



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0007192
(43) 공개일자 2015년01월20일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01S 17/08 (2006.01) H04N 5/235 (2006.01)
H04N 5/225 (2006.01) H04N 13/02 (2006.01)
G01C 3/08 (2006.01)
- (21) 출원번호 10-2013-7001577
- (22) 출원일자(국제) 2011년07월21일
심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2013년01월21일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2011/044800
- (87) 국제공개번호 WO 2012/012607
국제공개일자 2012년01월26일
- (30) 우선권주장
13/021,484 2011년02월04일 미국(US)
61/400,061 2010년07월21일 미국(US)

- (71) 출원인
마이크로소프트 코포레이션
미국 워싱턴주 (우편번호 : 98052) 레드몬드 원
마이크로소프트 웨이
- (72) 발명자
후이 후아
미국 워싱턴주 98052-6399 레드몬드 원 마이크로
소프트 웨이 엘씨에이 - 인터내셔널 패이턴즈 마
이크로소프트 코포레이션
팜지 사이러스
미국 워싱턴주 98052-6399 레드몬드 원 마이크로
소프트 웨이 엘씨에이 - 인터내셔널 패이턴즈 마
이크로소프트 코포레이션
- (74) 대리인
김태홍, 김성기

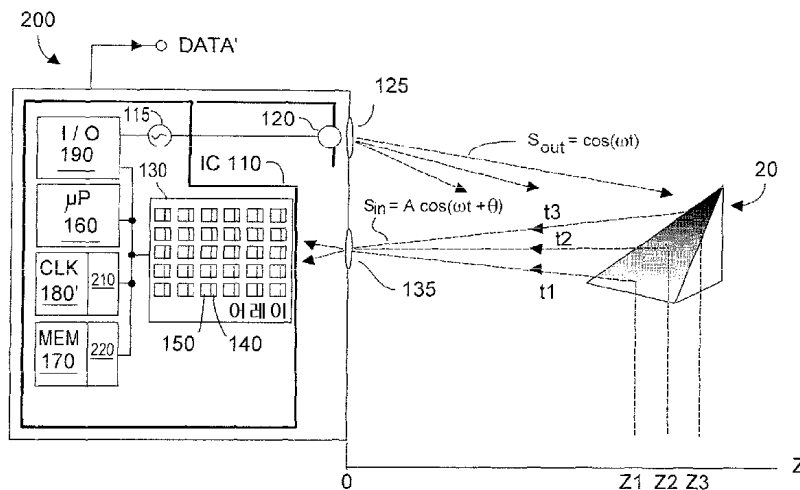
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 TOF 시스템의 계층적 디앨리어싱을 위한 방법 및 시스템

(57) 요약

TOF 시스템은 각각의 앨리어싱 인터벌 범위 Z_1, Z_2, \dots, Z_m 과 연관된 $n \geq 3$ 변조 주파수 f_1, f_2, \dots, f_m 를 각각 이용하여 깊이 데이터를 획득한다. 다음으로, n 개의 중간 주파수들인 $f_{DE1}, f_{DE2}, \dots, f_{DEn}$ 가 $f_{DE1} < f_{DE2} < \dots < f_{DEn}$ 의 순서에 따라 소팅되어 생성되고 대응 위상들이 f_1, f_2, \dots, f_m 을 이용하여 각각 획득되는 데이터로부터 산출된다. 그렇게 획득된 데이터의 계층적 디앨리어싱이 생성된 중간 주파수들을 이용하여 수행된다. 그렇게 동작될 때 TOF 시스템은 마치 상기 TOF 시스템이 매우 낮은 변조 주파수 f_D 에서 작동되는 것처럼 $k=1n$ 에 대해 유효 앨리어싱 인터벌 범위 $Z_D > Z_k$ 를 제공하면서 동시에 마치 상기 TOF 시스템이 높은 변조 주파수 f_E 에서 작동되는 것처럼 깊이 분해능 확실성을 제공한다. 바람직하게 높은 변조 주파수 f_E 는 모든 변조 주파수들 f_1, f_2, \dots, f_m 의 함수이며, 그 함수는 f_1, f_2, \dots, f_m 의 산술 평균 또는 가중 평균일 수 있다.

대표도



특허청구의 범위

청구항 1

위상 타입 TOF(time of flight) 시스템의 거리 Z 범위를 계층적으로 디앨리어싱하는 방법으로서,

(a) 변조 주파수들 f_1, f_2, \dots, f_m 을 각각 이용하여 상기 TOF 시스템으로부터 데이터를 획득- 상기 TOF 시스템이 상기 변조 주파수들 중 하나에서 유일하게 작동될 경우, Z_1, Z_2, \dots, Z_m 의 앨리어싱 인터벌 범위들이 생성됨 -하는 단계,

(b) $f_{DE1} < f_{DE2} < \dots < f_{DEn}$ 의 순서로 소팅된 n 개의 중간 주파수들 $f_{DE1}, f_{DE2}, \dots, f_{DEn}$ 을 생성하며, 단계(a)에서 획득된 데이터로부터 그 중간 주파수들의 상응하는 위상들을 산출하는 단계, 및

(c) 단계 (b)에서 생성된 상기 중간 주파수들을 이용하여 단계 (a)에서 획득된 데이터를 계층적으로 디앨리어싱하는 단계를 포함하며,

상기 TOF 시스템은, 마치 상기 TOF 시스템이 매우 낮은 변조 주파수 f_D 에서 작동되는 것처럼 $k=1, \dots, n$ 에 대해 유효 앨리어싱 인터벌 범위 $Z_D > Z_k$ 를 제공하면서 동시에 마치 상기 TOF 시스템이 높은 변조 주파수 f_E 에서 작동되는 것처럼 깊이 분해능 확실성을 제공하는

방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

단계 (b)에서, 상기 중간 주파수 $f_{DE1}, f_{DE2}, \dots, f_{DEn}$ 의 선택은 두 주파수들 사이의 비율 $f_{DE(k+1)}/f_{DEk}$ 에 기반하며, 이 두 주파수들 사이의 비율은 불확실성 요건에 의해 결정되는 비율에 의해 제한되는

방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

단계 (c)에서, 단계적 디앨리어싱은 한 번에 한 단계씩 수행되는

방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

단계 (c)는 먼저 f_D 의 위상을 사용하여 f_{DE1} 의 위상 데이터를 디앨리어싱하며, 그 후 f_{DE1} 의 위상을 이용하여 f_{DE2} 의 위상을 디앨리어싱하는 것을 포함하는

방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

각각의 단계에서, $f_{DE(k+1)}$ 의 위상은 마지막 단계까지 f_{DEk} 의 위상을 사용하여 디앨리어싱되며, 상기 마지막 단계에서 f_{DEn} 의 위상을 이용하여 위상 f_E 가 디앨리어싱되는 f_E 의 언래핑된(unwrapped) 위상이 산출되는

방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

f_E 는 모든 변조 주파수들 f_1, f_2, \dots, f_m 의 함수이며, 상기 함수는 (i) f_1, f_2, \dots, f_m 의 산술적 평균 및 (ii) f_1, f_2, \dots, f_m 의 가중 평균 중 적어도 하나로부터 선택되는

방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

f_E 의 언래핑된 위상은,

(i) 계층적 디앨리어싱의 마지막 단계에서, 각각의 변조 주파수의 언래핑된 위상을 얻기 위해 f_{DEn} 을 사용하여 각각의 상기 변조 주파수 f_1, f_2, \dots, f_m 의 위상을 디앨리어싱하고,

(ii) f_E 및 f_1, f_2, \dots, f_m 사이의 함수를 사용하여 f_E 의 언래핑된 위상을 산출하여 산출될 수 있는 방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

f_{DEk} 의 위상을 이용하여 $f_{DE(k+1)}$ 의 위상을 디앨리어싱하는 각각의 단계에서, 이전의 디앨리어싱 단계로부터 $f_{(DE(k-1))}$ 의 $[0, 2\pi]$ 사이클 안에서 f_{DEk} 의 정정된 위상 사이클이 f_{DEk} 의 사이클 안에서 $f_{(DE(k+1))}$ 의 올바른 위상 사이클을 찾는 데 사용되며,

전체 명확한 범위 Z_D 안의 $f_{(DE(k+1))}$ 의 올바른 사이클이나 f_D 의 사이클이 찾아질 수 있는

방법.

