(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(51) Int. Cl.[7]
A61B 8/13

(11) 공개번호 특2001-0051946
(43) 공개일자 2001년06월25일

(21) 출원번호 10-2000-0070577
(22) 출원일자 2000년11월24일
(30) 우선권주장 2,290,240 1999년11월24일 캐나다(CA)
(71) 출원인 카나다연방 국방부 케이. 피. 아스필라
캐나다 케이1에이 0케이2 온타리오 오타와 코로넬 바이 드라이브 101
(72) 발명자 스텔지오포우로스스텔지오스
카나다엠4엔1에스8온타리오토론토로렌스애버뉴이스트124
다난트와리아마르씨.
카나다엠2알3에스3온타리오노스요크스틸워터크레센트57
(74) 대리인 허진석

심사청구 : 없음

(54) 다차원 센서 어레이를 배치한 고해상도 3차원 초음파 영상시스템 및 센서 신호를 다차원 빔형성하는 방법

요약

즉시에 가까운 수렴성을 가지며, 다차원 센서 어레이를 배치한 초음파 영상 시스템용 적응 제어 다차원 빔형성기가 개시된다. 우선적으로, 이 다차원 빔형성기는 서브-애퍼쳐들(sub-apertures)로 나누어진다. 이어서, 각각의 서브-애퍼쳐는, 다차원 어레이의 서로 다른 좌표 방향에서 원형 및/또는 선형 어레이 빔형성기의 두 코히어런트 서브셋들(coherent subsets)로 나누어진다. 본 발명에 따른 다차원 빔형성기의 실행은 소형 다차원 센서 어레이와, 현장 배치가능하고 실시간으로 고해상도 3차원 영상을 만들어내는 소형 처리 유닛을 구비하는 본 발명에 따른 3차원 초음파 영상 시스템의 기초를 제공한다. 또한, 4차원이 시간이며 결과의 영상들이 다량의 움직이는 장기의 비디오 영상을 형성하는, 4차원 영상을 포착하는 것도 가능하다.

대표도

도1

색인어

적응제어, 빔형성기, 다차원, 애퍼쳐, 초음파, 영상, 센서, 신호, 어레이

명세서

도면의 간단한 설명

도 1은 본 발명에 따른 소형의 현장 배치가능한 초음파 영상 시스템의 개략적 다이어그램;

도 2는 초음파 영상 시스템에 대한 선형 센서 어레이의 개략적 다이어그램;

도 3은 초음파 영상 시스템에 대한 원형 센서 어레이의 개략적 다이어그램;

도 4는 본 발명에 따른 분해 개념을 도시한 초음파 영상 시스템의 실린더형 센서 어레이의 개략적 다이어그램;

도 5는 초음파 영상 시스템에 대한 본 발명에 따른 적응제어 빔형성기의 개략적 흐름을 나타낸 다이어그램;

도 6은 본 발명에 따른 적응제어 서브-애퍼쳐 구조를 도시한 초음파 영상 시스템에 대한 선형 센서 어레이의 개략적 다이어그램;

도 7은 본 발명에 따른 적응제어 서브-애퍼쳐 구조를 도시한 초음파 영상 시스템에 대한 원형 센서 어레이의 개략적 다이어그램;

도 8은 본 발명에 따른 적응제어 서브-애퍼쳐 구조를 도시한 초음파 영상 시스템에 대한 실린더형 센서 어레이의 개략적 다이어그램;

도 9는 본 발명에 따른 적응제어 서브-애퍼쳐 구조를 도시한 초음파 영상 시스템에 대한 평면형 센서 어레이의 개략적 다이어그램;

도 10은 빔형성 실린더형 어레이들에 대한 본 발명에 따른 신호처리 흐름의 개략적 다이어그램;

도 11은 본 발명에 따른 다차원 어레이들에 대한 적응제어 서브-애퍼쳐 구조에 대한 신호처리의 개략적 다이어그램;

도 12는 다양한 형태의 빔형성기들에 대해 스티어링 각도의 함수로서 능동 연속파(CW) 펄스들에 대한 빔 응답 파워를 나타낸 개략적 다이어그램;

도 13은 초음파 응용분야에 대해 다양한 형태의 빔형성기들의 시뮬레이션된 정합 필터 결과를 나타낸 도면;

도 14는 본 발명에 따른 적응제어 빔형성기의 영상 해상도 향상을 평가하기 위한 초음파 영상 시스템의 개략적 다이어그램; 및

도 15는 현 기술상태의 초음파 시스템에 의해 포착된 신호에 대해 현 기술상태의 신호처리 기술을 이용함으로써 그리고 본 발명에 따른 적응제어 빔형성기를 적용함으로써 얻어진 태아 두개골의 다양한 3차원 영상들을 나타낸 도면이다.

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 초음파 영상 시스템 분야에 관한 것이다. 특히, 본 발명은 실시간으로 고해상도 영상을 제공하는, 현장 배치가능한 3차원 초음파 영상 시스템에 관한 것이다.

초음파 감지 및 영상 기술은 치료 판단용 비침습성(non-invasive) 영상 및 최소 침습성 수술을 위한 강력한 도구를 제공한다. CT 스캐너 및 MRI와는 달리 초음파 영상 시스템은 소형이며 제조가격이 훨씬 저렴하다. 이러한 장점들은 앰뷸런스 또는 헬리콥터 등의 이동 운송기기에서의 초음파 영상 시스템 사용을 가능하게 해준다. 일반적으로, 사고, 재난, 또는 전쟁의 피해자들은 그들의 생명을 구하기 위해 즉각적인 판단 및 치료를 필요로 한다. 예컨대, 이동 운송기기 내에 소형 초음파 영상 시스템을 배치하는 것은 수송 도중에 치료 판단을 위해 현장의 영상화를 가능하게 하여, 병원에서의 추후 수술을 위한 생생한 저장 정보를 제공하거나 심지어는 상기 이동 운송기기 내에서의 최소 침습성 수술을 위한 정보를 제공한다. 따라서, 사고 현장, 재난 영역 또는 전쟁 지구의 피해자들의 즉각적인 영상화를 위한 이동 운송기기 및 야전 병원용 소형의 현장 배치가능한 3차원 초음파 영상 시스템을 제공한다면 대단히 유익할 것이다.

그러나, 현 기술 상태의 초음파 영상 시스템들은 소형 시스템의 매우 작은 크기의 센서 어레이로 인해 매우 열악한 영상 해상도를 나타낸다. 따라서, 이러한 시스템들은 치료 판단이나 수술을 위해 만족스러운 해상도를 갖는 영상을 제공하지 않는다. 영상의 질을 향상시키기 위해서는, 부분 상관된(partially correlated) 잡음 필드에 들어 있는 신호에 대한 어레이 이득의 상당한 향상을 제공하도록 소형 다차원 어레이 내에 다수의 센서를 배치할 필요가 있다. 부분 상관된 잡음 필드는, 예컨대, 인체의 비선형 전파특성에 의해 발생하며 수차 영향과 재구성된 영상의 흐려짐으로 귀착된다. 어레이 이득의 향상은 영상 해상도의 향상과 수차 영향의 최소화로 귀착된다.

적응 제어 및 합성 애퍼쳐 빔형성기에 대한 현 기술상태의 개략적 설명이 S. 스텔지오포우로스(S. Stergiopoulos)에 의해 1998년 2월 IEEE 프로시딩 86(2), pp.358-397에 실린 "집적 능동-수동 수중 음파탐지 시스템에서의 적응제어 및 합성 애퍼쳐 처리 절차의 실행"에 주어진다. 이 알고리즘들은 목표물 감지 향상을 위한 신호 대 잡음비를 증가시키고, 주파수, 시간지연, 도플러 편이, 음향 신호의 국지화(localising), 선별 및 추적을 하는 알고리즘으로의 통합을 위한 방위(bearing) 등의 파라미터 평가치를 동시에 제공하도록 고안되었다.

빔형성 과정을 최적화하기 위해, 빔형성 필터 계수는 수중 음파탐지 시스템의 센서 어레이로부터 받은 데이터에 기초하여 선택되어야만 한다. 특히, 이 계수는 받은 데이터의 통계적 성질에 기초하여 선택되어야만 한다. 빔형성 과정을 최적화하기 위해 센서 어레이로부터 받은 잡음의 특성을 이용한 알고리즘을 적응제어 빔형성기라고 한다. 이 적응제어 빔형성기는 상관된 잡음의 공분산 행렬에 대한 지식을 필요로 한다. 그러나, 잡음특성에 대한 지식이 부정확하다면, 적응제어 빔형성기의 성능은 상당히 떨어질 것이며 심지어는 원하는 신호가 소멸되는 결과를 낳을 수도 있다. 따라서, 실시간 작동 시스템에서 유용한 적응제어 빔형성기를 실행하는 것이 매우 어렵다. 적응제어 빔형성기에 대한 수많은 논문과 그들의 실행에 관한 어려움이 발표되어 왔다. GSC(Generalized Sidelobe Cancellers), LCMV(Linearly Constrained Minimum Variance Beamformers), MVDR(Minimum Variance Distortionless Response) 등의 다양한 적응제어 빔형성기가 다음 참고문헌에 논의되어 있는데, 이들은 이 문서에 참고문헌으로 통합되어 있다:

B. Windrow et al.: "Adaptive Antenna Systems", Proceedings IEEE, 55(12), pp. 2143-2159, 1967;

N.L. Owsley: "Sonar Array Processing", S.Haykin, Editor, Prentice-Hall Signal Processing Series, A.V. Oppenheim Series Editor, pp. 123, 1985;

B. Van Veen and K. Buckley: "Beamforming: a Versatile Approach to Spatial Filtering", IEEE ASSP Mag., pp 4-24, 1988;

J. Capon: "High Resolution Frequency Wavenumber Spectral Analysis", Proc. IEEE, 57, pp. 1408-1418, 1969;

S. Haykin: "Adaptive Filter Theory", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1986;

T.L. Marzetta: "A New Interpretation for Capon's Maximum Likelihood Method of Frequency-Wavenumber Spectra Estimation", IEEE-Trans. Acoustic Speech Signal Proc., ASSP-31(2), pp. 445-449, 1983;

A.H. Sayed and T. Kailath: "A State-Space Approach to Adaptive RLS Filtering", IEEE SP Mag.,

pp. 18-60, July, 1994;

A.B. Baggeroer, W.A. Kuperman and P.N. Mikhalevsky: "An Overview of Matched Field Methods in Ocean Acoustics", IEEE J. Oceaninc Eng., 18(4), pp. 401-424, 1993;

H. Wang and M. Kaveh: "Coherent Signal-Subspace Processing for the Detection and Estimation of angles of Arrival of Multiple Wideband Sources", IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Proc., ASSP-33, pp. 823-831, 1985;

J. Krolik and D.N. Swingler: "Bearing Estimation of Multiple Broadband Sources using Steered Covariance Matrices", IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Proc., ASSP-37, pp. 1481-1494, 1989;

S.D. Peters: "Near-Instantaneous Convergence for Memoryless Narrowband GSC/NLMS Adaptive Beamformers", submitted to IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Proc., January 1995;

L.J. Griffiths and C.W. Jim: "An Alternative Approach to Linearly Constrained Adaptive Beamforming", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, AP-30, pp. 27-34, 1982; 및

D.T.M. Slock: "On the Convergence Behavior of the LMS and the Normalized LMS Algorithms", IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Proc., ASSP-31, pp. 2811-2825, 1993.

하지만 유감스럽게도, 수백 개의 센서들을 가진 다차원 어레이로 이루어진 현재의 초음파 시스템에서 적응제어 빔형성기를 실행하는 것은 실시간 데이터 처리를 위해 엄청난 양의 메모리와 매우 큰 처리 능력을 필요로 하므로 현장에 배치가능한 시스템으로 이들을 응용하는 것을 불가능하게 한다. 현재의 컴퓨터 기술을 이용하여 적응제어 빔형성기를 실행하기 위해서, 부분 적응제어 빔형성기 설계이라는 개념이 개발되었다. 이 부분 적응제어 빔형성기는 빔형성 과정에 관련된 자유도의 수를 감소시켜 계산 상의 필요조건을 감소시키고 응답시간에 개선을 가져다준다. 하지만 유감스럽게도, 자유도 수의 감소로 인해, 부분 적응제어 빔형성기는 완전 적응제어 빔형성기로서의 최적해(optimum solution)로 수렴할 수 없다. 따라서, 부분 적응제어 빔형성기는 어레이 이득을 향상시키고 고해상도의 영상을 제공하기 위해 초음파 시스템 내에 배치된 다차원 어레이들을 충분히 이용할 수 없다.

발명이 이루고자하는 기술적 과제

따라서, 본 발명의 목적은 다차원 센서 어레이로 이루어진 현재의 초음파 영상 시스템에서 적응제어 빔형성기를 실행하는 데에 관련된 문제점을 극복하는 것이다.

본 발명의 다른 목적은 센서들의 선형 어레이, 원형 어레이, 구형 어레이 또는 이들 형태의 어레이들을 임의로 중첩하여 배치한 초음파 영상 시스템을 위한, 즉시에 가까운 수렴성을 가지는 적응제어 빔형성기를 제공하는 것이다.

본 발명의 또 다른 목적은 현장배치가 가능한 적응제어 빔형성 과정을 이용하여 실시간으로 고해상도 영상을 생성하기 위한 다차원 센서 어레이를 구비하는 3차원 초음파 영상 시스템을 제공하는 것이다.

발명의 구성 및 작용

본 발명에 따르면, 초음파 영상 시스템을 위해 즉시에 가까운 수렴성을 갖는 적응제어 다차원 빔형성기가 제공된다. 본 발명에 따른 다차원 빔형성기를 실행하는 것은 현장 배치가능한 소형 다차원 센서 어레이와 소형 처리 유닛으로 이루어진 본 발명에 따른 3차원 초음파 영상 시스템에 대한 기초를 제공하며 실시간 또는 실시간에 가깝게 고해상도 영상을 생성한다.

본 발명에 따르면, 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법이 제공되는데, 이 방법은:

다차원 빔형성기를 원형 어레이 빔형성기들 및/또는 선형 어레이 빔형성기들의 두 코히어런트 서브셋들로 나누되, 제1 서브셋이 다차원 어레이의 제1 좌표방향으로 후속 빔형성기들을 구비하고 제2 서브셋이 다차원 어레이의 제2의 다른 좌표방향으로 후속 빔형성기들을 구비하도록 나누는 단계;

상기 제1 서브셋의 후속 빔형성기들을 적용함으로써 상기 센서 시계열에 관련된 데이터의 소정 빔 스티어링 방향에 대한 빔형성을 하되, 각 빔형성기가 하나의 빔 시계열을 생성하게 하는 단계; 및

상기 제2 서브셋의 후속 빔형성기들을 스티어링된 방향에 대해 적용하여 빔형성기들의 상기 제1 서브셋의 각 빔 시계열을 상기 소정의 빔 스티어링 방향에 대해 빔형성하여 상기 빔 스티어링 방향에 대해 하나의 빔 시계열을 생성하는 단계를 구비한다.

