

도플러 스캐닝 기법을 이용한 이동하는 다중 음원의 상대 위치 추적 기법

The Relative Position Estimate of the Moving Distributed Sources Using the Doppler Scanning Technique

노 용 주*, 윤 종 략*, 전 재 진**
(Ro Yong-Ju*, Yoon Jong-Rak*, Jeon Jae-Jin**)

*부경대학교 정보통신공학과, **국방과학연구소
(접수일자: 2002년 4월 4일; 채택일자: 2002년 7월 15일)

본 연구는 이동 표적체에서 주파수가 서로 다른 신호가 서로 다른 위치에서 발생할 때 도플러 주파수 편이량을 추정하여 이들의 상대적인 신호 발생 위치를 추적하는 도플러 스캐닝 기법에 관한 연구이다. 예를 들어 선박의 발전기와 프로펠러 등과 같은 탑재 기계장치들의 진동에 의해 야기되는 기계적 소음의 각 특징 주파수들의 도플러 주파수 편이는 최단근접거리 (CPA: Closest Point of Approach)에 따라 유일한 시간 정보를 갖고 각 소음원들의 위치에 관련되는 함수이다. 따라서 도플러 스캐닝 기법을 적용하면 이동 선박의 각 기계적 소음원들 간의 공간적인 상대 위치 추정이 가능하다. 그러나 일반적으로 기계류 소음의 주파수는 저주파수대역이므로 도플러 주파수 편이량을 추정하기 위해서는 주파수 분해능이 높아야 하고 아울러 탑재장치의 공간분해능을 높이기 위해서는 동시에 시간 분해능이 높아야 한다. 따라서 상호 역비례 관계에 있는 이들 분해능을 동시에 높이기 위해 확장 칼만 필터 알고리즘을 적용하여 특징 신호들의 도플러 주파수 편이량을 추정하여 기계류의 상대적인 탑재 위치를 규명할 수 있음을 보인다. 먼저 수치모의 실험으로 그 가능성을 검증하고 자동차에 탑재된 스피커 음원을 사용한 실험 결과를 통해 그 성능을 확인하도록 한다.

핵심용어: 도플러 스캐닝, 도플러 주파수 시프트, 음원 위치 추적, 확장 칼만 필터, 주파수 추정, 주파수-진폭 추정기

투고분야: 음향 신호처리 분야 (1,3)

This paper presents the Doppler Scanning technique which enables us to detect the relative positions of moving distributed sources using Doppler frequency shift estimate when the moving source consists of distributed sources with different signature frequencies. Doppler frequency shifts of characteristic frequencies of machinery noise sources such as ship's generator and propeller, with time along CPA (Closest Point of Approach of moving source) are unique, and can be functioned with respect to each source position. Therefore, this technique can be applied to estimate the relative geometrical positions between machinery noise sources. The Extended Kalman Filter (EKF) which has a high frequency resolution with high time resolution, is adopted for improving accuracy of Doppler frequency shift estimate geometric resolution of machinery positions since machinery noise sources show in general low frequency band characteristics with limited spacial distance. The performance of the technique is examined by the numerical simulations and is verified by the experiment using loudspeaker sources on the roof of the car.

Keywords: Doppler scanning, Doppler frequency shift, Source position detection, Extended Kalman filter (EKF), Frequency estimate, Frequency-amplitude tracker

ASK subject classification: Acoustic signal processing (1.3)

I. 서론

이동 소음원의 특징 주파수는 도플러 효과에 의한 주파수 편이가 발생된다. 이러한 주파수 편이량은 소음원의 이동 속도와 주파수 크기에 의해 결정된다. 정지하고 있는 측정점에 접근하는 소음체는 양 (+)의 도플러 주파수 편이량으로 멀어질 때는 음 (-)의 도플러 주파수 편이량으로 측정되며, 최단근접거리 (CPA: Closest Point of Approach)에서 영 (0)인 도플러 주파수 편이량을 갖게 된다[1]. 측정 신호로부터 도플러 주파수 편이량을 보상하여 원 신호의 특성을 얻기 위한 연구 (Dedopplerization 기법) 혹은 도플러 주파수 자체를 추정하여 이동 물체의 동적 특성을 예측하고자 하는 연구들이 진행되어 왔다[2,3].

이동 선박의 방사소음 측정 시험은 선박의 피탐지 수준을 측정하기 위한 측정 시스템 개발과 주파수 대역별 음원 준위 혹은 선박 고유의 음향 특징 추출 등을 목적으로 수행되고 있다. 그러나 선박에 탑재된 주기관, 보조기관을 위시한 각종 기계장치들에 의해 발생하는 선박 방사소음의 특징 주파수 음원들의 음향학적인 발생 위치는 기계장치들의 기하학적인 탑재 위치와 다르게 나타나고[4], 특징 주파수 음원들의 음향적 발생 위치 정보를 추정하는 것은 이동 선박 방사소음 측정 시험에서 선박 고유의 음향 특징 추출 문제와 관련된다.

이러한 이동 선박에서 다른 특징 주파수가 서로 다른 위치에서 발생할 때, 이들 특징 주파수는 같은 이동 속도를 가지나 위치와 주파수가 서로 다르므로 같은 측정 시간에 상이한 도플러 주파수 편이량을 갖게 된다. 따라서

각 특징 주파수의 도플러 주파수 편이량이 0이 되는 시각이 그 특징 주파수의 음원이 CPA를 통과한 시각이 되고, 서로 다른 위치에서 발생하는 각 특징 주파수의 도플러 주파수 편이량을 추정하면 각 특징 주파수의 상대적 발생 위치를 예측할 수 있다.

그러나 선박과 같은 기계적 소음의 주파수는 저주파수 대역이므로 도플러 주파수 편이량을 추정하기 위해서는 주파수 분해능이 높아야 하고 아울러 탑재장치의 공간분해능을 높이기 위해서는 동시에 시간 분해능이 높아야 한다.

