

가우시안 가중치에 의한 광대역 빔형성 특성

도경철* 손경식**

* 국방과학연구소, 경남 진해 우체국 사서함 18호

** 부산대학교 전자공학과, 부산광역시 금정구 장전동 산30번지

Wide-Band Beamforming with Gaussian Weighting

Kyeong-Cheol Dho* Kyung-Sik Son**

* Agency for Defense Development, PO Box 18 Chinhae KyungNam

** Pusan National University, Dept. of Electronics Eng., 30 Changiundong Keumjungku Pusan

Abstract

This paper proposes a new wide-band beamforming which has Gaussian weighting. For the purpose of measurement this beam is formed by using all sensors together, not octave-by-octave. Weighting is applied to each sensor before time-delay compensation as a frequency-dependent function. As the results of the simulation of the proposed algorithm for nested linear array having 17 sensors for each octave, it is confirmed that beam can be formed with all sensors together and uniform directivity index can be achieved by proposed algorithm.

본 논문에서는 이와 같은 측정 목적의 광대역 빔형성에 관하여 연구한다. 제2장에서 전형적인 선형배열에서의 대역별 빔형성기법을 살펴 보고, 제3장에서는 대역별 다수 빔을 하나로 줄여 형성시키되 음원의 광대역신호를 수신하는 새로운 측정용 광대역 빔형성기법을 제안한다. 제안된 알고리즘을 제4장에서 시뮬레이션하고 결과를 고찰한 다음 제5장에서 결론을 맺는다.

I. 서론

배열신호처리에는 탐지(detection)성능 향상을 주요 목표로 연구되어 왔다. 일반적으로 탐지용 선형배열에서는 옥타브 대역별로 옥타브 개수 만큼의 빔을 형성시키고, 각 빔 출력을 선형합산하여 광대역신호를 수신한다. 신호대잡음비는 센서개수 증가에 의해 증대되지만 센서개수가 많아지면 하드웨어 부담이 늘어나므로 적정 센서수량과 함께 가중상수를 이용함으로써 부엽의 신호준위를 낮추고 상대적으로 신호대잡음비를 향상시킨다. 그러나 가중상수에 의한 부엽준위 억제는 빔폭의 확장을 야기시키므로, 빔 분해능을 향상시키기 위한 여러 기법들이 병행 연구되어 왔다[1,2,3].

측정(measurement) 관점에서는 음원의 왜곡없는 수신이 일차적인 목적이다. 그러므로, 탐지용 빔형성과는 달리 신호대잡음비와 빔 분해능 증대를 중요하게 고려하지 않는다. 즉, 부엽준위는 원음측정을 방해하지 않는 수준 정도로만 낮추고, 음원의 물리적인 크기를 수용하기 위하여 빔폭은 오히려 적정하게 넓혀줘야 한다. 이는, 측정용 빔형성에서는 가중상수가 부엽준위 조정 역할을 하지 않아도 됨을 의미하며, 따라서 빔을 대역별로 형성시키지 않아도 빔을 상징할 수 있다.

II. 수동 선형배열 대역별 빔형성

전형적인 수동 선형배열은 구현이 용이하도록 센서간격을 옥타브 대역별로 일정하게 배치되, 상위 옥타브 센서 사이 사이에 하위 옥타브 센서가 삽입된 형태(Nested Linear Array)로 그림 1과 같이 구성한다. 측정하고자 하는 최대 주파수의 파장 λ 에 대하여 1/2 간격으로 센서가 배열되고, 옥타브 대역을 위한 동일 위치의 센서들은 중복 이용된다.

