

# 비균일 분포 견인 배열을 이용한 입사각 및 도플러 주파수 동시 추정 기법

강정원 이원철  
승실대학교 정보통신공학과

## Estimation Method for the DOAs and Doppler Frequencies Using the Non-Uniformly Distributed Towed Array

JeongWon Kang WonCheol Lee  
Department of Information & Telecommunication Engineering, Soongsil University  
jwkang@ifcom.soongsil.ac.kr wcleee@ifcom.soongsil.ac.kr

본 연구는 수중 음향 특화 센터에서 지원한 Synthetic Aperture Array 소나 신호처리 기술연구의 일환으로 수행된 것입니다.

### 요약

본 논문은 비균일 분포 수동형 견인 배열 센서를 사용하여 입사각 추정은 물론, 도플러 주파수를 동시에 추정해내기 위한 기법을 제안한다. 균일 선형 센서 배열을 사용하는 전통적인 수동형 견인 센서 배열 처리기법은 센서간의 등 간격 구조 및 단순한 표본 과정에 기인하여 활용 분야의 한계성을 가지며, 주된 응용 분야가 방사된 음향신호의 입사각을 추정하는 데만 국한되어 사용될 수 있다는 문제점을 내포하고 있다. 본 논문은 이러한 제한성을 극복하고 방사 신호들의 개별적인 입사각 및 도플러 주파수의 동시 추정이 가능한 새로운 형태의 수동형 견인 배열 센서 처리 기법을 제안한다.

### 1. 서론

수중 소나 처리 기법은 견인 배열 센서를 사용하여 수중 목표물에서 방사되는 저주파 성분의 잡음신호를 취득하고 신호상에 포함되어 있는 각종 정보들을 정밀하게 추출함으로써 목표물에 대한 조기경보 능력을 향상시키기 위한 목적을 갖는다. 특히 목표물의 방사신호에 포함되어 있는 주요한 정보는 목표물의 위치판별을 위한 입사 방향각 정보와 목표물의 식별을 위한 고유 중심주파수 정보를 비롯하여 이동 견인 배열 센서와 목표물간의 상대속도에 대한 정보 등이며 이들의 정밀 추정을 위하여 수중 소나 처리 기법이 이용된다[1][2].

수동형 견인 배열 센서 처리 기법은 천해 환경 하에서 수중 환경의 음향 전달 경로에 대한 모델링과 수중 원거리상에 분산되어 존재하는 다수의 목표물에서 방사되는 신호에 포함되

어 있는 고유한 개별 중심주파수 성분들과 센서 배열상의 입사각 정보 및 상대속도 추정을 통한 목표물들간의 종류식별 및 위치판단에 사용될 수 있다[2].

본 논문에서는 하이드로폰 배열 센서를 견인하면서 취득된 신호들을 이용하여 미지의 방사신호에 포함되어 있는 주요 파라메타들을 추정하는 과정을 소개한다. 특히, 비균일 분포 배열 센서를 사용하여 목표물에서 방사된 신호의 도플러 주파수 및 입사각 정보들을 동시에 추출할 수 있는 기법을 제안한다.

### 2. 센서 출력 신호에 대한 모델링

등속도로 직진하는  $N$  개의 하이드로폰 센서로 구성된 비균일 선형 견인 어레이 상에 단일 방사 물체에 의해 생성된 협대역 신호가 입사되는 경우  $n$  번째 센서의 표본화 된 출력은 다음과 같다.

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

여기서  $d_n$  은 기준 센서로부터의 거리이고,  $A$  는 신호의 감쇄와 위상지연을 포함하는 복소 값이며,  $f$  는 도플러 주파수,  $c$  는 수중환경 하에서의 음파 전달 속도를 나타낸다.  $\varepsilon_n(t_i)$  는 영 평균의 통계적인 특성을 가지는 가우시안 잡음 랜덤 변수를 나타낸다. 또한,  $t_i$  는 각 센서 출력을 표본화 하는 시점을 나타내며, 표본화 시간 간격을  $\Delta t$  라고 할 경우  $t_i = i \Delta t$  로 표현할 수 있다.