본 연구에서는 CPA 통과 전후의 도플러 주파수 편이량 추정을 도플러 스캐닝 (Doppler scanning)으로 정의하고, 주파수 분해능은 물론 시간분해능이 높아 이동물체의 위치추적에 광범위하게 적용되고 있는 확장 칼만 필터 (EKF: Extended Kalman Filtering) 기법으로 이 문제를 해결하고자 한다. 먼저 수치모의 실험에서 확장 칼만 필터로 구현되는 도플러 스캐닝 기법으로 소음원 내의 다른 위치에서 발생하는 특징주파수에 대한 상대적 위치 규명이 가능함을 보이고 자동차에 탑재된 스피커 음원을 이용한 실험으로 그 성능을 확인한다.

II. 확장 칼만 필터를 이용한 도플러 스캐닝 기법

도플러 스캐닝 기법이 적용되는 이동음원 및 수신기의 상대적 위치도는 그림 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이

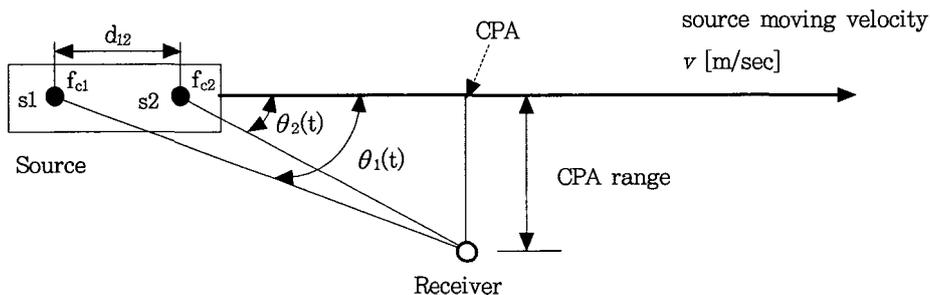


그림 1. 이동음원 및 수신기의 상대적인 위치도
Fig. 1. Geometrical configuration of relative positions of moving source and receiver.

도플러 스캐닝 기법은 이동 소음체의 다른 위치, 즉 그림 1에서 s1과 s2에서 발생된 다른 주파수 신호를 측정하여 각각 주파수 신호의 도플러량을 추정하여 발생점의 위치를 설명하고자 하는 것이다.

이동 소음체의 s1과 s2 위치에서 발생하는 서로 다른 주파수의 음원 신호는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$s_1(t) = \cos(2\pi f_{d1}t + \phi_1), s_2(t) = \cos(2\pi f_{d2}t + \phi_2) \quad (1)$$

여기서 f_{d1} 과 f_{d2} 는 각 음원의 특징 주파수이고 ϕ_1 과 ϕ_2 는 초기 위상이다.

경계면에 의한 반사파는 고려하지 않고 직접파만의 도플러 효과를 고려할 때, 수신기에 수신된 신호는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} r(t) &= r_1(t) + r_2(t) + n(t) \\ &= a_1(t) \cos[2\pi f_1(t)t + \phi_1] \\ &\quad + a_2(t) \cos[2\pi f_2(t)t + \phi_2] + n(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $r_1(t)$ 와 $r_2(t)$ 는 각 음원의 무 잡음 수신 신호, $a_1(t)$ 와 $a_2(t)$ 는 진폭 변화 성분, $f_1(t)$ 과 $f_2(t)$ 는 시간에 따라 변화하는 주파수, ϕ_1 와 ϕ_2 는 초기 위상, $n(t)$ 는 백색 잡음이다. 각 음원에 대한 수신신호의 주파수 $f_1(t)$ 와 $f_2(t)$ 는 식 (3)과 같이 정의되고

$$f_1(t) = f_{c1} + \Delta f_1(t), \quad f_2(t) = f_{c2} + \Delta f_2(t) \quad (3)$$

여기서 $\Delta f_1(t)$ 와 $\Delta f_2(t)$ 는 각 특징주파수 음원에 대한 수신신호의 도플러 주파수 편이량으로 식 (4)로 주어진다[2].

$$\Delta f_1(t) = f_{d1} \frac{v}{C} \cos \theta_1(t), \quad \Delta f_2(t) = f_{d2} \frac{v}{C} \cos \theta_2(t) \quad (4)$$

여기서 v 는 소음체의 이동 속도[m/sec], C 는 음속[m/sec], $\theta_1(t)$ 와 $\theta_2(t)$ 는 각 음원과 수신기간의 각도이다. 각 음원의 도플러 주파수 편이량을 추정하면 도플러 주파수 편이량이 0이 되는 시점을 알아낼 수 있다. 이때의 시각이 각 음원이 CPA를 통과하는 시각이 되고, 이 정보로부터 이동 선박 방사소음 측정 시험과 같이 소음체 이동 속도 (v)가 주어진다면 각 음원 간의 상대 위치, 즉 상대거리를 구할 수 있다. 따라서 음원의 상대 위치 d_{12} 는 각 음원의 특징주파수의 발생점이 CPA를 통과하는 시각과 음원의 이동 속도의 함수로 식 (5)와 같이 정의된다.

$$d_{12} = v(t_{c1} - t_{c2}) = v \Delta t_{c12} \quad (5)$$

$$\Delta f_1(t_{c1}) = 0, \quad \Delta f_2(t_{c2}) = 0 \quad (6)$$

여기서 t_{c1} 과 t_{c2} 는 각 음원이 CPA를 통과할 때의 시각으로 식 (6)과 같이 각 음원의 주파수 편이량 $f_1(t)$ 와 $f_2(t)$ 가 0이 되는 시각으로 구해지고, Δt_{c12} 는 t_{c1} 과 t_{c2} 의 차 함수로 두 음원의 CPA 통과 시간차이다. 또한, 두 음원의 상대 거리 추정 오차는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} e_d &= \sqrt{(d_{12} - \hat{d}_{12})^2} \\ &= \sqrt{(v e_t + \Delta t_{c12} e_v + e_v e_t)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$e_v = \sqrt{(v - \hat{v})^2}, \quad e_t = \sqrt{(\Delta t_{c12} - \Delta \hat{t}_{c12})^2} \quad (8)$$

여기서 $\hat{d}_{12} [= \hat{v} \Delta \hat{t}_{c12}]$ 는 두 음원의 상대 거리 추정치, \hat{v} 는 소음체의 이동 속도 예측치, $\Delta \hat{t}_{c12}$ 는 두 음원의 CPA 통과 시간차의 추정치, e_v 는 소음체의 이동 속도 예측 오차, e_t 는 두 음원의 CPA 통과 시간차 추정 오차이다. 식 (7)과 같이 도플러 스캐닝 기법을 이용한 다중 음원 상대 거리 추정 오차는 소음체의 실제 이동 속도 [v], 각 음원의 실제 CPA 통과 시간차 [Δt_{c12}], 소음체의 이동 속도 예측 오차 [e_v]와 각 음원의 CPA 통과 시간차 추정 오차 [e_t]의 함수이다. 따라서 소음체의 이동 속도가 빠르거나 음원 간의 거리가 길면 상대 거리 추정 오차는 크게 된다.

