열 빔 형성기 설계법을 소개하였다. 이 방법은 현재까지 많

은 연구자들에게 기본 방법으로 채택되고 있다. 이 방법은 Le Bret와 Boyd^[5]에 의해서 볼록 최적화법으로 만들어졌다. Frost가 제안한 방법의 성능을 보완하기 위한 많은 방법들이 존재한다.^[6,7]

그 중에서 Spatial Response Variation(SRV)^[8] 제약 조건은 지향각에서 관심 있는 주파수 범위에 걸쳐 광대역 빔 형성기의 일관성을 제어하기 위해 도입되었다.

본 논문은 Le Bret와 Boyd가 만든 최적화 식에 SRV를 적용하여 새로운 최적화 식을 만들고, 이로부터 최종 구현된 광대역 빔 형성기의 주 빔 특성이 더욱 향상되도록 하였다. 그리고 비교 실험을 통해서 제안한 방법으로 광대역 빔을 형성하여, SRV 도입 전

†Corresponding author: Jun Seok Lim (jslim@sejong.ac.kr)

Department of Electrical Engineering, Sejong University, 209 Neungdong-ro, Guang-jin-gu, Seoul 05006, Republic of Korea
(Tel: 82-2-3408-3299, Fax: 82-2-3408-4329)



Copyright©2020 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

후의 광대역 빔 형성기의 주 빔 특성을 서로 비교하였다.

II. 광대역 빔형성기 배경 이론

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

$$w = [w_{1,1} \cdots w_{M1} \cdots w_{1,J} \cdots w_{M,J}]^T, \quad (1)$$

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.

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

여기서 \otimes 는 코로네커 곱이고, $s_1(f)$ 와 $s_r(f, \theta)$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

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

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

여기서 T_s 는 시간의 샘플링 간격이다. $\tau_i(\theta)$ 는 i번째

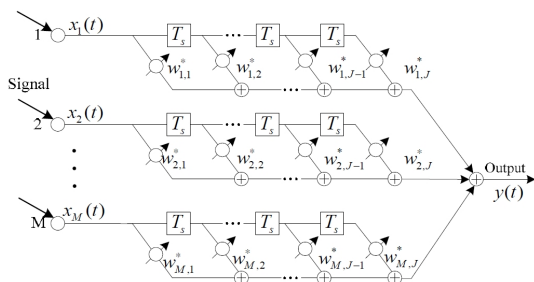


Fig. 1. Broadband beamformer structure.

배열에 대한 전파 지연 값이다. 위와 같은 광대역 배열에서의 빔 패턴 합성은 볼록 최적화 문제로 공식화 될 수 있으며 여기서 다음과 같이 표준 형식으로 정의된다.^[5]

$$\begin{aligned} & \min_w |A_s^H w|^2, \\ & \text{s.t.} \\ & G(f, \theta_o) = 1, f_L \leq f \leq f_U, \max |A_s^H w| \leq SLL, \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 Side Lobe Level(SLL)은 희망 부엽 주위 상한 값이다. f_L 은 배열 관심 주파수의 하한이고 f_U 는 배열 관심 주파수 상한을 의미한다. θ_o 는 지향각이다. A_s 는 부엽이 존재하기를 희망하는 모든 각도 범위에서의 공간 응답 벡터들로 이루어진 행렬이다. 즉 $A_s = [s(f_1, \theta_1)^T, \dots, s(f_i, \theta_j)^T, \dots, s(f_K, \theta_N)^T]$ 이다. K는 희망하는 주파수 밴드 중 선택된 K개의 주파수 값을 의미한다. 또 N은 공간각 중 주 빔 폭에 해당하는 공간각을 제외한 나머지 공간각을 균등하게 나눈 값이다. 이 Eq. (6)으로 설계된 빔의 성능은 원하는 주파수 범위 내에서 비교적 일정한 빔 폭을 제공한다. 그러나 각 주파수마다 빔 폭 변화가 존재한다. 따라서 빔 폭 변화가 좀 더 적은 방법의 도입이 필요하다.