이때, 목표물에서 방사되는 신호의 중심 주파수와 센서 배열의 이동에 의해 생기는 도플러 주파수사이의 관계는 다음

과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = f_0 \left( 1 \pm \frac{v}{c} \sin \theta \right) \quad (2)$$

수중상에서 목표물이 건인함에서 멀어진다고 가정하고 식 (2)를 식(1)에 대하여 대입하여 근사화하면 다음과 같다.

$$x_n(t) \equiv A \exp \left[ j2\pi f_0 \left( t - \frac{v t_i + d_n}{c} \sin \theta \right) \right] + \varepsilon_n(t) \quad (3)$$

식(3)에서 보는 바와 같이  $n$  번째 센서 출력의  $i$  번째 표본화된 샘플은 센서 배열의 이동에 의하여 최초 신호 취득이 이루어 지는 시점의 공간상의  $n$  번째 센서의 위치에서  $v t_i$  만큼 이동하여 받아들여지는 스냅샷을 의미하게 된다. 이때, 각 센서 출력의 총 샘플표본 수가  $K$  이고 전체 신호 취득에 필요한 시간을  $\tau$  라고 하면, 전체 신호 취득에 소요되는 시간은  $\tau = K\Delta T$  이 되며, 신호 취득을 수행하는 동안의 건인함의 이동거리는  $v\tau = vK\Delta T$  가 된다.

단일 목표물에서 방사된 신호가 수면과 수중바다 분포에 의해  $L$  개의 반사모드가 생긴다고 가정하고, 생성된  $L$  개의 코히어런트한 신호들이 센서 배열상으로 받아들여질 경우 식 (1)을 사용해  $n$  번째 센서 출력을 표현하면 다음과 같다.

$$x_n(t) = \sum_{l=1}^L A_l \exp \left[ j2\pi f_l \left( t - \frac{d_n}{c} \sin \theta_l \right) \right] + \varepsilon_n(t) \quad (4)$$

이때, 센서의 수  $N$  이 경로의 수  $L$  보다 클 경우 센서 출력 신호들간의 상관행렬을 구성하여 CBF, MLM, MEM, MUSIC, GEESSE 등의 기존의 공간 스펙트럼 추정기법을 적용하면, 각 신호 모드에 대한 입사 방향 탐지가 가능해 지게 된다[3][4].

### 3. Sample Skipping 기법

기준 센서에 대하여 거리상으로  $d_n$  만큼 떨어진  $n$  번째 센서에서 취득 되는 신호를 표본화 하는 과정에서 Sample Skipping 기법을 적용하면, 시간상  $(n-1)\Delta T$  만큼 표본화가 생략된 이후 표본화가 수행된다. 이때, 각 센서 출력 표본 수를 일정하게 만들기 위하여, 표본화 시간을  $\Delta T$  만큼 연장시키며, 이에 따라  $n$  번째 센서에서 취득한 신호에 대한 표본화 과정은 사실상  $t_0 + (n-1)\Delta T$  부터  $t_{K-1} + (n-1)\Delta T$  시간 내에서 수행된다. 각 센서 출력별로 생략된 샘플의 수가 정수  $N_s$  의 배수 만큼이라고 한다면, 즉  $\Delta T = N_s \Delta t$ , 기준 센서에 대하여  $d_n$  만큼 떨어진  $n$  번째 센서에서 받아들이는 신호는  $t_i = \{(n-1)N_s + i\}\Delta t$ ,  $i = 0, 1, \dots, K-1$ , 시점에서 표본화가 이루어 진다.