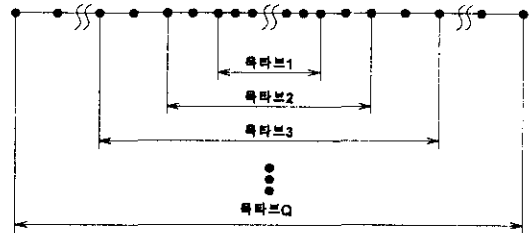


그림 1. 전형적인 수동 선형배열의 센서 구성

수동 선형배열의 임의 옥타브 대역 q 에서의 빔 $B_q(t)$ 는 식 (1) 및 그림 2와 같이 형성된다. 아래 식 (1)에서 $s(t-\tau_i)$ 는 시간지연 τ_i 가 보상된 센서 i 의 수신신호이고 A_i 는 이 센서에 적용되는 가중상수이다. N 은 옥타브

$$B_q(t) = \sum_{i=1}^N A_i s(t-\tau_i) \quad (1)$$

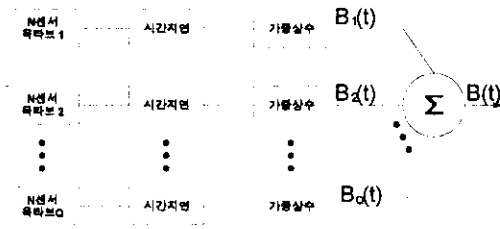


그림 2. 수동 선형배열의 전형적인 빔형성

브 내의 센서 개수이다. 그림 2에서 보듯이 원하는 광대역을 탐지하기 위하여는 옥타브 개수 만큼의 빔형성기가 필요하다[1].

선형배열에서의 가중치 A_i 는 옥타브당 N 개의 센서 각각에 대하여 주어진다. 이는, 센서간격이 시간영역의 주파수 또는 공간영역의 파장에 대한 함수임을 의미한다. 전형적인 선형배열에서 빔패턴은 부엽준위를 낮추고 빔폭을 좁히는데 초점이 맞추어져 있고, 가중상수가 조정 역할을 담당한다. 빔폭 및 부엽준위 제어를 위하여 선형배열에서는 돌프-체비셰프 가중치를 주로 이용한다.

선형배열에서의 지향지수(directionality index) DI 는 옥타브 당 센서 개수 N 과 각 옥타브의 최대 수신주파수 f_{max} 에 의해 식(2)와 같이 근사적으로 계산된다[4].

$$DI = 10 \log[(N-1)f/f_{max}] \quad (2)$$

예를 들어 그림 3은 옥타브 당 17개 센서를 사용하는 선형배열에서의 주파수에 따른 지향지수를 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이, 일반적으로 선형배열의 지향지수는 주파수에 따라 일정하지 않다.

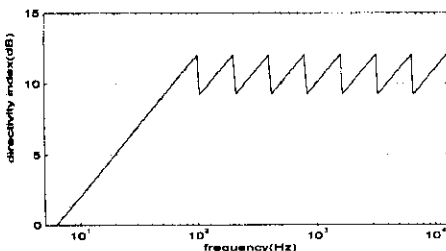


그림 3. 수동 선형배열의 전형적인 지향지수

신호유무에만 관심을 갖는 탐지(detection) 신호처리에서는 지향지수가 주파수의 함수로 주어지더라도 탐지 성능에 영향을 주지 않는다. 그러나 수신신호를 왜곡없이 보존해야 하는 측정(measurement)의 경우에는,

주파수와 무관하게 그림 3의 지향지수를 균일하게 유지시킬 필요가 있다.

III. 광대역 단일 빔형성

3.1 단일 빔형성 알고리즘 제안

서론과 제2장에서 언급한 바와 같이 전형적인 선형배열에서는 빔폭 및 부엽준위 제어용 가중상수의 적용을 위하여 옥타브 개수 만큼의 빔형성기가 사용된다. 그러나 측정 신호처리에서는 가중상수를 부엽준위 조정 목적으로 사용할 필요가 없다. 이는 반듯이 빔을 대역별로 형성시키지 않아도 됨을 의미하며 따라서 빔형성 개수 또한 줄일 수 있음을 의미한다.