확장 칼만 필터 주파수-진폭 추정기를 이용한 도플러 스캐닝 기법의 전체적인 구성도는 그림 2와 같다. 그림에서 보는바와 같이 측정신호는 각 특징 주파수를 중심 주파수로 하는 대역통과 필터를 거친 후 확장 칼만 필터에서 주파수의 시간적 변화 성분을 추정하고 비교기(Comparator)에서 특징 주파수와 소음체의 이동 속도로부터 두 특징 주파수 음원 간 상대거리를 추정하게 된다. 상대거리 추정치 \hat{d}_{12} 가 양수이면 이동 소음체의 진행방향으로 음원 1이 음원 2보다 \hat{d}_{12} 만큼 앞서 있는 것이고 음수이면 음원 1이 음원 2보다 \hat{d}_{12} 만큼 뒤에 위치해 있는 것이다.

그림 2에서 확장 칼만 필터(EKF)는 대역 필터된 측정 신호로부터 시간에 따른 주파수의 변화 특성을 추정한다. 확장 칼만 필터의 입력 신호인 대역 필터된 이산 측정 신호는 식 (9), (10)으로 정의된다.

$$z_i(k) = r_i(k) + n_i(k) \quad (9)$$

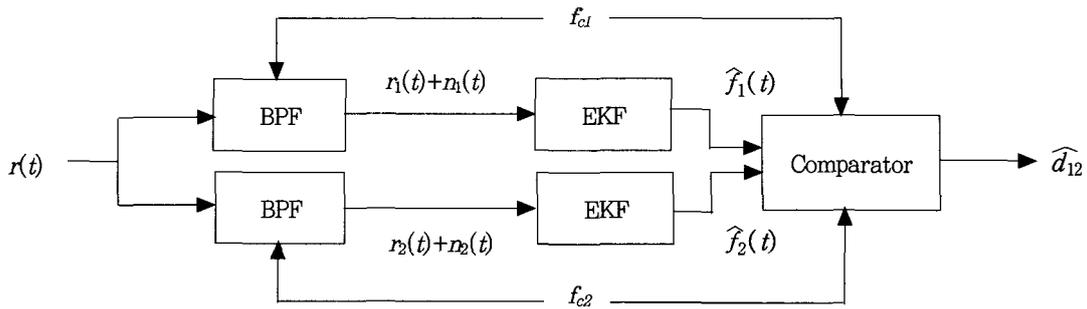


그림 2. 확장칼만필터를 이용한 도플러 스캐닝 기법의 모식도
 Fig. 2. Block diagram of doppler scanning method using EKF.

$$r_i(k) = a_i(k) \cos[2\pi f_i(k)kT_s + \phi_i] \quad (10)$$

여기서 $a_i(k)$ 는 대역 제한된 신호 진폭, $f_i(k)$ 는 주파수, T_s 는 샘플링 주기, k 는 이산시간, ϕ_i 는 초기위상, $n_i(k)$ 는 대역 제한된 부가 백색잡음이고 첨자 i 는 다른 특징 주파수 신호 성분을 의미한다.

확장 칼만 필터 주파수-진폭 추정기를 구성하기 위하여 식 (9), (10)을 적절한 상태 변수로 대체하고 상태 변수와 측정 신호와의 관계를 정의하여 상태 방정식과 측정 방정식을 유도한다. 먼저 시스템의 상태 방정식은 4차 상태 벡터로 식 (10)으로부터 아래와 같이 정의된다[5].

$$x_i(k+1) = f[x_i(k), k] + G w_i(k), \quad w_i(k) \sim N(0, Q_i(k)) \quad (11)$$

$$x_i(k) = [x_{i,1}(k), x_{i,2}(k), x_{i,3}(k), x_{i,4}(k)]^T = [\cos(2\pi f_i(k)kT_s + \phi_i), \sin(2\pi f_i(k)kT_s + \phi_i), T_s 2\pi f_i(k), a_i(k)]^T \quad (12)$$

$$w_i(k) = [w_{i,1}(k), w_{i,2}(k), w_{i,3}(k), w_{i,4}(k)]^T \quad (13)$$

$$f[x_i(k), k] = \begin{bmatrix} \cos[x_{i,3}(k)]x_{i,1}(k) - \sin[x_{i,3}(k)]x_{i,2}(k) \\ \sin[x_{i,3}(k)]x_{i,1}(k) + \cos[x_{i,3}(k)]x_{i,2}(k) \\ (1 - \varepsilon_{i,f})x_{i,3}(k) \\ (1 - \varepsilon_{i,a})x_{i,4}(k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Q_i(k) = E[w_i(k)w_i(k)^T] = \begin{bmatrix} \sigma_{i,1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{i,2}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{i,3}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{i,4}^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$GQ_i(k)G^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{i,3}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{i,4}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{i,f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{i,a} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서 $w_i(k)$ 는 평균이 0이고 공분산 행렬이 $Q_i(k)$ 인 무상관 백색잡음 시계열이고 상태 벡터 $x_i(k)$ 의 각 성분들은 동위상 신호 $[\cos(2\pi f_i(k)T_s k + \phi_i)]$, 직교위상 신호 $[\sin(2\pi f_i(k)T_s k + \phi_i)]$, 정규화된 주파수 $[2\pi f_i(k)T_s]$ 및 진폭 $[a_i(k)]$ 을 나타낸다. 각 이산 시간에 대한 상태 벡터 $x_i(k)$ 를 추정하여 시간에 따라 변동되는 주파수와 진폭을 동시에 추정한다. 식 (11), (14)에서 상태 공간 모델의 상태 전이 함수 $f[x_i(k), k]$ 는 비선형 함수 특성이며, $\varepsilon_{i,f}$ 와 $\varepsilon_{i,a}$ 는 안정화 파라미터로 신호 주파수와 진폭의 시간 변화률에 관계되고, $GQ_i(k)G^T$ 의 성분 $q_{i,f}$ 와 $q_{i,a}$ 는 각각 정규화된 각주파수 $T_s \omega_i(k)$ 와 진폭 $a_i(k)$ 에 부가되는 백색 잡음 $w_i(k)$ 와 $w_i(k)$ 의 분산값 $\sigma_{i,3}^2$ 과 $\sigma_{i,4}^2$ 를 의미하며 신호의 주파수와 진폭의 시간 변화률에 관계되는 파라미터이다.

