

수중 통신을 위한 광대역 주파수 불변 빔 형성 기법

이주영, 신종우, 박근호, 김형남
부산대학교

hnkim@pusan.ac.kr

Wideband frequency invariant beamforming method
for underwater communicationsJu-Yeong Lee, Jong-Woo Shin, Geun-Ho Park, Hyoung-Nam Kim
Pusan National University

요약

수중에서는 복잡한 신호 송수신환경을 극복하기 위한 방안으로 빔 형성 기술이 사용된다. 대부분의 광대역 빔 형성은 주파수에 대한 정보를 요구하며, 주파수에 관계없이 빔 형성을 하기 위해서는 광대역 빔 형성이 필요하다. 광대역 빔 형성을 위한 기존의 주파수 불변 빔 형성 기법들은 특정 대역에서 원하는 빔 패턴을 얻을 수 없는 단점을 가지며, 빔 패턴에 대한 수학적 표현을 얻을 수 없기 때문에 이론적 송수신 성능 분석에 어려움이 있다. 본 논문에서는 이러한 기존의 주파수 불변 빔 형성의 문제를 해결하기 위해 focusing 행렬 기반 주파수 불변 빔 형성을 제안하고, 빔 패턴에 대한 수식을 제시한다. 또한, 빔 패턴에 대한 분석을 통해 특정 대역에서만 주파수 불변 빔이 형성되는 기존의 기법과 달리 제안된 방법은 모든 주파수 대역에서 동일한 빔 패턴을 형성할 수 있음을 보인다.

I. 서론

복잡한 수중 환경에서 음파를 이용해 표적탐지 및 통신 등을 수행하기 위해서는 빔 형성 기법이 필수적이다. 특히, 수신 신호에 대한 주파수 정보가 없거나 광대역 신호를 다루고자 할 때는 광대역 빔 형성 기법이 사용되어야 한다. 또한 광대역 빔 형성은 육상 통신에 비해 저주파 대역을 사용하는 수중 통신에서 발생하는 빔 폭이 넓어지는 현상을 극복할 수 있다. 광대역 빔 형성은 크게 적응 빔 형성(adaptive beamforming)과 고정 빔 형성(fixed beamforming) 방법으로 분류할 수 있다. Linearly constrained minimum variance(LCMV)와 같은 적응 빔 형성은 데이터에 의존적이기 때문에 가중치(weight)를 지속적으로 갱신해야 하는 한계점을 가진다. 고정 빔 형성의 경우, 적응 빔 형성에 비해 낮은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio)를 가지지만, 적은 연산량을 가지며 사전에 가중치를 계산할 수 있으므로 구현에 용이하다는 특징이 있다[1].

광대역 신호를 위한 고정 빔 형성 중 가장 널리 사용되는 harmonic nesting은 각 옥타브(octave) 내에서는 빔 패턴이 여전히 주파수의 영향을 받으므로 완전한 주파수 불변 빔 형성이 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 2차원 역 푸리에 변환 기반 주파수 불변 빔 형성이 제안되었지만, 이는 0° 가 아닌 다른 방향으로 지향하면 저주파 대역 및 고주파 대역에서 불완전한 형태의 주파수 불변 빔이 형성되고, 빔 패턴을 수식으로 유도하는 것이 어렵다는 한계가 있다[2].

본 논문에서는 focusing 기술을 이용하여 간단한 구조를 가지는 주파수 불변 빔 형성 기법을 제안한다. 본 논문에서 제안된 방법은 기존의 기법들과 달리 빔 패턴을 수식으로 유도함으로써 이론적 송수신 성능 분석이 가능하고, 모든 주파수에서 주파수 불변 빔을 형성할 수 있다.

II. 2차원 역 푸리에 변환 기반 주파수 불변 빔 형성

고정 빔 형성 중 성능이 가장 우수한 2차원 역 푸리에 변환 기반 주파수 불변 빔 형성은 시간 영역 빔 형성의 가중치와 원하는 빔 패턴의 관계를 이용한다. 원하는 빔 패턴과 시간 영역 빔 형성 가중치는 다음 식과 같은 관계를 갖는다.

$$P(\omega, \theta) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} w_{m,n} e^{-jm\mu\Omega \sin\theta} e^{-jn\Omega} \quad (1)$$

where $\mu = md / (cT_s)$ and $\Omega = \omega T_s$.

여기서 c 는 전파 속도이고, 식 (1)을 $\bullet_1 = \bullet \sin\theta d / c$, $\bullet_2 = \bullet T_s$ 로 치환하면 다음 식과 같다.

$$P(\Omega_1, \Omega_2) = \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} w_{m,n} e^{-jm\Omega_1} e^{-jn\Omega_2} \quad (2)$$

with $\Omega_1 = \omega \sin\theta d / c$, $\Omega_2 = \omega T_s$.

식 (2)를 m 과 n 에 대하여 각각 역 푸리에 변환을 취하면 가중치 $w_{m,n}$ 을 얻을 수 있다. 이를 이용하여 그림 1과 같은 시간 영역 광대역 빔 형성을 하면 원하는 빔 패턴을 얻을 수 있다.