본 발명의 일측면에 따르면, 서브-애퍼쳐 구성을 이용하여 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법이 제공되는데, 이 방법은:

a) 상기 다차원 빔형성기를 복수의 후속 서브-애퍼쳐들로 나누는 단계;

b) 각각의 서브-애퍼쳐를 원형 어레이 빔형성기들 및/또는 선형 어레이 빔형성기들의 두 코히어런트 서브셋들로 나누되, 제1 서브셋이 다차원 어레이의 제1 좌표방향으로 후속 빔형성기들을 구비하고 제2 서브셋이 상기 서브-애퍼쳐의 제2의 다른 좌표방향으로 후속 빔형성기들을 구비하도록 나누는 단계;

c) 상기 제1 서브셋의 후속 빔형성기들을 적용한 센서 시계열의 푸리에 변환을 소정의 빔 스티어링 방향으로 각 서브-애퍼쳐에 대한 종래방법의 빔형성을 하고 각 빔형성기가 빔 시계열을 생성하게 하는 단계;

d) 스티어링된 방향으로 상기 제2 서브셋의 후속 빔형성기를 적용함으로써 c)단계의 빔형성기들에 의해 생성된 빔 시계열을 상기 소정의 빔 스티어링 방향으로 각 서브-애퍼쳐에 대한 종래방법의 빔형성을 하고 각 서브-애

퍼쳐에 대한 상기 빔 스티어링 방향으로 하나의 빔 시계열을 생성하는 단계; 및

e) 각 선형 어레이가 하나의 좌표방향으로 다른 후속 서브-애퍼쳐들의 빔 시계열을 구비하는 선형 어레이들에 대해 적응제어 빔형성을 하고, 상기 빔 스티어링 방향에 대해 하나 또는 그 이상의 빔 시계열을 제공하는 단계를 구비한다.

본 발명의 다른 측면에 따르면, 코히어런트 광대역 적응제어 빔형성기를 이용하여 초음파 영상 시스템의 센서들에 의해 제공된 센서 시계열을 빔형성하는 방법이 제공되는데, 이 방법은:

연속 센서 시계열을 중첩된 데이터 셋들의 집합으로 분할하는 단계;

중첩된 데이터 셋들의 각각의 FFT를 연산하여 서로 다른 주파수 빈들에 대해 상기 중첩된 데이터 셋들의 푸리에 변환 셋을 생성하는 단계;

각 주파수 빈 및 각 소정의 스티어링 방향에 대해 상기 중첩된 데이터 셋들의 푸리에 변환들로부터 교차 스펙트럼 밀도 행렬을 형성하는 단계;

상기 교차 스펙트럼 밀도 행렬 및 종래 스티어링 벡터의 대각 행렬을 이용하여 스티어링 공분산 행렬을 형성하되, 하나의 스티어링 공분산 행렬이 각 스티어링 방향 및 해당 주파수 대역에 대한 것이 되게 형성하는 단계;

스티어링 공분산 행렬들을 반전시키는 단계;

해당 주파수 대역의 주파수 빈들에 걸쳐 정지상태를 가상하고 상기 스티어링 공분산 행렬의 추정치가 해당 주파수 대역의 중심주파수의 협대역 추정치와 같다는 고려에 의해 적응제어 스티어링 벡터들을 추정하는 단계;

상기 적응제어 스티어링 벡터들의 추정치를 이용하여 협대역 적응제어 스티어링 가중치들을 결정하는 단계;

상기 중첩된 데이터 셋들과 적응제어 스티어링 가중치들의 푸리에 변환으로부터 주파수 영역에서 적응제어 빔들을 형성하는 단계;

IFFT를 통해 시간 영역에서 적응제어 빔들을 형성하는 단계; 및

중첩부분을 버리고 분할부분들을 연쇄하여 연속적인 빔 시계열을 결정하는 단계를 구비한다.

본 발명에 따르면, 실시간으로 목표물의 고해상도 3차원 영상을 제공하기 위한 현장 배치가능한 3차원 초음파 영상 시스템도 제공되는데, 이 시스템은:

(A) 초음파를 방사하는 소스;

(B) 상기 목표물 내의 서로 다른 구조들에 의해 반사되는 초음파의 반사를 포착하고 상기 반사된 초음파를 표시하는 센서 시계열을 제공하는 소형 적응제어 다차원 센서 어레이;

(C-1) 다차원 센서 어레이에 의해 생성된 센서 시계열을 받아들이고,

(C-2-1) 다차원 빔형성기를 원형 어레이 빔형성기들 및/또는 선형 어레이 빔형성기들의 코히어런트 서브셋들을 구비하는 서브-애퍼쳐들로 나누고,

(C-2-2) 원형 어레이들을 종래방법으로 빔형성하고,

(C-2-3) 선형 어레이들을 적응제어 빔형성함으로써

(C-2) 연속 빔 시계열을 생성하기 위해 센서 시계열을 처리하며,

(C-3) 실시간으로 빔 시계열로부터 3차원 영상을 재구성하기 위한

(C) 소형 처리 유닛; 및

(D) 실시간으로 재구성된 3차원 영상을 표시하는 표시장치를 구비한다.

도 1은 본 발명에 따른 현장배치 가능한 3차원 초음파 영상 시스템(100)을 개략적으로 나타낸다. 대상물(2)은 초음파를 방사하는 소스(4)에 의해 조사된다. 대상물(2) 내의 다른 구조물(3)은 초음파를 다른 방향들로 반사시킨다. 반사된 초음파는 그 다음에 소형 다차원 -2차원 또는 3차원- 센서 어레이(6)의 복수의 센서들(8)에 의해 포착된다. 센서들(8)의 출력신호들은 처리를 위해 통신링크를 경유하여 종래의 컴퓨터 워크 스테이션과 같은 소형 처리 유닛(12)으로 전송된다. 이어서 재구성된 영상들이 표시장치(14)를 이용하여 표시된다. 현장배치 가능한 초음파 영상 시스템을 위해 다차원 센서 어레이(6)와 처리 유닛(12)을 소형으로 설계하고 고행상도 영상을 제공하는 것은 다음 단락에 개시될 본 발명에 따른 고도의 빔형성 과정을 이용하여 가능해진다. 본 발명에 따른 고도의 빔형성 과정은 다차원 센서 어레이(6)의 센서신호들에 의해 제공된 모든 정보를 효과적으로 사용함으로써 어레이 이득 및 영상 해상도를 극대화시킨다. 센서신호들의 이러한 효과적 사용은 다차원 센서 어레이(6)를 최소화할 수 있게 해주는데, 이는 현장배치 가능한 초음파 영상 시스템(100)을 위해 필수적이다. 더욱이, 본 발명에 따른 진전된 빔형성 과정은, 완전히 다차원인 빔형성기를 현존하는 연산구조의 병렬구성 내로 통합된 작은 크기의 CPU들에서 실행될 수 있는 코히어런트 과정들의 서브셋들(sub-sets)로 나누는 분해단계를 구비한다. 따라서, 본 발명에 따른 고도의 빔형성 과정은 현장배치 가능한 초음파 영상 시스템(100)의 소형 처리 유닛(12)을 사용하여 수행된다. 빔형성 과정의 서브-애퍼쳐(sub-aperture)를 더 사용하는 것은 적응제어 빔형성기의 즉시에 가까운 수렴성을 제공하여 본 발명에 따른 초음파 시스템의 실시간 적용을 가능하게 해준다.

본 발명에 따른 분해단계의 결과로서, 완전히 다차원인 빔형성 과정은 선형 및 원형 어레이들에 대한 빔형성 과정으로 줄어든다.

도 2는 진행방향 Θ로 평면파 신호(22)를 받아들이는 동일 센서간격 δ의 N개의 센서들(8)을 구비하는 선형 센서 어레이(20)를 나타낸다. $x_n(t_i)(n=1,\ldots,N;i=1,\ldots,I)$는 N개의 센서들(8)에 의해 생성된 센서 시계

열로서 받아들인 평면파 신호(22)를 나타내는 것이다. 각도 θ로 도착하는 평면파 신호(22)에 대해 센서 시계열은 $x_n(t_i)=x_n(t_i-(n-1)\tau(\theta))$로 표현되며, 여기서 $\tau(\theta)$는 두 인접 센서들의 센서 시계열 사이의 시간지연으로서 c가 관련된 매질 내에서의 평면파 신호(22)의 전파속도일 때 $\tau(\theta)=\delta\cos(\theta)/c$로 주어진다.

N-센서 선형 어레이(20)의 평면파 신호 응답은 수학식 1로 표현되는데, 여기서 *는 복소공액 전치(complex conjugate transpose)를 표시한다.

$$B(f,\theta_s)=\overline{D}^{*}(f,\theta_s)\overline{X}(f)$$

$\overline{X}(f)$ 는 관련된 주파수 빈(frequency bin) f에 대한 $x_n(t_i)$ 의 푸리에 변환(Fourier transform) 벡터이다. $\overline{D}^{*}(f,\theta_s)$ 는, 예컨대 각도 θ_s 에서 평면파 신호(22)에 대한 자신의 n번째 위상 항이 $d_n(f,\theta_s)=\exp[j2\pi f(n-1)\delta\cos\theta_s/c]$로 표현되게 하는 스티어링 벡터(steering vector)인데. 여기서 θ_s는 빔 스티어링 방향 각이다. 그러면 빔 파워 패턴 P(f,θ_s)는 $P(f,\theta_s)=B(f,\theta_s)\times B^{*}(f,\theta_s)$와 같이 얻어진다. 신호들 내에서의 불연속들의 푸리에 변환에 기인한 사이드 로브(side lobe) 구조들은 깁스 효과(Gibbs effect)로도 불리는데, 증가된 빔 폭을 희생시켜서 푸리에 변환동안에 서로 다른 가중치를 가함으로써 - 소위 쉐이딩(shading)에 의해- 억제될 수 있다. 선형 어레이의 각응답(angular response)은 각도 θ_s에 대해 모호하여, 각도 θ_s 및 $-\theta_s$에서 타겟들에 동등하게 반응하는데, 여기서 θ_s는 영역 [0, π]에 걸쳐 변한다.

도 3은 반경 R의 고리 상에 균등하게 분포된 N개의 센서들(8)을 구비하는 원형 센서 어레이(30)를 나타낸다. 도 2에 도시된 바와 같이, 이 N개의 센서들은 방위각 θ 및 고도각 ϕ로 도달하는 평면파 신호(22)를 받아들이고 있다. N개의 센서들(8)은 받아들인 평면파 신호(22)를 나타내는 센서 시계열 $x_n(t_i)(n=1,\ldots,N;i=1,\ldots,I)$을 생성한다.

그러면 원형 센서 어레이(30)의 평면파 신호 응답은 수학식 2와 같이 표현된다.

$$B(f,\theta_s,\phi_s)=\overline{D}^{*}(f,\theta_s,\phi_s)W(\theta_s)\overline{X}(f)$$

$\overline{X}(f)$는 관련된 주파수 빈 f에 대한 센서 시계열 $x_n(t_i)$의 푸리에 변환 벡터이다. $\overline{D}^{*}(f,\theta_s,\phi_s)$는 평면파 신호(22)에 대한 자신의 n번째 위상 항이 $d_n(f,\theta_s,\phi_s)=\exp[j2\pi fR\sin\phi_s\cos(\theta_s-\theta_n)/c]$로 표현되게 하는 스티어링 벡터인데, 여기서 $\theta_n=2\pi n/N, n=0,1,\ldots,N-1$이다. 각도 θ_s 및 θ_n은 빔 스티어링 방향 및 센서 위치를 각각 나타내고 있다. $W(\theta_s)$는 대각행렬인데 대각을 벗어난 원소들은 0이고 대각 항들은 사이드 로브 구조를 감소시키기 위한 공간 윈도우(spatial window)의 가중치들로 되어 있다. 이 공간 윈도우는, 일반적으로, 균등하지 않으며 센서 위치와 빔 스티어링 방향에 의존한다. 그러면 빔 파워 패턴 $P(f,\theta_s,\phi_s)$는 $P(f,\theta_s,\phi_s)=B(f,\theta_s,\phi_s)\times B^{*}(f,\theta_s,\phi_s)$와 같이 얻어진다. 원형 센서 어레이(30)의 각응답(angular response)은 [0, 2π] 범위에 걸쳐 있게 되는데, 이에 따라 방위각 θ에 대해 모호성을 갖지 않는다.

도 4를 참조하면, 실린더형 어레이 빔형성기를 본 발명에 따라 서형 및 원형 어레이 빔형성기의 코히어런트 서브셋들로 분해하는 과정이 도시된다. 도 4에 도시된 바와 같이 실린더형 센서 어레이(40)는 NM개의 센서들(8)을 구비하는데, 여기서 N은 원형 센서 어레이들(30)의 개수이며 M은 각각의 원형 센서 어레이(30) 상의 센서들(8)의 개수, 즉 선형 센서 어레이들(20)의 개수이다. (θ_s,ϕ_s)에서 스티어링 방향으로 실린더형 센서 어레이(40)의 각응답은 도 4에 표시된 바와 같이 다음 수학식 3과 같이 표현될 수 있다.

$$B(f,\theta_s,\phi_s)=\sum_{r=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}w_{r,m}X_{r,m}(f)d_{r,m}^{*}(f,\theta_s,\phi_s)$$

$w_{r,m}$은 사이드로브 구조(sidelobe structures)를 억제하기 위한 3차원 공간 윈도우의 가중치로 이루어진 행렬 $W(\theta,\phi)$의 (r,m)번째 항이다. $X_{r,m}(f)$는 r번째 원형 어레이 상의 m번째 센서의 센서 시계열의 푸리에 변환을 나타내는 행렬 $\underline{X}(f)$의 (r,m)번째 항이다. $\underline{D}(f,\theta_s,\phi_s)$는 평면파 신호에 대한 자신의 (r,m)번째 위상 항이 $d_{r,m}(f,\theta_s,\phi_s)=\exp[j2\pi f(r\delta_z\cos\phi_s+R\sin\phi_s\cos(\theta_s-\theta_m))/c]$로 표현되게 하는 스티어링 벡터인데, 여기서 R은 원형 센서 어레이(30)의 반경이고, δ_z은 z-방향으로 다음 원형 어레이들 사이의 거

리이며 $\theta_m = 2\pi m/M, m = 0,1,\ldots,M-1$ 은 원형 어레이(30) 상의 센서(8)의 위치를 나타낸다. 발명자는 수학식 3의 재배열 형태가 다음 수학식 4와 같이 표현될 수 있음을 알아내었다.

$$B(f,\theta_s,\phi_s) = \sum_{r=0}^{N-1} w_{1,r} d_r^*(f,\theta_s,\phi_s)\left[\sum_{m=0}^{M-1} X_{r,m}(f) w_{2,m} d_m^*(f,\theta_s,\phi_s)\right]$$

여기서, $d_r(f,\theta_s,\phi_s) = \exp(j2\pi f r \delta_z \cos\phi_s / c)$ 는 스티어링 벡터 $\overline{D_z}(f,\theta_s,\phi_s)$ 의 r번째 항인데, 이는 위에 논의된 바와 같이 선형 어레이 빔형성기의 커널(kernel)이며 $w_{1,r}$ 은 선형 어레이 공간 쉐이딩을 위한 공간 윈도우의 항이다.

$d_m(f,\theta_s,\phi_s) = \exp(j2\pi f R \sin\phi_s \cos(\theta_s - \theta_m)/c)$ 은 스티어링 벡터 $\overline{D_y}(f,\theta_s,\phi_s)$ 의 m번째 항인데, 이는 위에 논의된 바와 같이 원형 어레이 빔형성기의 커널(kernel)이며 $w_{2,m}$ 은 원형 어레이 공간 쉐이딩을 위한 공간 윈도우의 항이다. 수학식 4는 두 개의 급수합의 곱으로 이루어진 실린더형 어레이 빔형성기를 표현하는데, 첫 번째 것은 선형 어레이 빔형성기이며 두 번째 것은 원형 어레이 빔형성기이다. 본 발명에 따르면 수학식 4에 의해 표현된 바와 같이 실린더형 어레이에 대한 빔형성 과정은 도 4에 도시된 바와 같이 두 단계로 분해된다. 제1 단계에서 원형 어레이 빔형성법은 각각의 어레이가 M개의 센서들(8)을 구비하는 N개의 원형 센서 어레이들(30)의 각각에 대해 수행되어, N개의 빔 시계열 출력을 생성한다. 제2 단계에서 선형 어레이 빔형성법은 제1 단계의 N개의 빔 시계열 출력에 대해 실행되어 스티어링 방향으로 하나의 빔 시계열을 생성한다. 관련된 다른 빔 스티어링 방향에 대해서도 이후에 동일 과정이 반복된다. 다른 방법으로서는, 선형 어레이 빔형성법을 먼저 실행하면 이 과정은 반대로 될 수 있다.