식 (9)의 대역 필터된 이산 측정 신호는 상태 벡터와의 관계에 의해 다음 식으로 표현된다[5].

$$z_i(k) = r_i(k) + n_i(k) = a_i(k) \cos(2\pi f_i(k)kT_s + \phi_i) + n_i(k) = h[x_i(k), k] + n_i(k), \quad n_i(k) \sim N(0, \sigma_n^2 B_i) \quad (17)$$

$$h[x_i(k), k] = a_i(k) \cos(2\pi f_i(k)kT_s + \phi_i) = x_{i,4}(k)x_{i,1}(k) \quad (18)$$

$$R(k) = E[n_i(k)n_i(k)^T] = \sigma_n^2 B_i \quad (19)$$

여기서 $n_i(k)$ 는 평균이 0이고 분산이 $\sigma_n^2 B_i$ 인 무상관 대역

제한 백색잡음 시계열이고[6], σ_n^2 은 무상관 백색잡음 시계열 $n(k)$ 의 분산이고, B_i 는 사용된 대역 필터의 대역폭이다. 상태 벡터와 측정 모델 사이의 관계함수 $h[x_i(k), k]$ 는 비 선형 함수이며 상태 벡터의 첫 번째 요소인 동위상 신호와 네 번째 요소인 진폭의 곱으로 정의된다.

식 (11)에서 (19)까지의 상태 벡터 방정식과 측정 방정식으로부터 확장 칼만 필터 주파수-진폭 추정기를 구성한다. 구성된 추정기의 성능은 다섯 개의 입력 파라미터 $\{\epsilon_{i,f}, \epsilon_{i,a}, q_{i,f}, q_{i,a}, \sigma_n^2 B_i\}$ 에 의존되며 이러한 입력 파라미터들은 응용 분야의 통계적 특성에 의한 함수로 정의될 수 있고 도플러 주파수의 추정에 있어서 파라미터 $q_{i,f}$ 는 최대 도플러 주파수 편이량에 관계되고, $q_{i,a}$ 는 측정 신호의 특성에 의해 결정될 수 있으며, σ_n^2 은 배경잡음 준위 등에 의해 결정된다.

각 특징 주파수에 적용되는 확장 칼만 필터 주파수-진폭 추정기는 식 (20)부터 (28)까지의 과정이 재귀적으로 처리, 구현되는 것으로 식 (20)에서 식 (28)까지의 관계식으로 도플러 주파수 편이량의 시간적 변화 특성이 예측된다.

$$\hat{x}_i(k)^- = f[\hat{x}_i(k-1)^+, k-1] \quad (20)$$

$$\hat{z}_i(k) = h[\hat{x}_i(k)^-, k] \quad (21)$$

$$F_{i(k-1)} \approx \left. \frac{\partial f[x_i(k), k]}{\partial x_i(k)} \right|_{x_i(k) = \hat{x}_i(k-1)^+} \quad (22)$$

$$H_{i(k)} \approx \left. \frac{\partial h[x_i(k), k]}{\partial x_i(k)} \right|_{x_i(k) = \hat{x}_i(k)^-} \quad (23)$$

$$P_i(k)^- = F_i(k-1) P_i(k-1)^+ F_i(k-1)^T + G Q_i(k-1) G^T \quad (24)$$

$$K_i(k) = P_i(k)^- H_i(k)^T \{H_i(k) P_i(k)^- H_i(k)^T + R_i(k)\}^{-1} \quad (25)$$

$$\hat{x}_i(k)^+ = \hat{x}_i(k)^- + K_i(k) \{z_i(k) - \hat{z}_i(k)\} \quad (26)$$

$$\hat{f}_i(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2\pi T_s} & 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{x}_i(k)^+ \quad (27)$$

$$P_i(k)^+ = \{I - K_i(k) H_i(k)\} P_i(k)^- \quad (28)$$

여기서 ‘ $\hat{\cdot}$ ’ 표시는 추정치를 의미하며, $F_i(k)[4 \times 4]$ 는 선형 상태 전이 행렬, $H_i(k)[1 \times 4]$ 는 선형인 측정신호와 상태 벡터 사이의 연결 행렬, $K_i(k)[4 \times 1]$ 는 칼만 이득, $P_i(k)[4 \times 4]$ 는 상태벡터의 추정치에 대한 오류 공분산 행렬이다. 또한 윗첨자 ‘-’는 선 (*priori*) 추정치, ‘+’는 후 (*posterior*) 추정치를 나타낸다[7].