III. 공간 응답 변화량을 적용한 광대역 빔형성 설계법

지향각에 대해서 설계 주파수대에서 빔형성기의 응답, 특히 빔 폭을 제어하기 위해서, 다음식과 같은 공간 응답 변화량(SRV)이 제안되었다.^[8]

$$\begin{aligned} SRV(\theta) &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |w^H (G(f_k, \theta) - G(f_o, \theta))|^2 \\ &= w^H D(\theta) w, \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 K는 희망하는 주파수 밴드 중 선택된 K개의 주파수 값을 의미한다. f_o 는 기준 주파수이고, $D(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$D(\theta) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |G(f_k, \theta) - G(f_o, \theta)|. \quad (8)$$

SRV의 의미는 기준 주파수에서 주 빔에 해당되는 모든 각도에서의 빔 응답과 관심 있는 모든 주파수에서 주 빔에 해당되는 모든 각도에서의 빔 응답간의 차이 에너지의 평균을 의미한다. 이는 마치 기준 주파수에서 주 빔에 해당되는 모든 각도에서의 빔 응답을 평균으로 삼았을 때의 분산과 같다. SRV은 주빔이 존재해야만 하는 범위를 정확하게 안내하는 역할을 한다. 이는 앞 절에서 소개된 광대역 빔 형성기를 위한 식인 Eq. (6)에서 부엽이 존재하는 각도 영역과 지향각만을 지정하여 주빔의 영역을 간접적으로 표시하는 것 보다는 훨씬 많은 정보를 최적화를 위해 제공하고 있다고 할 수 있다.

본 논문에서는 Eq. (7)과 같은 SRV을 Eq. (6)에 적용하여 목표하는 주파수 대역에서 빔의 주엽 폭 변동이 적은 광대역 빔 형성기를 설계하고자 다음과 같은 식을 제안한다.

$$\begin{aligned} & \min_w (1-r) \times |A_s^H w|^2 + r \times w^H D(\theta) w, \\ & \text{s.t.} \\ & G(f_o, \theta) = 1, f_L \leq f \leq f_U, \max |A_s^H w| \leq SLL, \\ & D(\theta) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |G(f_k, \theta) - G(f_o, \theta)|, \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 SLL은 희망 부엽 주위 상한 값이다. 또 r 은 상대 기여도로써 값의 범위는 $0 \leq r \leq 1$ 이다. 이 값으로 빔의 부엽 수준과 빔의 주엽 분산 간에 기여도를 조절한다. f_o 는 기준 주파수이고, f_U 은 배열 사용 주파수의 하한이고 f_L 은 배열 사용 주파수 상한을 의미한다. θ_o 는 지향각이다. A_s 는 부엽이 존재하기를 희망하는 모든 각도 범위에서의 공간 응답 벡터들로 이루어진 행렬이다.

IV. 실험

본 실험에서는 Fig. 2와 같은 선형 배열에 대해서 광대역 빔형성기를 설계한다. 특히 총 20개의 무지

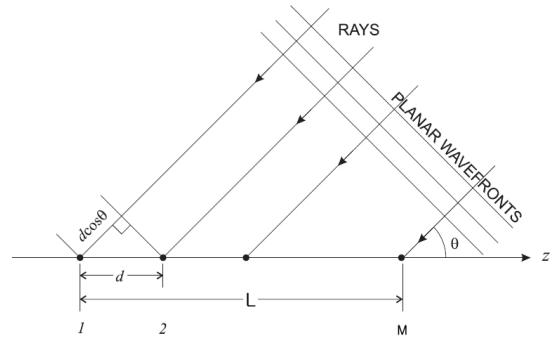


Fig. 2. Typical line array.

향성 센서를 사용한 선형 배열에 대해서 각 센서 후단에 4탭 FIR 필터를 사용한 광대역 빔 형성해 본다.

