

비정형 하이드로폰 어레이를 이용한 DOAs 및 도플러 주파수 동시추정기법

강정원 이원철
승실대학교 정보통신공학과

DOAs and Doppler Frequencies Estimation Techniques Using the Towed Hydrophone Array of Arbitrary Form

JeongWon Kang WonCheol Lee
CSP Lab., Dept. of Information and Telecomm. Engineering,
SoongSil Univ.

요약

본 논문은 비균일, 비선형 분포를 가지는 비정형 하이드로폰 어레이를 견인하여 목표물로부터 발생된 협대역 신호에 대한 DOAs(Direction-Of-Arrivals) 및 도플러 주파수 정보를 동시에 추정하는 기법을 제안한다. 균일 분포 선형 어레이를 견인하는 전통적인 처리기법은 DOA 추정에 국한되어 활용될 수 있다는 한계점을 가지고 있을 뿐 아니라 목표물의 특징을 파악할 수 있는 중요한 정보 중의 하나인 발생신호의 주파수 성분을 추정하기 위해서는 주파수 스펙트럼을 별도로 구성하여야 하는 등의 난점을 지니고 있어 조기 경보 능력의 치명적인 제한점을 가질 수 있으며, 하이드로폰 어레이의 구조가 외부적인 환경요인에 의하여 선형을 유지하지 못함으로써 추정능력을 저하시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 한계성을 극복하기 위하여 불규칙한 곡면을 가지고 있는 모함의 측면에 하이드로폰 어레이를 설치하여 목표물의 DOA 뿐만 아니라 모함의 이동에 의해 목표물과 사이에서 발생하는 도플러 주파수까지 동시에 추정하는 기법을 제안한다. 특별히, 도플러 주파수 추정은 취득신호에 대한 푸리에 변환과정을 거치지 않고 추정함으로써 계산량을 감소시킬 수 있다.

1. 서론

수중에서의 수동형 하이드로폰 어레이를 이용한 목

표물의 방사전호에 대한 DOA추정에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 수동형 견인 어레이를 이용하는 기존의 전통적인 처리기법들의 대부분은 수중에서 목표물이 방사하는 신호를 취득하는 과정에서 여러 가지 제한 조건 및 오류 발생의 가능성 및 오류 파라미터에 대하여 언급하고 있다. 특히, 하이드로폰 어레이의 직선성 및 어레이의 하이드로폰 사이의 등 간격 유지 등은 추정성을 좌우하는 주요한 파라미터이며, 이를 실제적인 상황에서 적용함에 있어서 위에서 언급한 제한 조건을 정확하게 만족시키는 것은 거의 불가능하다. 선형 견인 어레이의 이용은 그림 1.1과 같이 실제적인 환경 하에서 선형 어레이를 견인함에 있어서 해수의 흐름 등 외부적 환경의 원인에 의하여 하이드로폰 어레이가 선형 형태를 유지하지 못하여 시간에 따라 하이드로폰간의 거리 및 위치에 대한 오차가 발생함에 의해 주요 파라미터 추정 성능이 저하되는 문제점을 가지고 있다[1].

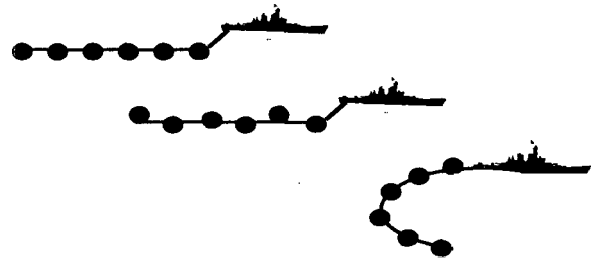


그림 1.1 실제환경 하에서의 선형 견인 어레이를 구성하는 하이드로폰 위치의 부정확성

위에서 언급한 선형 하이드로폰 어레이를 견인하는 과정에서 발생하는 공간 스펙트럼 추정시의 오차를 극복하고, 입사각 추정에 국한된 기존의 방법을 극복하기 위해서 선형 하이드로폰 어레이를 견인하는 대신 비선형의 비정형 곡면을 가지는 견인함의 측면에 어레이를 설치하는 방법을 고려하여 볼 수 있다. 그러나, 비정형 곡면에 설치된 하이드로폰 어레이에서 취득하는 신호에 대한 처리는 선형 하이드로폰 어레이에서 신호를 취득하여 처리하는 방법보다 상대적으로 신호의 처리 및 공간 스펙트럼 구성상의 복잡성이 존재한다. 그러므로, 견인함 측면에 같은 높이에 설치된 비선형 구조의 하이드로폰 어레이가 취득하는 신호에 대하여 선형 구조의 어레이에 기준하는 보정이 필요하다.

