

광대역 chirp 신호의 방위각 추정을 위한 적응 빔 형성

Adaptive Chirp Beamforming for Direction-of-Arrival Estimation of Wideband Chirp Signals in Sensor Arrays

김 정 수*, 최 병 웅*, 배 은 현*, 이 균 경*

Jeong Soo Kim*, Byung Woong Choi*, Eun Hyon Bae*, Kyun Kyung Lee*

*경북대학교 전자전기컴퓨터학부

(접수일자: 2007년 12월 18일; 채택일자: 2008년 2월 18일)

본 논문은 동일한 주파수 파라미터를 가지고 다른방위에서 입사하는 chirp신호의 방위각 (DOA : Direction-of-arrival) 추정에서 상호 간섭으로 인한 bias문제를 해결 하기 위하여 적응 chirp 빔형성기법을 제안한다. 제안한 기법은 기존의 STMV (STeered Minimum Variance) 기법에 chirp 신호의 시간-주파수 특성을 고려함으로써 chirp 신호들의 상호 간섭을 보다 효과적으로 감소시켜 방위각 추정성능을 향상시킨다. 모의 실험에서 제안한 기법과 기존의 기법들에 의한 방위각 추정성능을 비교한다.

핵심용어: Chirp 신호, 적응 빔형성, DOA 추정, 선배열센서

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

In this paper, the adaptive chirp beamforming method is proposed to solve the bias problem in the direction-of-arrivals (DOAs) estimation of the wideband chirp signals which have an identical time-frequency parameter and are emanated from different directions. The source location bias results from the interferences impinging on the array from the other directions. The proposed method exploits the time-frequency structure of the chirp signal based on STMV (STeered Minimum Variance) to improve the DOA estimation performance by minimizing the chirp interferences effectively. Simulation results show the DOA estimation performance achieved by the proposed method as compared to the conventional methods.

Keywords: Chirp signal, Adaptive beamforming, DOA estimation, Uniform linear array

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.6)

I. 서론

광대역 chirp 신호는 시간에 따라 주파수가 일정하게 변하는 시간-주파수 특성을 가지는 신호로서 레이더, 소나 그리고 이동통신 등의 많은 응용분야에서 이용되고 있다. 최근에 센서 배열에서의 광대역 chirp 신호의 DOA 추정에 대한 많은 연구가 진행중이다 [1-5]. Wang [1] 등은 chirp신호의 주파수 변화율을 시간-주파수 분석을 통해 추정하고 이를 반복적으로 보상하여 협대역의 부공간 기반 DOA기법을 적용하였다. 그러나 반복적인 과정은 수렴이 보장되지 않고 또한 초기 DOA에 따라 성능이 크게 좌우되며 최종적으로 추정된 DOA는 큰 bias를 가진다. Chirp 신호의 시간-주파수를 함께 고려하여 이를 해결하기 위하여 Gershman 등은 chirp 신호의 변화 정도가

초기 주파수에 비해 충분히 작도록 광대역 chirp신호를 짧은 구간으로 나눈 후 주어진 시간에서 코히어런트 신호-부공간 (CSS: Coherent Signal-Subspace) 기법을 적용하여 DOA를 추정하고자 하였다 [2]. 그러나 이 방법은 분할된 데이터 구간의 길이에 의해서 성능이 좌우되는 문제를 가지므로 그들은 광대역 chirp 신호의 방위각과 주파수 파라미터를 보다 강인하고 정확하게 추정하고자 단일 chirp 신호인 경우를 대상으로 로그-우도 함수 (log-likelihood function)로부터 chirp 빔형성 (CBF: Chirp Beamforming) 기법을 유도하였다 [3]. 그러나 CBF기법은 다중의 chirp 신호일 경우 상호 간섭으로 인하여 추정된 파라미터와 방위각은 bias를 가지는 문제를 가진다. Lie 등 [4]은 다중 chirp 신호를 Polog의 MC-DPT (Multi-Component Discrete Polynomial Phase