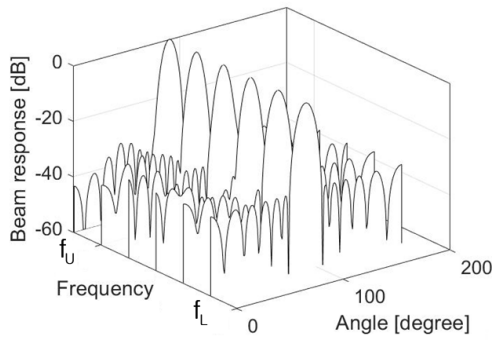
사용 주파수 상한이 사용 주파수 하한의 두 배가 되도록, $f_U = 2f_L$ 인 한 옥타브 대역에서 동작하고 지향각은 $\theta = 90^\circ$ 인 빔 형성기를 Eqs. (6)과 (9)를 사용하여 각각 설계하고 그 결과를 비교하였다. 설계 할 때에 기준 주파수는 $f_o = (f_L + f_U)/2$ 로 하였고, 샘플링 주파수는 f_U 의 4배인 것으로 설정하였다. 또 Eq. (9)에서 r 값을 0.1과 0.9로 설정하여 가중치의 역할도 살펴 보았다. 부엽 준위 상한은 -31 dB로 설정하였다. 그리고 가능한 고른 부엽 준위를 얻기 위해서 -31 dB보다 높은 부엽 준위로부터 순차적으로 내려가면서 최적화를 반복하였다.

제안한 광대역 빔설계방법의 유용성을 보이기 위해서 Reference [5]에서 소개된 Eq. (6)을 이용한 광대역 빔 형성기 설계법을 사용하여 결과를 Fig. 3에 보였다.

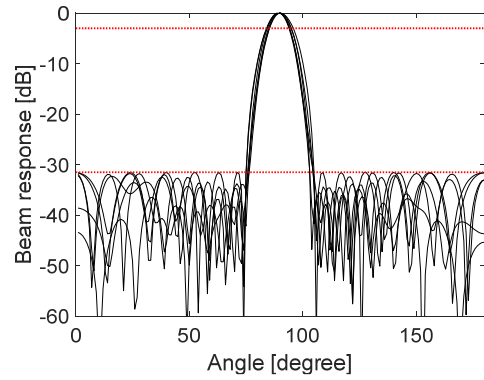
Fig. 3을 보면 약 -31 dB에 부준엽 준위가 형성되어 있고, 원하는 작용 주파수 대역에서 주빔이 비교적 고르게 형성되어 있음을 볼 수 있다.

다음은 본 논문이 제안한 Eq. (9)을 이용한 빔 형성기 설계 결과를 Fig. 4에 보인다. 특히 가중치 r 을 0.9로 설정하여 설계하였다.

Fig. 4를 보면 부엽 준위는 Fig. 3과 같으나 주빔의 훨씬 더 고르게 형성되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4을 좀 더 자세히 비교하기 위해서 두 결과의 빔 폭을 확대하여 비교한 것을 Fig. 5에 보였다. Fig. 5(a)는 Eq. (6)을 사용하여 설계한 경우 주빔의 -3 dB 주변을 확대한 그림이다. 이 그림을 보면 90° 보다 낮은 각도에서는 최소 84.2° 부터 최대 85.8° 까지 분포되어

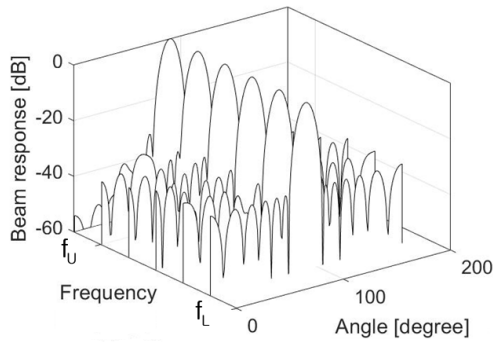


(a) Waterfall plot for beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$

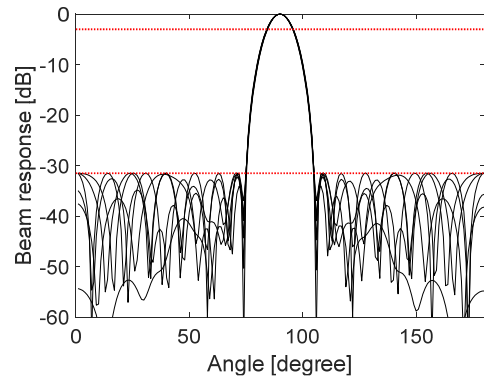


(b) Beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$

Fig. 3. (Color available online) Result of broadband beampattern by Eq. (6).