청구항 9

위상 기반 TOF 시스템에서 사용 가능한 계층적 디앨리어싱 유닛으로서,

변조 주파수들 f_1, f_2, \dots, f_m 을 각각 이용하여 상기 TOF 시스템이 데이터를 획득하게 하는 프로세싱 하드웨어(160, 180", 310, 320)에 연결된 어레이(130)를 포함하되, 상기 TOF 시스템이 상기 변조 주파수들 중 하나에서 유일하게 작동된다면 Z_1, Z_2, \dots, Z_m 의 앨리어싱 인터벌 범위들이 생성될 수 있고, 상기 프로세싱 하드웨어(160, 180", 310, 320)는 $f_{DE1} < f_{DE2} < \dots < f_{DEn}$ 의 순서로 소팅된 n 개의 중간 주파수들 $f_{DE1}, f_{DE2}, \dots, f_{DEn}$ 을 생성하며 단계(a)에서 획득된 데이터로부터 그 중간 주파수들의 상응하는 위상들을 산출하며, 상기 프로세싱 하드웨어(160, 180", 310, 320)는 상기 변조 주파수들 f_1, f_2, \dots, f_m 을 각각 이용하여 획득된 데이터를 n 개의 중간 주파수들 $f_{DE1}, f_{DE2}, \dots, f_{DEn}$ 을 사용하여 계층적으로 디앨리어싱하며,

상기 TOF 시스템은 마치 상기 TOF 시스템이 매우 낮은 변조 주파수 f_D 에서 작동되는 것처럼 $k=1, \dots, n$ 에 대해 유효 앨리어싱 인터벌 범위 $Z_D > Z_k$ 를 제공하면서 동시에 마치 상기 TOF 시스템이 높은 변조 주파수 f_E 에서 작동되는 것처럼 깊이 분해능 확실성을 제공하는

계층적 디앨리어싱 유닛.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 생성을 위한 수단은 두 주파수들 사이의 비율 $f_{DE(k+1)}/f_{DEk}$ 에 기반하여 상기 중간 주파수 $f_{DE1}, f_{DE2}, \dots, f_{DEn}$ 를 선택하며, 이 두 주파수들 사이의 비율은 불확실성 요건에 의해 결정되는 비율에 의해 제한되는

계층적 디앨리어싱 유닛.

명세서

기술분야

[0001]

본 발명은 일반적으로 깊이 이미징 시스템(depth imaging systems)에 관한 것으로서, 특히 방출 광 에너지와 반사되어 검출된 광 에너지 사이의 위상 쉬프트(θ)를 비교함으로써 거리들(Z)에서의 깊이 이미지들을 획득하는 TOF(time-of-flight) 이미징 시스템에 관한 것이다. Z의 변화가 위상 쉬프트(θ)의 변화를 만들지만, 결국 위상 쉬프트는 예컨대 $\theta = \theta + 2 \cdot \pi$ 등을 반복하기 시작한다. 따라서, 거리 Z는 모듈로 $2 \cdot \pi \cdot C / 2 \cdot \omega = C / 2 \cdot f$ 로 알려져 있으며, 여기서 f는 변조 주파수이다. 본 발명은 특히 잡음의 존재 시 위상 쉬프트(θ) 및 거리 Z의 검출 값들 사이의 고유의 모호성을 없애는(또는 디앨리어싱(dealiasing)하는) 것에 관한 것이다.

배경 기술

[0002]

근래의 TOF(time-of-flight) 시스템들은 알려진 위상(ϕ)의 변조된 광 에너지를 방출하며 타깃 오브젝트로부터 TOF 시스템으로 다시 반사되는 광 신호의 위상 쉬프트를 검사함으로써 타깃 오브젝트까지의 깊이 거리들(Z)을 확인할 수 있다. 전형적인 그러한 위상 타입 TOF 시스템들이 카네스타 사(Canesta, Inc)가 양수하여 현재 마이크로소프트 사에 양도된 몇몇 미국 특허들에 기술된다. 그 특허들은 미국 특허 제6,515,740호 "양자 효율성 변조를 이용한 CMOS 호환형 3차원 이미징 센싱 방법(Methods for CMOS-Compatible Three-Dimensional Imaging Sensing Using Quantum Efficiency Modulation)", 3차원 센싱을 위한 전하 관리를 위한 방법 및 장치(Methods and Devices for Charge Management for Three Dimensional Sensing)라는 제목의 제6,906,793호, 제6,678,039호 "CMOS 3차원 이미징과 함께 이용 가능한 동적 범위 변환을 개선하는 방법 및 시스템(Method and System to Enhance Dynamic Range Conversion Useable With CMOS Three-Dimensional Imaging)", 제6,587,186호 "감소된 피크 에너지를 이용한 CMOS 호환형 3차원 이미지 센싱(CMOS-Compatible Three-Dimensional Image Sensing Using Reduced Peak Energy)", 제6,580,496호 "양자화 효율성 변조를 이용한 CMOS 호환형 3차원 이미지 센싱을 위한 시스템(Systems for CMOS-Compatible Three-Dimensional Image Sensing Using Quantum Efficiency Modulation)"을 포함한다.

[0003]

본 발명은 그러한 종래의 위상 타입 TOF 시스템들과 함께 사용되므로, 이 시점에서 그들의 동작을 검토하는 것이 유용하다. 도 1a는 위에서 참조된 특허들, 예컨대 '186호 특허에 기반하는 것이며, 전형적인 위상 타입 TOF 시스템을 도시한다.

[0004]

도 1a에서 전형적인 위상 쉬프트(phase-shift) TOF 깊이 이미징 시스템(100)은 동작에 있어 싱글 엔드형(single-ended)이거나 디퍼런스형(differential)일 수 있는 픽셀 검출기들(140)의 2차원 어레이(130)를 포함하는 IC(110) 상에 제작될 수 있다. 픽셀 검출기들(140) 각각은 관련 검출기에 의해 출력되는 검출 전하를 처리하기 위한 전용 회로(150)를 가지는 것이 바람직하다. IC(110)는 마이크로프로세서나 마이크로컨트롤러 유닛(160), 메모리(170)(랜덤 액세스 메모리 또는 RAM 및 읽기 전용 메모리 또는 ROM을 포함함이 바람직함), 고속 분배 클럭(180) 및 다양한 컴퓨팅 및 입출력(I/O) 회로(190)를 또한 포함함이 바람직하다. 다른 어떤 기능들 가운데, 제어기 유닛(160)은 오브젝트까지의 거리 및 오브젝트 속도 산출을 수행할 수 있다.

[0005]

마이크로프로세서(160)의 제어 하에서, 광 에너지 소스(120)가 여자기(exciter)(115)에 의해 주기적으로 동력을 받고 오브젝트 타깃(20)을 향해 변조된 광 에너지를 발산한다. 발광기(120)는 저전력(가령, 아마도 1W) 주기적 파형을 발산하고, 셔터 시간(아마도 10ms)이라 알려진 기간 동안 알려진 주파수(아마 수 십 MHz)의 광 에너지

방출을 생성하는 적어도 하나의 LED 또는 레이저 다이오드(들)임이 바람직하다. 통상적으로 발광기(120)는 아마 800nm의 파장을 가진 근적외선(near IR)에서 동작한다. 렌즈(125)는 방출된 광 에너지를 포커싱하는 데 보통 사용된다.