빔을 한 번만 형성시키는 단일 빔형성은 식 (3)의 개념으로 수행된다. M 은 선배열의 총 센서개수이다.

$$B(t) = \sum_{i=1}^M A(i, f) s(t - \tau_i) \quad (3)$$

식 (1)과 비교하여 식 (3)은 외견상 모든 센서에 대하여 동시에 빔을 형성시키는 개념만 상이하다고 판단할 수 있다. 그러나 식 (3)에 그림 2 개념으로 가중상수를 적용시키면 각 센서간격에 의해 물리적으로 주어지는 수신 주파수 대역을 조정하기 어려우므로, 식 (3)의 가중치가 센서별 수신 주파수 대역 제한의 역할을 해야 한다. 식 (1) 및 그림 2에서의 가중상수가 부엽준위를 제어함과 비교하여 기능적으로 상당한 차이를 가진다.

본 연구에서는 식 (3)에 대한 그림 4의 단일 빔형성 알고리즘을 제안한다. 즉, 빔은 1회만 수행하되, 시간 지연 보상 이전에 가중을 시키고 가중치가 센서별 수신 주파수 대역 조정기능을 수행하도록 주파수 종속 가중치(frequency dependent weighting) $A(i, f)$ 를 사용한다. 본 논문에서는 옥타브 내 각 센서에 일정하게 적용되는 시간영역 창함수(window function)를 가중상수, 센서마다 다르게 적용되는 창함수를 가중치로 구분한다.

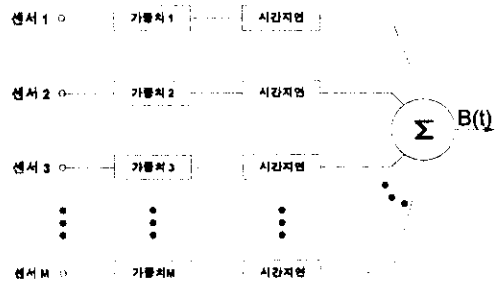


그림 4. 수동 선형배열에서의 광대역 단일 빔형성

3.2 단일 빔형성에서의 가우시안 가중치

단일 빔형성의 가중치 $A_i(f)$ 는 주파수 종속 함수로서 각 센서의 수신주파수 대역 차단기능을 한다. 즉, 선형배열에서 좁은 간격 센서는 고주파수대역까지 넓게 수신하게 하고, 넓은 간격 센서는 저주파수 대역만 수신하도록 일종의 선필터(pre-filter) 역할을 수행한다. 그림 5는 이와 같은 가중치 $A_i(f)$ 의 역할을 나타낸다.

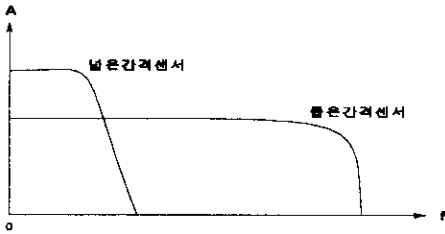


그림 5. 광대역 단일 빔형성에서의 가중치 기능

주파수영역에서 그림 5의 차단필터 역할을 하는 대표적 참함수로 여러 가지를 고려할 수 있으나, 시간영역에서의 구현가능성을 고려하여 본 논문에서는 가우시안 함수(Gaussian function)를 가중치로 이용한다. 가우시안 함수는 시간영역과 주파수영역에서 유사 형상을 가지므로 다른 함수와 비교하여 구현이 용이하다는 장점을 가진다. 일반적으로 주파수영역에서의 가우시안 함수는 식 (4)로 주어진다[5]. 여기서 ω 는 각주파수이고 σ 는 분산이다.

$$G(\omega) = \exp[-(\omega\sigma)^2/2] \quad (4)$$

가우시안 함수를 빔형성의 가중치로 활용하기 위하여는 가중치가 갖는 분산의 폭을 결정해야 한다. 각 센서에 적용될 가우시안 가중치가 그림 5에서와 같이 임의의 차단주파수를 가지는 경우, 차단주파수에서의 가우시안 가중치를 임의상수 k_1 로 가정하면 $k_1 \leq 1$ 이므로 식 (4)는 식 (5)와 같이 변환된다.