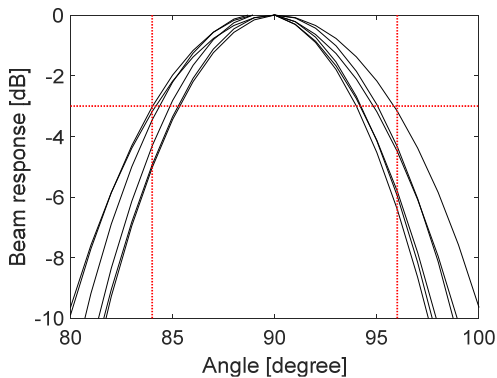


(a) Waterfall plot for beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$

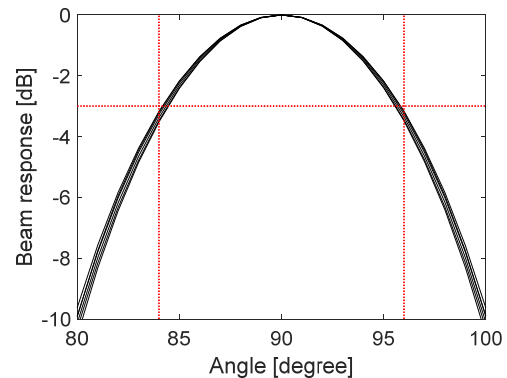


(b) Beampatterns at 6 frequencies within $[f_L, f_U]$

Fig. 4. (Color available online) Result of broadband beampatter by Eq. (9).



(a) Main lobe beam patterns from Fig. 3



(b) Main lobe beam patterns from Fig. 4

Fig. 5. (Color available online) Comparison of main lobe beam patterns between the result from Eq. (6) and the result from Eq. (9).

약 1.6° 사이에 분포되어 있다. 그리고 90° 보다 높은 각도에서는 최소 94.6° 부터 최대 95.8° 까지 분포되어 약 1.2° 사이에 분포되어 있다. Fig. 5(b)는 Eq. (9)을 사

용하여 설계한 경우 주 빔의 -3 dB 주변을 확대한 그림이다. 이 그림을 보면 90° 보다 낮은 각도에서는 최소 84.2° 부터 최대 84.5° 까지 분포되어 약 0.3° 사이에