[0006] 방출된 광 에너지(S_{out} 이라 표기) 중 일부는 타겟 오브젝트(20)의 표면에서 반사(S_{in} 이라 표기)될 것이다. 이 반사 광 에너지 S_{in} 은 조리개 필드 스톱 및 렌즈(135)를 통과할 것이고 픽셀 또는 광검출기들(140)의 이차원 어레이(130)에 도달될 것이다. 반사 광 에너지 S_{in} 가 어레이(130) 내 광검출기들(140)에 부딪힐 때, 광검출기들 내 광자(photon)들이 방출되어 소량의 검출 전류로 변환된다. 설명의 용이성을 위해, 들어오는 광 에너지를 $S_{in} = A E \cos(\omega E t + \theta)$ 으로 모델링될 수 있으며, 여기서 A 는 밝기 또는 강도 계수이고, ωt 는 주기적 변조 주파수이며, θ 는 위상 쉬프트이다. 거리 Z 가 변화하면서 위상 쉬프트 θ 가 변화하며 도 1b 및 1c는 방출 및 검출 신호들 사이의 위상 쉬프트 θ 를 도시한다. 위상 쉬프트 θ 데이터를 처리하여 원하는 Z 깊이 정보를 산출할 수 있다. 어레이(130) 안에서 픽셀 검출 전류는 깊이 이미지를 형성하는데 사용되는 의미있는 검출 신호를 누적하기 위해 병합될 수 있다. 이러한 방식으로 TOF 시스템(100)은 획득된 데이터의 각각의 프레임에 대해 센서 어레이(130) 내 각각의 픽셀 검출기(140)에서 Z 깊이 정보를 포착하여 제공할 수 있다.

[0007] 시스템(100)과 같은 위상 타입 TOF 시스템들 안에서의 신호 검출은 도 2b와 관련하여 본 명세서에서 이후 보다 충분히 기술될 것이나, 간략히 설명하면, 픽셀 검출 정보는 적어도 두 개의 다른 위상들, 바람직하게는 0도와 90도에서 포착되어 Z 데이터를 산출하기 위해 처리된다.

[0008] 시스템(100)은 아래의 식으로 주어지는 TOF로 인한 거리 Z 에서의 위상 쉬프트 θ 를 산출한다.

수학식 1

$$\theta = 2 \cdot \omega \cdot Z / C = 2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot Z / C$$

[0009]

[0010] 여기서 C 는 광속 300,000Km/sec이다. 상기 수학식 1로부터 거리 Z 가 다음과 같이 주어진다.

수학식 2

$$Z = \theta \cdot C / 2 \cdot \omega = \theta \cdot C / (2 \cdot 2 \cdot f \cdot \pi)$$

[0011]

[0012] 그리고 $\theta = 2 \cdot \pi$ 일 때, 변조 주파수 f 와 연관된 앨리어싱(aliasing) 인터벌 범위가 다음과 같이 주어진다.

수학식 3

$$Z_{AIR} = C / (2 \cdot f)$$

[0013]

[0014] 실제로, Z 의 변화가 위상 쉬프트 θ 의 변화를 만들지만, 결국 위상 쉬프트는 예컨대 $\theta = \theta + 2 \cdot \pi$ 등으로

반복하기 시작한다. 따라서, 거리 Z는 모듈로 $2 \cdot \pi \cdot C / (2 \cdot \omega) = C / 2 \cdot f$ 이라 알려지며, 여기서 f는 변조 주파수

이다. 따라서 위상 쉬프트 θ 와 거리 Z의 검출 값들 사이에는 내재적 모호성이 존재할 수 있으며, 다중 주파수 방법들이 위상 쉬프트 데이터를 명확히하거나 디앨리어싱하는 데 사용된다. 그에 따라 시스템(100)이 거리 Z₁을

보고하면, 실제 상에서 실제 거리는 $Z_N = Z_1 + N \cdot C / 2f$ 중 어느 하나일 수 있으며, 여기서 N은 정수이다. 이러한 모호성의 특성은 도 1d 및 1e를 참조하여 보다 잘 파악될 수 있다.

[0015]

도 1d는 시스템(100)의 검출 위상 θ 대 거리 Z의 매핑이다. 시스템(100)은 타겟 오브젝트(20)에 대한 위상 각

도 θ' 를 결정한다고 가정할 수 있으며, 이때 이 위상 정보는 이를테면 50MHz의 변조 주파수 f₁을 이용하여 획득되었다고 하자. 도 1d에 도시된 바와 같이, 이러한 특정 위상 각도로 표현될 수 있는 몇 개의 거리들, 예컨

대 Z_1, Z_2, Z_4, Z_5 등이 존재한다...그러나 어느 것이 옳은 거리인가? 도 1d에서, Z_{AIR1}은 주파수 f₁에서 획득된 z 데이터와 연관된 Z 거리 앨리어싱 인터벌 범위를 나타내며, z₁에서 z₂까지 또는 z₂에서 z₄까지 또는 z₄에서 z₅까지 등의 거리이다. 이들 다양한 z₁, z₂, z₄, z₅ 거리는 모호하며 정확한 거리 값을 식별하기 위해 명확화 또는 디앨리어싱을 요구한다. 명확히하다와 디앨리어싱하다, 또는 명확화 및 디앨리어싱이라는 용어는 여기서 서로 호환 가능하게 사용될 수 있다.

[0016]

앨리어싱 인터벌 범위 Z_{AIR1}의 크기를 증가시킴으로써 z 데이터를 디앨리어싱하는 것이 요망된다. 종래의 한 가지 접근 방식은 C/2f 비를 증가시킴으로써, 말하자면 변조 주파수 f를 감소시킴으로써 이를 수행한다, 수학적 3 참조. 도 1d는 또한 보다 낮은 변조 주파수 f₂에 대해 획득되는 위상 데이터를 굵은 선으로 보여준다. 도 1d

에서 f₂는 f₁ 파형에 대한 기울기 $d\theta/dz$ 가 f₁ 파형에 대한 기울기의 약 절반에 미치지 못한다는 점에서 아마

도 20MHz이며, 여기서 기울기 $d\theta/dz$ 는 변조 주파수 f_m과 비례한다. 도 1e는 반시계 방향으로 회전하는 선

으로 도시된 벡터가 속도 $\omega = d\theta/dt = 2\pi f$ 으로 회전하는 극회전 표현이다. 종래의 시스템(100)에서 데이터는 적어도 두 개의 다른 위상들, 예컨대 0도 및 180도에서 픽셀 검출기들로부터 수집된다.

[0017]

따라서 도 1d에서 보다 낮은 변조 주파수 f₂가 사용될 때 위상 θ' 으로 표현되는 후보 거리 값들은 z₃, z₆ 등이다. 도 1d에 보여진 바와 같이, 앨리어싱 인터벌 범위 Z_{AIR2}는 짧은 거리 Z_{AIR1}(보다 빠른 변조 주파수 f₁과 연관됨)로부터 보다 긴 거리 Z_{AIR2}까지 바람직하게 증가하였다. 앨리어싱 인터벌 범위 증가율은 f₂/f₁일 수 있다. 그러나 보다 낮은 변조 주파수 f₂로 위상 데이터를 획득하는 것은 보다 높은 변조 주파수 f₁으로 획득된 경우보다 낮은 정밀도나 분해능을 가진 Z 값을 산출한다. 이러한 부정확성은 주파수 f₂의 곡선 기울기가 변조 주파수 f₁의 기울기의 약 절반이기 때문에 발생된다. 따라서 f₂에서 획득된 위상 계측 에러들은 f₁에서 획득된 위상의 에러들 보다 큰 Z의 에러들로 옮겨간다. 동일한 신호/잡음비에 대해, f₁ 및 f₂에서 획득된 위상 에러들은 동일할 것이나, 보다 낮은 f₂에서 획득된 Z 사용 위상의 상응하는 불확실성 에러들은 도 1d의 표현에 비해 약 두 배 더 크게 될 것이다. 따라서, 모든 것이 동일할 때, 변조 주파수를 낮추는 것은 정확하게 Z를 결정하는 데 있어 보다 낮은 분해능(보다 큰 불확실성)이라는 바람직하지 못한 결과를 가져온다.