단일 방사 신호가  $L$  개의 서로 다른 전달경로를 거쳐서

입사되는 경우 각 센서 출력 신호들을  $\Delta t$  간격으로 표본화 하였을 때, 각 센서 별로 skipped 된 샘플이 차지하는 시간을  $(n-1)\Delta T$ ,  $n=1, 2, \dots, N$ , 라 하면, 식(4)에 의하여  $n$  번째 센서의 출력 표본에 대한 표현식은 다음과 같다.

$$x_n(t + (n-1)\Delta T) = \sum_{l=1}^L s_l(t) \exp(j2\pi f_l(n-1)\Delta T) \exp \left[ -j2\pi \left( f_l(t + (n-1)\Delta T) + \frac{d_n}{\lambda} \sin \theta_l \right) \right] + \varepsilon_n(t + (n-1)\Delta T) \quad (5)$$

여기서,  $s_l(t) = A_l \exp(j2\pi f_l t)$  이며,  $N$  개의 각 센서에 대한 출력들로 구성된 벡터를 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{D}\mathbf{A}\Phi(t)\mathbf{S}(t) + \mathbf{E} \quad (6)$$

여기서,  $\mathbf{S}(t)$  는  $L$  개의 다중경로 신호들로 구성된 벡터이며,  $\mathbf{A}$  는  $L$  개의 다중경로 성분들의 입사각에 대한 방향 벡터들로 구성되는  $N \times L$  행렬이며,  $\mathbf{E}$  는 잡음성분벡터이다 또한 식(6)에서,

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

$$\Phi(t) \equiv \text{diag} \left[ e^{-j2\pi f_1 t}, e^{-j2\pi f_2 t}, \dots, e^{-j2\pi f_L t} \right],$$

$$\mathbf{D} \equiv \text{diag} \left[ 1, e^{j2\pi f_1 N \Delta T}, \dots, e^{j2\pi f_L (N-1)\Delta T} \right] \quad (7)$$

이다.

이때, 센서 출력 벡터  $\mathbf{X}(t)$  에 대한 상호 상관행렬  $\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}$  은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} \equiv E \{ \mathbf{X}(t) \mathbf{X}^*(t) \} = \mathbf{D}\mathbf{A}\Phi(t) \mathbf{R}_{\mathbf{S}\mathbf{S}} \Phi^*(t) \mathbf{A}^* \mathbf{D}^* + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (8)$$

여기서,  $*$  는 Hermitian transpose 를,  $E \{ \cdot \}$  은 기대치 함수를 나타내며,  $\mathbf{R}_{\mathbf{S}\mathbf{S}}$  는 신호 성분들간의 상호 상관 행렬이다.  $\mathbf{R}_{\mathbf{V}\mathbf{V}} = \Phi(t) \mathbf{R}_{\mathbf{S}\mathbf{S}} \Phi^*(t)$  라 하면, 식(8)은 다음과 같은 간소화된 행렬식으로 표현된다.

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \mathbf{D}\mathbf{A}\mathbf{R}_{\mathbf{V}\mathbf{V}} \mathbf{A}^* \mathbf{D}^* + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (9)$$

만약, 방사물체 및 센서 배열의 움직임이 없고 센서 배열 상에 단일 물체로부터 방사되는 협대역 신호가 여러 경로를 거쳐서 각기 다른 입사각으로 입사되는 경우, 입사 신호들 간에는 높은 코히어런스 특성을 갖게 되며, 이로 인하여 배열 센서 입사 신호들간의 상호 상관 행렬  $\mathbf{R}_{\mathbf{V}\mathbf{V}}$  의 rank 는 사실상 1 이 된다. 그러나, 센서 배열을 일정한 속도로 건인하는 경우 다중 경로를 거쳐서 입사되는 신호,  $y_l(t)$ ,  $l=1, 2, \dots, L$ , 들은 배열 센서의 움직임에 의해 서로 다른 도플러 천이 값들을 가지며, 이로 인하여 이동 건인 센서 배

열상에 입사되는 다중 경로 신호들이 서로 중첩되지 않는 주파수 대역을 유지한다면 이들간의 코히어런트한 성질은 무시될 수 있으며, 식(9)상의 센서 출력들 간의 상호 상관행렬  $\mathbf{R}_{yy}$  의 rank 는 센서 배열상에 입사되는 신호의 수와 동일하게 된다.