2. 비선형 하이드로폰 어레이의 선형 매핑 원리

그림 2.1은 같은 수위에 곡면을 따라 설치된 하이드로폰 어레이를 나타내고 있다. N 개의 하이드로폰으로 구성된 비선형 어레이는 기준 하이드로폰과 기준 하이드로폰에서 가장 멀리 떨어진 N 번째 하이드로폰을 잇는 직선 상에 투영하여 맵핑할 수 있다. 기준 하이드로폰으로부터 n 번째 하이드로폰까지의 직선 거리를 d_{n-1} 이라고 하고 이 직선이 견인함의 종축과 평행하다고 가정하고, 비선형 어레이 내의 n 번째 하이드로폰이 종축과 기준 하이드로폰에 대하여 이루는 각을 ϕ_n 이라고 하면 직선 상에 맵핑된 n 번째 하이드로폰과 기준 하이드로폰과의 거리는 $d_{n-1} \cos \phi_n$ 이 된다. 또한 신호의 입사방향 θ 에 대하여 입사하는 신호의 wavefront를 기준으로 n 번째 하이드로폰의 처음 위치와 맵핑된 위치사이에서

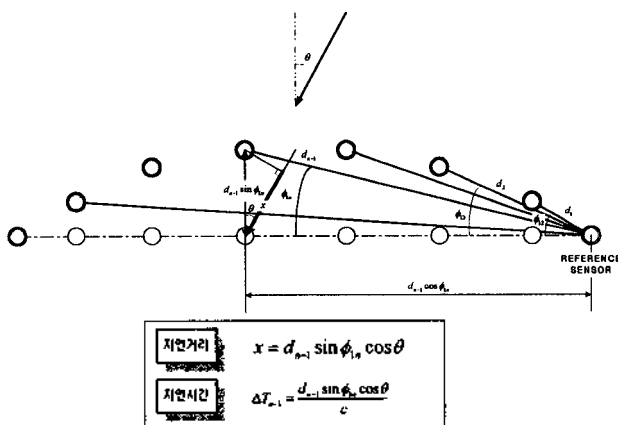


그림 2.1 비선형 하이드로폰 어레이와 선형 하이드로폰 어레이의 신호 취득에 대한 시공간 비교

$x = d_{n-1} \sin \phi_n \cos \theta$ 만큼의 공간 거리가 발생되며, 그에 따라 어레이에 입사되는 신호에 대하여 $d_{n-1} \sin \phi_n \cos \theta / c$ 시간만큼의 시간차가 생긴다. 따라서, 매핑 과정에서

$d_{n-1} \sin \phi_n \cos \theta / c$ 시간과 $d_{n-1} \sin \phi_n \cos \theta$ 거리만큼의 시공간 보정이 필요하다. 이때 ϕ_n 은 선박의 곡면 형태에 따라 $-90^\circ < \phi_n < 90^\circ$ 사이의 값을 임의로 가질 수 있다. 즉, 투영된 가상의 선형 하이드로폰 어레이와의 수신신호에 대한 비교를 하게 되면 실제 분포되는 비선형 하이드로폰 내의 n 번째 하이드로폰에 대하여 하이드로폰 위치의 선형화에 기인하는 시간 보정 값 $d_{n-1} \sin \phi_n \cos \theta / c$ 시간만큼의 시간차가 발생되어 신호를 취득하게 되는 사실을 그림 2.1을 통하여 확인할 수 있다.