Transform) [6]를 이용하여 시간-주파수 평면상에서 단일 chirp신호들로 분리하여 상호간섭을 없앤 후 각각에 CBF를 적용함으로써 bias문제를 해결하였다. 그러나 동일한 시간-주파수 특성을 가지고 다른 방위에서 입사하는 다중 chirp 신호의 경우 시간-주파수 평면상에서는 근본적으로 분리가 불가능하므로 CBF를 통한 방위각 추정 시 다중신호에 의한 상호간섭으로 인하여 방위각 bias문제는 여전히 존재하게 된다.

이러한 환경에서 다른 방위에서 입사하는 chirp신호들의 간섭을 억제하여 방위각 bias문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 Krolik과 Swingler [7]의 STMV 기법을 확장한 CSTMV (Chirp STMV) 기법을 제안한다. STMV 기법은 참고문헌 [1,2]에서 사용된 CSS기반의 DOA추정 기법과는 달리 광대역 신호에 대한 focusing 행렬이 불필요하므로 이로 인하여 생기는 방위각 추정 bias가 작은 것으로 알려져 있다. 그러나 STMV 기법은 신호의 시간-주파수 특성을 전혀 고려하지 않은 일반적인 광대역 적응 빔형성기법으로서 이를 chirp 신호의 방위각 추정에 보다 효과적으로 적용하기 위하여 chirp 신호의 시간-주파수 특성을 고려하여 CSTMV로 확장한다. 모의 실험에서 시간-주파수 특성을 고려한 제안한 CSTMV 기법의 방위각 추정성능을 보이기 위하여 기존의 STMV 기법과 CBF기반의 Lie 기법에 대해 비교한다.

II. Lie의 DOA 추정기법

M 개의 센서로 구성된 선 배열에 일정한 진폭 A_l , $l = 1, \dots, L$ 을 가지고 미지의 초기주파수와 주파수 변화율(a_l, b_l)을 가진 광대역 chirp 신호가 L 개의 표적방위각 $\theta_1, \dots, \theta_L$ 에서 입사하는 경우 센서 출력벡터는 다음과 같이 정의 된다 [3, 4].

$$\mathbf{x}(n) = \sum_{l=1}^L \mathbf{x}_l(n) + \mathbf{v}(n), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{v}(n)$ 은 $M \times 1$ 시간 공간상에서 zero-mean complex circularly Gaussian noise 벡터이다.

그리고 $\mathbf{x}_l(n)$ 은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\mathbf{x}_l(n) = A_l \begin{bmatrix} \exp[j2\pi(\phi_{0,l} + w_{0,l}\Delta n + v_{0,l}(\Delta n)^2)] \\ \vdots \\ \exp[j2\pi(\phi_{M-1,l} + w_{M-1,l}\Delta n + v_{M-1,l}(\Delta n)^2)] \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $v_{m,l} = b_l$, $w_{m,l} = a_l + 2b_l\tau_m(\theta_l)$, $\phi_{m,l} = a_l\tau_m(\theta_l)$ 그리고 $\tau_m(\theta_l) = md \sin \theta_l / c$ 이다. 그리고 $\{A_l, a_l, b_l\}$ 는 각각 l 번째 신호성분의 신호 진폭, 초기 주파수 그리고 주파수 변화율이며 Δ 는 샘플링 주기, d 는 인접 센서간 거리 그리고 c 는 매질에서의 전파속도이다. 순시각 주파수 $a_l + 2b_l\Delta n$ 은 신호원이 배열센서의 aperture를 통과하는 $T_s = (M-1)d/c$ 동안은 변하지 않는다고 가정한다.

MC-DPT는 단일 센서 출력 신호를 구성하는 각 신호 성분들의 특징 파라미터를 추정하고 이로부터 각 신호 성분들을 분리해내는 알고리즘이다.