III. 실험 결과

3.1. 컴퓨터 모의 실험

확장 칼만 필터 주파수-진폭 추정기를 이용한 도플러 스캐닝 기법으로 이동 소음체 내의 다른 위치에서 발생된 다른 특징 주파수의 상대 위치 추정 결과를 컴퓨터 모의 실험을 통하여 검증하였다. 먼저 확장 칼만 필터의 입력 파라미터($q_{i,f}, q_{i,a}, R_i$)의 설정은 각 음원의 주파수, 음원의 이동속도, 음속, 샘플링 주파수, 입력신호의 특성, 배경잡음의 크기와 대역필터의 대역폭 등에 의해 결정된다. 먼저 $q_{i,f}$ 는 이론적으로 예측되는 도플러 주파수 편이의 최대값에 관계되는 함수로 다음 식과 같이 결정되고

$$q_{i,f} = \alpha_f \frac{(2\pi f_i T_s v/C)^2}{2} \quad (29)$$

여기서 T_s 는 샘플링 주기, f_i 는 각 음원의 특징주파수, v 는 음원 이동 속도, C 는 음속, α_f 는 비례상수이다. 모의실험과 실제 실험에서 모두 비례상수 α_f 는 0.01로 설정하였다. 그리고 $q_{i,a}$ 는 측정 신호의 절대값의 최대값과 평균값의 함수로 다음과 같이 결정하고

$$q_{i,a} = \alpha_a \frac{[\max(|y_i(k)|) - \tilde{y}_i(k)]^2}{2} \quad (30)$$

여기서 $y_i(k)$ 은 대역필터를 통과한 측정 신호, $\tilde{y}_i(k)$ 은 $y_i(k)$ 의 절대값의 시간 평균이고 α_a 는 비례상수이다. 비례상수 α_a 는 0.01로 설정하였다. 마지막으로 R_i 는 배경잡음 준위와 대역통과필터의 대역폭에 의해 결정하였다.

$$R_i = \sigma_n^2 B_i \quad (31)$$

여기서 σ_n^2 은 배경잡음 준위이고, B_i 는 대역통과필터의 대역폭이다.

모의실험은 공기중과 수중의 두 가지 경우에 대하여 수행하였고 다중경로에 대한 영향은 고려하지 않았다. 먼저 공기 중에서는 그림 3과 같이 수평거리 2 m만큼 떨어져 있고 각각 0.8 kHz, 1 kHz와 1.2 kHz의 톤 신호를 발생하는 음원이 동일한 속도 20 km/h (≈ 5.56 m/s)로 이동하는 경우에 대하여 수행되었다. 이때 음원들의 높이는 1.5 m, 수신기의 높이는 3 m, 그리고 4 m의 CPA 거리로 수신기를 직선으로 통과한다. 음속은 340 m/s로 일정하다고 가정하였고 신호대잡음비는 20 dB, 샘플링 주파수는 10 kHz로 설정하였다. 이때 각 음원 주파수 0.8

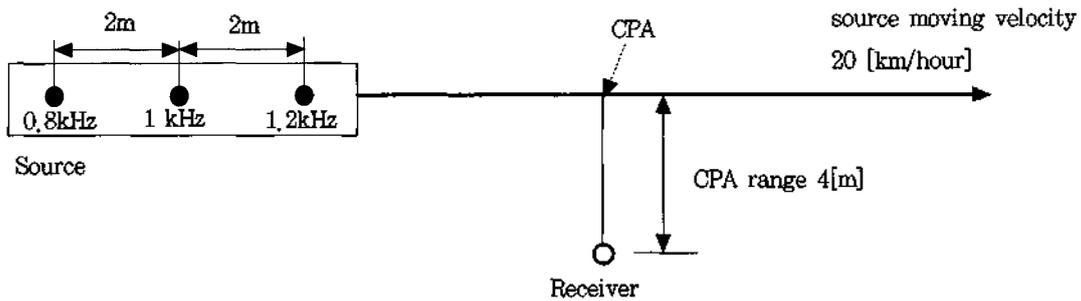


그림 3. 공기 중에서의 수치모의실험 조건
Fig. 3. Simulation configuration in air.

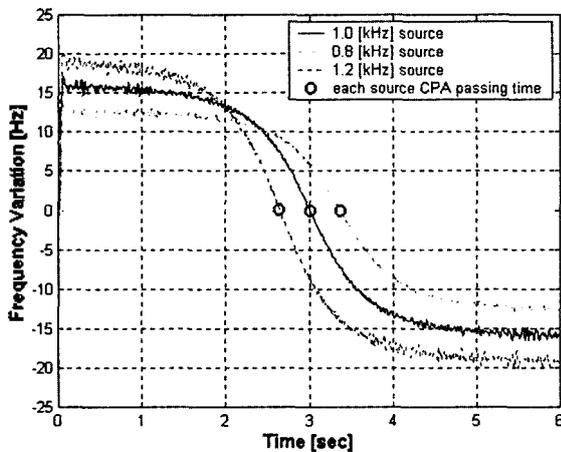


그림 4. 공기 중에서의 도플러 주파수 편이량 추정 결과
Fig. 4. Estimated results of doppler frequency shift in air.

0.8 kHz, 1 kHz와 1.2 kHz에 대한 이론적으로 예측되는 도플러 주파수 편이의 최대치는 각각 약 13.1 Hz, 16.3 Hz와 19.6 Hz이다.

그림 4는 공기 중에서의 모의실험으로 해석한 각 음원들의 주파수 편이량의 시간에 따른 추정 결과를 보인다. 그림에서 보이는 바와 같이 0.8 kHz, 1 kHz와 1.2 kHz 신호들의 CPA 통과 시점은 각각 3.365 sec, 3.006 sec, 2.646 sec로 추정된다. 이때 0.8 kHz와 1 kHz 음원의 CPA

통과 시간차 오차 (e_t)는 대략 1.2 msec이고 1 kHz와 1.2 kHz 음원간은 0.3 msec이다. CPA 통과 시각 추정치와 음원의 이동 속도로부터 0.8 kHz와 1 kHz 음원간의 상대 거리는 대략 -1,993 m, 1 kHz와 1.2 kHz 음원간의 상대 거리는 1,998 m로 추정된다. 음원간의 상대 거리 추정 오차는 각각 0.7 cm와 0.2 cm로 이것은 음원간 수평 거리 2 m의 0.4% 미만이다. 만약 음원의 이동 속도 오차 (e_v)가 5% 즉, 1 km/h (≈ 0.28 m/s)이면, 상대거리 예측 오차는 식 (7)과 같이 각각 9.4 cm와 9.9 cm로 음원간 거리의 약 5%까지 증가된다.