3. 비선형 하이드로폰 어레이의 신호 취득 모델링

3.1 선형 하이드로폰 어레이의 신호 취득

등속 직진하는 N 개의 하이드로폰으로 구성된 비균일 선형 견인 어레이 상에 단일 방사 물체에 의해 생성된 협대역 신호가 입사되는 경우 n 번째 하이드로폰의 표본화 된 출력은 다음과 같다[2].

$$x_n(t_i) = A \exp \left[j 2 \pi f \left(t_i - \frac{d_n}{c} \sin \theta \right) \right] + \varepsilon_n(t_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, K \quad (3.1.1)$$

여기서 d_n 은 기준 하이드로폰로부터의 거리이고, A 는 신호의 감쇄와 위상지연을 포함하는 복소값이며, f 는 도플러 주파수, c 는 수중환경 하에서의 음파 전달 속도를 나타내며 이때의 c 값은 대략 1500m/s 이다. $\varepsilon_n(t_i)$ 는 영 평균의 통계적인 특성을 가지는 가우시안 잡음 랜덤변수를 나타낸다. 또한, t_i 는 각 하이드로폰 출력을 표본화하는 시점을 나타내며, 표본화 시간 간격을 Δt 라고 할 경우 $t_i = i \Delta t$ 로 표현할 수 있다. 이때, K 는 각 하이드로폰 출력에 대한 총 측정 표본 수를 나타낸다. 이때, 목표물과 하이드로폰 어레이 간에 상당하면 거리가 유지된다고 가정하고, 견인 어레이의 이동 속도를 v , 방사 신호의 어레이 입사각을 θ , 목표물에서 발생하는 협대역 신호의 주파수를 f_0 라 하면, 정지상태의 목표물에서 방사되는 신호의 중심 주파수와 하이드로폰 어레이의 이동에 의해 생기는 도플러 주파수 사이의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = f_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} \sin \theta \right) \quad (3.1.2)$$

식(3.1.2)를 식(3.1.1)에 대입하고 근사화하여 정리하면 다음과 같다.

$$x_n(t_i) \approx A \exp \left[j 2 \pi f_0 \left(t_i - \frac{v t_i + d_n}{c} \sin \theta \right) \right] + \varepsilon_n(t_i), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3.1.3)$$

위의 식(3.1.3)를 입사되는 신호의 파장길이 $\lambda_0 = c / f_0$,

도플러 천이 값 $f_d = f_0 v \sin \theta / c$ 로 다시 표현하면, 다음과 같다.

$$x_n(t) = A \exp(j2\pi f_0 t) \exp\left[-j2\pi\left(f_d t + \frac{d_n}{\lambda_0} \sin \theta_t\right)\right] + \varepsilon_n(t) \quad n=1,2,\dots,N \quad (3.1.4)$$

이때, 단일 목표물에서 방사된 신호가 수면과 수중바닥 분포에 의해 L 개의 반사모드가 생긴다고 가정하고, 생성된 L 개의 코히어런트한 신호들이 하이드로폰 어레이 상으로 받아들여질 경우 식(3.1.1)을 사용하여 n 번째 하이드로폰 출력을 표현하면 다음과 같다[3].

$$x_n(t) = \sum_{l=1}^L A_l \exp\left[j2\pi f_l \left(t - \frac{d_n}{c} \sin \theta_l\right)\right] + \varepsilon_n(t) \quad , \quad n=1,2,\dots,N \quad (3.1.5)$$

또한, 단일 방사 신호가 협대역 특성을 가지며 그 중심 주파수가 f_0 인 경우 n 번째 하이드로폰에서 L 개의 모드로 입사되는 신호 성분의 도플러 천이 값들과 협대역 신호 성분들로 표현하면 다음과 같다.

$$x_n(t) = \sum_{l=1}^L A_l \exp(j2\pi f_0 t) \exp\left[-j2\pi\left(f_d t + \frac{d_n}{\lambda_0} \sin \theta_l\right)\right] + \varepsilon_n(t) \quad (3.1.6)$$

여기서, $A_l = \alpha_l e^{j\phi_l}$ 은 감쇄이득 α_l 과 위상성분 ϕ_l 을 갖는 l 번째 신호 모드의 복소 진폭 값이며, f_d 과 θ_l 은 각각 l 번째 신호모드에 대한 도플러 주파수 천이 및 입사각 성분을 의미한다.