III. Focusing 행렬 기반 주파수 불변 빔 형성

Focusing 기술은 주로 광대역 신호의 부공간 기반 도래각 추정에 사용되며, 각 주파수마다 다르게 형성된 신호 부공간(subspace)을 변환행렬인 focusing 행렬을 이용해 focusing 주파수(focusing frequency)에 해당하는

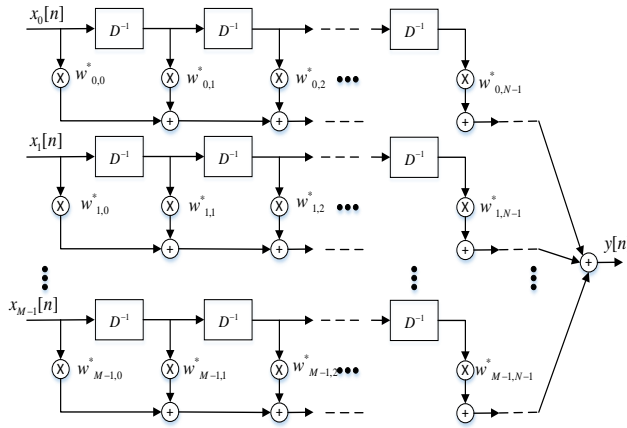


그림 1. 시간 영역 광대역 빔 형성의 구조.

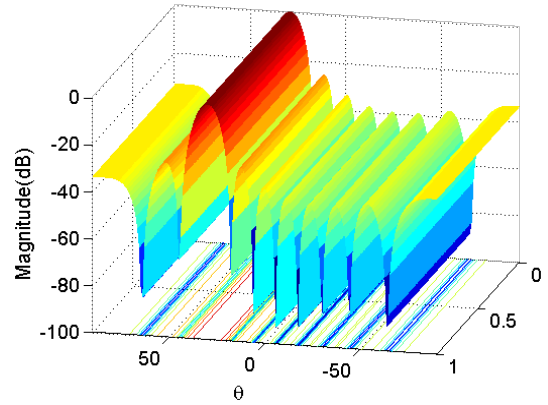


그림 2. Focusing 행렬 기반 주파수 불변 빔 형성 (조향각 : 30°, 배열 센서 수 : 10개).

부공간으로 변환하는 기술이다. Focusing 행렬은 여러 방법으로 나타낼 수 있지만 하나의 각도에 대한 일반적인 형태는 식 (3)과 같이 focusing 주파수 f_r 과 focusing 각도 θ_f 를 포함하는 행렬로 다음과 같이 설계된다.

$$\mathbf{T}_i = \text{diag} \left\{ 1, e^{-j(\omega_i - \omega_r) \frac{d}{c} \sin \theta_f}, \dots, e^{-j(\omega_i - \omega_r) \frac{(M-1)d}{c} \sin \theta_f} \right\}. \quad (3)$$

여기서 focusing 각도 θ_f 는 사전 정보에 의해 수신신호의 도래각과 일치하도록 정의한다. Focusing 기술 적용 후 변환된 수신 신호는 식 (4)와 같이 표현되고, focusing 행렬 기반 주파수 불변 빔 형성기의 출력 신호는 식 (5)와 같다.

$$\mathbf{X}_{gen} = \mathbf{T}_i \mathbf{X}_i \quad (4)$$

where $\omega_L < \omega_i < \omega_H$ for $i = 0, 1, \dots, N-1$,

$$\mathbf{Y}(\omega) = \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{w}_i^H \{ \mathbf{T}_i \mathbf{X}_i \}. \quad (5)$$

Focusing 기술을 적용한 후, 주파수 영역 빔 형성을 수행하면 다음 식과 같이 원하는 빔 패턴을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} B(\theta, \lambda; \theta_0) &= \sum_{i=0}^{N-1} | \mathbf{w}_i^H \{ \mathbf{T}_i \mathbf{a}(\omega_i, \theta) \} | \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} | \mathbf{w}_i^H \mathbf{a}(\omega_r, \theta) | \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} \left| \frac{\sin \left(\frac{M\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right)}{\sin \left(\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right)} \right| \end{aligned} \quad (6)$$

IV. 빔 패턴 기반의 성능 분석

그림 2 는 10 개의 등간격 선형 배열(uniform linear array) 센서를 이용하여 조향각이 30° 인 focusing 기반 주파수 불변 빔 형성의 빔 패턴이다. 식 (5)에서 나타낸 바와 같이 모든 주파수에서 focusing 주파수에 해당하는

협대역 빔 패턴을 보이는 것을 알 수 있다. Focusing 행렬 기반 주파수 불변 빔 형성은 수신 신호의 입사각에 대한 사전 정보가 주어진 상황에서 신호원 방향으로 신호를 송·수신하는 데 유용하게 활용할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 수중 환경에서 주파수에 관계없이 사용할 수 있는 광대역 빔 형성을 위해 focusing 행렬 기반 주파수 불변 빔 형성 기법을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 빔 형성 기법을 활용하면 간단한 구조로 주파수 불변 빔을 형성할 수 있고, 빔 패턴을 수식으로 유도하여 이론적 분석이 가능함을 확인하였다. 그러나 focusing 각을 정의하기 위해 도래각에 대한 사전 정보가 필요하고, 추가적으로 도래각에 대한 사전정보가 주어지지 않은 경우의 분석이 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2015 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2014R1A1A2056013)

참 고 문 헌

[1] Mars, Rohith, V. G. Reju, and Andy WH Khong, "A frequency-invariant fixed beamformer for speech enhancement," Asia-Pacific Signal and Information Processing Association, 2014 Annual Summit and Conference (APSIPA). IEEE, pp. 1-6, 2014.

[2] Liu, Wei, Stephan Weiss, "Beam steering for wideband arrays," Signal Processing, pp. 941-945, 2009.