[0018]

따라서 앨리어싱 범위 인터벌 증가가 요망될 때, 변조 주파수 f를 감소시켜 앨리어싱 범위 인터벌을 증가시키는 것은 바람직하지 못하다. 디앨리어싱에 대한 이러한 변조 주파수 감소 방식은 보다 낮은 변조 주파수가 발광기(120)(도 1a)로부터 조명 전력의 와트(watt) 당 보다 낮은 픽셀 센서(140) 정확도를 의미하기 때문에 쓸모가 없다. 예를 들어, 변조 주파수의 2.5 배 감소, 즉 f=50MHz로부터 f=20MHz로의 감소는 같은 비율의 앨리어싱 인터

벌 증가, 예컨대 3m에서 7.5m까지 바람직하게 증가시킬 것이나, 그에 대한 불이익은 주변 일광 효과가 무시될 수 있다고 가정할 때 유사한 불확실성 성능을 얻기 위한 거의 $(2.5) \cdot (2.5) = 6.25$ 배의 동작 전력 증가이다. 또 다른 예로서, 만일 50MHz 및 10MHz의 변조 주파수들이 사용된다면 디앨리어싱 범위는 3m에서 30m로 증가할 것이지만, 같은 불확실성 수준을 위해 25 배의 동작 전력 증가가 있을 것이다. 따라서, 실제 상에서 단순히 변조 주파수 낮춤에 따른 TOF 시스템의 디앨리어싱은 매우 실질적인 성능 불이익을 동반한다.

- [0019] 이상적으로 TOF 시스템을 디앨리어싱하는 것은 낮은 변조 주파수에 대해 명확한 범위를 얻으면서 높은 변조 주파수에 대해 거리 분해능을 제공할 것이다. 그러나 잡음 존재 시의 디앨리어싱은 특히 높은 변조 주파수대 또는 넓고 명확한 범위에 있어 난제가 될 수 있다.
- [0020] 위상 타입 TOF 시스템에 있어 필요한 것은 특히 잡음의 존재 시 Z 데이터 결과들을 디앨리어싱 또는 명확화하는 방법이다. 바람직한 디앨리어싱은 높은 변조 주파수대나 넓고 명확한 범위에 대해서 조차 잡음 존재 시에 작동해야 한다.
- [0021] 본 발명은 위상 타입 TOF 시스템들의 디앨리어싱을 위한 방법 및 시스템을 제공한다.

발명의 내용

과제의 해결 수단

- [0022] 본 발명의 실시예들은 위상 타입 TOF 시스템에 의해 획득되는 깊이 거리 Z를 계층적으로 디앨리어싱한다. 깊이 데이터는 바람직하게는 적어도 세 개의 변조 주파수들 f_1, f_2, \dots, f_m 을 각각 이용하는 TOF 시스템에 의해 획득되며, 여기서 상기 TOF 시스템이 오직 상기 변조 주파수들 중 하나에서 동작되었다면 Z_1, Z_2, \dots, Z_m 의 앨리어싱 인터벌 범위들이 파생될 것이다. 이어서, n 개의 중간 주파수들인 $f_{DE1}, f_{DE2}, \dots, f_{DEN}$ 이 $f_{DE1} < f_{DE2} < \dots < f_{DEN}$ 의 순서로 소팅되어 생성되고, 이들의 대응 위상들이 셋 이상의 변조 주파수들 f_1, f_2, \dots, f_m 을 각각 사용하여 획득된 데이터로부터 산출된다. 마지막으로 상기 생성된 중간 주파수들을 이용하여 셋 이상의 변조 주파수들 각각에 대해 획득된 데이터의 계층적 디앨리어싱이 발생된다. 계층적 디앨리어싱은 원하는 경우 한 번에 한 단계씩 수행된다.
- [0023] 그 결과 TOF 시스템은 마치 상기 TOF 시스템이 매우 낮은 변조 주파수 f_D 에서 작동되는 것처럼 $k=1, \dots, n$ 에 대해 유효 앨리어싱 인터벌 범위 $Z_D > Z_k$ 를 제공하면서 동시에 마치 상기 TOF 시스템이 높은 변조 주파수 f_E 에서 작동되는 것처럼 깊이 분해능 확실성을 제공한다. 높은 변조 주파수 f_E 는 모든 변조 주파수들 f_1, f_2, \dots, f_m 의 함수임이 바람직하고, 그 함수는 비한정적인 것으로서 f_1, f_2, \dots, f_m 의 산술 평균이거나 f_1, f_2, \dots, f_m 의 가중 평균일 수 있다.
- [0024] 일 실시예에서 중간 주파수들 $f_{DE1}, f_{DE2}, \dots, f_{DEN}$ 의 선택은 반드시 연속적일 필요는 없으나 여기에서 단순성을

$$\frac{f_{DE(k+1)}}{f_{DEk}}$$

위해 보여지는 두 주파수들 사이의 비율에 기반할 수 있으며, 그 비율은 불확실성 요건에 의해 결정되는 비율에 의해 제한된다.

- [0025] 다른 실시예에서, 계층적 디앨리어싱은 f_D 의 위상을 이용하여 f_{DE1} 의 위상 데이터를 먼저 디앨리어싱하고 그 후 f_{DE1} 의 위상을 이용하여 f_{DE2} 의 위상을 디앨리어싱하는 단계를 포함하는 단계적 시퀀스로 수행될 수 있다. 원하는 경우, 각각의 단계에서, $f_{DE(k+1)}$ 의 위상은 위상 f_E 가 f_E 의 언래핑된 위상(unwrapped phase)을 산출하기 위해 f_{DEn} 의 위상을 이용하여 디앨리어싱되는 마지막 단계까지 f_{DEk} 의 위상을 이용하여 디앨리어싱된다. 일 실시예에서 f_E 의 연속화된 위상은 계층적 디앨리어싱의 마지막 단계에서 각각의 변조 주파수의 연속화된 위상을 얻기 위해 f_{DEN} 을 이용하는 각각의 변조 주파수 f, f_2, \dots, f_m 의 디앨리어싱 위상을 이용하고, 그 후 f_E 및 f_1, f_2, \dots, f_m

사이의 함수를 사용하여 f_E 의 언래핑된 위상을 산출함으로써 산출될 수 있다.

[0026] 일 실시예에서, f_{DEk} 의 위상을 이용하여 $f_{DE(k+1)}$ 의 위상을 디앨리어싱하는 각각의 단계에서, f_{DEk} 의 사이클 안에서 $f_{DE(k+1)}$ 의 올바른 위상 사이클을 찾기 위해 이전의 디앨리어싱 단계로부터 $f_{DE(k-1)}$ 의 $[0, 2\pi]$ 사이클 안에서 f_{DEk} 의 올바른 위상 주기가 사용된다. 이것은 이제 완전히 명확한 범위 Z_D 나 f_D 의 사이클 안에서 $f_{DE(k+1)}$ 의 올바른 사이클이 찾아질 수 있게 한다.

[0027] 본 발명은 비율 f_E/f_D 이 증가함에 따라 성공적으로 데이터를 디앨리어싱하는 어려움이 증가하며, 이는 θ_E 가 θ_{DS} 를 산출하는데 사용될 때 상기 비율에 의해 θ_E 의 잡음이 증폭되기 때문임을 인식한다. 결과적으로, 큰 유효 주파수 f_E 에 대응하는 높은 변조 주파수 또는 작은 차이 주파수 f_D 에 대응하는 매우 큰 명확한 범위에 대해, 그렇게 증폭된 잡음은 디앨리어싱 인터벌 K 를 산정함에 있어 예러가 있는 결과를 도출할 것이다. 그 결과는 명확한 범위의 중간에 대한 앨리어싱을 야기할 수 있다.

[0028] 본 발명의 실시예들은 하드웨어 및/또는 소프트웨어로 구현될 수 있으며, 그 하드웨어 및/또는 소프트웨어는 본 발명이 실시되는 TOF 시스템의 일부일 수 있다. 본 발명의 실시예들에 따른 계층적 디앨리어싱은 상대적으로 낮은 손실임이 바람직하다.

[0029] 본 발명의 다른 특징 및 이점들은 바람직한 실시예들이 첨부된 도면들과 연계하여 상세히 기술된 이하의 내용으로부터 드러날 것이다.