수학식 4에 기초한 본 발명에 따른 분해과정은 실린더형 어레이 빔형성법을 실질적으로 용이하게 한다. 수학적 연산의 개수와 이 연산을 수행하기 위해 요구되는 메모리 양은 실린더형 빔형성기를 수학식 3에 표현한 바와 같은 이중 급수합 대신에 두개의 급수합의 곱으로 표현함으로써 실질적으로 감소된다. 따라서, 이는 실시간 시스템 응용을 위한 대용량 메모리와 초고속 CPU들에 대한 필요성을 없애준다. 이는 기존 컴퓨터 워크스테이션과 같이 현재 입수가능한 컴퓨터 기술을 소형 처리 유닛(12)에 사용하는 다차원 어레이용 고도의 빔형성 알고리즘의 응용을 가능하게 해준다.

명백히, 본 발명에 따른 분해 과정에서 비롯된 원형 및 선형 빔형성기는 병렬적으로 실행될 수 있으므로 병렬처리기를 가진 컴퓨터를 이용하여 빔형성 연산의 최적 실행을 가능하게 해 줌으로써 빔형성 과정의 성능을 실질적으로 향상시킨다. 이는 현재 입수가능한 컴퓨터 기술을 소형 처리 유닛(12)에 사용하는 초음파 영상 시스템(100)의 실시간 응용을 가능하게 해 준다.

더욱이, 수학식 4는 더 이상의 가정 없이 수학식 3으로부터 직접 도출되기 때문에, 본 발명에 따라 분해된 실린더형 어레이 빔형성 과정은 자유도의 수를 잃지 않는다. 따라서, 본 발명에 따라 분해된 실린더형 어레이 빔형성 과정은 수학식 3에 의해 표현된 바와 같이 최적 해(optimum solution)로 수렴한다.

본 발명에 따른 분해 과정의 또 다른 이점은 3차원 공간 윈도우를 훨씬 더 간단하게 디자인하고 통합할 수 있다는 것이다. 방위각 theta에 대한 각응답을 향상시키기 위해 불균등한 쉐이딩 윈도우라도 각각의 원형 어레이 빔형성기에 대해 적용될 수 있다. 그 다음 고도각 Φ에 대한 각응답을 향상시키기 위해 균등한 쉐도잉 윈도우가 선형 어레이 빔형성기에 대해 적용될 수 있다. 물론, 다른 형태의 쉐도잉 윈도우나 그들의 조합이 적용될 수도 있다.

평면형 및 구형 어레이들에 대한 분해과정은 상기한 실린더형 어레이에 대한 분해과정과 매우 유사하다. 이 과정들에 대한 자세한 설명은 발명자인 A. 토픽(A. Tawfik) 및 S. 스텔지오포우로스(S. Stergiopoulos)에 의해 다음에 발표되었다: "A Generic Processing Structure Decomposing the Beamforming Process of 2-D & 3-D Arrays of Sensors into Sub-sets of Coherent Processes", IEEE, J. Oceanic Eng., July, 1997. 물론, 본 발명에 따른 분해는 실린더형, 평면형 및 구형 어레이 이외의 센서 어레이에도 역시 적용될 수 있다.

선형 센서 어레이들(20) 및 원형 센서 어레이들(30)에 대한 수학식 1 및 2에 대해 각각 표현된 빔형성 과정은 기본적으로 공간 필터인 시간 지연 빔형성 추정기(time delay beamforming estimator)이다. 하지만, 센서 어레이 응답을 최적화시키기 위해, 최적의 빔형성법은 센서 어레이에 의해 받은 잡음특성에 기초하여 빔형성 필터 계수를 선택할 것을 요구한다. 센서 어레이에 의해 받은 잡음특성을 이용한 최적의 빔형성 알고리즘을 적응제어 빔형성기라고 한다. 이 알고리즘의 빔형성 필터 계수는 센서 어레이에 의해 받은 상관된 잡음의 공분산 행렬에 기초하여 선택된다. 하지만, 잡음의 특성에 대한 이해가 부정확한 경우에는, 적응제어 빔형성기의 성능이 심각하게 떨어지게 되며 심지어는 원하는 신호가 소멸되는 결과를 낳을 수도 있다. 따라서, 실시간 연산 시스템에 유용한 적응제어 빔형성기를 갖추는 것은 매우 어려운 일이다. 더욱이, 정합 필터(matched filter) 처리와 같은 후속 처리를 위해 적응제어 빔형성기는 코히어런트 빔 시계열을 제공해야만 한다. 특히, 정합 필터 처리는 기준신호와 상관된 연속 빔 시계열을 생성하는 빔형성기의 즉시에 가까운 수렴을 필요로 한다.

적응제어 빔형성방법에 있어서, 빔형성기 응답은 원하는 신호의 방향 이외의 방향으로부터 도달하는 잡음 및 신호에 기인한 영향을 최소로 포함하도록 최적화된다. 이러한 최적화를 위해, 원하는 방향으로부터의 신호가 정해진 이득을 가지고 통과하게 해주는 구속조건 최소화 문제(constraint minimization problem)에 대한 해인 선형 필터 벡터 $\overline{Z}(f,\theta)$ 를 알아내는 것이 바람직하다. 이 최소화 문제는 다음 수학식 5와 같이 표현된다.

$\overline{Z}^{*}(f_i,\theta)\overline{D}(f_i,\theta)=1$

$\sigma_{MV}^{2}=\overline{Z}^{*}(f_i,\theta)R(f_i)\overline{Z}(f_i,\theta)$를 최소화

여기서, $\overline{D}(f_i,\theta)$는 수학식 1에 기초한 기존의 스티어링 벡터이다. $R(f_i)$는 원소들로서 $R_{nm}(f,\delta_{nm})=E\{X_n(f)X_m(f)\}$를 가지는 받아들인 센서 시계열의 공간 상관 행렬인데, 여기서 $E\{...\}$는 기대값 연산자(expectation operator)이고 δ_{nm}은 n번째 센서와 m번째 센서 사이의 센서간격이다. 최소화 문제의 해는 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{Z}(f_i,\theta)=\frac{R^{-1}(f_i)\overline{D}(f_i,\theta)}{\overline{D}^{*}(f_i,\theta)R^{-1}(f_i)\overline{D}(f_i,\theta)}$$

수학식 6은 N-센서 어레이에 의해 받은 빔형성 신호들을 위한 적응제어 스티어링 벡터들을 제공한다. 주파수 영역에서, 스티어링 각도 θ_s인 적응제어 빔은 수학식 1에 의해 표현된 기존의 빔에 대응하여 다음과 같이 정의된다.

$B(f_i,\theta_s)=\overline{Z}^{*}(f_i,\theta_s)\overline{X}(f_i)$

크로릭(Krolik) 및 D.N. 스윙글러(Swingler)는 광대역 소스의 위치지정을 위한 수렴시간이 STCM(steered covariance matrix)이라 불리는 공간-시간 통계원리를 사용함으로써 감소된다는 것을 다음의 참고문헌에서 보였다. 참고문헌: "Bearing Estimation of Multiple Broadband Sources using Steered Covariance Matrices", IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Proc., ASSP-37, pp.1481-1494, 1989, J.

이 방법은, B. 반 빈(Van Veen) 및 K. 버클리(Buckley)가 다음 참고문헌에서 개시한 바와 같은 협대역 CSDM(cross spectral density matrix)에 기초한 적응제어 알고리즘보다 상당히 짧은 수렴시간을 공간 해상도의 희생 없이 달성하게 해준다. 참고문헌: "Beamforming: a Versatile Approach Spatial Filtering", IEEE ASSP Mag., pp.4-24, 1988. 이 STCM을 평가하는 데 이용되는 통계적 자유도의 수는, CSDM방법에서는 관측시간($T=M/F_s$, F_s는 샘플링 주파수)임에 비해, 근사적으로 시간과 대역폭의 곱인 $T\times BW$이다. 이는 수렴시간에서 광대역 소스 대역폭의 크기인 BW의 향상을 제공한다.

주파수 영역에서 기존의 빔형성기의 출력은 수학식 1에 의해 표현된다. 그러면, 시간 영역에서 대응하는 출력 $\xi(t_i,\theta_s)$은 스티어링된 센서 출력들의 가중치 부가된 합으로서 다음과 같이 표현된다.

$$\xi(t_i,\theta_s)=\sum_{n=1}^{N}x_n(t_i-\tau_s)$$

$\xi(t_i,\theta_s)$는 $B(f,\theta_s)$의 IFFT(inverse fast Fourier transformation)이기 때문에, 연속 빔 시계열이 FFT(fast Fourier transformation) 및 패스트 콘볼루션 절차(fast convolution procedures)를 사용하여 주파수 영역 빔형성기의 출력으로부터 얻어진다.

빔형성기 출력을 사용하면 광대역 빔출력의 기대값인 $B(\theta)$가 다음과 같이 얻어진다.

$B(\theta_s)=E\{|\xi(t_i,\theta_s)|\}=\overline{h}^{*}E\{\overline{x}^{*}(t_i,\tau_n(\theta))\overline{x}(t_i,\tau_m(\theta))\}\overline{h}$

여기서, 벡터 $\overline{h}$는 공간 쉐이딩을 위한 가중치를 포함한다.

수학식 10에 나타나는 항은 시간 영역에서의 STCM으로 정의되며 정지조건(stationary conditions)에서 t_i에 의존하지 않는 것으로 가정된다.

$\Phi(t_i,\theta_s)=E\{\overline{x}(t_i,\tau_n(\theta_s))\overline{x}^{*}(t_i,\tau_m(\theta_s))\}$

$X_n(f_i)$가 센서 시계열의 푸리에 변환이라고 하고 센서 시계열이 근사적으로 대역 제한되어(band limited) 있다고 가정하면 스티어링된 센서 출력들의 벡터인 $x_n(t_i,\tau_n(\theta_s))$는 수학식 11에 의해 표현된다.

$$\bar{x}(t_i,\tau_n(\theta_s))=\sum_{k=l}^{l+H}T_k(f_k,\theta_s)\bar{X}(f_k)\exp(j2\pi f_k t_i)$$

$T(f_k,\theta)$는 기존의 스티어링 벡터 $\bar{D}(f_i,\theta)$의 원소들과 동일한 원소들을 갖는 대각 스티어링 행렬이며 다음과 같이 표현된다.

$$T(f_k,\theta)=\begin{bmatrix}1 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & d_1(f_k,\theta) & & \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & & \cdots & d_N(f_k,\theta)\end{bmatrix}$$

그러면, STCM은 상기 수학식들로부터 직접 다음과 같이 도출된다.

$$\Phi(\Delta f,\theta_s)=\sum_{k=l}^{l+H}T(f_k,\theta_s)R(f_k)T^{*}(f_k,\theta_s)$$

여기서 지수 $k=l,l+1,\ldots,l+H$은 관련된 대역 내의 주파수 빈들(frequency bins) Δf을 가리키며 $R(f_k)$는 주파수 빈 f_k에 대한 CDSM이다.

STMV(steered minimum variance algorithms)에서 광대역 공간 파워의 스펙트럼 추정값은 다음과 같이 주어진다:

$$B(\theta_s)=\left[\bar{I}^{*}\Phi(\Delta f,\theta_s)^{-1}\bar{I}\right]^{-1}$$

하지만, 수학식 14에 따른 $B(\theta)$의 추정값들은 코히어런트 빔 시계열을 제공하지 않는데 그 이유는 이들이 적응제어 과정의 광대역 빔 파워 출력을 나타내기 때문이다. 따라서, 본 발명에 따르면 STMV의 추정과정이 관련된 주파수대역에서 모든 주파수 빈에 대해 $\Phi(\Delta f,\theta_s)$의 복소수 계수를 결정하도록 수정되었다.

이 STMV 알고리즘은, 그 원래 형태로서, 받아들인 신호의 모든 주파수 대역들 Δf에 대한 $\Phi(\Delta f,\theta)$의 추정값을 생성하도록 사용된다. 대역 Δf의 주파수 빈들에 걸쳐 정지상태를 가정하면 STMV의 추정값은 대역 Δf의 중심 주파수 f_0에 대한 협대역 추정값 $\Phi(f_0,\theta)$과 대략 같을 것으로 생각된다. 그러면 협대역 적응제어 계수는 다음 식으로부터 도출된다.

$$\bar{w}(f_0,\theta)=\frac{\Phi(f_0,\Delta f,\theta)^{-1}\bar{D}(f_0,\theta)}{\bar{D}^{*}(f_0,\theta)\Phi(f_0,\Delta f,\theta)^{-1}\bar{D}(f_0,\theta)}$$

주파수 빈들 $i=l,l+1,\ldots,l+H$에 걸친 $\bar{w}(f_0,\theta)$의 위상 변이는 수학식 16에 의해 모델링되는데,

$$w_n(f_i,\theta)=\exp[2\pi f_i\Psi(\Delta f,\theta)]$$

여기서, $\Psi_n(\Delta f,\theta)$는 수학식 17로부터 도출되는 시간 지연항이다.

$$\Psi_n(\Delta f,\theta)=F[w_n(\Delta f,\theta),2\pi f_0]$$

수학식 16에 의해 제공된 적응제어 스티어링 가중치들 $w_n(\Delta f,\theta)$을 사용하면, 적응제어 빔들은 다음 식에 의해 형성된다.

$$B(f_i,\theta_s)=\overline{w}^{*}(f_i,\theta_s)\overline{X}(f_i)$$

도 5는 위에 논의한 바와 같은 STMV 빔형성기의 처리 단계들을 개략적으로 보여준다. 우선 센서 시계열이 분할, 오버랩되고 FFT를 이용하여 주파수 영역 내로 변환된다. 다음 단계에서 수학식 10 및 13에 기초하여 STCM이 결정된다. 이어서, 이 STCM은 수학식 15에 따른 적응제어 스티어링 벡터들의 추정값을 결정하기 위해 촐레스키 분해(Cholesky factorization)를 이용하여 반전(inverted)된다. 그 다음, 이 적응제어 스티어링 벡터들은 주파수 영역에서 적분되어 적응제어 빔들을 형성한다. 최종적으로, 시간영역에서의 적응제어 빔들은 IFFT를 통해 다음과 같이 형성되는데,

$$b(t_i,\theta_s,\phi_s)=IFFT\{B(f_i,\theta_s,\phi_s)\}$$

여기서, 연속 빔 시계열을 형성하도록 오버랩 및 분할 부분들의 연결은 버려진다.

실시간 응용으로 적응제어 빔형성기를 실행함에 있어서 행렬 반전은 주요 관심사이다. 선형식들의 시스템을 풀기 위한 표준 계산기술법들이 적응제어 가중치들을 풀기 위해 적용될 수 있다. 이 계산기술법에는 다음이 포함된다:

· 공분산 행렬 $R(f_k)$의 촐레스키 분해. 이는 받아들인 데이터 벡터의 면에서 후치환(backsubstitution)에 의해 선형 시스템이 풀려질 수 있도록 해준다.

· 회전을 통해 행렬을 상부 삼각형 형태로 변환하는 것을 포함하는, 받아들인 벡터 $\overline{X}(f_i)$의 QR 분해. 이 QR 분해법은 촐레스키 분해보다 더 나은 안정성을 가지나 2배에 가까운 연산노력을 필요로 한다.

· SVD(Singular Value Decomposition) 방법. 이 SVD 방법은 가장 안정된 인수분해 기술이나 QR 분해 방법보다 3배 큰 연산노력을 필요로 한다.