Lie 등은 M 개의 각 센서에 MC-DPT를 적용하여 서로 다른 L 개의 시간-주파수 파라미터를 추정하고 다중 신호 벡터 $\mathbf{x}(n)$ 로부터 l 번째 시간-주파수 파라미터에 해당하는 신호성분 벡터 $\hat{\mathbf{x}}_l(n)$ 을 추출하였다. 그런 후 식 (3)에서 주어진 것과 같이 추정된 l 번째 시간-주파수 파라미터 (\hat{a}_l, \hat{b}_l) 와 신호성분 $\hat{\mathbf{x}}_l(n)$ 만을 고려하여 CBF기법을 기반으로 방위각을 추정함으로써 bias 문제를 개선시켰다. 이는 시간-주파수 평면상에서 파라미터 (\hat{a}_l, \hat{b}_l) 를 가지는 l 번째 신호성분만 추출함으로써 다른 k 번째($k \neq l$) 신호-주파수 파라미터에 대한 chirp신호의 영향을 제거하였기 때문이다.

$$\hat{\theta}_l = \arg \max_{\theta} \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{r}^H(n, \theta, \hat{a}_l, \hat{b}_l) \hat{\mathbf{x}}_l(n) \right| \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{r}(n, \theta, \hat{a}_l, \hat{b}_l)$ 은 $\mathbf{r}_m(n, \theta, \hat{a}_l, \hat{b}_l) = \exp[j2\pi(\hat{a}_l\tau_m(\theta) + (\hat{a}_l + 2\hat{b}_l\tau_m(\theta))\Delta n + \hat{b}_l(\Delta n)^2)]$ 을 m 번째 성분으로 하는 $M \times 1$ 벡터이며 \hat{x} 은 x 의 추정치이다.

III. 제안한 CSTMV에 의한 방위각 추정

L 개의 chirp 신호가 각기 다른 방위각 $\theta_l (l=1, \dots, L)$ 에서 단일 시간-주파수 파라미터 (a, b) 로 입사할 때 MC-DPT로 (\hat{a}, \hat{b}) 는 추정할 수 있다. 그러나 MC-DPT는 추정된 시간-주파수 파라미터가 상이해야 시간-주파수 평면상에서 각 신호들이 분리되므로 이 경우에는 Lie의 방법으로는 방위각 추정 시 bias문제를 해결할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 (\hat{a}, \hat{b}) 는 MC-DPT로 추정된 후 MC-DPT에 의한 시간-주파수 평면상의 분리 대신 공간상으로 서로의 간섭을 최소화 하기 위하여 CSTMV 기법을 유도한다.

일반적으로 적응 빔형성기법에 있어 신호의 공분산 행

렬 추정이 해당 빔형성기의 성능을 좌우한다. 따라서 chirp 신호 환경에서 효율적인 CSTMV빔형성을 위하여 chirp 신호의 시간-주파수 특성을 고려한 CSTCM (Chirp STeered Covariance Matrix)을 추정한다.

이를 위하여 먼저 다음 식과 같이 STMV에 이용되는 기존의 STCM (Steered Covariance Matrix)을 고려한다.

$$\mathbf{R}_{STCM}(\theta) = \sum_{k=1}^K \mathbf{X}_k(\theta) \mathbf{X}_k^H(\theta) \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{X}_k = [X_{k,0}, X_{k,1}, \dots, X_{k,M-1}]^T$ 는 $f_l \leq f_k \leq f_h$ 로 대역 제한된 광대역 신호에서 푸리에 변환을 통해 얻은 $M \times 1$ 의 협대역 신호 벡터이다. 그리고 $\mathbf{X}_k(\theta) = [X_{k,0}(\theta), X_{k,1}(\theta), \dots, X_{k,M-1}(\theta)]^T$ 는 $X_{k,m}(\theta) = X_{k,m} \cdot \exp(-j2\pi f_k m d \sin \theta / c)$ 를 m 번째 성분으로 갖는 벡터로서 \mathbf{X}_k 를 주파수 f_k 에 대해 θ 로 위상 지연 시간 값이다.