3.2 비선형 하이드로폰의 신호취득 모델링

앞서 2장에서 언급한 바와 같이 l 번째 다중경로를 통하여 입사된 신호에 대하여 가상의 선형 어레이와의 비교를 통하여 얻어진 비선형 어레이의 n 번째 하이드로폰에 대한 취득 시간차를 ΔT_{n-1} 이라고 하면

$$\Delta T_{n-1} = \frac{x}{c} = \frac{d_{n-1} \sin \theta_{l_n} \cos \theta_l}{c} \quad (3.2.1)$$

로 표현된다. 따라서, 선박 측면에 곡면을 따라 설치된 하이드로폰에서 수신한 신호는 그림 2.1에서 보인 바와 같이 투영된 가상의 선형 하이드로폰 어레이에서 취득한 신호에 대하여 ΔT_{n-1} 시간차에 대한 성분을 포함하고 있다고 할 수 있다. 따라서, 식(3.1.6)에 대하여

$$x_n(t + \Delta T_{n-1}) = \sum_{l=1}^L A_l \exp(j2\pi f_0 (t + \Delta T_{n-1})) \exp\left[-j2\pi\left(f_d (t + \Delta T_{n-1}) + \frac{d_n}{\lambda_0} \sin \theta_l\right)\right] + \varepsilon_n(t + \Delta T_{n-1}) \quad (3.2.2)$$

와 같이 정리할 수 있다.

따라서, N 개의 하이드로폰으로 이루어진 어레이에서

취득하는 신호에 대하여 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$X(t) = \mathbf{D} \mathbf{A} \Phi(t) \mathbf{S}(t) + \mathbf{E} \quad (3.2.3)$$

이때,

$$X(t) = [x_1(t) \quad x_2(t + \Delta T_1) \quad \dots \quad x_N(t + \Delta T_{N-1})]^T,$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}[e^{j2\pi f_0 \Delta T_1} \quad \dots \quad e^{j2\pi f_0 \Delta T_{N-1}}],$$

$$\mathbf{S}(t) = [s_1(t) \quad s_2(t) \quad \dots \quad s_L(t)]^T, \quad s_l(t) = A_l \exp(j2\pi f_0 t),$$

$$\Phi(t) = \text{diag}[e^{-j2\pi f_d t} \quad e^{-j2\pi f_d t} \quad \dots \quad e^{-j2\pi f_d t}],$$

$$\mathbf{E} = [\varepsilon_1(t) \quad \varepsilon_1(t + \Delta T_1) \quad \dots \quad \varepsilon_N(t + \Delta T_{N-1})]^T,$$

$\mathbf{A} =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{-j2\pi\left(f_d \Delta T_1 + \frac{d_1}{\lambda_0} \sin \theta_1\right)} & e^{-j2\pi\left(f_d \Delta T_1 + \frac{d_2}{\lambda_0} \sin \theta_2\right)} & \dots & e^{-j2\pi\left(f_d \Delta T_1 + \frac{d_L}{\lambda_0} \sin \theta_L\right)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j2\pi\left(f_d \Delta T_{N-1} + \frac{d_{N-1}}{\lambda_0} \sin \theta_1\right)} & e^{-j2\pi\left(f_d \Delta T_{N-1} + \frac{d_{N-1}}{\lambda_0} \sin \theta_2\right)} & \dots & e^{-j2\pi\left(f_d \Delta T_{N-1} + \frac{d_{N-1}}{\lambda_0} \sin \theta_L\right)} \end{bmatrix}$$

이다.

따라서, 곡면에 분포된 하이드로폰 어레이로부터 수신된 신호에 대한 하이드로폰 어레이의 출력식 $X(t) = \mathbf{D} \mathbf{A} \Phi(t) \mathbf{S}(t) + \mathbf{E}$ 에 대하여 상관행렬을 구성할 수 있으며 구성된 상관행렬을 통하여 앞서 언급된 과정을 거쳐 3차원 각-도플러 공간 스펙트럼을 추정할 수 있다. 이때, 3차원 각-도플러 공간 스펙트럼을 추정하기 위해 필요한 조절벡터 \mathbf{M}_s 는 다음과 같이 구성된다.