수중의 컴퓨터 모의실험 경우는 그림 5와 같이 수평거리 5 m만큼 떨어져 있고 각각 115 Hz, 60 Hz와 250 Hz의 톤 신호를 발생하는 음원이 일정한 속도 12 knot (≈ 6.18 m/s)로 이동하는 경우에 대하여 수행되었다. 60 Hz 신호는 보통 선박의 발전기 소음이며 기준 음원으로 하였다. 이때 수면으로부터 음원들의 깊이는 3 m, 수신기의 깊이는 30 m, 그리고 5 m의 CPA 거리로 수신기를 직선으로 통과하는 것으로 가정하며, CPA를 제외한 값들은 실제 해양의 방사소음 측정 환경을 토대로 설정한 것이다. 음속은 주파수에 관계없이 1500 m/s로 일정하다고 가정하고 반사파의 영향은 고려하지 않았으며, 신호대잡음비는 20 dB, 샘플링 주파수는 10 kHz로 설정하였다. 이때 각

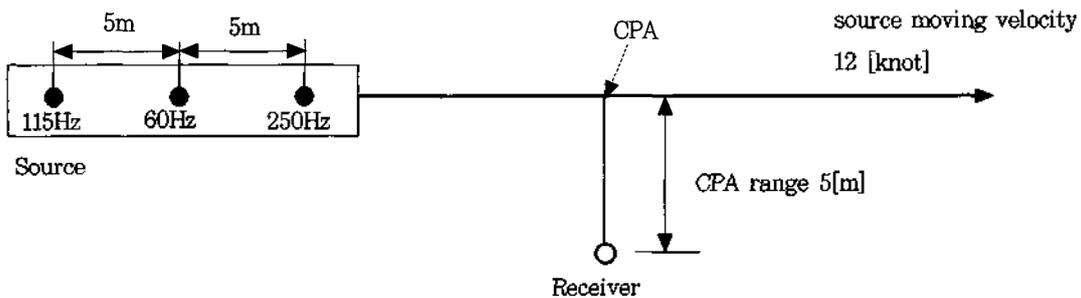


그림 5. 수중에서의 수치모의실험 조건
Fig. 5. Simulation configuration in water.

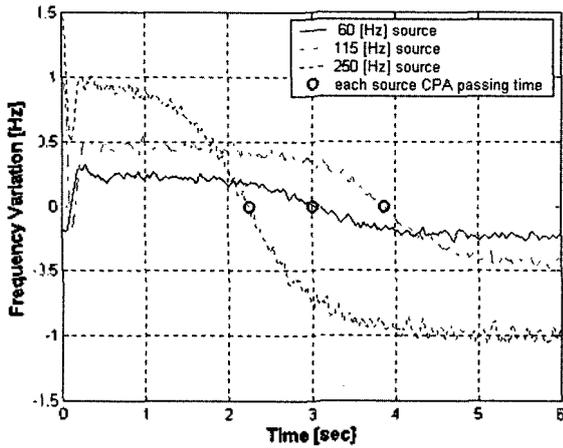


그림 6. 수중에서의 도플러 주파수 편이량 추정 결과
Fig. 6. Estimated results of doppler frequency shift in water.

음원 주파수 115 Hz, 60 Hz와 250 Hz에 대한 이론적으로 예측되는 도플러 주파수 편이의 최대치는 각각 약 0.47 Hz, 0.25 Hz와 1.03 Hz이다.

그림 6은 수중에서의 각 음원들의 시간에 따른 주파수 편이량 추정 결과를 보인다. 그림에서 보이는 결과로부터 115 Hz, 60 Hz와 250 Hz 신호들의 CPA 통과 시점은 각각 3.867 sec, 3.045 sec, 2.249 sec로 추정되고, 60 Hz와 115 Hz 음원의 CPA 통과 시간차 오차 (e_t)는 대략 13.3 msec이고 60 Hz와 250 Hz 음원간은 11.8 msec이다. 공기 중의 모의실험 결과와 비교해 보면 대략 10배 정도 큰 오차를 나타내었다. 이것은 도플러 주파수 편이량의 변화 폭이 상대적으로 작아 주파수 분해능의 영향에 기인된 도플러 주파수 편이량 추적 성능 저하인 것으로 판단된다. 각 음원의 CPA 통과 시각의 추정치와 음원의 이동 속도로부터 60 Hz와 115 Hz 음원간의 상대거리는 약 -5.073 m로 추정되고, 60 Hz와 250 kHz 음원간의 상대 거리는 4.918 m로 추정되어 음원간의 상대 거리 추정 오차는 각각 7.3 cm와 8.2 cm로 음원간 수평 거리의 1.6 % 이하이다. 만약 음원의 이동 속도의 오차가 5%인 0.6

knot (≈ 0.31 m/s)이면, 상대 거리 예측 오차는 32.6 cm와 33.6 cm로 음원간 거리의 약 7%까지 증가되며, 식 (7)과 일치한다. 이상의 모의실험 결과로부터 이동 소음체의 이동 속도를 안다면, 확장칼만필터 주파수-진폭 추적기를 적용한 도플러 스캐닝 기법으로 높은 주파수 분해능과 시간 분해능으로 도플러 주파수 편이량을 추적하여 이동 소음체 내의 다른 위치에서 발생하는 특정 주파수의 발생위치 간의 상대거리를 예측할 수 있음을 확인하였다.

3.2. 자동차를 이용한 스피커 음원 실험

자동차에 설치된 스피커 음원을 이용하여 공기 중에서 도플러 스캐닝 기법을 이용한 음원간 상대 거리 추정 실험을 수행하였다. 실험 조건은 그림 7과 같다. 이때, 자동차의 지붕에 두 개의 스피커를 수평거리 1.94 m, 높이 1.63 m에 고정하고 988 Hz 정현신호를 스피커1로 발생하고 800 Hz와 1200 Hz의 정현파를 각각 스피커2에서 발생시켜 CPA를 3 m로 하고 수신 마이크로폰의 높이 1 m로 하여 측정하였다. 자동차의 이동 속도는 대략 18 km/h 이었고, 50 kHz의 샘플링 주파수로 측정데이터를 샘플링하고 10 kHz로 다운 샘플링하여 분석하였다. 실험 주파수 대역에서 신호대잡음비는 대략 7.45 dB로 측정되었다.