입사각과 도플러 주파수 값을 동시에 포함하는 행렬  $\mathbf{M} \equiv \mathbf{D}\mathbf{A}$  는 다음에 표현한  $L$  개의 벡터들로 구성된다.

$$\mathbf{m}(\theta_i) = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j2\pi\left(f_c\Delta T + \frac{d_i}{\lambda_0}\sin\theta_i\right)} & \dots & e^{-j2\pi\left(f_c\Delta T + \frac{d_i}{\lambda_0}\sin\theta_i\right)} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

만약, 식(13)에서 표본의 skipping 시간 간격을 무시하면, 즉  $\Delta T = 0$ ,  $\mathbf{D} = \mathbf{I}$  로 표현될 때, 식(9)는 다음과 같이 간소화된다.

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{A}\mathbf{R}_{yy}\mathbf{A}^* + \sigma^2\mathbf{I} \quad (11)$$

여기서,  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1) \ \mathbf{a}(\theta_2) \ \dots \ \mathbf{a}(\theta_L)]$  는  $L$  개의 방향 벡터로 구성되는 행렬을 의미한다. 식(11)에서 볼 수 있듯이, 표본의 skipping 과정 없이 센서 출력들 간의 상호 상관행렬을 구하여 공간 스펙트럼 추정기법에 적용하게 된다면, 결국 방향벡터 성분만을 추정하게 되어 방사 신호들의 입사각 정보를 얻어낼 수 있다.

만약, Sample Skipping 기법은 적용하고, 기준센서와 임의의  $n$  번째 센서 간의 거리  $d_n = (n-1)\delta$  로 표현되는 균일 배열 센서를 사용한다고 한다면, 식(10)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{m}(\theta_i) = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j2\pi\beta} & \dots & e^{-j2\pi(\Delta-1)\beta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서,  $\beta = f_c\Delta T + \frac{\delta}{\lambda_0}\sin\theta_i$  이다. 따라서, 행렬  $\mathbf{M}$  을

구성하는 행렬 벡터는 각각의 입사신호에 대해 센서 출력 신호가 갖는 도플러 주파수 및 입사각 성분이 혼합된 단일 값들로 표현되며, Sample Skipping 기법을 적용하여 취득된 센서 출력 신호들간의 상호 상관 행렬을 사용하여 식(12)의 벡터 성분들을 추정하게 되면 결국 개별적인  $f_c$  과  $\theta_i$  의 추정이 불가능하게 되는 모호성이 발생한다.

따라서, Sample Skipping 기법을 사용하여 도플러 주파수에 대한 성분을 이끌어 내고, 각 센서의 간격을 비균일 간격으로 놓아 주파수와 입사각에 대한 정보를 혼합되지 않게 함으로써 입사각과 도플러 주파수의 동시 추정이 가능하게 된다.

#### 4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 본 논문이 제안한 비균일 센서와 Sample Skipping 기법을 적용하여 각기 다른

주파수의 신호를 발생시키는 다중 목표물에 대한 입사각도플러 주파수 추정 및 단일 목표물에서 방사된 신호에 대해 다중경로의 입사각 및 각 경로에 대한 도플러 주파수의 추정을 2차원 각도도플러 공간 스펙트럼을 통하여 고찰해 보고, 이후에서는 Sample Skipping 기법의 사용에 따르는 영향을 살펴보고자 한다.

먼저, 단일 목표물이 발생시키는 방사신호의 주파수는 191Hz 이고, 센서배열의 수직 성분을 기준으로 하여 45도와 45에서 2개의 반사 모드를 통해 각각 센서 배열 내로 신호가 입사 된다. 이때, 센서 배열을 견인하는 견인함의 속도는 2.5m/s 이며, 배열내의 센서의 개수는 20 개이다. 또한, 비균일 배열내의 인접 센서간의 거리는 방사신호의 중심 파장 길이의 1/2 에 대해 각각 {0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1 0.05}와 같이 정규화 시켰다. 그림 1 은 MUSIC 기법을 사용하여 2차원 각도도플러 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 1 의 (a)와 (c) 는 각각 도달한 신호의 SNR 이 10dB 와 0dB 인 경우를 나타내며, 그림 (b)와 (d)는 추정 스펙트럼 (a)와 (c)에 대해 수직으로 투영한 것을 나타낸다. 따라서, Sample Skipping 기법을 적용한 비균일 센서 배열의 사용은 단일 목표물의 다중경로 측정 시 입사각 및 도플러 주파수의 동시 추정에 사용될 수 있음을 그림 1 을 통해 확인할 수 있다.