도면의 간단한 설명

- [0030] 도 1a는 종래 기술에 따른 위상 타입 TOF 3차원 이미징 시스템을 묘사한 블록도이다.
- 도 1b 및 1c는 종래 기술에 따라 도 1a의 이미징 시스템과 관련된 발광 및 반사 광 에너지 파형들을 도시한다.
- 도 1d는 종래 기술에 따라 두 개의 변조 주파수들에 대해 획득된 위상 대 거리 Z 를 도시하며 앨리어싱 인터벌들과 거리 모호성을 보여준다.
- 도 1e는 종래 기술에 따른 획득 위상 데이터의 변조 주파수의 함수로서의 극회전도이다.
- 도 2a는 제12/459,033 출원의 실시예들에 따른 위상 타입 TOF 3차원 이미징 시스템을 도시한다.
- 도 2b는 본 발명의 실시예들에 따라 0도와 180도, 90도와 270도에서 수집된 전형적 위상의 세부사항을 도시한다.
- 도 3은 제12/459,033호 출원의 실시예들에 따른 두 개의 인접 변조 주파수들 및 가상 주파수들 f_D , f_E , 및 f_{DS} 에 대해 획득된 위상 대 거리 Z 및 그 결과에 따른 넓은 앨리어싱 인터벌 Z_{AIR} 이다.
- 도 4a는 제12/459,033호 출원의 일 실시예에 따른 하나의 픽셀 검출기로부터의 여덟 번의 상이한 수집 시퀀스 및 그 결과에 따른 위상 쉬프트 및 프레임 구성을 도시한다.
- 도 4b는 제12/459,033호 출원의 일 실시예에 따른 네 개의 인접 픽셀 검출기들이 단일 수집 시 네 개의 위상들을 획득하는 시퀀스 및 그 결과에 따른 위상 쉬프트 및 프레임 구성을 도시한다.
- 도 4c는 제12/459,033호 출원의 일 실시예에 따른 각각의 위상에 대한 수집들이 동일한 픽셀 검출기로부터의 데이터를 이용하여 오프셋 제거되는 시퀀스 및 그 결과에 따른 위상 쉬프트 및 프레임 구성을 도시한다.
- 도 4d는 제12/459,033호 출원의 일 실시예에 따른 θ_E 의 직접 산출이 이루어지는 시퀀스 및 그 결과에 따른 위상 쉬프트 및 프레임 구성을 도시한다.
- 도 5a 및 5b는 제12/459,033호 출원의 최소 공통 다중 디앨리어싱 실시예에 따라 두 개의 변조 주파수들을 사용

하여 결정되는 타깃 오브젝트 위치들인 실상(real) 및 허상(phantom)을 도시한다.

도 6은 본 발명의 실시예들에 따른 계층적 디앨리어싱을 이용한 위상 타입 TOF 3차원 이미징 시스템을 도시한다.

도 7a-7c는 본 발명의 실시예들에 따른 계층적 디앨리어싱의 다양한 단계들에 대한 위상 대 거리 Z를 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0031] 본 발명의 실시예들은 적어도 세 개의 주파수를 이용하여 TOF 위상을 계층적으로 디앨리어싱하는 방법 및 시스템을 구현하며, 도 6-7d를 참조하여 설명될 것이다. 종래의 디앨리어싱은 두 개의 주파수 사용에 의존한다. 그러나 셋 이상의 주파수들을 사용하는 것이 잡음을 크게 증폭하지 않으면서 TOF 시스템의 명확한 거리를 실질적으로 바람직하게 증가시킬 수 있다. 본 발명의 양태들은 위상의 확률 분포 및 타원 정정(elliptical correction) 양태들을 포함하는 계층적 디앨리어싱을 다룰 수 있다.

[0032] 그러나 계층적 세 주파수 디앨리어싱에 대한 보다 큰 예상 및 이해가 제12/459,033호 출원에 따른 두 주파수 디앨리어싱을 먼저 검토함으로써 얻어진다. 제12/459,033호 출원에 따른 디앨리어싱은 무손실이며 낮은 변조 주파수와 어울리는 상대적으로 큰 앨리어싱 인터벌 범위를 바람직하게 제공할 수 있다. 이것은 최고 변조 주파수 f_m 에 인접한 변조 주파수에 어울리는 주어진 Z 값에 대한 높은 정밀 확실성을 또한 제공하면서 달성되었다. 제12/459,033호 출원에 대한 설명이 먼저 도 2a-5b를 참조하여 이루어질 것이다.

[0033] 도 2a는 제12/459,033호 출원의 실시예들을 구현하기 위해 추가 구성요소들(210) 및 소프트웨어(220)가 포함된다는 것을 제외하면 도 1a-1c와 관련하여 기술된 것과 유사한 위상 타입 TOF 시스템(200)을 도시한다. 그와 같은 소프트웨어(220 및 210)는 TOF 시스템(200)의 디앨리어싱 서브시스템이라고 간주될 수 있다. 출력 DATA'는 도 1a의 TOF 시스템(200)에 의해 DATA로서 제공되는 정보를 포함할 수 있다. 시스템(100(도 1a) 또는 200(도 2a))와 같은 TOF 시스템은 보통 어떤 최대 변조 주파수 f_m , 아마도 100MHz에서 동작할 수 있다. 이것은 시스템이 f_m 보다 높은 변조 주파수에서 동작될 수 없다는 것이 아니라, 그러한 높은 변조 주파수대에서는 시스템 성능이 극도로 저하한다는 것이다. 따라서, f_m 은 시스템이 정상적으로 동작할 수 있는 최고 변조 주파수를 나타내는 것이며 그것이 동작할 수 없는 최고 변조 주파수를 의미하는 것이 아니라는 것을 알 수 있다.

[0034] 시스템(200)의 디앨리어싱 동작을 설명하기 전에, 어레이(130) 내 많은 광검출기들(PD) 중 둘, 즉 광검출기 140-1 및 140-N과 그들과 관련된 전자회로의 일부, 즉 150-1, 150-N을 도시한 도 2b를 참조하여 간략하게 다중 위상 검출에 대해 기술하는 것이 유용하다. 이러한 특정 실시예는 양자 효율성(QE) 변조된 차동 광검출기들 또는 픽셀들(140)을 활용하며, 그들의 픽셀 검출 정보는 적어도 두 개의 다른 위상들인 0도 및 90도, 그리고 보다 바람직하게는 네 개의 다른 위상들인 0도와 180도 그리고 90도와 270도에서 수집된다. 픽셀 검출기들의 서로 다른 위상 동작들은 검출되고자 모색되는 위상 쉬프트 데이터 Θ 와 혼동되지 않도록 하기 위한 것이다. 이러한 서로 다른 위상들은 변조기(115) 및 광 에너지 발광기(120) 사이의 쉬프트를 나타내는 반면, 검출이 모색되는 위상 쉬프트 데이터 Θ 는 발광기(120)로부터 발산된 광 에너지 S_{out} 및 어레이(130) 내 픽셀 검출기들(140) 사이의 쉬프트이다(도 2a 참조).

[0035] 서로 다른 위상들에서 수집되는 검출 위상 데이터는 여기에서 캡처 C^0 및 C^{180} , C^{90} 및 C^{270} 이라고 표시되며 제12/459,333호 출원에 따른 디앨리어싱을 구현하기 위해 처리된다. 네 위상들을 이용한 포착은 소위 고정 패턴 오프셋을 제거하는데 선호된다. C^0 포착은 데이터를 산출하지만 0으로부터 예러 오프셋을 포함할 수 있다, 예컨대 값 C^0 는 검출된 신호가 존재하지 않을 때 0이 아닐 수 있다. 동일한 맥락에서 C^{180} 은 같지만 반전된 데이터를 가져야 하며 동일한 고정 패턴 오프셋을 가질 것이다. 바람직하게는 $(C^0 - C^{180})$ 및 또한 $(C^{90} - C^{270})$ 감산을 통해, 위상 및 Z 데이터 정보가 보존되면서 고정 패턴 오프셋이 상쇄된다. 그러나 제12/459,033 출원의 실시예들은 싱글 엔드형(single-ended) 위상 검출기들뿐 아니라 QE 변조 검출을 활용하지 않는 검출 시스템들로부터도 얻어지는 다중 위상 TOF 데이터를 디앨리어싱하는데 사용될 수 있다.

[0036] 위상 각도 Θ 가 캡처 C^0 , C^{90} , C^{180} , C^{270} 으로부터 다음과 같이 산출될 수 있다.

수학식 4

$$\theta = \text{atan2}(C^{90} - C^{270}, C^0 - C^{180})$$

[0037]

[0038] 여기서 atan2(X,Y)는 atan(Y/X)에 해당하는 삼각 함수이다.