$$\sigma = (-2 \ln k_1)^{1/2} / (2\pi f) \quad (5)$$

선형배열 중심으로부터 센서 i 까지의 거리를 Li 로 두면 $Li = \lambda/4$ 이므로 식 (5)는 식 (6)과 같이 쓸 수 있다. 식 (6)에서 k 는 $2(-2 \ln k_1)^{1/2} / \pi$ 를 의미하는 임의 상수로서, 가우시안 가중치의 폭을 결정짓는다.

$$\sigma = 4Li(-2 \ln k_1)^{1/2} / (2\pi c) = k Li/c \quad (6)$$

결과적으로 단일 빔형성 식 (3)의 가중치 $A_i(f)$ 에는 식 (7)의 가우시안 가중치 $G_i(f)$ 가 적용된다. 식 (7)은 가우시안 가중치가 주파수 종속 함수임을 나타내고, 센서간격과 각 센서의 수신 주파수에 따라 센서마다 상이하게 적용됨을 알 수 있다.

$$G_i(f) = \exp[-(2\pi f k Li/c)^2/2] \quad (7)$$

IV. 가우시안 가중치에 의한 빔 특성 시뮬레이션 및 고찰

4.1 시뮬레이션 사양

가우시안 가중치가 적용되는 식 (3)의 단일 빔형성 특성을 고찰하기 위하여 시뮬레이션을 수행한다. 50Hz $z \sim 12800$ Hz의 광대역 수신주파수 범위에 걸쳐 8개 옥타브를 가진 선형배열이 옥타브 당 17개 센서를 갖는다고 가정하면 본 선형배열은 길이 120m로서 모두 73개 센서를 운용한다. 그림 3에서와 같이 옥타브별 빔형성의 경우 최대 12.3dB의 지향지수를 갖는다.

4.2 지향지수

본 연구의 단일 빔형성에 대한 지향지수는 그림 6 및 그림 7과 같이 구해진다. 그림 6은 배열과의 수직 빔 지향이고, 그림 7은 배열 양 끝(end-fire)으로 빔 지향시킨 경우이다. 일정 주파수 이상에서 지향지수가 균일함을 그림에서 볼 수 있다. 그러나 그림 3의 전형적인 옥타브별 빔형성과 비교하여 저주파수 대역에서 지향지수가 상대적으로 낮다.

지향각에 따른 단일 빔형성 지향지수는 그림 8에 나타내었다. 단일 빔형성에서는 빔지향각이 배열 끝으로 갈수록 낮은 지향지수를 가진다. 그리고 특히 지향각에 민감하여 5도 정도만 지향하여도 지향지수가 약 2dB 정도 감소된다. 그림에서 주파수대역 끝단에서는 지향지수가 동일값으로 모인다. 이는 높은 주파수대역으로 센서가 많이 배열되어 있음을 의미한다.

4.3 빔패턴

본 연구에서 제안한 단일 빔형성의 빔패턴은 그림 9와 같다. 주파수가 낮을수록 빔폭이 넓어지고 부엽의 크기 또한 높아짐을 알 수 있다.

200Hz의 경우 약 -14dB까지 부엽이 증가되어 돌프-체비세프 가중상수를 적용한 전형적인 빔형성 보다 높은 부엽준위를 갖는다. 그러나 측정을 위한 빔형성에서는 이와 같은 부엽준위의 상승이 크게 중요하지 않다. 14dB 정도의 신호대 잡음비는 측정정확도를 크게 저해하지 않기 때문이다.