또한, 다중 목표물이 발생시키는 각기 다른 주파수를 가진 신호들에 대한 실험에서 목표물의 수가 2 개, 각각의 목표물의 방사신호의 중심 주파수가 188Hz 와 192Hz 라 하고, 각기 -27도와 55 도로 입사 된다고 하였을 때, 비균일 센서 배열을 사용한 2차원 각도도플러 추정 스펙트럼은 그림 2 과 같이 보여진다.

앞에서 보인 두 시뮬레이션을 통하여, 견인 비균일 센서 배열과 Sample Skipping 기법의 이용은 목표물의 주요 파라메타 중의 하나인 도플러 주파수를 신호간의 코히어런트한 성질에 영향을 받지 않고 정확히 추정한다는 사실을 확인할 수 있다.

마지막으로, 센서 배열의 분포와 Sample Skipping 기법에 대한 영향을 균일 및 비균일 센서 배열을 이용하여 표본에 대한 skipping 을 시도하여 얻어지는 효과를 고찰하였다. 비균일 센서 배열에 대한 분포 및 파라미터는 두번째 시뮬레이션에서 이용한 배열 분포를 이용하였다. 그림 3 에서 (a)는 균일 센서 배열을 사용하고 Sample Skipping 기법을 시도하지 않은 경우이며, (b)는 균일 센서 배열을 사용하고 Sample Skipping 기법을 시도한 경우의 스펙트럼을 나타낸다. 또한 (c)는 비균일 센서 배열을 사용하고 Sample Skipping 기법을 시도하지 않은 경우이며, (d)는 비균일 센서 배열에 Sample Skipping 기법을 동시에 시도한 경우의 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림

3의 (a)와 (c)에서 보여주는 바와 같이 센서 배열의 분포와 관계없이 Sample Skipping 기법을 적용하지 않으면, 입사각에 대한 정보를 추정할 수 있게 되지만, 도플러에 대한 추정 성분이 없게 되므로, 도플러 주파수의 추정은 불가능하게 됨을 알 수 있으며, (b)에서 보이는 바와 같이 Sample Skipping 기법을 적용하였다 하더라도, 균일 센서 배열을 사용하면, 입사각과 도플러에 대한 추정 성분이 앞서 언급한 바와 같이 혼합된 값으로 나타내어 지게 되어 도플러 주파수는 물론 입사각에 대한 추정도 불가능하게 되어짐을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 논문은 천해상에서 여러 방사 물체들에 의해 생성된 음향 신호들이 다중경로를 거쳐서 견인 센서 배열상에 입사될 경우 이들에 대한 도플러 및 입사각을 동시에 추정할 수 있는 기법을 제안하였으며 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 이에 대한 성능을 고찰하였다. 본 논문에서는 균일분포의 견인 센서 배열의 사용과 표본화 과정을 수행하는 기존의 일반적인 방법이 방사 신호들의 입사각 추정에만 국한적으로 사용될 수 있다는 단점을 보완하기 위하여 비균일 분포를 갖는 센서 배열과 Sampling Skipping 기법(SST)을 복합적으로 사용함으로써 입사각은 물론 도플러 주파수 값들을 동시에 추정할 수 있는 방안을 제시하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 방법이 우수한 해상도를 유지하는 2차원의 각-도플러 스펙트럼을 제공함을 입증하였으며, 이들의 결과를 토대로 주요 파라미터들인 입사각 및 도플러 주파수의 효과적인 동시추정을 통한 천해환경상의 다중경로 모델링과 목표물의 위치 및 종류 식별의 가능성을 확인하였다.