[0039]

도 2b에 도시된 것의 구성과 동작은 앞서 인용된 미국 특허 제6,580,496호 및 제7,906,793호의 고정 위상 지연 실시예(도 10)와 관련하여 기술되었다. 도 2b에서, 각각의 QE 변조된 차동 픽셀 검출기, 예컨대 140-1로부터

$$B \cdot \cos(\theta), B \cdot \sin(\theta)$$

검출 생성된 광전류가 차별적으로 검출되고(DIF. DETECT) 차별적으로 증폭되어(AMP) 신호를 산출하며, 여기서 B는 밝기 계수이다. 고정된 각각의 0도나 90도 위상 쉬프트 지연(DELAY), 보다 바람직하게는 고정된 0도나 180도나 90도나 270도 위상 쉬프트가 클록 유닛(180')에 의해 명령될 수 있는 위상 선택 제어 신호(PHASE SELECT)에 응하여 스위칭 가능하게 삽입될 수 있다. 위상 데이터, 예컨대 C^0 와 C^{180} , C^{90} 및 C^{270} 이 그러한 개별 위상들에서 픽셀 검출기들로부터 포착 또는 수집된다. 그러한 위상 검출에 대한 보다 상세한 내용은 위에서 인용된 특허들에서 찾을 수 있으나, 제한 없이 고정적인 개별 위상 쉬프트들은 신호가 검출기 어레이(130)를 구동하는데 사용되거나 변조기(115)에 의해 도입될 수 있는 클록 유닛(180')에 의해 삽입될 수 있다; 도 2b 참조.

[0040]

제12/459,033호 출원에 따르면, 각각이 통상적으로 시스템 최대 변조 주파수(f_m)보다 적은 서로 인접한 변조 주

파수들 f_1 및 f_2 가 결합되는 것이 바람직하다. 그에 따라 각각으로부터 획득되는 것으로 θ_1 및 θ_2 로 표기되는 위상 데이터는 두 가지 목적을 제공하는데 사용된다: (1) 낮은 수준의 Z 분해능 확실성을 산출하는 시스템(200)으로부터 높은 변조 주파수 측정 등가치를 획득하며, (2) 긴 앨리어싱 인터벌 Z 범위를 제공하는 시스템(200)으로부터 낮은 변조 주파수 측정 등가치를 획득. 이러한 방식으로 긴 앨리어싱 인터벌로부터 대략적인 Z 범위가 결정되는 한편, Z 값의 보다 정밀한 결정은 높은 변조 주파수 측정으로부터 정해진다.

[0041]

다시 도 2a를 참조하면, 프로세서(160)에 의해 실행될 때의 소프트웨어(220)는 구성요소들(220)을 이용하여 클록 회로(180')의 일반 동작을 변경할 수 있다. 그에 따라 시스템(200)은 적어도 제1 및 제2주파수 f_1 , f_2 를 사용하여 동작하게 되며, 여기서 $f_1 > f_2$ 이고, f_1 은 바람직하게는 f_m 의 약 40% 이하 안에서 f_m 에 가깝고 f_2 는 f_1 의 약 35% 안에 있고 바람직하게 더 인접하다. 따라서, f_1 은 만일 f_m 이 약 100MHz라면 f_1 이 약 60MHz에서 100MHz 만큼 높은 주파수를 가지도록 f_m 의 주파수의 약 60% 내지 100% 범위 안에 존재한다고 할 수 있다. 마찬가지로 f_2 의 범위는 f_1 이 약 90MHz라면 f_2 가 약 58.5MHz에서 약 89.1MHz까지의 주파수를 가지도록 주파수의 약 65% 내지 약 99%가 된다.

[0042]

제12/459,033호 출원에 따르면, 변조 주파수 f_1 및 f_2 를 사용하는 것은 시스템(200)이 디앨리어싱 인터벌과 관련하여 마치 시스템(200)이 바람직하게는 $(f_1 - f_2)$ 에 비례하는 매우 느린 변조 주파수 f_0 에서 동작되고 있는 동안 위상 데이터가 수집되는 것과 같이 시스템(200)이 행위하도록 한다. 예를 들어 변조 주파수 f_1 에서의 시스템(200) 동작은 앨리어싱 인터벌 범위 Z_{AIR1} 을 제공하며 변조 주파수 f_2 에서의 시스템(200)의 동작은 앨리어싱 인터벌 범위 Z_{AIR2} 를 제공한다고 가정한다. 제12/459,033호 출원의 실시예들은 유효 앨리어싱 인터벌 범위 $Z_{AIR0} > Z_{AIR2} > Z_{AIR1}$ 을 제공하도록 변조 주파수 f_1 및 변조 주파수 f_2 에서 획득된 데이터를 처리한다.

[0043]

또한, 바람직하게 서로 인접한 변조 주파수 f_1 및 f_2 의 그러한 사용은 시스템(200)이 f_m 에 인접한 높은 유효 변조 주파수, 아마도 $(f_1 + f_2)/2$ 또는 f_1 및 f_2 의 다른 조합을 이용하여 동작하면서 위상 데이터를 수집하고 있는 것처럼 Z 측정치들의 양호한 분해능 정밀도를 바람직하게 도출하였다. 주파수들 $(f_1 - f_2)$, $(f_1 + f_2)/2$ 및 이 변조 주파수들의 다른 조합들은 아주 수학적인 구조 또는 가상 주파수들이며, 시스템(200)은 그러한 가상 주파수들에서 물리적으로 동작하지 않는다는 것을 알아야 한다. 물론 둘 이상의 변조 주파수들 f_1 , f_2 이 사용될 수

있고, 서로 다른 변조 주파수들이 주파수 상에서 서로, 그리고 f_m 에 인접한다는 것을 알아야 한다. 여러 변조 주파수들을 사용하는 것은 또한 TOF 시스템이 오직 변조 주파수 f_1 에서 동작하면서 획득된 데이터를 처리하고 변조 주파수 f_2 에서 획득된 데이터를 버리거나 변조 주파수 f_2 에서 동작하고 변조 주파수 f_1 에서 획득된 데이터를 버리는 경우에 달성될 수 있는 것보다 더 우수한 Z 분해능 확실성이나 정밀도를 낳는다.

[0044] 도 3에 도시된 것으로부터 예상할 수 있는 바와 같이, 시스템 효율성의 손실과 함께 f_m 이 감소되는 종래의 디앨리어싱과 비교하여 제12/459,033호 출원의 실시예들은 바람직하게는 f_m 에 인접한 높은 주파수에서 시스템(200)을 운영하였고, 그것이 높은 동작 시스템 효율성을 유지시킨다. 또한, 변조 주파수들 f_1 및 f_2 가 바람직하게는 서로와 그리고 f_m 과 인접하기 때문에, 하나의 변조 주파수에서 픽셀 검출기들(140)에 의해 수집되는 위상 정보는 다른 변조 주파수(또는 둘 이상의 변조 주파수들이 사용되는 경우 주파수들)에서 수집되는 데이터 프레임들과 공유될 수 있다.

[0045] 도 3은 제12/459,033 출원에 따른 위상 대 거리 Z의 곡선이다. 제1변조 주파수 f_1 을 이용하여 획득되는 위상

데이터에 대한 파형이 보여지며, 그 데이터는 θ_1 으로 표기된다. 설명의 목적 상, f_1 은 약 50MHz라고 가정한다. 도 3은 또한 다소 더 낮은 제2변조 주파수 f_2 를 이용하여 획득되는 위상 데이터의 곡선을 보이며, 그 데이

터는 θ_2 라 표기된다. 설명의 목적 상, f_2 는 약 31MHz이고, 그 기울기에 따르면 f_1 파형의 것보다 작고, 그 주기(또는 앨리어싱 인터벌 범위)는 더 길다. 이러한 f_1 및 f_2 의 전형적 값들에 대해, 시스템(200)의 f_m 의 전형적 값은 70MHz일 수 있다. 도면의 명료성을 도모하기 위해 f_2 파형이 f_1 파형보다 굵은 선으로 그려진다. 도

1d에 도시된 곡선의 경우와 같이, 2π 의 위상 배수들에서 데이터가 폴드오버되거나 랩어라운드된다. 겹침은

나중에 여기에서 기술되는 것과 같이 θ_E 과 θ_{DS} 의 계산을 다소 복잡하게 한다.