본 발명에 따른 빔형성 과정의 조사 연구를 위해 촐레스키 분해와 QR 분해기술이 적용되었다. 이들 방법 사이에 안정성에 관한 성능에 있어서 어떤 두드러진 차이점들도 발견되지 않았다. 물론, 실시간 응용을 위해서는 가장 빠른 알고리즘이 선호된다.

실시간 응용에서 적응제어 빔형성방법을 시행하기 위한 또 다른 주요 관심사는 수학식 10 및 13에서 도출되는, 잡음 필드에 대한 2차 통계값들(second order statistics)의 이해 필요성이다. 이 통계값들은 일반적으로 알려져 있지 않으나 공분산 행렬 $R(f_k)$의 다수 독립 샘플들을 평균화함으로써 받아들인 데이터로부터 추정될 수 있다. K가 통계적으로 독립인 $R(f_k)$의 샘플들의 유효 개수이고 N이 센서들(8)의 개수일 때, 잡음 필드에 대한 2차 통계값 -적응제어 빔 출력 파워 추정기 감지 통계값- 의 변이는 (K-N+1)에 역비례한다. 실험적인 관찰 뿐만 아니라 이론적인 추정도 적응제어 빔형성기의 출력에서 코히어런트 빔 시계열을 얻기 위해서는 K가 N보다 4배 이상 커야한다는 것을 제시한다. 매우 많은 수의 센서들을 가진 어레이들에 대해 통계적으로 최적인 빔형성기로서 적응제어 빔형성기를 실행하는 것은 매우 많은 수의 $R(f_k)$ 독립 샘플을 평균화할 것을 요구하는데, 이는 실시간 시스템에서는 적용할 수 없다. 이 문제에 대한 해법은 시각 t_k에 $R(f_k)$의 시변(time varying) 적응제어 추정의 형태로 지수 윈도우(exponential window)를 사용하여 공분산 행렬을 업데이팅하는 것이다. 이 시변 적응제어 추정은 시각 t_k에 지수함수적으로 시간 평균된 추정기 - 기하학적 망각 알고리즘(geometric forgetting algorithm) - 이다:

$$R^{t_k}(f_i)=\mu R^{t_{k-1}}(f_i)+(1-\mu)\overline{X}(f_i)\overline{X}^{*}(f_i)$$

여기서, mu는 지수함수적으로 가중치가 부가된 시간 평균을 실행하는 평활화 인자(smoothing factor)($0<\mu<1$)이다.

다수의 센서들에 대해 다수의 적응제어 가중치로써 적응제어 빔생성기를 실행하는 것은 받아들인 관련 신호의 시변 특성을 감지하기 위해 적응제어 빔형성기의 동적 특성을 제거하는 매우 긴 수렴주기를 필요로 한다. 이러한 제한은 적응제어 가중치의 개수를 줄이는 방법에 의해서만 회피할 수 있다. 적응제어 가중치의 개수의 감소는 본 발명에 따른 서브-애퍼쳐 처리(sub-aperture processing) 계획을 도입함으로써 달성된다.

도 6은 센서들(8)의 선형 어레이(20)에 대한 서브-애퍼쳐 구성을 나타낸다. 이 선형 어레이는 복수의 오버래핑 서브-어레이들(overlapping sub-arrays)로 나뉘어진다. 제1 단계에서, 서브-어레이들은 각 스티어링 방향에 대한 서브-어레이의 개수와 같은 다수의 빔 셋들을 생성하는 기존의 빔형성기를 사용하여 빔형성된다. 제2 단계에서, 적응제어 빔형성법은 공간적으로 동일방향으로 스티어링되어 있으나 서로 다른 서브-어레이에 속한 각 빔들의 각 셋에 대해 수행된다. 한 셋의 빔들은, 센서간격이 두 인접 서브-어레이들의 공간간격과 같고 센서의 수가 서브-어레이의 수와 같으며 동일 방향으로 스티어링된 방향성 센서들로 구성된 선형 어레이와 등가이다.

도 7은 본 발명에 따른 M개의 센서들(8)을 가진 원형 어레이(30)에 대한 서브-애퍼쳐 구성을 나타낸다. 제1 원형 서브-애퍼쳐는 n=1,2,...,M-G+1로서 M-G+1 센서들로 구성되는데, 여기서 n은 센서 지수이며 G는 서브-애퍼쳐들의 개수이다. 제2 원형 서브-애퍼쳐는 n=2,3,...,M-G+2로서 M-G+1 센서들로 구성된다. 서브-애퍼쳐

형성은 최종 서브-애퍼쳐가 n=G,G+1,...,M로서 M-G+1 센서들로 구성될 때까지 계속된다. 제1 단계에서, 각 원형 서브-애퍼쳐는 각각의 스티어링 방향에 대해 G개의 빔 셋들을 생성하는 기존의 빔형성기를 사용하여 빔형성된다. 제2 단계는 공간적으로 동일방향으로 스티어링되어 있으나 그 각각이 서로 다른 원형 서브-애퍼쳐에 속한 빔들의 셋에 대한 적응제어 빔형성을 포함한다. 도 7은 G=3에 대한 서브-애퍼쳐 단계들을 나타낸다.

도 8을 참조하면, 본 발명에 따른 실린더형 어레이(40)에 대한 서브-애퍼쳐 구성이 도시된다. 실린더형 어레이(40)는 NM개의 센서들(8)로 이루어지는데, 여기서 N은 원형 고리들의 개수이며 M은 각각의 고리 상에 있는 센서들의 개수이다. 서브-애퍼쳐들의 형성은 다음과 같이 수행된다:

제1 서브-애퍼쳐는 n=1,2,...,N-G+1이 고리의 지수이며 G가 서브-애퍼쳐의 개수일 때 제1 (N-G+1) 고리들로 구성된다. 각각의 고리에서 M-G+1 센서들의 제1 셋들이, m=1,2,...,M-G+1를 각 고리에 대한 센서 지수로서 하여, 선택된다. 이러한 제1 서브-애퍼쳐가 도 8의 우상단 그림에서 작은 원들로 표시된 실린더형 어레이 셀(42)을 형성한다. 이어서 상기한 바와 같은 본 발명에 따른 분해 과정을 이용하여 기존의 빔형성방법이 실린더형 어레이 셀(42)에 적용된다. 방위각 θ_s와 고도각 ϕ_s로 이루어진 주어진 스티어링 방향에 대해 다차원 서브-애퍼쳐 빔형성기는 제1 서브-애퍼쳐를 표시하는 아래첨자 g=1를 가진 빔 시계열 $b_{g=1}(t_i,\theta_s,\phi_s)$를 제공한다.

제2 서브-애퍼쳐는 n=2,3,...,N-G+2인 (N-G+1) 고리들의 후속 셋으로 구성된다. 각각의 고리에서 m=2,3,...,M-G+2인 M-G+1 센서들의 연속적인 셋들이 선택된다. 이렇게 선택된 센서들은 이어서 제2 서브-애퍼쳐 실린더형 어레이 셀을 형성한다. 그 다음 기존의 빔형성방법이 적용되고 주어진 스티어링 방향에 대해 다차원 서브-애퍼쳐 빔형성기가 제2 서브-애퍼쳐를 표시하는 아래첨자 g=2를 가진 빔 시계열 $b_{g=2}(t_i,\theta_s,\phi_s)$를 제공한다.

서브-애퍼쳐 형성은 최종 서브-애퍼쳐가 n=G,G+1,...,N인 (N-G+1) 고리들의 후속 셋을 구성할 때까지 계속된다. 그 다음 기존의 빔형성방법이 적용되고 주어진 스티어링 방향에 대해 다차원 서브-애퍼쳐 빔형성기가 최종 서브-애퍼쳐를 표시하는 아래첨자 g=G를 가진 빔 시계열 $b_{g=G}(t_i,\theta_s,\phi_s)$을 제공한다.

빔형성의 제2 단계는 도 8에 도시된 바와 같이 G=3 빔 시계열 $b_g(t_i,\theta_s,\phi_s), g=1,2,...,G$로 구성된 선형 어레이에 대한 적응제어 빔형성기로 이루어진다. 주어진 방위 및 고도 스티어링 각도 $\{\theta_s,\phi_s\}$의 쌍에 대해, 실린더형 적응제어 빔형성 과정은 적응제어 선형 어레이 빔형성기로 감소될 수 있다. 적응제어 선형 어레이 빔형성기는, 두 개의 인접한 서브-애퍼쳐 실린더형 셀들 사이의 간격이 $\delta=[(R2\pi/M)^2+\delta_z^2]^{1/2}$인 세 개의 빔 시계열들 $b_g(t_i,\theta_s,\phi_s), g=1,2,3$로만 이루어지는데, 여기서 $(R2\pi/M)$는 각각의 고리 상의 센서 간격이며 δ_z는 실린더형 어레이(40)의 z-축 방향의 각각의 고리 사이의 거리이다. 이 적응제어 선형 어레이 빔형성기는 방위 및 고도 스티어링 각도의 쌍 $\{\theta_s,\phi_s\}$에 중심을 두고 스티어링된 하나 또는 그 이상의 적응제어 빔 시계열을 제공한다.

각각의 서브-애퍼쳐에서의 자유도 수가 매우 적기 때문에, 본 적응제어 과정은 즉시에 가까운 수렴성을 겪는다. 더욱이, 본 발명에 따른 다차원 서브-애퍼쳐 빔형성기 과정은 다음에 논의된 MVDR 및 GSC와 같은 다양한 적응제어 잡음 소거 기술을 포함할 수도 있다:

S. Stergiopoulos: "Implementation of Adaptive and Synthetic Aperture Processing Schemes in Integrated Acitve-Passive Sonar Systems", Proceedings of the IEEE, 86(2), pp. 358-397, February, 1998;

B. Windrow et al.: "Adaptive Antenna Systems", Proceedings IEEE, 55(12), pp. 2143-2159, 1967;

N.L. Owsley: "Sonar Array Processing", S. Haykin, Editor, Prentice-Hall Signal Processing Series, A.V. Oppenheim Series Editor, pp. 123, 1985; 및

B. Van Veen and K. Buckley: "Beamforming: a Versatile Approach to Spatial Filtering", IEEE ASSP Mag., pp. 4-24, 1988.

또한, 본 발명에 따른 서브-애퍼쳐 구성은 평면형 어레이 및 구형 어레이 등의 다른 다차원 어레이들에도 적용가능하다. 평면형 및 구형 어레이들을 위한 적응제어 빔형성기의 실행뿐만 아니라 분해, 서브-애퍼쳐 형성은 위에 논의한 실린더형 어레이에 대한 대응 단계들과 유사하다. 특히, 평면형 어레이들에 대해서, 서브-애퍼쳐들의 형성은 도 9에 도시된 선형 어레이들에 대한 서브-애퍼쳐 적응제어 개념에 바탕을 둔다. 마찬가지로, 구형 어레이들에 대한 서브-애퍼쳐들의 형성은 원형 어레이들의 서브-애퍼쳐 적응제어 개념에 바탕을 둔다.

도 10은 본 발명에 따른 초음파 영상 시스템의 3차원 실린더형 어레이를 위한 신호처리 흐름의 모듈 구조를 개략적으로 도시한다. 선형 및 원형 어레이 빔형성기들은 FIR(Finite Impulse Response) 필터들로서 실행된다. 도 10에서 다른 처리 모듈의 재구성은 이 신호처리 흐름을, 예컨대 선형, 평면형 또는 구형 센서 어레이들을 가진 다양한 초음파 영상 시스템에 응용하게 해준다.

제1 처리 모듈(50)은, 센서 어레이로부터 받은 시계열의 분할, 분할된 시계열의 초기 스펙트럼 FFT의 연산, 대역-통과 FIR을 통한 해당 주파수 대역의 선정 및 다운 샘플링(downsampling)을 포함한다. 모듈(50)의 출력은 감소된 샘플링률(sampling rate)에서의 연속 시계열로 이루어진다.

원형 어레이 및 선형 어레이 빔형성기들로 이루어진 제2 모듈(52) 및 제3 모듈(53)은 원형 콘볼루션

(circular convolution)을 통한 공간 필터를 위한 FIR 구성을 이용하여 연속적인 방향성 빔 시계열을 제공한다. 빔형성기들의 입력에 대한 분획(segmentation) 및 중첩(overlap)은 빠른-콘볼루션(fast-convolution) 신호처리 조작에 기인한 랩어라운드 오류를 해결해준다. 이 중첩은 FIR 필터의 유효길이와 같다.

모듈(54)은 능동 초음파 응용분야로부터 얻어진 에코(echo)를 처리하는 데 이용된다.

모듈(56)은 시간적인 스펙트럼 분석(temporal spectral analysis)의 최종 처리 단계들을 포함한다.

마직막으로, 데이터 정규화 처리 방식들이 출력 결과들을 표시장치의 다이내믹 레인지(dynamic range) 내로 매핑하는 데 사용된다.

모듈(56)에서 버니어(vernier)의 사용과 시간적인 스펙트럼 분석-분획 중첩을 결부시킴, 윈도윙(windowing) 및 FFT 코히어런트 처리-은 모든 빔 시계열에 대한 협대역 결과를 제공한다. 정규화 및 오어링(OR-ing)은 출력 결과를 표시하기 전의 최종 처리단계들이다.

능동 모듈(54)에서 빔 시계열에 대한 정합된 필터-또는 모사 상관자(replica correlator)-의 적용은 광대역 처리를 제공한다. 이는 초음파 시스템의 능동 트랜스듀셔에 의해 전송된 기준 파형에 대한 범위 및 방위(range and bearing)의 함수로서 에코의 감지를 가능하게 해준다.

도 11을 참조하면, 본 발명에 따른 다차원 어레이들의 서브-애퍼쳐 구성에 대한 신호처리 흐름의 개략적 다이어그램이 도시된다. 모듈(60)은 본 발명에 따른 서브-애퍼쳐들의 형성을 포함한다. 다음 단계에서, 각 서브-애퍼쳐의 센서 시계열은 도 10에 도시된 바와 같이 본 발명에 따른 다차원 어레이들에 대해 종래의 빔형성기를 이용하여 모듈(62)에서 빔형성되어 각 서브-애퍼쳐에 대해 빔 시계열을 제공한다. 빔형성의 제2 단계는 모듈(64)에서 수행된다. 이러한 제2 단계는 모듈(62)에서 얻어진 빔 시계열의 적응제어 빔형성을 포함한다. 적응제어 빔형성기는 종래의 빔들과 같은 방위 및 고도각에 중심을 두고 스티어링된 하나 또는 그 이상의 적응제어 빔 시계열을 제공한다.

도 11에 도시한 바와 같은 다차원 어레이들의 서브-애퍼쳐 구성을 위한 신호처리 흐름은 도 10에 도시된 신호처리 흐름의 모듈들(52 및 53)과 합쳐질 수도 있다.

본 발명에 따른 신호처리의 또 다른 실시예에서 서브-애퍼쳐 적응제어 빔형성기는 더 나은 영상 해상도를 위해 합성 애퍼쳐 빔형성기-ETAM 알고리즘-와 통합된다. 상기 합성 애퍼쳐 빔형성기는, 합성 애퍼쳐 빔형성기에 입력 센서 시계열을 제공하도록 사용되는 실제-물리적인- 센서 어레이보다 더 많은 수의 센서들로 이루어진 합성 센서 어레이에 상응하는 센서 시계열을 제공한다. 합성 애퍼쳐 빔형성기에 대해 자세한 것은 설리번(Sullivan) E.D.와 스텔지오포우로스 S.에게 1990년 부여된 미국특허 제4,930,111호에 개시되어 있다. 제1 단계에서 센서 시계열은 합성 애퍼쳐 빔형성기를 사용하여 처리되고 서브-애퍼쳐 적응제어 빔형성기에 대한 입력으로서 제공된다. 선택사항으로서, 이 방법은, 소형 초음파 영상 시스템에 적은 수의 센서 어레이가 배치된 때에, 만족스러운 영상 해상도를 얻는 데 이용될 수 있다.