STCM으로부터 θ 방향의 STMV의 출력은 $p_{STMV}(\theta) = \mathbf{1}^H (\mathbf{I}_{M \times 1}^H \mathbf{R}_{STCM}^{-1}(\theta) \mathbf{I}_{M \times 1})^{-1}$ 으로 주어진다. 여기서 $\mathbf{1}_{M \times 1}$ 은 $M \times 1$ 의 일 벡터 (ones vector)이다.

식 (4)의 기존의 STCM은 광대역 신호의 특성이 전혀 고려되지 않은 상태로 각 협대역 신호벡터들을 주어진 θ 에 대해 공간상으로 0의 주파수가 되도록 (coherent) 위상 지연시킨 후 각 상관행렬들을 더함으로써 얻어진다.

CSTMV는 기존의 STCM의 공간상의 0 주파수 개념을 기반으로 한다. 식 (5)에서 먼저 식 (3)의 $r_m(m; \theta, \hat{a}, \hat{b})$ 를 적용해서 m 번째 센서신호 $x_m(n)$ 을 추정된 시간-주파수 파라미터 (\hat{a}, \hat{b}) 으로 보상한 후 θ 에 대해 위상 지연시킨다. 그리고 합 연산으로 구현된 저역 통과필터에 적용함으로써 $r_m(m; \theta, \hat{a}, \hat{b})$ 로 인하여 coherent하게 위상 지연된 성분 $z_m(\theta, \hat{a}, \hat{b})$ 을 얻게 된다.

$$z_m(\theta, \hat{a}, \hat{b}) = \sum_{n=0}^{N-1} r_m^*(m; \theta, \hat{a}, \hat{b}) x_m(n) \quad (5)$$

여기서 $x_m(n)$ 은 식 (1)의 $\mathbf{x}(n)$ 에 대한 m 번째 센서출력을 나타낸다. 그리고 $r_m(m; \theta, \hat{a}, \hat{b})$ 은 m 번째 센서신호를 (\hat{a}, \hat{b}) 의 시간-주파수 파라미터를 갖는 chirp 신호를 θ 방향으로 위상지연 시키는 값이다.

식 (4)에서는 광대역 신호로부터 분리된 여러 개의 협대역 신호 벡터로부터 full rank를 확보 할 수 있지만 식 (5)에서는 파라미터 (\hat{a}, \hat{b}) 에 대해 하나의 데이터 단편 $\mathbf{z}(\theta, \hat{a}, \hat{b}) = [z_0(\theta, \hat{a}, \hat{b}), \dots, z_{M-1}(\theta, \hat{a}, \hat{b})]^T$ 이 주어진다. 이로부터 full rank의 CSTCM을 얻기 위하여 다음 식과

같이 전후방 평균 (forward-backward averaging) [2]을 취한다.

$$\mathbf{R}_{CSTCM}(\theta, \hat{a}, \hat{b}) = \sum_{k=0}^{K-1} (\mathbf{z}_{k,f}(\theta, \hat{a}, \hat{b}) \mathbf{z}_{k,f}^H(\theta, \hat{a}, \hat{b}) + \mathbf{z}_{k,b}(\theta, \hat{a}, \hat{b}) \mathbf{z}_{k,b}^H(\theta, \hat{a}, \hat{b})) \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{z}_{k,f}(\theta, \hat{a}, \hat{b}) = [z_{k,0}(\theta, \hat{a}, \hat{b}), \dots, z_{k,Q-1}(\theta, \hat{a}, \hat{b})]^T$, $\mathbf{z}_{k,b}(\theta, \hat{a}, \hat{b}) = [z_{k,M-1}^*(\theta, \hat{a}, \hat{b}), \dots, z_{k,M-Q+1}^*(\theta, \hat{a}, \hat{b})]^T$ 이다. 그리고 부배열을 구성하는 센서의 개수를 Q 라 할 때, 전체 센서 개수 M 으로부터 만들어 지는 부배열의 개수는 $K = M - Q + 1$ 이다. 부배열 한 개는 전후방으로 두 번 이용되므로 full rank를 얻기 위하여 $2K > Q > L$ 의 조건을 만족해야 한다.