[0046] 주지된 바와 같이, 제12/459,033 출원의 양태나 목적은 시스템(200)이 상대적으로 낮은 변조 주파수를 이용하여 단계화된 위상 데이터를 획득하는 것처럼 보여지게 함으로써 큰 앨리어싱 인터벌 범위 Z_{AIR} 를 제공하는

것이었다. 이하의 내용은 f_1 및 f_2 의 함수임이 바람직한 차이 주파수를 정의하고 위상 차 $\theta_D = (\theta_1 - \theta_2)$ 를 정의하는 것이 큰 앨리어싱 인터벌 범위에 적합한 낮은 변조 주파수를 제공하는 목적을 달성할 수 있다는 것을 증명할 것이다. 제한 없이, f_0 의 전형적 함수는 차이 함수 $(a \cdot f_1 - b \cdot f_2)$ 일 수 있고, 여기서 a 및 b는 가중 팩터들일 수 있다.

[0047] 수학적으로 위상 지연 θ 는 절대 타깃 거리 Z와 관련하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

수학식 5

$$\theta = 2\pi \left(\frac{2fZ}{C} + N \right)$$

[0048]

[0049] 수학식 5를 미분한 식은 다음과 같다.

수학식 6

$$\delta\theta = \frac{4\pi Z \delta f}{C}$$

[0050]

따라서, 절대(디앨리어싱) 거리 Z_{ABS} 는 다음과 같이 주어진다.

수학식 7

$$Z_{ABS} = Z = \frac{C}{4\pi} \frac{\delta\theta}{\delta f}$$

[0052]

이 경우, 수학식 7의 미분이 정밀도의 손실 없이 작은 차이들로 대체되어 다음과 같은 식을 산출할 수 있다.

수학식 8

$$Z_{ABS} = Z = \frac{C}{4\pi} \frac{\Delta\theta}{\Delta f}$$

[0054]

수학식 8은 θ_D (또는 $\theta_1 - \theta_2$)인 $\Delta\theta$ 로부터 그리고 Δf 으로부터 결정될 수 있다는 것을 보여준다. 이

[0055]

것은 변조 주파수 $\Delta f = f_D = f_1 - f_2$ 및 위상 $\Delta\theta = \theta_D = \theta_1 - \theta_2$ 으로부터 Z를 결정하는데 사용하는 것과

동일한 식임을 알 수 있다. 따라서, $f_1, f_2, \theta_1, \theta_2$ 의 지식을 이용하여 실제 변조 주파수가 물리적으로 $(f_1 - f_2)$ 이었던 Z에 대한 산출과 비슷한 거리 Z의 측정치를 산출할 수 있다. 이것은 마치 시스템(200)이 매우 낮은 변조 주파수에서 동작하면서 위상 데이터를 획득하고 있던 것처럼 큰 앨리어싱 인터벌 범위를 산출할 변조 주파수 f_1 및 f_2 의 조합을 나타낸다. 물론 f_1 과 f_2 의 많은 다른 조합들이 그러한 목적을 달성하기 위해 사용될 수도 있으며, 둘 이상의 변조 주파수들, 예컨대 f_1, f_2, f_3, \dots 를 사용할 수도 있다. 바람직하게는 이러한 변조 주파수들 중 가장 높은 것 f_1 이 시스템의 가장 높은 최대 변조 주파수 f_m 에 가까울 것이며 최소한 f_m 의 40% 안에 있을 수 있다. 바람직하게는 다양한 변조 주파수들 중 적어도 서로 가장 가까운 것이 서로의 약 $\pm 35\%$ 안에 있을 수 있으며 바람직하게는 그보다 더 가까울 수 있다.

[0056]

바람직하게는 최대 변조 주파수 f_m 은 TOF 시스템(200)의 최적 동작 지점과 인접하다. 이것은 f_m 이 동작 효율성의 최대치에 가깝다는 것을 의미하며, 그에 따라 시스템 동작 효율성 곡선은 f_m 주변에서 상대적으로 평탄하다. 일반적으로 이러한 최대치는 매우 평탄하고 그에 따라 동작 주파수 f_1 및 f_2 는 또한 시스템(200)의 최적 동작 조건에 가까울 것이다.

[0057]

원하는 낮은 수준의 Z 분해능 불확실성에 상응하는 높은 유효(가령, 가상) 변조 주파수를 구현함에 따른 설계적 고려사항이 이제 제12/459,033 출원에 따라 제시될 것이다. 변조 주파수 f_1 및 f_2 에서 동작하는 시스템(200)(도 2a 참조)으로부터 얻어지는 위상 데이터가 결합되어 주파수 f_e 에서의 유효(가상) 주파수 계측을 낳는다. 변조 주파수 f_1 단독 또는 변조 주파수 f_2 단독으로 동작하는 시스템(200)으로부터 얻어지는 데이터를 사용하기 보다,

제12/459,033호 출원의 실시예들은 Z 데이터의 불확실성을 더 낮추기 위해 두 변조 주파수들에 획득되는 데이터를 유리하게 결합한다. (추가적인 변조 주파수들, 예컨대 f_3, f_4, \dots 가 사용되면 시스템이 이들 변조 주파수들에서 동작하면서 획득되는 위상 데이터 역시 바람직하게 사용될 것임을 알 수 있다).

[0058] 사용된 모든 변조 주파수들(가령, 가까운 예에서 f_1 및 f_2)로부터의 위상 데이터를 결합하는 것은 위상 데이터 측정치들의 잡음을 평균화하고, 바람직하게는 f_1 나 f_2 단독으로만 획득되는 데이터를 이용하여 얻어질 수 있는 것보다 낮은 잡음을 낳는다. 또한 변조 주파수들 f_1 및 f_2 이 바람직하게는 최대 변조 주파수 f_m 과 상대적으로 가깝기 때문에 각각의 계측치는 상대적으로 높은 정밀도 및 보다 낮아진 잡음과 함께 획득된다. 일반적으로 서로 보다 인접한 주파수들 f_1 및 f_2 에 있어 시스템(200) 성능은 얼마간 유사할 것이다. 바람직하기로는, 주파수 f_1 및 f_2 로부터의 데이터 결합 후에 얻어진 불확실성은 변조 주파수 f_1 이나 변조 주파수 f_2 를 이용하여 획득되는 위상 데이터가 단독으로 사용되었을 때의 불확실성의 약 0.7 배가 될 것이다.

[0059] 따라서 이러한 제12/459,033호 출원의 제2양태는 낮은 Z 분해능 불확실성을 산출하는 높은 변조 주파수에서 동작하는 시스템을 모방하기 위해 서로 다른 (그러나 바람직하게는 서로 가까운) 변조 주파수들에서 동작하는 시스템(200)에 의해 획득되는 위상 데이터를 결합하는 것에 관한 것이다. 데이터를 결합하는 어떤 특정 방법들이 이제 기술될 것이나, 다른 많은 조합 역시 이용될 수도 있을 것이다.

[0060] 이러한 제2양태나 목적과 관련하여, 한 가지 방법은 변조 주파수 f_1 에서 얻어진 캡처들 $(C_1^0, C_1^{90}, C_1^{180}, C_1^{270})$ 로부터 어레이(130) 내 픽셀 검출기들(140)(도 2a 및 2b 참조)로부터의 미가공 데이터 관측치들을 결합하고 이 미가공 데이터를 주파수 f_2 에서 얻어진 데이터 관측치들 $(C_2^0, C_2^{90}, C_2^{180}, C_2^{270})$ 에 더하여 $(C_1^0 + C_2^0, C_1^{90} + C_2^{90}, C_1^{180} + C_2^{180}, C_1^{270} + C_2^{270})$ 을 도출한다. 이러한 전형적 조합은 극회전도(polar representation)에서 개별 위상 벡터들을 함께 더하고 그 합 벡터에 대한 위상 각도를 얻는 것에 상응한다.