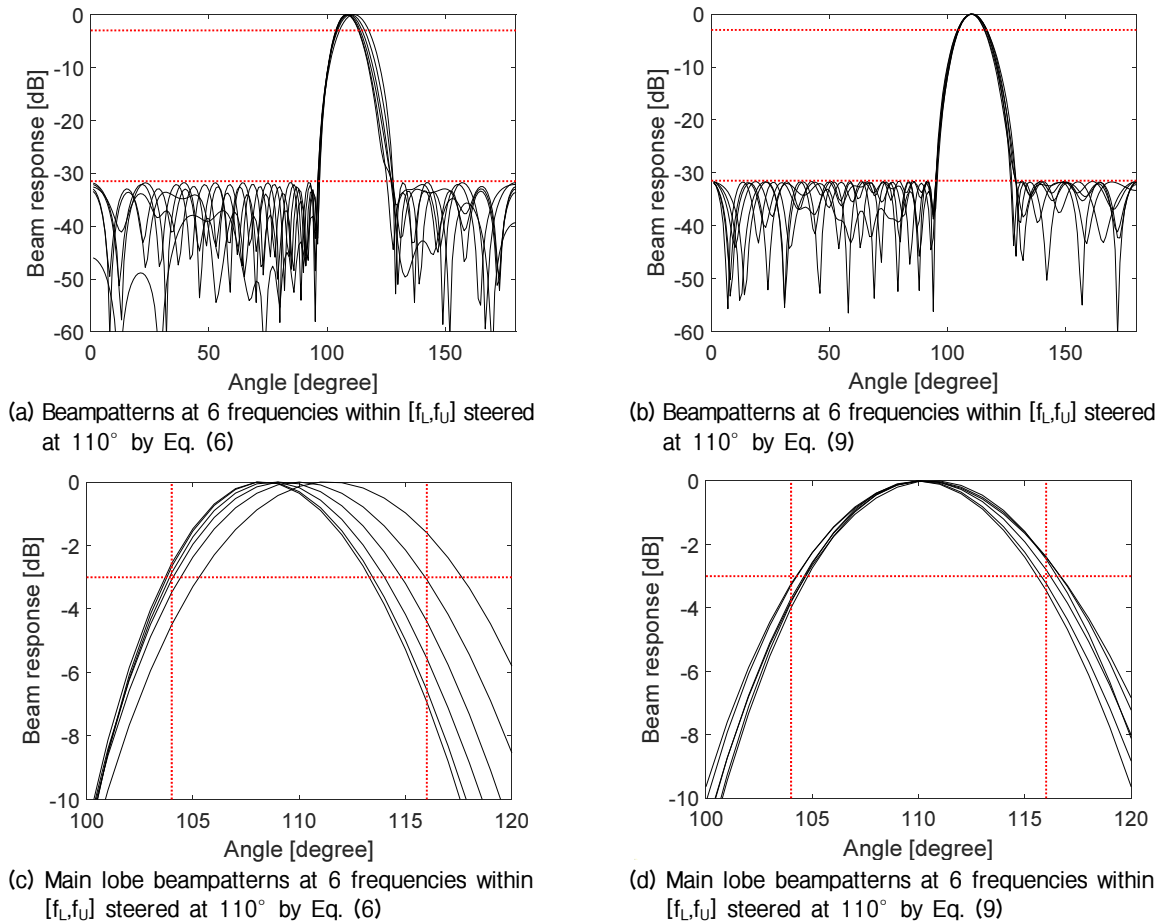


Fig. 6. (Color available online) Comparison of beampatterns with steering angle at 110° .

분포되어 있다. 그리고 90° 보다 높은 각도에서는 최소 95.5° 부터 최대 95.8° 까지 분포되어 약 0.3° 사이에 분포되어 있다. 즉 제안한 방법으로 설계된 빔이 Eq. (6)의 방법으로 설계한 결과보다 훨씬 더 주 빔 폭의 변동성이 적게 형성되었음을 확인할 수 있다.

다음 Fig. 6은 주 빔의 지향각을 Fig. 5의 지향각으로부터 20° 이동하도록 최적화한 결과를 비교한 것이다.

Fig. 6(a)는 Eq. (6)을 사용하여 설계한 경우 빔의 모양이고 Fig. 6(b)는 제안한 방법을 사용하여 설계한 경우 빔의 모양이다. 두 빔의 결과를 비교하기 위해서 Fig. 5에서와 같이 주 빔을 확대하여 각각 Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)에 각각 나타내었다. Fig. 6(c)를 보면 110° 보다 낮은 각도에서는 최소 103.7° 부터 최대 105.3° 까지 분포되어 약 1.6° 사이에 분포되어 있다. 그리고 90° 보다 높은 각도에서는 최소 114.0° 부터 최

대 117.6° 까지 분포되어 약 3.6° 사이에 분포되어 있다. Fig. 6(d)를 보면 110° 보다 낮은 각도에서는 최소 104.2° 부터 최대 104.7° 까지 분포되어 약 0.5° 사이에 분포되어 있다. 그리고 110° 보다 높은 각도에서는 최소 115.6° 부터 최대 116.7° 까지 분포되어 약 1.1° 사이에 분포되어 있다. 이 결과를 보면 지향각을 이동한 경우에도 제안한 방법으로 설계된 빔이 Eq. (6)의 방법으로 설계한 결과보다 훨씬 더 주 빔 폭의 변동성이 적게 형성되었음을 확인할 수 있다.