그림 8은 988 Hz와 1.2 kHz 두 음원의 측정 신호로부터 두 음원의 시간에 따른 도플러 주파수 편이량 추정 결과를 보인다. 그림에서 각 음원의 도플러 주파수 편이량이 각 음원의 CPA 근처에서는 잘 추적되지만 CPA에서 멀어질수록 진동하는 특성을 보인다. 이것은 스피커와 수신 마이크로폰의 지향성과 전파손실 때문에 CPA에서 멀어질수록 각 음원이 낮은 진폭으로 측정되어 신호대잡음비가 떨어져서 확장칼만 필터 주파수-진폭 추적기의 성능이 저하된 것으로 판단된다. 그러나 다중 음원의 상대거리 추정에서는 각 음원의 CPA 통과시각의 도플러 주파수 편이량 추적이 중요하며, CPA 근처에서의 추적 성능은

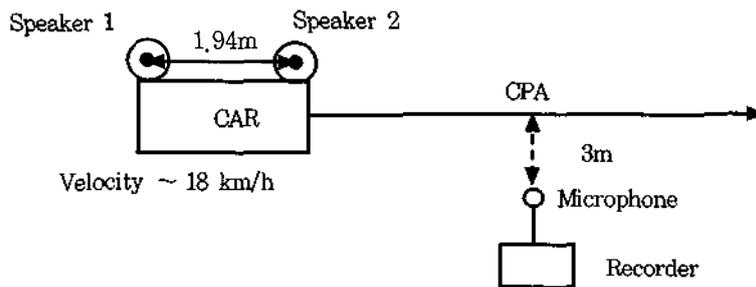


그림 7. 자동차에 설치된 스피커를 이용한 실험 조건
Fig. 7. Experimental configuration using loudspeaker sources on the roof of the car.

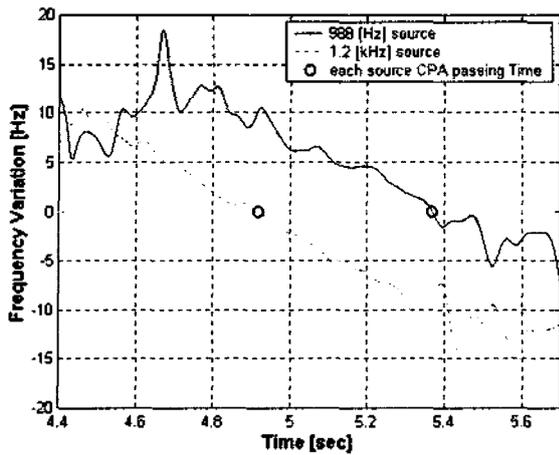


그림 8. 988Hz와 1200Hz 신호로부터 추정된 도플러 주파수 편이량

Fig. 8. Estimate results of doppler frequency shift from 988Hz and 1200Hz signals.

충분히 각 음원의 CPA 통과시각을 예측할 수 있다. 이때 이론적으로 예측되는 도플러 주파수 편이의 최대치는 음원의 이동 속도가 18 km/h (≈ 5.00 m/s)이므로 음파의 속도를 340 m/s로 가정하면 988 Hz 음원은 약 14,529 Hz이고 1200 Hz 음원은 약 17,647 Hz이다. 그림에서 988 Hz와 1.2 kHz 음원의 도플러 주파수 편이량이 0인 점의 시각은 약 5.367 sec와 4.914 sec로 두 음원의 CPA 통과 시간차는 대략 0.453 sec였고, 자동차의 이동 속도와 두 음원의 CPA 통과 시간차 추정치로부터 두 음원 간의 상대 거리는 2.267 m로 예측되었다. 두 스피커 간의 거리 추정 오차는 약 17%인 33 cm로 모의실험 결과와 비교하면 음원의 이동 속도 오차가 약 17%인 3.4 km/h (≈ 0.95 m/s) 일 때와 유사하였다.

그림 9는 988 Hz와 800 Hz 두 음원의 측정 신호로부터 두 음원의 시간에 따른 도플러 주파수 편이량 추정치를 보인다. 그림에서 988 Hz와 800 Hz 두 음원의 도플러 주파수 편이량이 0인 점의 시각은 대략 4.717 sec와 4.207 sec로 두 음원의 CPA 통과 시간차는 대략 0.510 sec였다. 자동차의 이동 속도는 18 km/h (≈ 5.00 m/s)이었고, 이때 두 음원 988 Hz와 800 Hz의 이론적으로 예측되는 도플러 주파수 편이량의 최대치는 각각 16,144 Hz와 11,765 Hz이다. 두 음원의 CPA 통과 시간차와 자동차의 이동속도로부터 두 음원간의 상대거리는 2.55 m로 예측되고, 실제 두 스피커간의 거리와의 추정 오차는 약 31%인 61 cm로 모의실험 결과와 비교하면 음원의 이동 속도 오차가 약 31%인 6.1 km/h (≈ 1.69 m/s) 정도일 때 상대 거리 추정 오차와 같다. 실제 실험에서 모의실험보다 높은 추정 오차가 발생된 것은 자동차의 이동속도 측정의 비정확성과

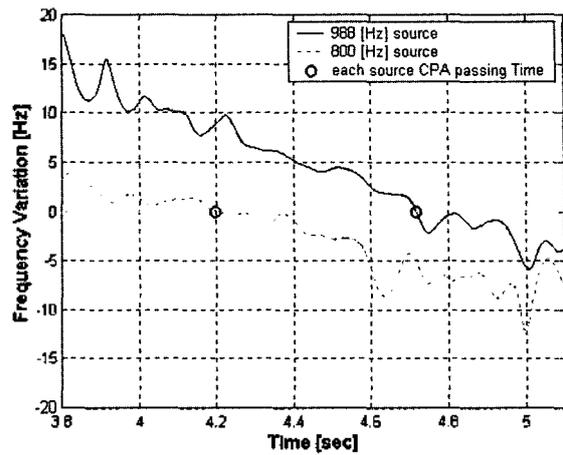


그림 9. 988Hz와 800Hz 신호로부터 추정된 도플러 주파수 편이량

Fig. 9. Estimate results of doppler frequency shift from 988Hz and 800Hz signals.