식 (6)의 CSTCM으로부터 주파수 파라미터 (\hat{a}, \hat{b}) 인 chirp 신호의 θ 에 대한 CSTMV의 출력은 다음 식과 같으며 이로부터 $\theta_l (l=1, \dots, L)$ 을 추정한다.

$$p_{CSTMV}(\theta, \hat{a}, \hat{b}) = \frac{1}{\mathbf{1}_{Q \times 1}^H \mathbf{R}_{CSTCM}^{-1}(\theta, \hat{a}, \hat{b}) \mathbf{1}_{Q \times 1}} \quad (7)$$

IV. 모의 실험

시간-주파수 특성을 고려하지 않은 기존의 STMV 기법, Lie기법과 제안한 CSTMV기법의 방위각 추정성능을 비교하기 위하여 센서개수 $M = 10$ 의 omni-directional sensor이 센서간격 $d = 1.5$ [m]로 배열된 ULA (uniform linear array)로 가정하였다. $Q = 6$, $N = 1024$ 그리고 $\Delta = 1/1024$ [sec]으로 하였다. 동일한 초기주파수와 주파수 변화율 $(a, b) = (420 | \text{Hz} |, 50 | \text{Hz} |)$ 그리고 동일한 진폭 $A_1 = A_2$ 를 가지는 2개의 광대역 chirp 신호가 다른 방위각에서 입사하는 경우를 고려하였다. 그림 1은 chirp 신호가 각각 $\theta_1 = 10^\circ$ 와 $\theta_2 = 25^\circ$ 에서 SNR이 0 [dB]로 입사 할 때 방위각을 추정한 결과로서 기존의 STMV기법, Lie기법과 제안한 CSTMV기법에 의한 빔출력을 비교하였으며 그림 2는 그림 1의 경우와 같은 조건에서 $\theta_1 = 10^\circ$ 로 고정한 후 θ_2 를 변화시켜 DOA separation ($|\theta_2 - \theta_1|$)에 따른 방위각 분해능을 비교하기 위하여 두 신호의 방위각 분리 확률을 나타낸 것이다. 그림 2에서 제안한 기법이 다른 두 기법에 비해 향상된 방위각 분해능을 가진다. 제안한 CSTMV기법은 DOA separation이 약 5° 부터 분리 가능한 반면 기존

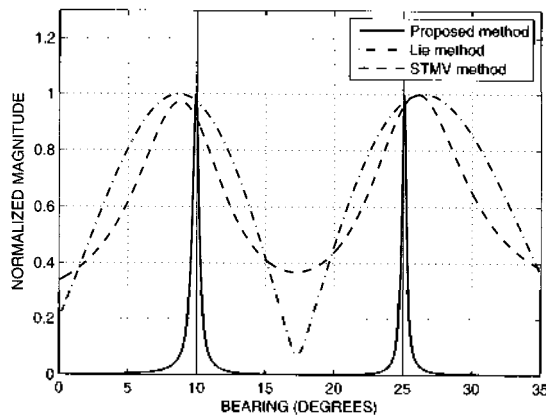


그림 1. 방위각 추정 결과 비교
Fig. 1. Comparison of DOA estimation results.