본 발명에 따른 서브-애퍼쳐 적응제어 빔형성기가 즉시에 가까운 수렴성을 성취하고, 이에 따라 기준신호에 대해 충분한 시간적인 코히어런스와 상관관계를 갖는 출력 빔 시계열을 제공하는지를 입증하기 위해 실제 데이터 셋뿐만 아니라 시뮬레이션으로 테스트를 행하였다. 충분한 시간적인 코히어런스를 갖는 출력 빔 시계열을 제공하는 것은 수동 및 능동 초음파 영상 시스템에서 정합 필터 처리 또는 시간적인 스펙트럼 분석을 위해 필수적이다. 도 12를 참조하면, 다양한 형태의 빔형성기-48 센서의 평면형 어레이에 대한 종래의 빔형성기(1); 48 센서의 평면형 어레이에 대한 본 발명에 따른 서브-애퍼쳐 적응제어 빔형성기(2); 물리적인 48 센서의 평면형 어레이를 합성 144 센서의 평면형 어레이로 연장하는 합성 애퍼쳐(ETAM 알고리즘) 빔형성기(3); 48 센서의 평면형 어레이에 대한 본 발명에 따른 통합된 합성 애퍼쳐 및 서브-애퍼쳐 적응제어 빔형성기(4); 및 144 센서의 평면형 어레이에 대한 종래의 빔형성기-에 대해 스티어링 각도의 함수로서 능동 연속파(CW) 펄스에 대한 빔 응답 파워가 도시된다. 도 12에 제시된 결과들로부터 명백하듯이, 본 발명에 따른 서브-애퍼쳐 적응제어 빔형성기는 3배 더 큰 평면형 어레이에 적용된 종래의 빔형성기와 유사한 각 해상도(angular resolution)를 제공한다. 각 해상도에 대한 더 나은 개선점은, 빔형성 과정에 더 많은 연산노력이 드는 것을 감수하면 도 12에 도시된 바와 같이 본 발명에 따른 합성 애퍼쳐 빔형성기와 서브-애퍼쳐 적응제어 빔형성기를 통합함으로써 얻어진다.

또한, 광대역 FM 펄스들에 대한 코히어런트 빔 시계열을 제공하기 위해 즉시에 가까운 수렴성을 달성하는 본 발명에 따른 서브-애퍼쳐 적응제어 빔형성기의 효율을 입증하기 위해 수 분(a few minutes)의 반복률을 가진 광대역 FM 펄스들을 포함하는 합성 데이터 셋들을 가지고 본 발명에 따른 서브-애퍼쳐 적응제어 빔형성기를 테스트하였다. 이 테스트는 필수적인데, 왜냐하면 적응제어 처리 방식이 최적해로의 수렴을 위해 적어도 수 회의 반복과정(iterations)을 요구하기 때문이다. 도 13에 도시된 바와 같이 GRAM들이 빔-스티어링의 함수로서 워터폴 범위 표시(waterfall display of ranges)를 제공하면서 정합 필터와 그 설비를 이용하여 출력 빔 시계열을 처리하였다. 각각의 빔형성기에 대해 수평축은 20도 관측방향에 중심을 둔 10도 각 섹터(angular sector)에 20 스티어링 빔들을 포함한다. 수직축은 시간지연 또는 인체 내에서의 신호의 투과깊이를 나타낸다. 따라서, 도 13에 도시된 각 윈도우의 수직축을 따라 있는 감지된 에코는 신체 장기 등의 시뮬레이션된 대상으로부터의 반사를 나타낸다. 도 13에서 왼쪽부터, 다음과 같은 서로 다른 빔형성기들이 사용된다: 48 센서 어레이에 대한 종래의 빔형성기; 48 센서 어레이에 대한 본 발명에 따른 서브-애퍼쳐 적응제어 빔형성기; 물리적인 48 센서 어레이를 합성 144 센서 어레이로 연장하는 합성 애퍼쳐(ETAM 알고리즘) 빔형성기; 48 센서 어레이에 대한 본 발명에 따른 통합된 합성 애퍼쳐 및 서브-애퍼쳐 적응제어 빔형성기; 및 144 센서 어레이에 대한 종래의 빔형성기. 명백히 드러나는 바와 같이, 48 센서 어레이에 대해 적용된 종래의 빔형성기-도 13의 왼쪽에서 첫 번째 윈도우-는 두 개의 에코우를 분해하는 데 실패하였다. 이는 현 기술상태의 초음파 영상 시스템의 성능특성을 나타낸다. 도 13에 있는 그 다음의 세 개의 윈도우들은 48 센서 어레이에 대해 적용된 본 발명에 따른 적응제어 빔형성기의 결과를 보여준다. 뚜렷하게 드러나는 바와 같이, 세 개의 모든 윈도우들에서 두 개의 에코가 명백히 눈에 띈다. 본 발명에 따른 적응제어 빔형성기들의 해상도는, 도 13의 오른쪽 윈도우에 보이는 바와 같이 3배 더 많은 센서 어레이에 대해 적용된 종래의 빔형성기의 해상도에 필적한다.

이러한 개선점을 입증하기 위해, 본 발명에 따른 적응제어 빔형성기가, 도 14에 도시된 바와 같이 내과 진단

응용분야용 일반 용도 초음파 영상 시스템 내에서 실행되었다. 이 시스템은: 32개 센서(8)의 선형 어레이; 현 기술상태의 신호처리 유닛(72); 12비트이며 채널당 45㎒ 샘플링 주파수를 가진 주문형 A/DC(74); 선형 어레이(20)에 의해 제공된 센서 시계열을 적응제어적으로 빔형성하며 영상 재구성 및 3차원 시각화를 위한 컴퓨터 워크스테이션(20)으로 이루어진다.

도 15는 태아 두개골의 3차원 영상들을 보여준다. 위의 두 개의 영상들과 좌하단 영상은 현 기술상태의 초음파 시스템과 신호처리를 사용하여 얻어진 것인 반면에, 우하단 영상은 현 기술상태의 초음파 시스템에 의해 포착된 신호들에 대해 본 발명에 따른 적응제어 빔형성기를 적용하여 얻어진 것이다. 뚜렷하게 드러나는 바와 같이, 본 발명에 따른 적응제어 빔형성기의 적용은 영상 해상도를 충분히 향상시킨다.

영상 해상도의 더 나은 향상은, 빔형성 과정 도중에 신호의 더 나은 각 해상도(angular resolution)를 허용하는 다차원-2차원 또는 3차원- 센서 어레이들에 대해 본 발명에 따른 적응제어 빔형성기를 적용함으로써 얻을 수 있다.

발명의 효과

도 12, 13 및 15에 묘사된 결과에 의해 도시된 바와 같이, 본 발명에 따른 적응제어 빔형성기는 즉시에 가까운 수렴성을 달성하며 영상 해상도를 충분히 향상시킨다. 따라서, 적응제어 빔형성기는 초음파 영상화 응용분야에서 매우 많은 장점을 가지며 영상 해상도를 개선하기 위해 현존하는 초음파 시스템 내에서 실행될 수 있다. 바람직한 실시예에서 본 발명에 따른 적응제어 빔형성기는 실시간으로 고해상도 영상들을 제공하는 소형의 현장-배치가능한 초음파 시스템을 제공하는 데 이용된다. 이는, 소형 다차원 어레이들로부터 얻어진 신호들에 대해 적응제어 빔형성기를 적용할 뿐 아니라 각 서브-애퍼쳐 내의 자유도를 감소시키는 서브-애퍼쳐 구조를 사용하여 빔형성 다차원 어레이들에 대한 연산 노력을 최소화함으로써 달성된다. 따라서, 이러한 빔형성 과정은 종래의 워크 스테이션만을 필요로 하며 실시간으로 수행된다.

물론, 본 발명의 정신 및 범주를 벗어남이 없이 다른 많은 실시예들이 연상가능하다.

(57) 청구의 범위

청구항 1

초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법에 있어서:

다차원 빔형성기를 원형 어레이 빔형성기들 및/또는 선형 어레이 빔형성기들의 두 코히어런트 서브셋들로 나누되, 제1 서브셋이 다차원 어레이의 제1 좌표방향으로 후속 빔형성기들을 구비하고 제2 서브셋이 다차원 어레이의 제2의 다른 좌표방향으로 후속 빔형성기들을 구비하도록 나누는 단계;

상기 제1 서브셋의 후속 빔형성기들을 적용함으로써 상기 센서 시계열에 관련된 데이터의 소정 빔 스티어링 방향에 대한 빔형성을 하되, 각 빔형성기가 하나의 빔 시계열을 생성하게 하는 단계; 및

상기 제2 서브셋의 후속 빔형성기들을 스티어링된 방향에 대해 적용하여 빔형성기들의 상기 제1 서브셋의 각 빔 시계열을 상기 소정의 빔 스티어링 방향에 대해 빔형성하여 상기 빔 스티어링 방향에 대해 하나의 빔 시계열을 생성하는 단계를 구비하는 빔형성 방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 다차원 센서 어레이가 평면형 어레이인 것을 특징으로 하는, 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 다차원 센서 어레이가 실린더형 어레이인 것을 특징으로 하는, 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 다차원 센서 어레이가 구형 어레이인 것을 특징으로 하는, 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 5

제1항에 있어서, 각 좌표 방향의 빔형성기들의 서브셋들이 병렬로 실행되는 것을 특징으로 하는, 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 6

제1항에 있어서, 사이드로브 구조를 억제하기 위해 3차원 공간 윈도우의 가중치들을 더 구비하는 것을 특징으로 하는, 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 7

제1항에 있어서, 다차원 어레이의 두 개의 서로 다른 좌표 방향에 있는 항들의 이중 급수합을 구비하는 상기 다차원 빔형성기가 두 개의 합의 곱으로 변환되되, 각각의 합이 상기 다차원 어레이의 한 좌표 방향에 있는 항들을 구비하는 것을 특징으로 하는, 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 8

제1항에 있어서, 상기 서브셋들의 상기 빔형성기들이 적응제어 빔형성기들인 것을 특징으로 하는, 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 9

제1항에 있어서, 불균일 쉐이딩 윈도우들이 빔형성기들의 서브셋의 빔형성기에 적용되는 것을 특징으로 하는, 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 10

제1항에 있어서, 상기 선형 및 원형 어레이 빔형성기들이 원형 콘볼루션을 통한 공간 필터링용 FIR(Finite Impulse Response) 필터들로서 실행되는 것을 특징으로 하는, 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 11

제1항에 있어서, 범위 및 방위의 함수로서 에코들을 감지하기 위한 정합 필터를 사용하여 각 스티어링 방향에 대해 빔 시계열을 광대역 처리하는 단계를 더 구비하는 것을 특징으로 하는, 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 12

서브-애퍼쳐 구성을 이용하여 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법에 있어서:

a) 상기 다차원 빔형성기를 복수의 후속 서브-애퍼쳐들로 나누는 단계;

b) 각각의 서브-애퍼쳐를 원형 어레이 빔형성기들 및/또는 선형 어레이 빔형성기들의 두 코히어런트 서브셋들로 나누되, 제1 서브셋이 다차원 어레이의 제1 좌표방향으로 후속 빔형성기들을 구비하고 제2 서브셋이 상기 서브-애퍼쳐의 제2의 다른 좌표방향으로 후속 빔형성기들을 구비하도록 나누는 단계;

c) 상기 제1 서브셋의 후속 빔형성기들을 적용한 센서 시계열의 푸리에 변환을 소정의 빔 스티어링 방향으로 각 서브-애퍼쳐에 대한 종래방법의 빔형성을 하고 각 빔형성기가 빔 시계열을 생성하게 하는 단계;

d) 스티어링된 방향으로 상기 제2 서브셋의 후속 빔형성기를 적용함으로써 c)단계의 빔형성기들에 의해 생성된 빔 시계열을 상기 소정의 빔 스티어링 방향으로 각 서브-애퍼쳐에 대한 종래방법의 빔형성을 하고 각 서브-애퍼쳐에 대한 상기 빔 스티어링 방향으로 하나의 빔 시계열을 생성하는 단계; 및

e) 각 선형 어레이가 하나의 좌표방향으로 다른 후속 서브-애퍼쳐들의 빔 시계열을 구비하는 선형 어레이들에 대해 적응제어 빔형성을 하고, 상기 빔 스티어링 방향에 대해 하나 또는 그 이상의 빔 시계열을 제공하는 단계

를 구비하는 빔형성 방법.

청구항 13

제12항에 있어서, 상기 다차원 센서 어레이가 평면형 어레이인 것을 특징으로 하는, 서브-애퍼쳐 구성을 이용하여 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 14

제12항에 있어서, 상기 다차원 센서 어레이가 실린더형 어레이인 것을 특징으로 하는, 서브-애퍼쳐 구성을 이용하여 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 15

제12항에 있어서, 상기 다차원 센서 어레이가 구형 어레이인 것을 특징으로 하는, 서브-애퍼쳐 구성을 이용하여 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 16

제12항에 있어서, 상기 방법이 MVDR 적응제어 잡음 소거법을 구비하는 것을 특징으로 하는, 서브-애퍼쳐 구성을 이용하여 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 17

제12항에 있어서, 상기 방법이 GSC 적응제어 잡음 소거법을 구비하는 것을 특징으로 하는, 서브-애퍼쳐 구성을 이용하여 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 18

제12항에 있어서, 상기 적응제어 빔형성기가 합성 애퍼쳐 빔형성기와 통합된 것을 특징으로 하는, 서브-애퍼쳐 구성을 이용하여 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원

빔형성하는 방법.

청구항 19

제12항에 있어서, 상기 센서 시계열이 실시간으로 빔형성되는 것을 특징으로 하는, 서브-애퍼쳐 구성을 이용하여 초음파 영상 시스템의 다차원 어레이에 배치된 센서들에 의해 제공되는 센서 시계열을 다차원 빔형성하는 방법.

청구항 20

코히어런트 광대역 적응제어 빔형성기를 이용하여 초음파 영상 시스템의 센서들에 의해 제공된 센서 시계열을 빔형성하는 방법에 있어서:

연속 센서 시계열을 중첩된 데이터 셋들의 집합으로 분할하는 단계;

중첩된 데이터 셋들의 각각의 FFT를 연산하여 서로 다른 주파수 빈들에 대해 상기 중첩된 데이터 셋들의 푸리에 변환 셋을 생성하는 단계;

각 주파수 빈 및 각 소정의 스티어링 방향에 대해 상기 중첩된 데이터 셋들의 푸리에 변환들로부터 교차 스펙트럼 밀도 행렬을 형성하는 단계;

상기 교차 스펙트럼 밀도 행렬 및 종래 스티어링 벡터의 대각 행렬을 이용하여 스티어링 공분산 행렬을 형성하되, 하나의 스티어링 공분산 행렬이 각 스티어링 방향 및 해당 주파수 대역에 대한 것이 되게 형성하는 단계;

스티어링 공분산 행렬들을 반전시키는 단계;

해당 주파수 대역의 주파수 빈들에 걸쳐 정지상태를 가상하고 상기 스티어링 공분산 행렬의 추정치가 해당 주파수 대역의 중심주파수의 협대역 추정치와 같다는 고려에 의해 적응제어 스티어링 벡터들을 추정하는 단계;

상기 적응제어 스티어링 벡터들의 추정치를 이용하여 협대역 적응제어 스티어링 가중치들을 결정하는 단계;

상기 중첩된 데이터 셋들과 적응제어 스티어링 가중치들의 푸리에 변환으로부터 주파수 영역에서 적응제어 빔들을 형성하는 단계;

IFFT를 통해 시간 영역에서 적응제어 빔들을 형성하는 단계; 및

중첩부분을 버리고 분할부분들을 연쇄하여 연속적인 빔 시계열을 결정하는 단계

를 구비하는 빔형성 방법.