마지막으로 제안한 Eq. (9)으로 설계할 때 가중치 r 의 영향을 보기 위해서 r 을 0.1로 설정하여 설계해 보고 앞서 Fig. 4에서 r 을 0.9로 설정하여 설계한 결과와 비교한 것을 Fig. 7에 보인다.

Fig. 7(c)와 Fig. 7(d)를 보면 Eq. (9)를 이용한 설계에서 가중치 r 의 효과가 잘 나타난다. 즉 가중치 r 이 1에 가까울수록 Eq. (9)에서 SRV에 영향을 많이 받아서

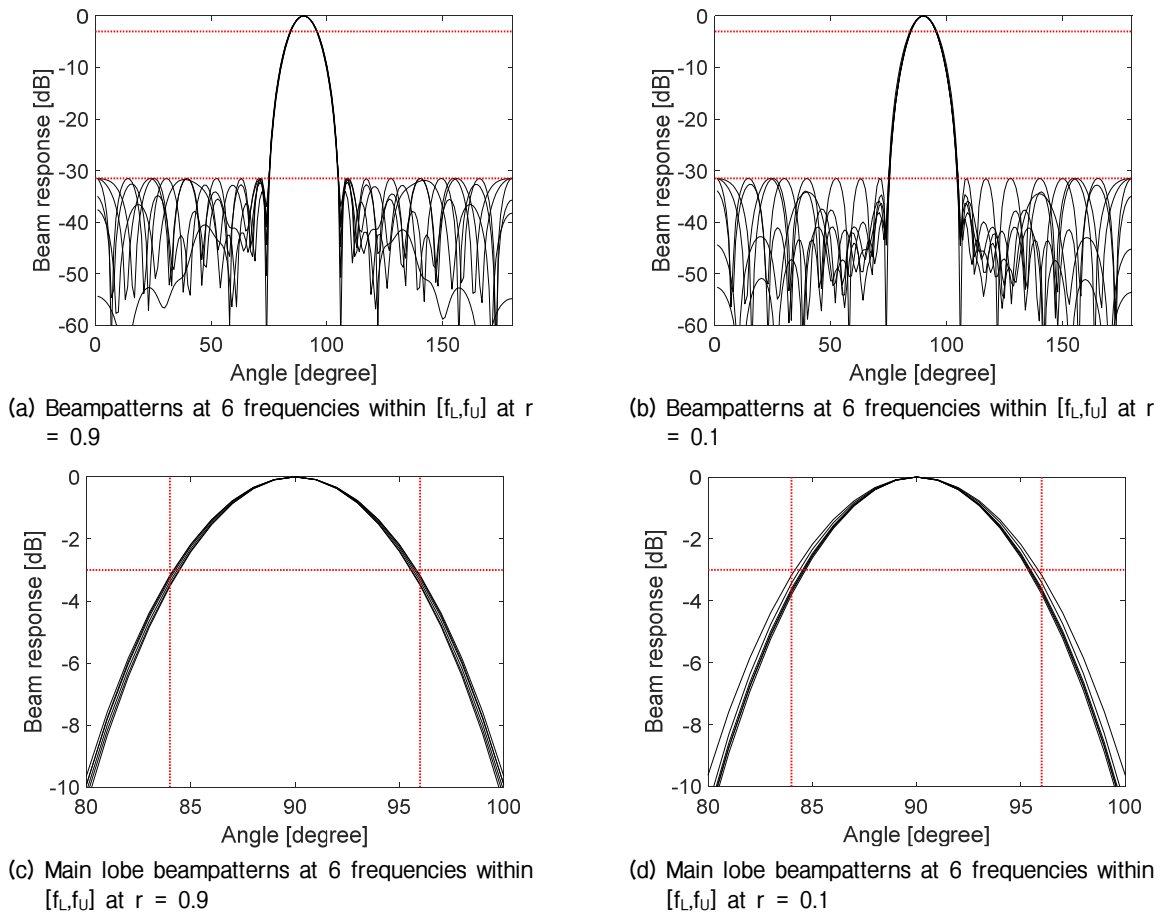


Fig. 7. (Color available online) Comparison of beampatterns between $r = 0.9$ and $r = 0.1$.