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j2\pi\left[f_d \frac{d_1 \cos \theta_1}{c} \cos \theta_s + \frac{d_1 \cos \theta_1}{\lambda_0} \sin \theta_s\right]} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi\left[f_d \frac{d_{N-1} \cos \theta_{N-1}}{c} \cos \theta_s + \frac{d_{N-1} \cos \theta_{N-1}}{\lambda_0} \sin \theta_s\right]} \end{bmatrix} \quad (3.2.5)$$

여기서, f_d , θ_s 는 각각 도플러 주파수와 신호 입사각에 상응하는 조절 주파수, 조절 각을 나타내며, λ_0 는 목표물의 중심 주파수에 관계하는 조절 파장 길이로서, $\lambda_0 = (c - v \sin \theta_s) / f_d$ 로 표현된다

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

모든 실험의 공통적인 파라미터는 다음과 같다. 어레이를 구성하는 하이드로폰의 수는 20개이고, 취득신호의 표본화 주파수는 신호원의 중심주파수 가운데 가장 큰 중심 주파수 값의 4배로 하였으며, 그 주파수에 대한 파장거리의 1/2로 각 하이드로폰의 기준 하이드로폰과 이루는 직선 거리를 정규화 하였다. 정규화 된 기준 하이드로폰으로부터의 직선 거리는 [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19]로 하였고, 기준 하이드로폰과 가장 멀리 떨어져 있는 하이드로폰은 견인함의 종축과 일치된 축을 이루도록 하였으며, 기준 하이드로폰으로부터의 각도는 [0 20 18 15 14 12 10 8 5 3

3 5 8 10 12 14 15 18 20 0]으로 하였다. 선박의 직진 이동 등속도는 5knot(약2.5m/s)이고, 표본화된 샘플의 수는 5000개이다.

먼저, 단일 목표물로부터 발생된 신호가 다중경로를 거쳐 입사하는 경우에 대한 모의 실험을 수행하였다. 입사되는 신호의 경로는 2개이고 각각 -45도와 45도에서 동시에 입사하며 그 중심주파수는 192Hz이다. 또한, 신호의 SNR은 10dB이다. 그림4.1은 추정된 3차원 각-도플러 공간 스펙트럼을 나타낸다.

그림4.1은 단일 목표물로부터 발생된 신호가 2개의 서로 다른 경로를 거쳐서 입사하는 경우의 결과이다. 단일 목표물로부터 발생된 신호는 높은 코히어런스 특성을 가지고 하이드로폰 어레이 상에 입사된다. 그림4.1에서 보는 바와 같이 견인함의 이동에 의해 생기는 도플러 효과는 서로 다른 입사경로를 가지고 높은 코히어런스 특성을 가지는 입사 신호를 분리해 냄을 확인할 수 있다.

또한 다중 목표물이 다중 경로를 거쳐 입사하는 경우를 살펴보자. 2개의 목표물이 각각 187Hz와 194Hz를 가지고 첫 번째 목표물은 30도, -20도, 0도의 다중 경로 입사 방향을 가지고 입사하고, 두 번째 목표물은 -20도와 10도에서 입사하는 경우를 가정하였다. SNR은 순서에 따라 10, 12, 14, 8, 13dB를 갖는다. 그림4.2는 다중 목표물의 방사신호가 다중경로를 거쳐서 입사하는 경우이다. 그림4.2에서 보는 바와 같이 -20도에서 같은 입사각을 가지고 입사하는 두 목표물의 방사신호에 대한 주파수 성분을 성공적으로 추정하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 비 선형 하이드로폰 어레이를 이용하여 추정된 3차원 각-도플러 스펙트럼은 방사신호의 코히어런스를 효과적으로 극복하고, 다른 주파수 성분을 가지고 같은 방향으로 입사하는 신호에 대하여 높은 분해능을 가지고 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 천해 상에서 여러 방사 물체들에 의해 생성된 음향 신호들이 다중경로를 거쳐서 견인 하이드로폰 어레이 상에 입사될 경우 이들에 대한 도플러 및 입사각을 동시에 추정할 수 있는 기법을 제안하였으며 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 이에 대한 성능을 고찰하였다. 하이드로폰 어레이의 구조에 영향을 적게 받음으로 인하여 실제 천해환경 하에서 비교적 설치의 용이성을 가지면서도, 입사각 뿐만 아니라 도플러 주파수까지 동시에 추정할 수 있는 비 선형 하이드로폰 어레이 구조를 이용한 3차원 공간 스펙트럼 기법을 제안하였다. 천해 상에서 여러 방사 물체들에 의해 생성된 음향 신호들이 다중경로를 거쳐서 비 선형 하이드로폰 어레이 상에 입사될 경우 이들에 대한 도플러 및 입사각을 동시에 추정할 수 있는 기법을 제안하였으며 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 이에 대한 성능을 고찰하였다. 모의 실험