청구항 21

제20항에 있어서, 상기 스티어링 공분산 행렬들이 촐레스키 분해를 이용하여 반전되는 것을 특징으로 하는, 코히어런트 광대역 적응제어 빔형성기를 이용하여 초음파 영상 시스템의 센서들에 의해 제공된 센서 시계열을 빔형성하는 방법.

청구항 22

제20항에 있어서, 상기 스티어링 공분산 행렬들이 QR 분해를 이용하여 반전되는 것을 특징으로 하는, 코히어런트 광대역 적응제어 빔형성기를 이용하여 초음파 영상 시스템의 센서들에 의해 제공된 센서 시계열을 빔형성하는 방법.

청구항 23

제20항에 있어서, 상기 스티어링 공분산 행렬들이 SVD(Singular Value Decomposition)를 이용하여 반전되는 것을 특징으로 하는, 코히어런트 광대역 적응제어 빔형성기를 이용하여 초음파 영상 시스템의 센서들에 의해 제공된 센서 시계열을 빔형성하는 방법.

청구항 24

제20항에 있어서, 상기 스티어링 공분산 행렬들이 시변 적응제어 추정법을 이용하여 갱신되되 상기 시변 적응제어 추정법이 지수함수적으로 시간 평균되는 추정기인 것을 특징으로 하는, 코히어런트 광대역 적응제어 빔형성기를 이용하여 초음파 영상 시스템의 센서들에 의해 제공된 센서 시계열을 빔형성하는 방법.

청구항 25

실시간으로 목표물의 고해상도 3차원 영상을 제공하기 위한 현장 배치가능한 3차원 초음파 영상 시스템에 있어서,

(A) 초음파를 방사하는 소스;

(B) 상기 목표물 내의 서로 다른 구조들에 의해 반사되는 초음파의 반사를 포착하고 상기 반사된 초음파를 표시하는 센서 시계열을 제공하는 소형 적응제어 다차원 센서 어레이;

(C-1) 다차원 센서 어레이에 의해 생성된 센서 시계열을 받아들이고,

(C-2-1) 다차원 빔형성기를 원형 어레이 빔형성기들 및/또는 선형 어레이 빔형성기들의 코히어런트 서브셋들을 구비하는 서브-애퍼쳐들로 나누고,

(C-2-2) 원형 어레이들을 종래방법으로 빔형성하고,

(C-2-3) 선형 어레이들을 적응제어 빔형성함으로써

(C-2) 연속 빔 시계열을 생성하기 위해 센서 시계열을 처리하며,

(C-3) 실시간으로 빔 시계열로부터 3차원 영상을 재구성하기 위한

(C) 소형 처리 유닛; 및

(D) 실시간으로 재구성된 3차원 영상을 표시하는 표시장치

를 구비하는 초음파 영상 시스템.

청구항 26

제25항에 있어서, 상기 소형 적응제어 다차원 센서 어레이가 평면형 어레이로 이루어진 것을 특징으로 하는, 실시간으로 목표물의 고해상도 3차원 영상을 제공하기 위한 현장 배치가능한 3차원 초음파 영상 시스템.

청구항 27

제25항에 있어서, 상기 소형 적응제어 다차원 센서 어레이가 실린더형 어레이로 이루어진 것을 특징으로 하는, 실시간으로 목표물의 고해상도 3차원 영상을 제공하기 위한 현장 배치가능한 3차원 초음파 영상 시스템.

청구항 28

제25항에 있어서, 상기 소형 적응제어 다차원 센서 어레이가 구형 어레이로 이루어진 것을 특징으로 하는, 실시간으로 목표물의 고해상도 3차원 영상을 제공하기 위한 현장 배치가능한 3차원 초음파 영상 시스템.

청구항 29

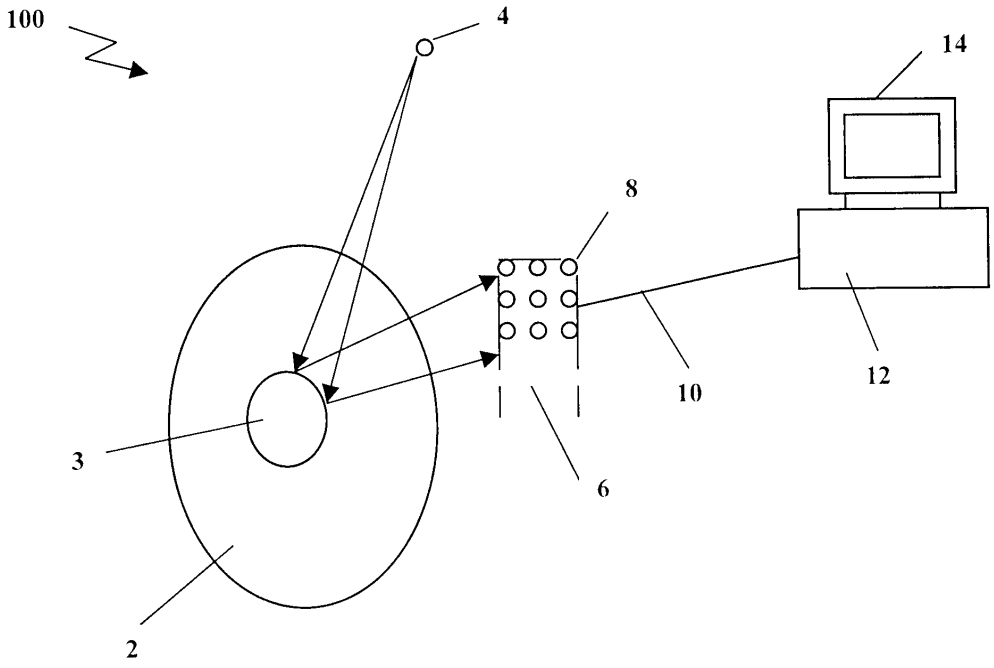
제25항에 있어서, 상기 소형 처리 유닛이 종래의 컴퓨터 워크스테이션으로 이루어진 것을 특징으로 하는, 실시간으로 목표물의 고해상도 3차원 영상을 제공하기 위한 현장 배치가능한 3차원 초음파 영상 시스템.

청구항 30

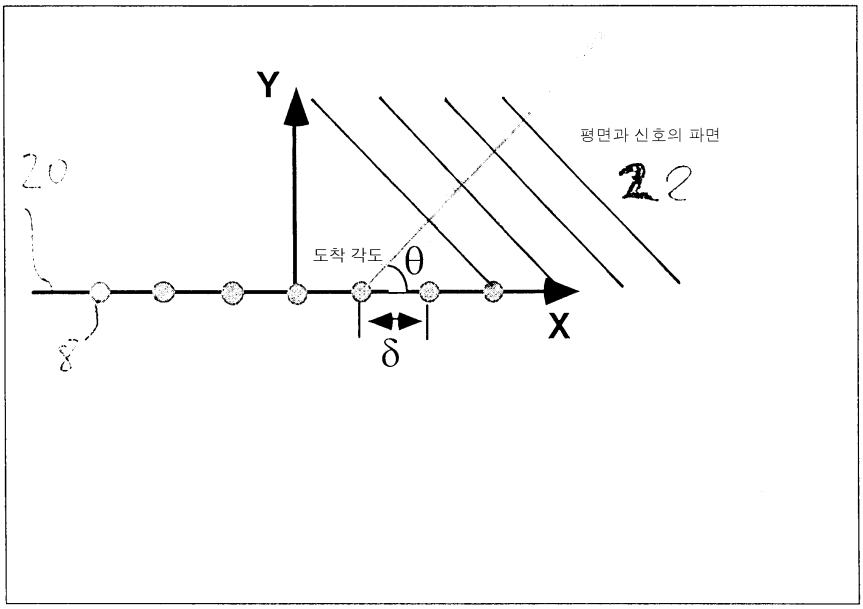
제28항에 있어서, 상기 종래의 컴퓨터 워크스테이션이 서브셋의 병렬처리 빔형성기를 위한 복수의 처리장치로 이루어진 것을 특징으로 하는, 실시간으로 목표물의 고해상도 3차원 영상을 제공하기 위한 현장 배치가능한 3차원 초음파 영상 시스템.

도면

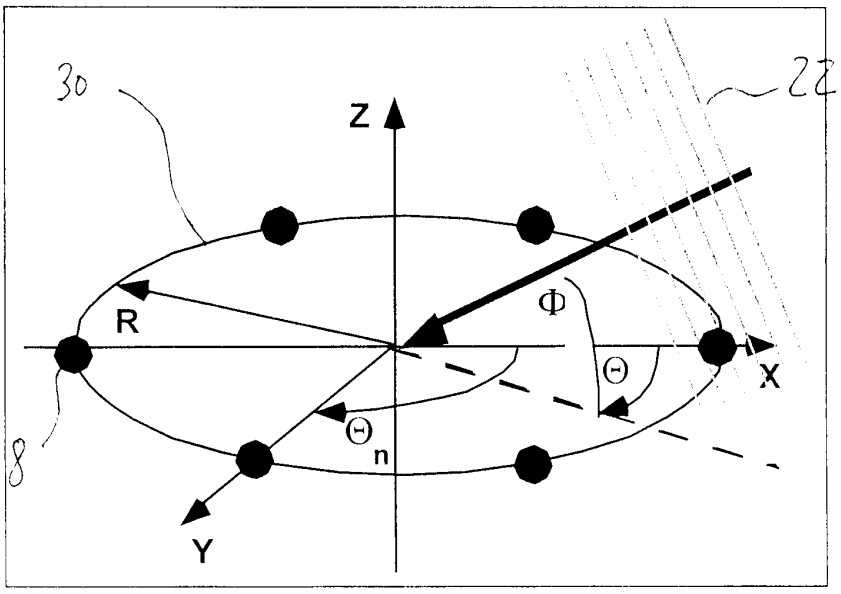
도면1



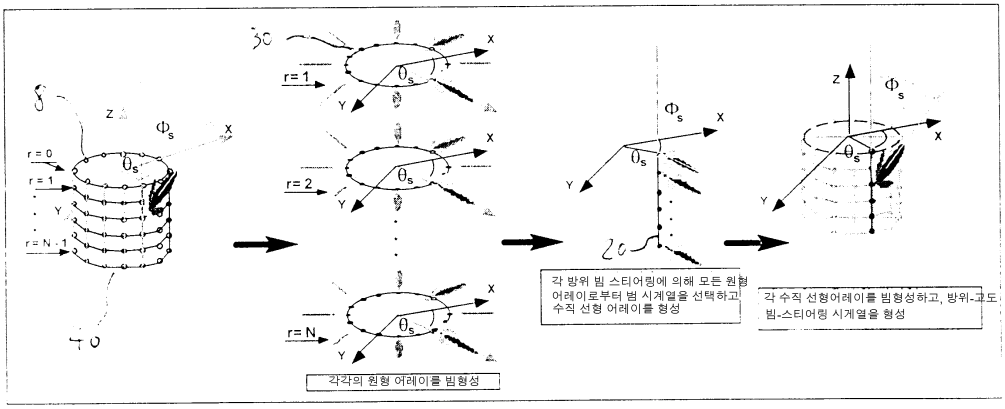
도면2



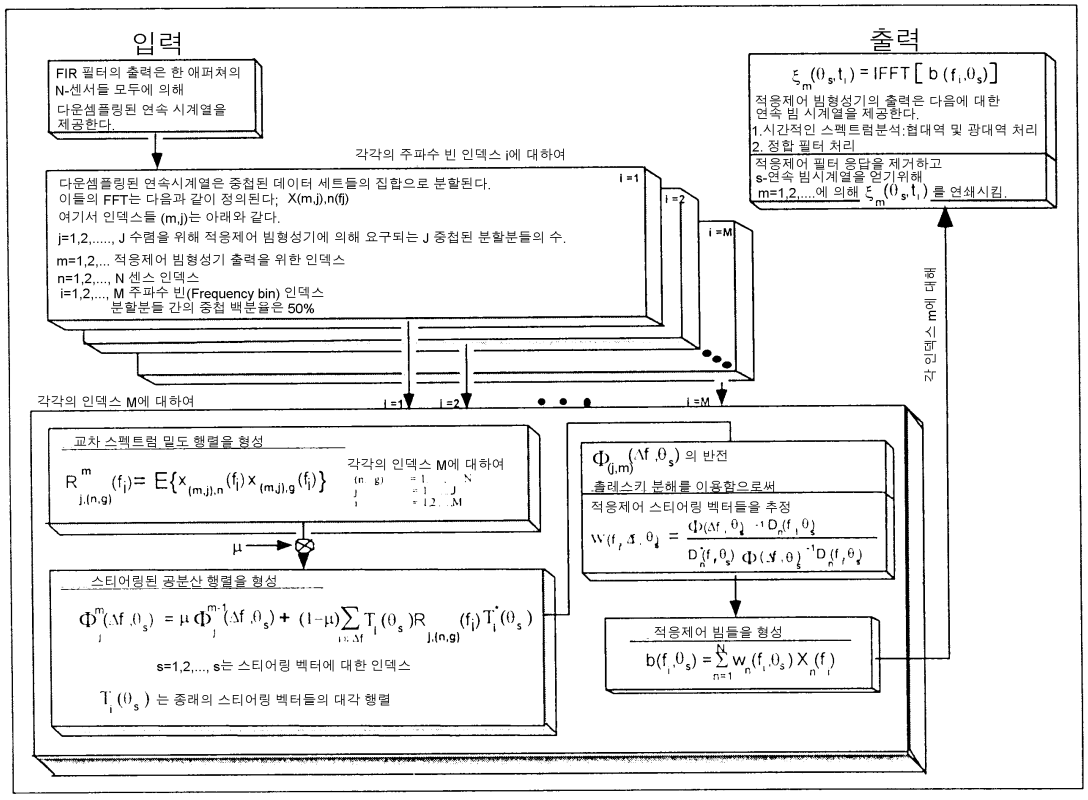
도면3



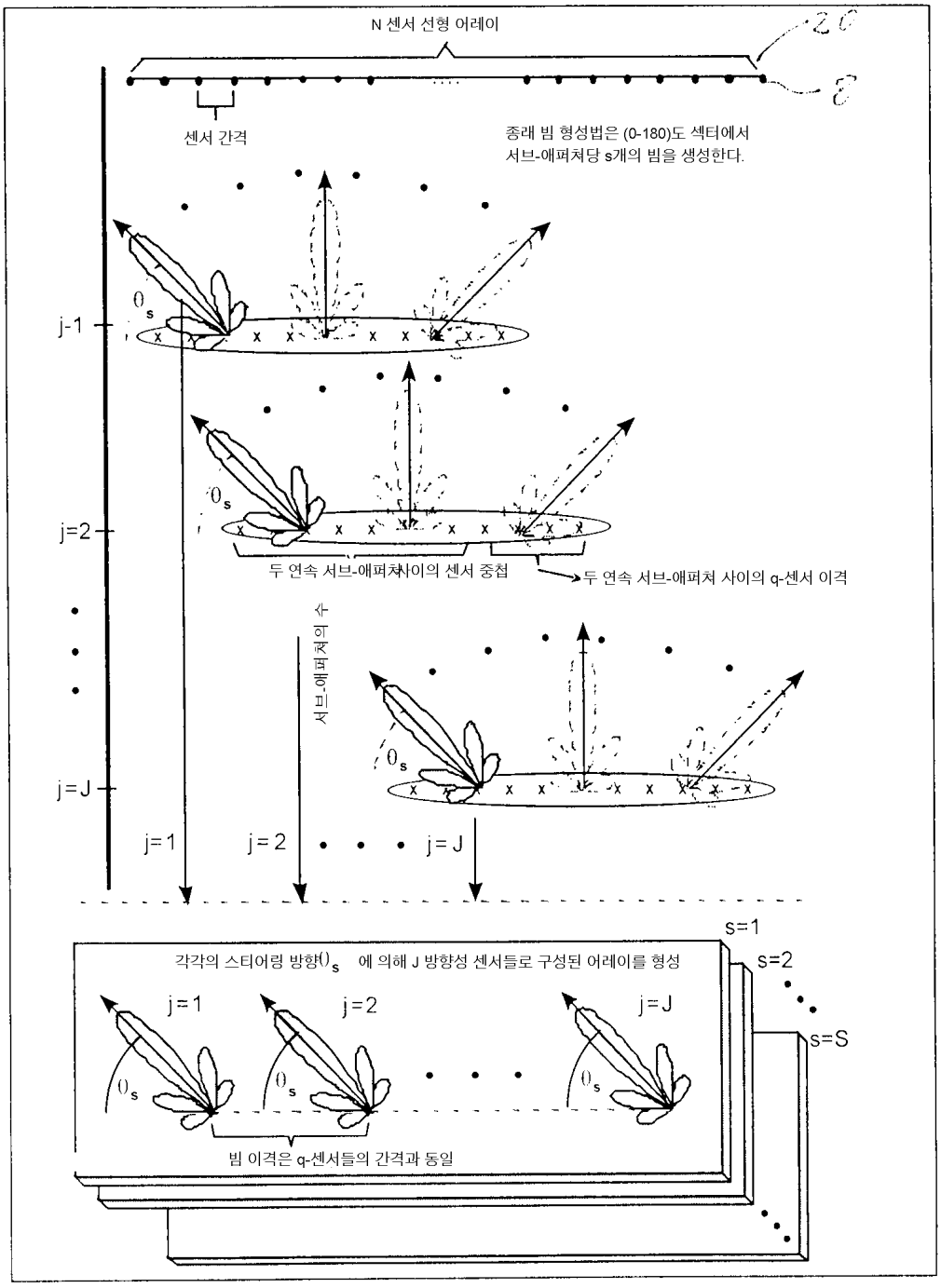
도면4


r= 0
r= 1
r= N-1
r= 1
r= 2
r= N
각각의 원형 어레이를 빔형성
각 방위 빔 스티어링에 의해 모든 원형 어레이로부터 빔 시계열을 선택하고 수직 선형 어레이를 형성
각 수직 선형어레이를 빔형성하고, 방위-고도 빔-스티어링 시계열을 형성