주 빔의 폭 변화가 적음을 알 수 있다. 그렇지만 Eq. (9)에서 알 수 있듯이 만약 $r=1$ 인 경우에는 Eq. (9)의 첫째 항이 담당하는 빔의 최대 부엽 수준을 제한하는 기능이 없어서 빔 형성에서 원하는 SLL을 얻을 수 없다. 반면에 r 의 값이 적더라도 SRV를 고려하지 않은 것에 비해서 전체 설계 주파수 대역에서 훨씬 고른 주 빔 폭을 얻었다.

V. 결 론

본 논문은 광대역 빔 형성기 설계법을 제안하였다. 관심 대역에서 좀 더 고른 주 빔 특성을 얻기 위해서 Lebreit와 Boyd가 만든 최적식에 SRV를 도입하여 관심 주파수 대역에서 주 빔의 빔 폭의 균일성이 더욱 향상되도록 하였다. 실험을 통해서 제안한 방법이 주 빔 균일도가 더 좋은 광대역 빔 형성을 할 수 있

음을 보였다.

감사의 글

본 논문에 국방과학연구소의 부분 지원이 있었습니다(UD190004DD 비선형 곡면배열센서 빔 데이터의 함자세 보상기법 연구).

References

1. M. M. Goodwin and G. W. Elko, "Constant beamwidth beamforming," Proc. ICASSP. 27-30 (1993).
2. S. Yan, "Optimal design of FIR beamformer with frequency invariant patterns," Appl. Acoust. **67**, 511-528 (2006).
3. E. L. Hixson and K. T. Au, "Wide-bandwidth constant beamwidth acoustic array," J. Acoust. Soc. Am. **48**, 117 (1970).

4. O. L. Frost, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing," Proceedings of the IEEE, **60**, 926-935 (1972).
5. H. Lebreit and S. Boyd, "Antenna array pattern synthesis via convex optimization," IEEE Trans. on Signal Processing, **45**, 526-532 (1972).
6. 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. **97**, 1023-1034 (1995).
7. D. B. Ward, R. A. Kennedy, and R. C. Williamson, "FIR filter design for frequency invariant beamformers," IEEE Signal Process. Lett. **3**, 69-71 (1996).
8. H. P. Duan, B. P. Ng, C. M. S. See, and J. Fang, "Applications of the SRV constraint in broadband pattern synthesis," Signal Processing, **88**, 1035-1045 (2008).

저자 약력

▶ 임 준 석 (Jun Seok Lim)



1986년: 서울대학교 전자공학과 학사 졸업
 1988년: 서울대학교 전자공학과 석사 졸업
 1996년: 서울대학교 전자공학과 박사 졸업
 1996년 7월 ~ 1997년 10월: LG종합기술원
 1998년 3월 ~ 현재: 세종대학교 전자정보
 통신공학과 교수

▶ 이 근 화 (Keunhwa Lee)



2000년 2월: 서울대학교 조선해양공학과
 학사
 2006년 2월: 서울대학교 조선해양공학과
 박사
 2006년 ~ 2014년: 서울대학교 해양시스
 템 공항연구소 연구교수
 2014년 ~ 2017년: 세종대학교 국방시스
 템공학과 조교수
 2018년 ~ 현재: 세종대학교 국방시스템
 공학과 부교수

▶ 안 재 균 (Jae-Kyun Ahn)



2007년 2월: 고려대학교 전기전자전파공
 학과 학사
 2009년 2월: 고려대학교 전자전기공학과
 석사
 2014년 2월: 고려대학교 전기전자전파공
 학과 박사
 2014년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임
 연구원