실험에서 사용된 기하학적인 스피커의 음원 중심점과 실제 음원 중심점의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 실험 결과로부터 음원의 이동 속도가 주어진다면 도플러 스캐닝 기법으로 동일한 속도로 이동하고 다른 위치에 있는 다른 특징 주파수 발생 위치의 상대거리를 추정하는 것이 가능함을 확인하였다. 또한 추정 오차는 각 특징 주파수의 CPA 통과 시각의 추정의 정확성 뿐만 아니라 음원의 이동 속도의 정확성에도 의존한다.

IV. 결론

확장칼만필터를 이용한 진폭-주파수 추정기로 이동 소음원의 각 특징 주파수의 도플러 주파수 편이량을 추정하여 각 특징 주파수의 발생원 간의 상대거리를 추정하는 도플러 스캐닝 기법을 컴퓨터 모의실험과 자동차를 이용한 이동 스피커 음원 실험으로 그 가능성을 검토하였다. 공기 중 조건의 모의실험에서 음원의 이동속도가 정확히 주어지는 경우 수평거리 2 m만큼 떨어져 있는 두 음원 간의 상대거리는 0.5%인 1 cm 미만의 오차로 추정 가능하였다. 음원의 이동 속도에서 5%인 1 km/h (≈ 0.28 m/s)의 오차가 발생되면, 상대거리 추정 오차는 약 5%인 10 cm로 증가한다. 또한 수중 조건의 모의실험에서는 이론적으로 예측되는 도플러 주파수 편이량의 최대치가 1 Hz 이하인 낮은 주파수 음원들이 5 m만큼 떨어져 있는 경우 약 1.6%인 8 cm 이하의 오차 범위 내에서 상대거리 추정이 가능함을 보였고, 공기 중의 모의실험 경우와 같이 약 5%인 0.6 knot (≈ 0.31 m/s)의 음원 이동 속도 오차 발생시, 상

대거리 추정 오차는 약 7%인 35 cm까지 증가하였다. 수중 환경의 모의실험의 결과가 공기중의 모의실험 결과보다 추정 오차가 크게 나타났는데, 이것은 도플러 주파수 편이량의 변화폭에 기인된 주파수 추적 성능의 영향인 것으로 판단된다. 자동차에 설치한 스피커 음원을 이용한 실험에서 988 Hz와 1.2 kHz인 두 음원에 경우에는 33 cm의 상대거리 추정 오차가 발생되었고 988 Hz와 800 Hz인 두 음원에 대해서는 61 cm의 추정 오차를 얻었다. 모의실험 결과와 비교해 보면 대략 30배, 60배의 상대거리 예측 오차가 발생했다. 이것은 음원의 이동 속도의 오차가 3.4 km/h와 6.1 km/h인 경우와 유사한 경우이다. 따라서 이것은 자동차의 이동 속도 측정의 비정확성으로 인한 오차와 기하학적인 스피커의 음원 중심점과 실제 음원 중심점과의 차이에 기인한 결과로 판단된다. 실험 결과로부터 상이한 특징 주파수가 다른 위치에서 발생되고 정확한 음원의 이동 속도를 알 수 있다면, 도플러 스캐닝 기법으로 이동하는 다중음원의 상대거리 추정이 가능함을 확인하였다. 그러나 경계면의 반사파에 의한 수신 신호 왜곡이 상대 위치 추정에 미치는 영향에 대한 연구가 이루어져야 한다. 또한 실제 이동 선박 방사소음으로부터 도플러 스캐닝 기법을 이용하여 선박의 탐재 장비의 상대 위치를 추정할 수 있음을 실제 해양 실험으로 검증할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 수중음향 특화센터 43과제 지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

1. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, Chap. 15, 415-417, 1982.
2. J. Crestel, B. Emile, M. Guillon, and D. Menard, "A Doppler Frequency Estimate Using The Instantaneous Frequency," *DSP 97*, 777-780, 1997.
3. M. Ghogho, A. Swami, and T. S. Durrani, "Frequency estimation in the presence of doppler spread: Performance analysis," *IEEE trans. on signal processing*, 49 (4), 777-789, 2001.
4. P. T. Arveson, "Radiated noise characteristics of a modern cargo ship," *J. Acoust. Soc. Am.*, 107 (1), 118-129, 2000.
5. 노용주, 윤종락, 전재진, "확장 칼만 필터 주파수-진폭 추적기 설계," *한국음향학회지*, 21 (3), 256-263, 2002.
6. K. S. Shanmugan and A. M. Breipohl, *Random Signals: Detection, Estimation and Data Analysis*, John Wiley & Sons., Chap. 5, 312-331, 1988.
7. M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering-Theory and Practice Using MATLAB*, John Wiley & Sons., Chap. 5, 169-200, 2001.
8. J.-R. Yoon and Y.-J. Ro, "Effective detection method of unstable acoustic signature generated from ship radiated noise," *Journal of the acoustical society of korea*, 20 (1E), 25-30, 2001.
9. B. F. La Scala and R. R. Bitmead, "Design of an extended kalman filter frequency tracker," *IEEE trans. on signal processing*, 44 (3), 739-742, 1996.

저자 약력

● 노 용 주 (Ro Yong-Ju)



1997년 2월: 부경대학교 정보통신공학과 공학사
 1999년 2월: 부경대학교 대학원 정보통신공학과 공학석사
 2001년 2월: 부경대학교 대학원 정보통신공학과 박사과정 수료
 ※ 주관심분야: 디지털신호처리, 수중음향신호처리, 표적 위치 탐지 등

● 윤 종 락 (Yoon Jong-Rak)

한국음향학회지 제18권 6호 참조
 현재: 부경대학교 정보통신공학과 교수

● 전 재 진 (Jeon Jae-Jin)

한국음향학회지 제18권 제2호 참조
 현재: 국방과학연구소 책임연구원