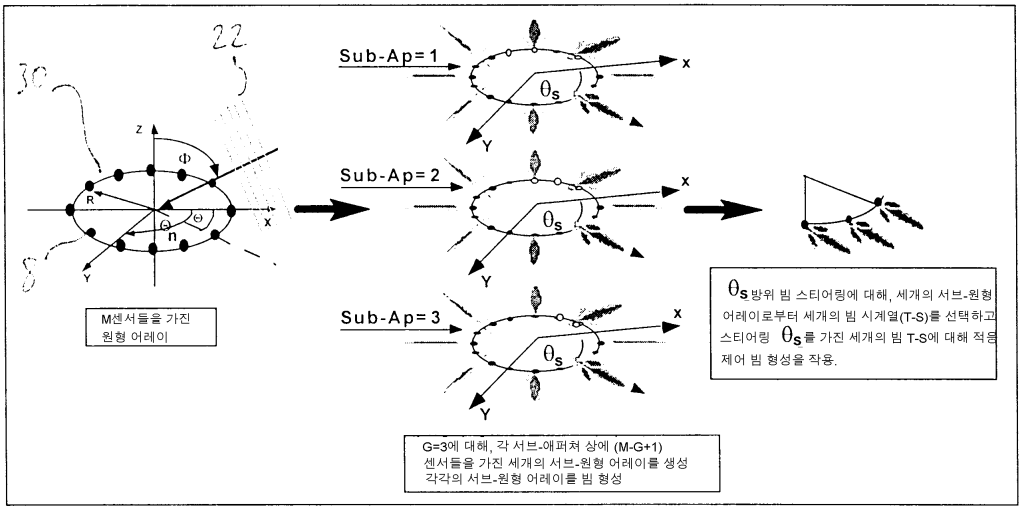
도면5


입력
FIR 필터의 출력은 한 애퍼처의 N-센서들 모두에 의해 다운샘플링된 연속 시계열을 제공한다.
각각의 주파수 빈 인덱스 i에 대하여
다운샘플링된 연속시계열은 중첩된 데이터 세트들의 집합으로 분할된다.
이들의 FFT는 다음과 같이 정의된다; X(m,j),n(fi)
여기서 인덱스들 (m,j)는 아래와 같다.
j=1,2,....., J 수렴을 위해 적응제어 빔형성기에 의해 요구되는 J 중첩된 분할분들의 수.
m=1,2,... 적응제어 빔형성기 출력을 위한 인덱스
n=1,2,..., N 센스 인덱스
i=1,2,..., M 주파수 빈(Frequency bin) 인덱스
분할분들 간의 중첩 백분율은 50%
각각의 인덱스 M에 대하여
교차 스펙트럼 밀도 행렬을 형성
각각의 인덱스 M에 대하여
스티어링된 공분산 행렬을 형성
s=1,2,..., s는 스티어링 벡터에 대한 인덱스
는 종래의 스티어링 벡터들의 대각 행렬
μ
출력
적응제어 빔형성기의 출력은 다음에 대한 연속 빔 시계열을 제공한다.
1.시간적인 스펙트럼분석;협대역 및 광대역 처리
2. 정합 필터 처리
적응제어 필터 응답을 제거하고
s-연속 빔시계열을 얻기위해
m=1,2,....에 의해 를 연쇄시킴.
각 인덱스 m에 대해
의 반전
홀레스키 분해를 이용함으로써
적응제어 스티어링 벡터들을 추정
적응제어 빔들을 형성

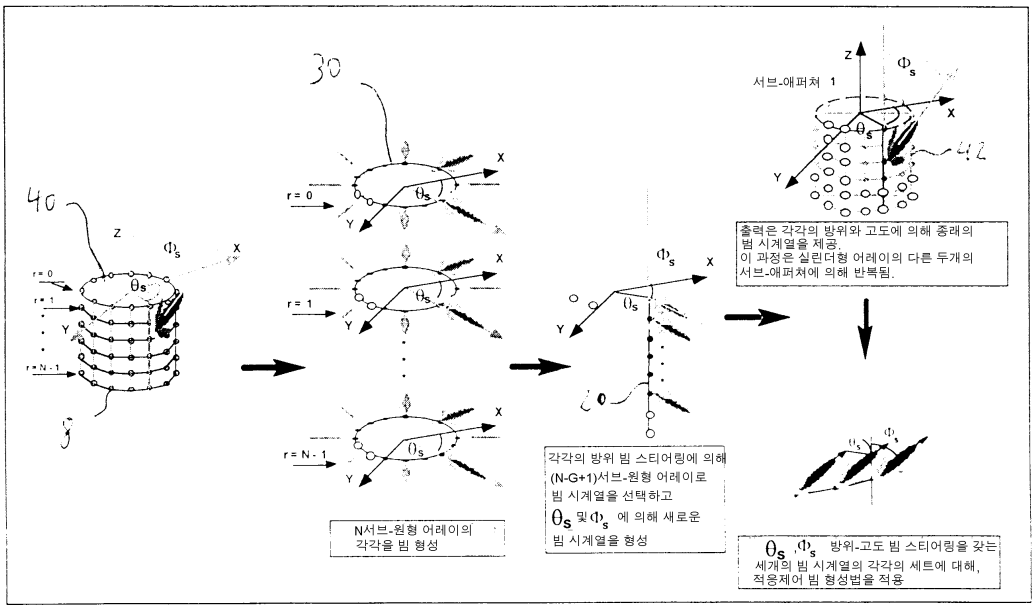
도면6


N 센서 선형 어레이
센서 간격
종래 빔 형성법은 (0-180)도 섹터에서
서브-애퍼쳐당 s개의 빔을 생성한다.
j-1
j=2
j=J
두 연속 서브-애퍼쳐 사이의 센서 중첩
두 연속 서브-애퍼쳐 사이의 q-센서 이격
서브-애퍼쳐의 수
j=1
j=2
j=J
s=1
s=2
s=S
각각의 스티어링 방향 에 의해 J 방향성 센서들로 구성된 어레이를 형성
빔 이격은 q-센서들의 간격과 동일

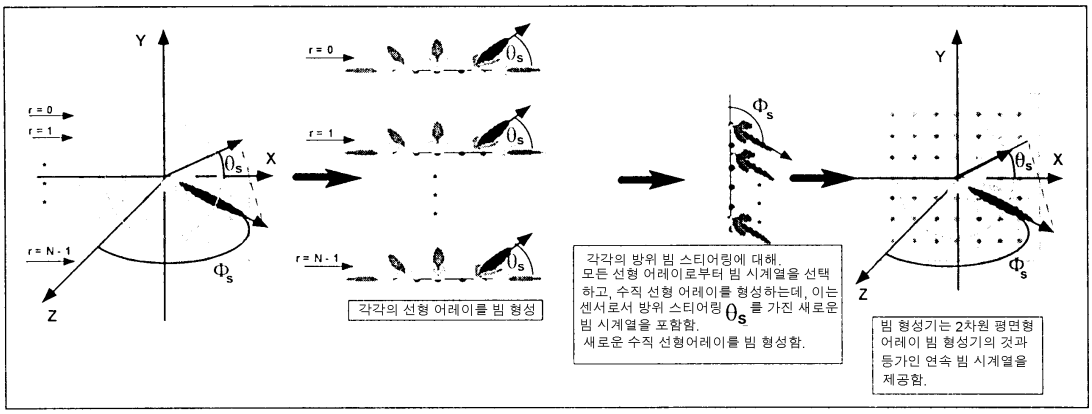
도면7


Sub-Ap=1
Sub-Ap=2
Sub-Ap=3
M센서들을 가진 원형 어레이
θs방위 빔 스티어링에 대해, 세개의 서브-원형 어레이로부터 세개의 빔 시계열(T-S)를 선택하고 스티어링 θs를 가진 세개의 빔 T-S에 대해 적응 제어 빔 형성을 작용.
G=3에 대해, 각 서브-애퍼처 상에 (M-G+1) 센서들을 가진 세개의 서브-원형 어레이를 생성 각각의 서브-원형 어레이를 빔 형성

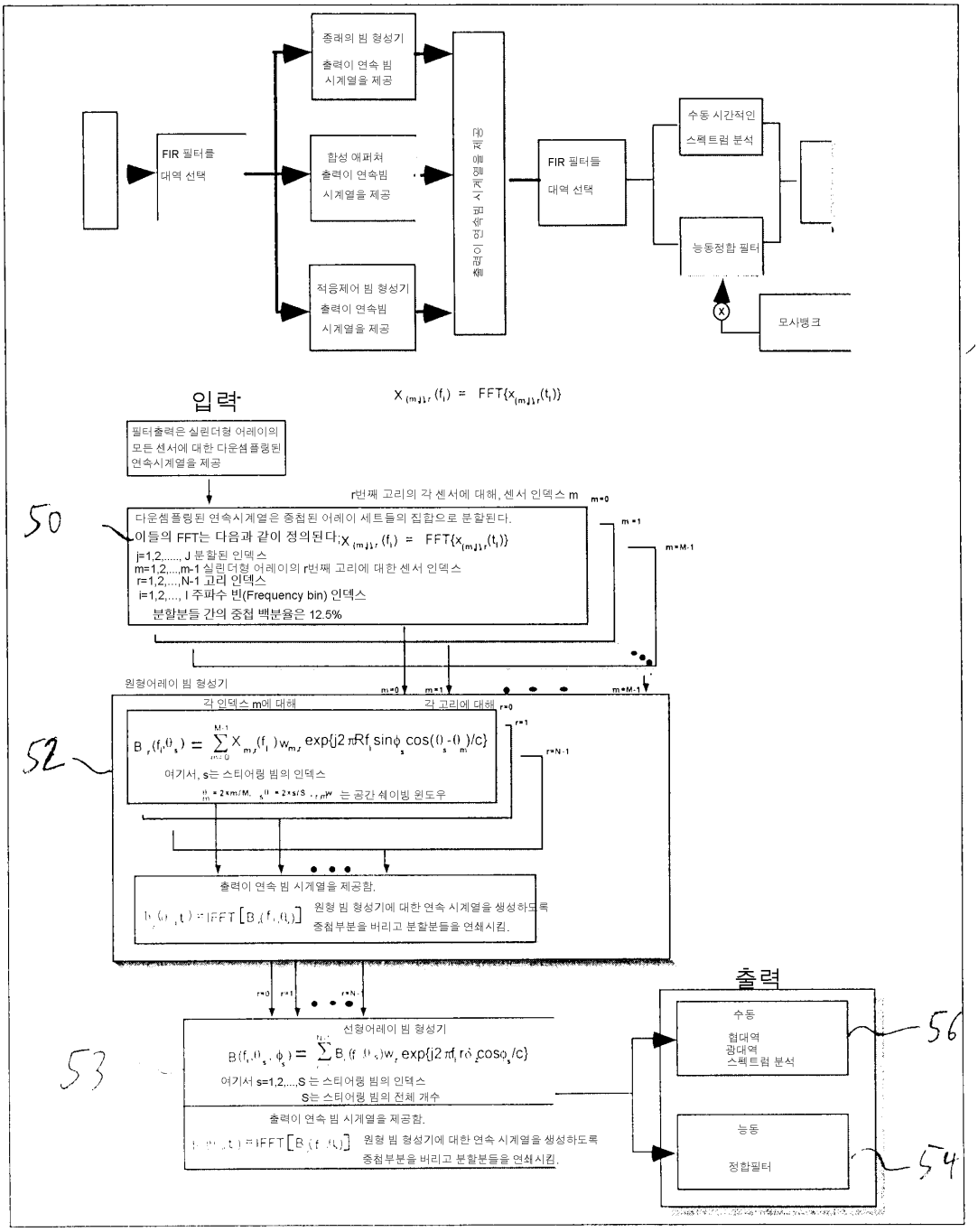
도면8


서브-애퍼처 1
출력은 각각의 방위와 고도에 의해 종래의 빔 시계열을 제공.
이 과정은 실린더형 어레이의 다른 두개의 서브-애퍼쳐에 의해 반복됨.
N서브-원형 어레이의 각각을 빔 형성
각각의 방위 빔 스티어링에 의해 (N-G+1)서브-원형 어레이로 빔 시계열을 선택하고 θs 및 Φs 에 의해 새로운 빔 시계열을 형성
θs ,Φs 방위-고도 빔 스티어링을 갖는 세개의 빔 시계열의 각각의 세트에 대해, 적응제어 빔 형성법을 적용