결과를 통하여 제안된 방법이 단일 목표물로부터 발생된 신호가 다중 경로를 통하여 전파되는 경우, 신호간의 높은 코히어런스를 극복하고 입사각 및 도플러 주파수 추정 시 우수한 분해성능을 가지고 있음을 확인하였으며, 다중 목표물로부터 발생된 신호가 같은 방향으로 입사하는 경우 신호간의 주파수 성분을 분리해 냄을 확인하였다. 끝으로, 어레이내에서의 하이드로폰의 위치오차를 최소화함으로써 실제 환경 하에서 보다 강인한 추정 알고리즘으로 적용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

6. 참고문헌

- [1] S. Stergiopoulos and E. J. Sullivan, "Extended Towed Array Processing by An Overlap Correlator", J. Acoust. Soc. Am., vol. 86, no. 1, pp.158-172, July 1989
- [2] S. Stergiopoulos and H. Urban, "A New Passive Synthetic Aperture Technique for Towed Arrays", IEEE J. of Oceanic Eng., vol. 17, no. 1, pp. 16-25, Jan. 1992
- [3] 강정원 이원철, "수동형 선형 견인 배열 센서를 이용한 입사각 및 도플러 동시 추정 기법", 한국음향학회 논문지, 17권 2호, pp.32-41, 한국음향학회, 1998. 4.

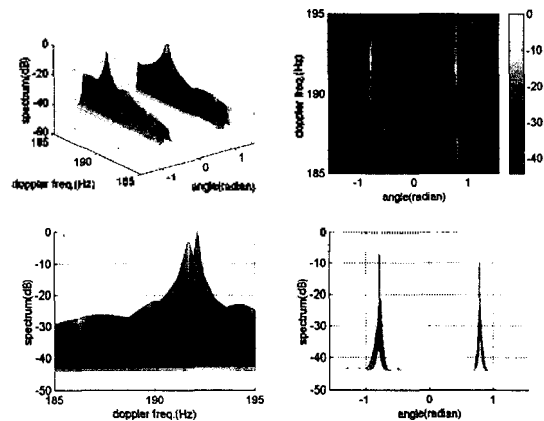


그림4.1 단일 목표물 발생신호의 다중 경로 입사시 비선형 하이드로폰 어레이를 적용한 3차원 각-도플러 공간 스펙트럼 추정기법

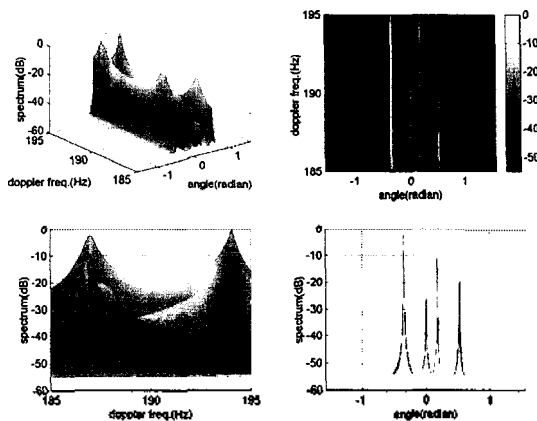


그림4.2 다중 목표물 발생신호의 다중 경로 입사시 비선형 하이드로폰 어레이를 적용한 3차원 각-도플러 공간 스펙트럼 추정기법