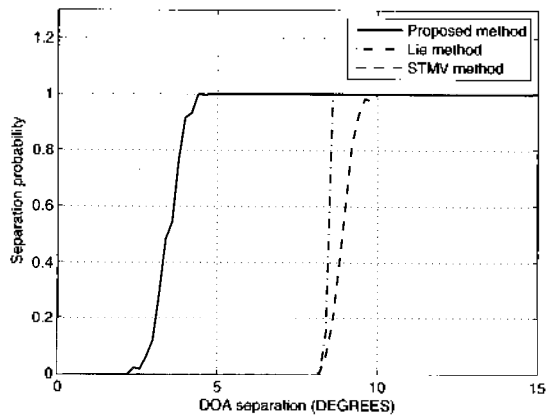


그림 2. DOA separation에 따른 방위각 분해능 비교
Fig. 2. Comparison of the DOA estimation resolution versus the DOA separation.

의 Lie기법과 STMV기법은 각각 약 8.5° 와 10° 부터 분리 가능하다. 기존의 STMV기법은 그림 1에서 제한한 기법에 비해 범 폭이 넓으며 또한 그림 2에서 보이는 바와 같이 chirp신호의 시간-주파수 특성을 고려한 나머지 두 기법에 비해 방위각 분해능이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 그림 3과 그림 4는 방위각 추정 성능 비교를 위하여 200회의 몬테 카를로 시뮬레이션을 수행하여 얻은 방위각 추정 RMSE (Root Mean Squared Error)와 [3]에서 주어진 CRB (Cramer-Rao bound)를 같이 나타내었다. 그림 3은 SNR변화에 따른 $\theta_1=10^\circ$ 와 $\theta_2=30^\circ$ 의 방위각 추정 RMSE이다. 기존의 Lie 기법은 방위각 추정에서 SNR에 관계없이 RMSE가 거의 일정하며 또한 기존의 STMV기법도 SNR의 증가로 인한 RMSE의 개선이 미미하다. 반면 제안한 기법의 DOA 추정 RMSE는 기존의 기법에 비해 SNR이 증가함에 따라 CRB와 비슷한 양상으로 감소한다. 그리고 그림 4는

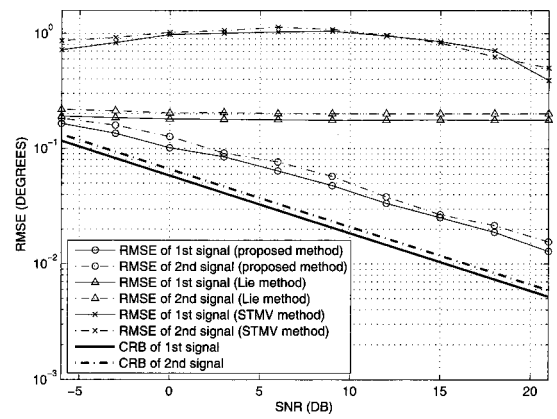


그림 3. SNR에 따른 방위각 추정 RMSE 비교
Fig. 3. Comparison of the DOA estimation RMSEs versus the SNR.

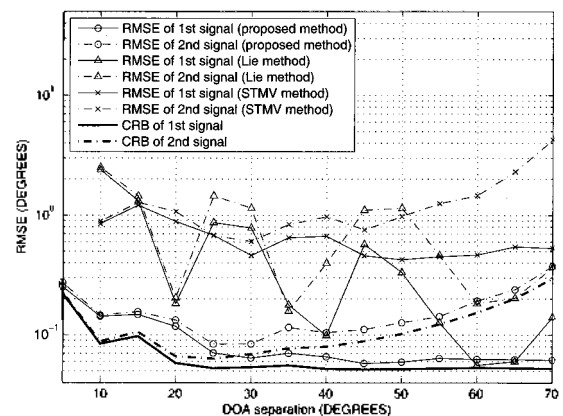


그림 4. DOA separation에 따른 방위각 추정 RMSE 비교
Fig. 4. Comparison of the DOA estimation RMSEs versus the DOA separation.