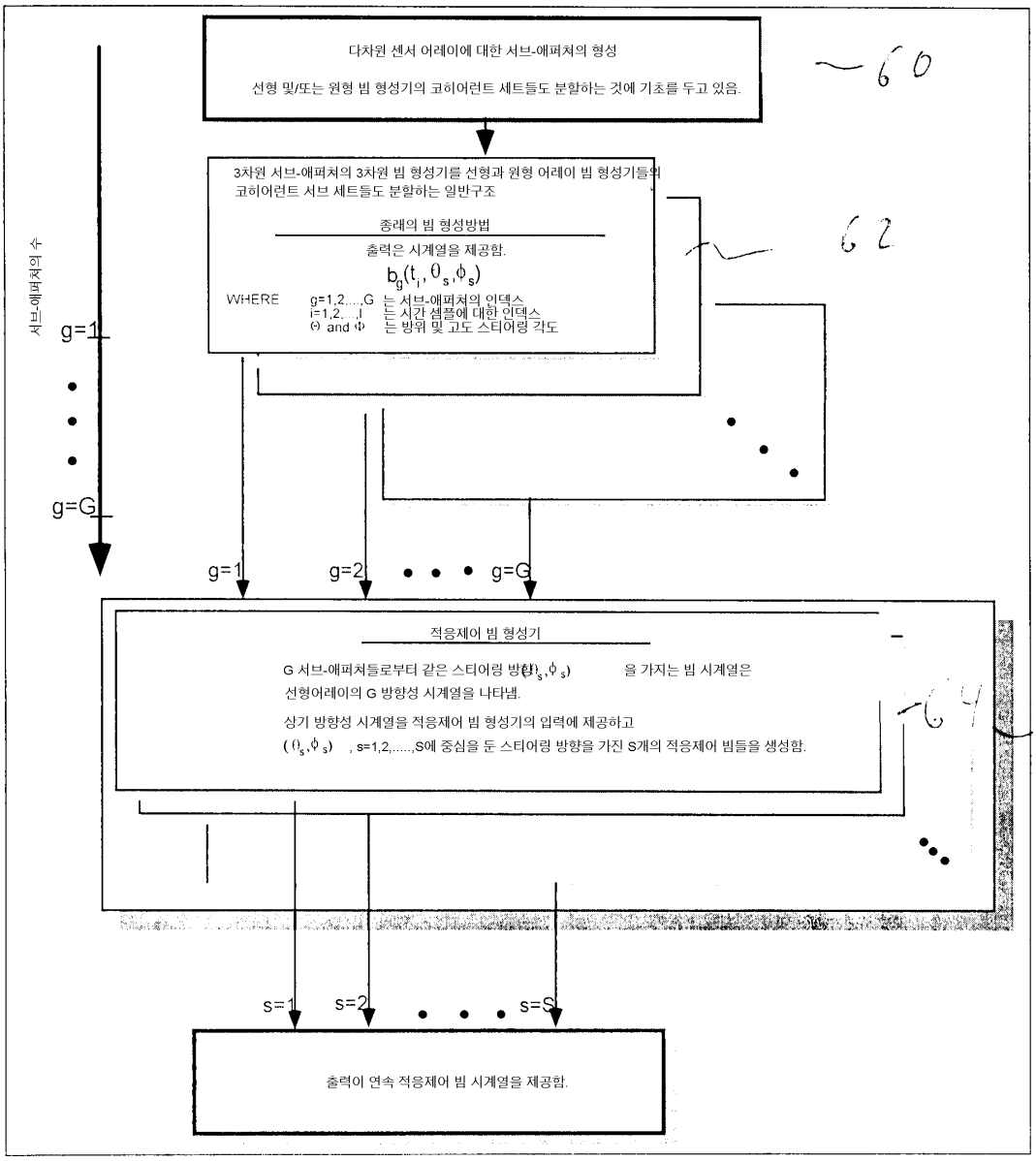
도면9


각각의 선형 어레이를 빔 형성
각각의 방위 빔 스티어링에 대해, 모든 선형 어레이로부터 빔 시계열을 선택하고, 수직 선형 어레이를 형성하는데, 이는 센서로서 방위 스티어링 θs 를 가진 새로운 빔 시계열을 포함함. 새로운 수직 선형어레이를 빔 형성함.
빔 형성기는 2차원 평면형 어레이 빔 형성기의 것과 등가인 연속 빔 시계열을 제공함.

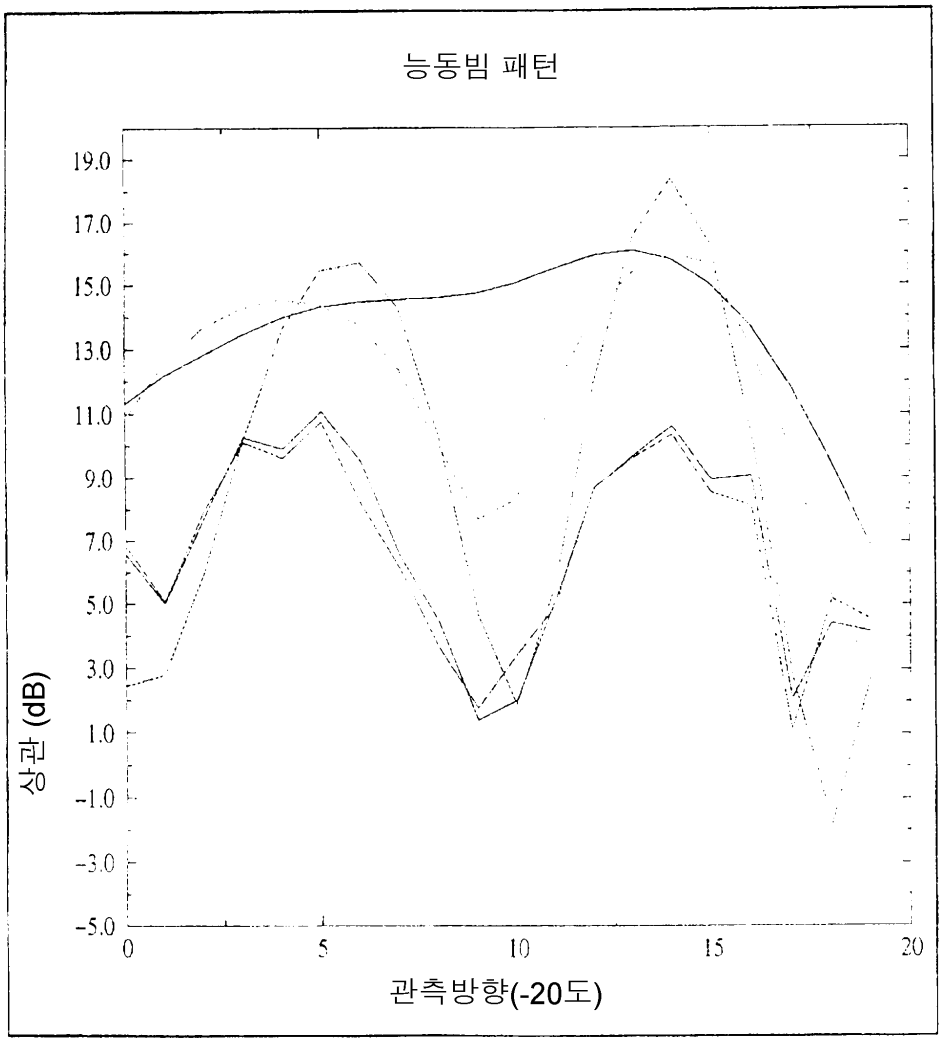
도면10


종래의 빔 형성기
출력이 연속 빔
시계열을 제공
FIR 필터를
대역 선택
합성 애퍼처
출력이 연속빔
시계열을 제공
적응제어 빔 형성기
출력이 연속빔
시계열을 제공
출력이 연속빔 시계열을 제공
FIR 필터들
대역 선택
수동 시간적인
스펙트럼 분석
능동정합 필터
모사뱅크
입력
필터출력은 실린더형 어레이의
모든 센서에 대한 다운샘플링된
연속시계열을 제공
50
다운샘플링된 연속시계열은 중첩된 어레이 세트들의 집합으로 분할된다.
이들의 FFT는 다음과 같이 정의된다;
j=1,2,....., J 분할된 인덱스
m=1,2,....,m-1 실린더형 어레이의 r번째 고리에 대한 센서 인덱스
r=1,2,...,N-1 고리 인덱스
i=1,2,..., I 주파수 빈(Frequency bin) 인덱스
분할분들 간의 중첩 백분율은 12.5%
r번째 고리의 각 센서에 대해, 센서 인덱스 m
원형어레이 빔 형성기
각 인덱스 m에 대해
각 고리에 대해
52
여기서, s는 스티어링 빔의 인덱스
는 공간 쉐이빙 윈도우
출력이 연속 빔 시계열을 제공함.
원형 빔 형성기에 대한 연속 시계열을 생성하도록
중첩부분을 버리고 분할분들을 연쇄시킴.
53
선형어레이 빔 형성기
여기서 s=1,2,....,S 는 스티어링 빔의 인덱스
S는 스티어링 빔의 전체 개수
출력이 연속 빔 시계열을 제공함.
원형 빔 형성기에 대한 연속 시계열을 생성하도록
중첩부분을 버리고 분할분들을 연쇄시킴.
출력
수동
협대역
광대역
스펙트럼 분석
56
능동
정합필터
54

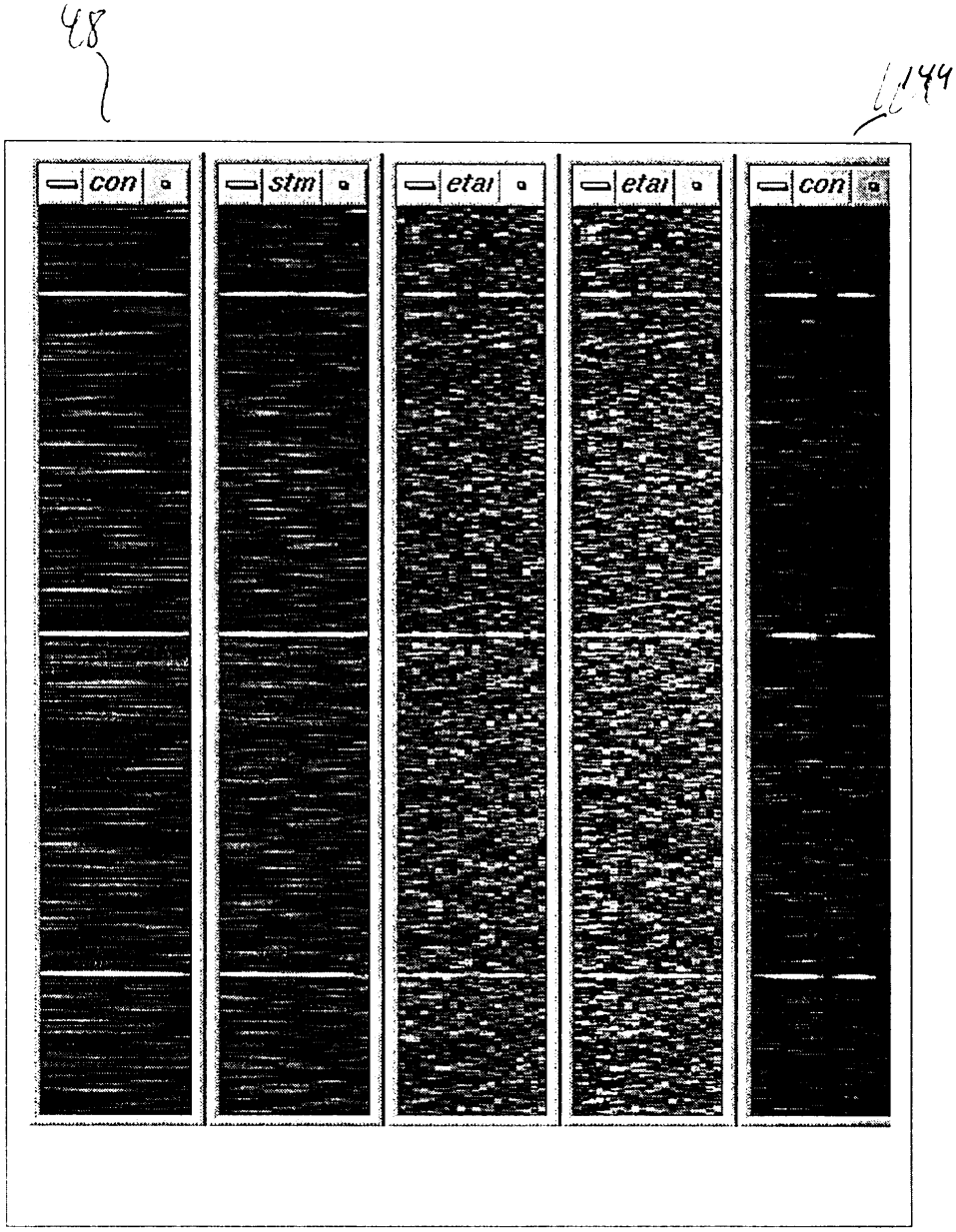
도면11


다차원 센서 어레이에 대한 서브-애퍼처의 형성
선형 및/또는 원형 빔 형성기의 코히어런트 세트들도 분할하는 것에 기초를 두고 있음.
60
3차원 서브-애퍼처의 3차원 빔 형성기를 선형과 원형 어레이 빔 형성기들의 코히어런트 서브 세트들도 분할하는 일반구조
종래의 빔 형성방법
출력은 시계열을 제공함.
$b_g(t_i, \theta_s, \phi_s)$
WHERE g=1,2,...,G 는 서브-애퍼처의 인덱스
i=1,2,...,I 는 시간 샘플에 대한 인덱스
Θ and Φ 는 방위 및 고도 스티어링 각도
62
서브-애퍼처의 수
g=1
g=G
g=1
g=2
g=G
적응제어 빔 형성기
G 서브-애퍼처들로부터 같은 스티어링 방향(θ_s, ϕ_s) 을 가지는 빔 시계열은
선형어레이의 G 방향성 시계열을 나타냄.
상기 방향성 시계열을 적응제어 빔 형성기의 입력에 제공하고
(θ_s, ϕ_s) , s=1,2,.....,S에 중심을 둔 스티어링 방향을 가진 S개의 적응제어 빔들을 생성함.
64
s=1
s=2
s=S
출력이 연속 적응제어 빔 시계열을 제공함.

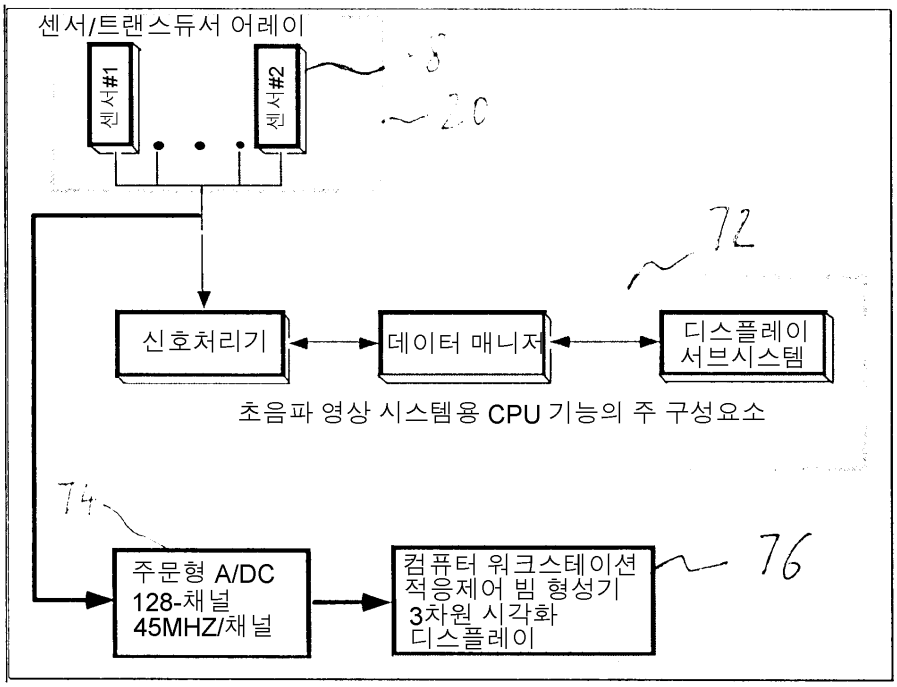
도면12


능동빔 패턴
19.0
17.0
15.0
13.0
11.0
9.0
7.0
5.0
3.0
1.0
-1.0
-3.0
-5.0
상관 (dB)
0
5
10
15
20
관측방향(-20도)

도면13



도면14


센서/트랜스듀서 어레이
센서#1
센서#2
18
20
72
신호처리기
데이터 매니저
디스플레이 서브시스템
초음파 영상 시스템용 CPU 기능의 주 구성요소
74
주문형 A/DC
128-채널
45MHZ/채널
컴퓨터 워크스테이션
적응제어 빔 형성기
3차원 시각화
디스플레이
76

도면15