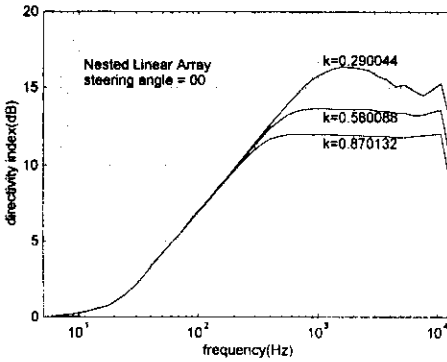


그림 6. 단일 빔형성 지향지수(지향각 0도)

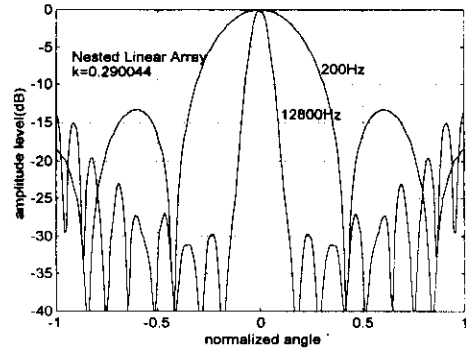


그림 9. 단일 빔형성에서의 빔패턴

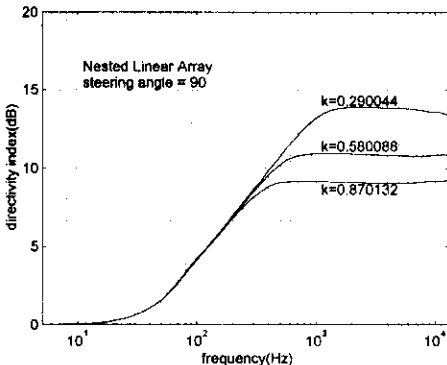


그림 7. 단일 빔형성 지향지수(지향각 90도)

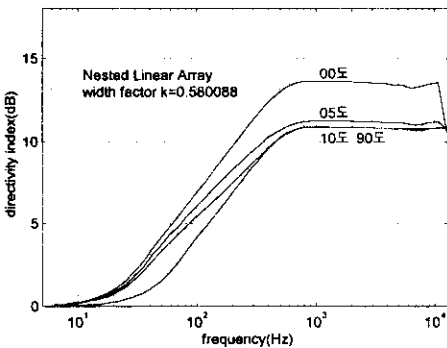


그림 8. 지향각에 따른 단일 빔형성 지향지수

4.4 단일 빔형성 특성 고찰

그림 9의 빔패턴에서 부엽준위가 높음에도 불구하고, 그림 6~8은 식 (3)의 단일 빔형성이 가용함을 보여준다. 더욱이 그림 9에서의 넓은 빔폭은 측정시 표적의 물리적 크기를 포괄할 수 있는 장점을 제공한다.

또한 그림 9의 빔패턴은 빔지향각에 구애됨이 없이

일정한 지향지수를 갖는 단일 빔형성이 가능함을 시사한다. 이는 식 (9)의 가우시안 가중치가 식 (3)의 단일 빔형성에 효과적으로 활용될 수 있음을 의미한다.

V. 결론

본 연구에서는 선형배열에서의 옥타브 대역별 빔형성 개수를 줄이고자 모든 센서수신에 대하여 동시에 빔을 형성시키는 단일 빔형성 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘의 단일 빔형성에 가우시안 함수를 가중상수로 적용시키고 시뮬레이션에 의해 고찰한 결과, 일정 주파수 이상에서 일정 지향지수를 가지고 넓은 빔폭을 가져 제안 알고리즘이 측정용 빔형성으로서의 역할 수행이 가능함을 확인하였다. 그러나 본 연구에서 제안한 단일 빔형성은 저주파수에서 지향지수가 상대적으로 낮아 이를 극복하기 위한 연구 및 시뮬레이션이 지속적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] R.A.Mucci, "A Comparison of Efficient Beamforming Algorithms", IEEE. Trans. on Acoust. Speech and Signal Proc., Vol.ASSP-32, No3, pp548-558, 1984
- [2] 도경철, 노정호, "DFT에 의한 위상천이 빔형성 기법" 제2회 신호처리합동학술대회 논문집, pp 101-105, 1989
- [3] C.R.Wan, "Continuous Performance Adjustment between Convensional and Adaptive Beamforming", UDT, pp142-146, 1997
- [4] A.D.Waite, "Sonar for Practicing Engineers", FTSS, 1996
- [5] B.D.Steinberg, "Principles of Aperature and Array System Design", 1976, A Wiley-Interscience Publication