### 참고 문헌

- [1] E. J. Sullivan, W. Carey and S. Stergiopoulos, "Editorial", *IEEE J. of Oceanic Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 1-7, Jan. 1992
- [2] J. W. Kang, W. C. Lee, K. M. Kim and D. H. Youn, "A Study on the Estimation Technique for Arrival Angles and Doppler Frequencies Using Passive Synthetic Towed Array", *한국 군사 과학 기술 학회 Proceeding of '97 Fall Conference, 1997*
- [3] S. Unnikrishna Pillai, "Array Signal Processing", *Springer Verlag, New York, 1989*
- [4] Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, "Array Signal Processing - Concept and Techniques", *Prentice Hall Signal Processing Series Alan V. Oppenheim, Series Editor, 1993*

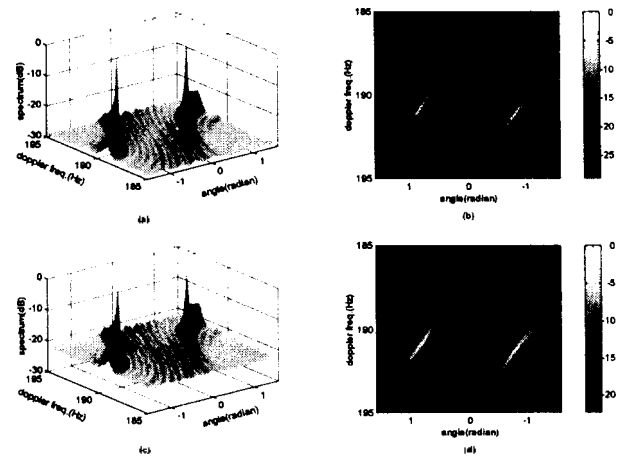


그림 1. 단일 목표물의 다중경로 신호에 대한 2차원 각-도플러 추정 스펙트럼

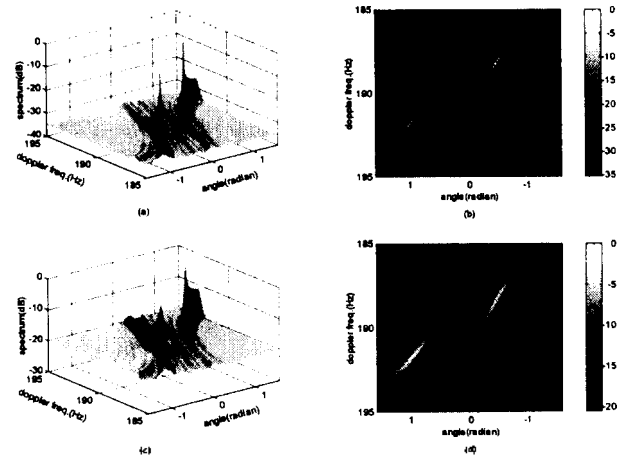


그림 2. 다중 목표물 신호에 대한 2차원 각-도플러 추정 스펙트럼

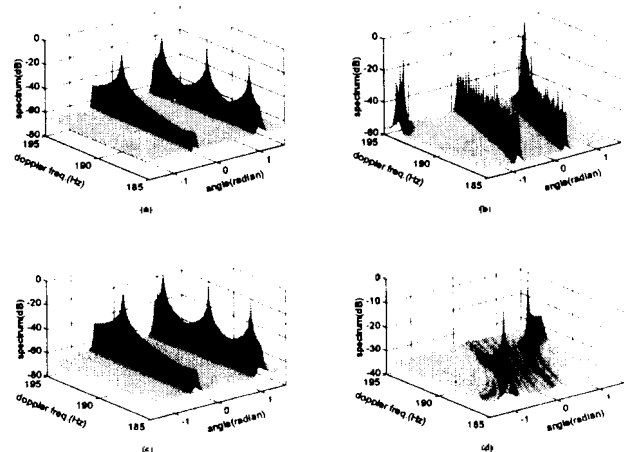


그림 3. 센서 배열의 분포와 Sample Skipping 기법의 적용에 의한 영향