DOA separation에 따른 방위각 추정 RMSE를 나타내기 위하여 신호의 SNR을 0[dB]로 하고 고정된 $\theta_1=10^\circ$ 에 대해 θ_2 를 변화시켜 가면서 θ_1 과 θ_2 각각의 방위각 추정 RMSE를 얻었다. 그림 2에서 얻은 각 기법의 분해 성능을 고려하여 그림 4에서 제한한 기법의 경우 DOA separation 5° 부터 방위각 추정의 RMSE를 나타내었고 나머지 두 개의 기법은 10° 부터 나타내었다. 그림 4에서 Lie의 기법은 DOA separation이 증가할수록 CRB에 점차 접근하지만 입사하는 방위가 달라짐에 따라 신호의 상호간 간섭의 양상이 달라져 RMSE의 변화가 심한 것을 볼 수 있다. 그리고 STMV기법은 CRB의 변화와 비슷한 양상으로 변하지만 큰 방위각 bias가 존재한다. 반면 제안한 기법은 방위각 추정 RMSE가 다른 기법에 비해 적으며 CRB에 가까이 접근한다. 그림 3과 그림 4에서 제안한 기법이 기존의 두 기법에 비해 향상된 방위각 추정성능을 가짐을 확인하였다. 이러한 성능

개선은 제안한 CSTMV에 의해 다른 방위의 chirp 간섭 신호들이 효과적으로 제거 되었기 때문이다.

V. 결론

본 논문은 시간-주파수 특성 파라미터가 분리 되지 않는 동일한 시간-주파수 파라미터를 갖는 다중 chirp 신호에서 방위각 추정성능을 저하시키는 간섭신호를 제거하기 위하여 CSTMV를 제안하였다. 제안한 기법은 CBF를 기반으로 하는 Lie의 기법이나 chirp신호의 특성을 고려하지 않은 기존의 STMV기법에 비해 방위각 분해능 및 추정성능이 우수함을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 경북대학교 수중 통신/탐지 특화연구센터(UCRC)에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. G. Wang and X. G. Xia, "Iterative algorithm for direction of arrival estimation with wideband chirp signals," *proc. Inst. Elect. Eng. Radar, Sonar Navigation*, 147(5), 233 -238, Oct, 2000.
2. A. B. Gershman and M.G. Amin, "Wideband direction-of-arrival estimation of multiple chirp signals using spatial time-frequency distributions", *IEEE Signal Processing Lett.*, 7(6), 152-155, June 2000.
3. A. B. Gershman, M. Pesavento and M. G. Amin, "Estimating Parameters of Multiple Wideband Polynomial-phase sources in sensor arrays," *IEEE Trans. Signal Process.*, 49(12), 2924 -2934, Dec, 2001.
4. S. Lie, A.R. Leyman and Y.H.Chew, "Wideband chirp parameter estimation in sensor arrays through DPT," *Electronics letters*, 39(23), Nov, 2003.
5. 최병웅, 김정수, 이균경, "선형 Dechirping기법을 이용한 LFM진향의 백색화 기법," *한국음향학회지* 26(3), 129-135, 2007.
6. S. Peleg and B. Freidlander, "Multicomponent signal analysis using polynomial-phase transform," *IEEE Trans. Aerosp. Electron Syst.*, 32, 378 - 387, Jan, 1989.
7. J. Krolik and D. Swingler, "Multiple broadband source location using steered covariance matrices," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, 37, 1481 - 1494, Oct, 1989.

저자 약력

•김 정 수 (Jeong Soo Kim)

한국음향학회지 제21권 1호 참조

•최 병 웅 (Byung Woong Choi)

한국음향학회지 제25권 4호 참조

•배 은 현 (Eun Hyon Bae)

한국음향학회지 제26권 2호 참조

•이 균 경 (Kyun Kyung Lee)

한국음향학회지 제26권 2호 참조