[0061] 이제 변조 주파수 f_1 이나 변조 주파수 f_2 에서 동작하는 시스템(200)에 의해 획득되는 주어진 거리 Z에 있는 타깃 오브젝트(20)의 위상 벡터에 대한 극회전도를 고려할 것이다. (도 1e는 단일 위상 벡터에 대한 극회전도로서 간주될 수 있다.) 위상 벡터들은 변조 주파수들 f_1, f_2 각각에서의 캡처들에 대한 $V_1 = (\rho, \theta_1)$ 및 $V_2 = (\rho, \theta_2)$ 로서 극 형식을 통해 나타내질 수 있다. 설명의 용이함을 위해 변조 주파수의 작은 변화가 변조 콘트라스트에 영향을 미치지 않는다고 가정할 수 있으며 따라서 두 V_1 및 V_2 는 동일한 크기 ρ 를 가진다. ("변조 콘트라스트"라는 용어는 픽셀 검출기들(140) 안에서의 수집 효율성 계측, 예컨대 신호 S_{in} 로부터 들어오는 광자 에너지가 얼마나 잘 수집되어 검출 신호로 변환되는지를 나타낸다. 높은 변조 콘트라스트가 바람직하다.)

[0062] 위상 벡터들 $V_1 = (\rho, \theta_1)$ 및 $V_2 = (\rho, \theta_2)$ 의 가산은 다음 식을 산출한다.

수학식 9

[0063]
$$V_1 + V_2 = (2\rho \cdot \sin((\theta_1 - \theta_2)/2), (\theta_1 + \theta_2)/2)$$

[0064] 따라서 만일 $(\theta_1 - \theta_2)$ 이 π 의 배수가 아니면, 벡터를 널(null)로 만들 수 있는 $V_1 + V_2$ 의 위상은 변조 주파수

$(f_1 + f_2)/2$ 에서 계측된 타깃 오브젝트(20)에 대한 위상 벡터와 동일한 위상 $(\theta_1 + \theta_2)/2$ 일 것이다. 실제로는 그러나 변조 콘트라스트는 주파수에 따라 가변하며, 이것이 그러한 가산 방법의 구현을 복잡하게 한다. 또 다른

복잡함은 온도에 따른 변조 콘트라스트 비율의 가변으로 이것이 수학적식을 다소 다루기 어렵게 만든다.

[0065]

대안적 실시예에서 변조 주파수들 f_1 및 f_2 에서의 두 계측치들 θ_1 및 θ_2 로부터의 실제 위상 각도들은 자체로서 결합되어 유효 위상 각도 θ_E 를 생성한다. 통상적으로 위상 각도들의 평균 $(\theta_1 + \theta_2)/2$ 이 사용되지만 실제 위상 각도들의 다른 조합 역시 가능하다.

[0066]

위에서 기술한 바와 같이, θ_E 및 θ_D 의 값들은 다양한 방식으로 결정될 수 있다. 이러한 값들을 얻기 위해 사용되는 특정 방법과 무관하게, 도 3에 의해 도시된 바와 같이 바람직하게는 θ_E 및 θ_D 둘 다 거리 Z 를 결정하는 데 사용된다. 도 3은 주파수 f_1 , f_2 , $f_D=(f_1-f_2)$ 및 $f_E=(f_1+f_2)/2$ 와 각기 연관된 위상 각도들 θ_1 , θ_2 , $\theta_D = \theta_1 - \theta_2$ 및 $\theta_E = (\theta_1 + \theta_2)/2$ 을 도시한다. θ_1 과 θ_2 은 $Z=0$ 에 대해 0이 되도록 정규화된다는 것을 알 수 있다. 도 3 또한 θ_D 로부터 $\theta_{DS} = \theta_D E f_E / f_D$ 로서 도출될 수 있는 θ_{DS} 을 도시한다. 각도 θ_{DS} 은 θ_E 와 동일한 주파수에 대응하며 그에 따라 도 3에 도시된 것과 같은 θ_E 와 동일한 기울기를 가진다. 그러나 각도 θ_{DS} 은 수학적으로 θ_D 로부터 도출되기 때문에, 그것은 바람직하게는 Z_{AIR} 로 표기되는 θ_D 와 동일한 큰 앨리어싱 인터벌을 가진다.

[0067]

두 θ_D 및 θ_E 는 θ_1 및 θ_2 의 반복들에 대한 폴드오버(foldover)나 랩어라운드(wraparound)를 고려하도록 조정된다는 것을 알아야 한다. 예를 들어, θ_E 의 제1앨리어싱 인터벌의 종료 전에 θ_1 이 랩어라운드한다. 단순히 $\theta_E = (\theta_1 + \theta_2)/2$ 을 산출하는 것은 충분치 않을 것인데, 이는 θ_1 이 랩어라운드할 때 θ_E 이 π 만큼 감소될 것이기 때문이다. 그러나 $\theta_1 < \theta_2$ 일 때, θ_1 이 랩어라운드되었을 것이라는 것이 알려지며, 그에 따라 π 가 θ_E 에 추가되어야 한다. 그러한 삼각함수적 정정이 이 기술 분야에서 잘 알려져 있으며 데이터에 대해 수행되었던 것으로 추정된다.

[0068]

그렇게 적절하게 삼각함수식으로 정정된 θ_E 및 θ_D 를 가질 때, θ_{DS} 와 θ_E 는 동일한 기울기를 가지고 각자의 앨리어싱 인터벌만큼만 차이가 나므로, 잡음의 부재 시 $\theta_{DS} = \theta_E + K2\pi$ 가 된다. K 는 θ_E 의 앨리어싱 인터벌의 인덱스를 나타내는 정수이다. 잡음이 존재할 때, $\theta_{DS} \cong \theta_E + K2\pi$. 올바른 앨리어싱 인터벌을 찾는 일은 $(\theta_{DS} - \theta_E + K2\pi)$ 의 절대값을 최소화하기 위한 K 를 선택하는 일을 수반한다. $\theta_E + K2\pi$ 은 여기서 Z 의 정확한 계측치를 나타내나 알려지지 않은 앨리어싱 인터벌을 이용한다. 식 $\theta_E + K2\pi$ 은 θ_E 의 디앨리어싱 값을 나타낸다. 물론 타겟 오브젝트는 f_0 의 앨리어싱 인터벌보다 적은

거리에 있다고 추정된다. K에 대한 적절한 값들을 결정하기 위한 다른 등가적인 수학적 접근방식들 역시 이용될 수 있다는 것을 알 수 있다.

[0069] 적합한 차이 주파수 f_D 를 선택하는 것이 중요하다. 만일 f_D 가 너무 큰 경우 f_D 에 대해 상응하는 디앨리어싱 인터벌은 너무 작을 것이다. 반대로 f_D 가 너무 작으면 f_D 에서 Z 계측치들의 분해능 확실성이 너무 크게 될 수 있다. 따라서, 차이 주파수 f_D 는 분해능 불확실성에 영향을 미치는 잡음 제약을 조건으로 가능한 한 작아야 한다. 앨리어싱 인터벌 인덱스 K는 적합한 디앨리어싱 인터벌이 선택되게 하기 위해 높은 확실성을 가지고 결정되어야 한다.

[0070] $f_D \ll f_E$ 이라고 가정했을 경우, $error(\theta_{DS}) \gg error(\theta_E)$ 이며 일반적으로 θ_E 으로부터 에러를 무시할 수

있다. $K_s = ((\theta_{DS} - \theta_r) / 2\pi)$ 라고 하자. 그러면 K는 K_s 에 가장 가까운 정수이다. 정확한 K를 찾기 위해 K_s 에 대

$$\theta_{DS} / 2\pi = \theta_D \cdot f_E / f_D \cdot 2\pi$$

한 에러(오차)는 $\ll 0.5$ 이어야 하며 이것은 θ_E 에 대한 에러 역시 실질적으로 0.5 미만이어야 한다는 것을 의미한다.

[0071] 다음 섹션은 이제 제12/459,033호 출원에 따른 변조 주파수들 f_1 및 f_2 에 대한 양호한 캡처 시퀀스들을 식별하는 전형적인 방식들을 기술할 것이다. 많은 다른 캡처 시퀀스들이 디앨리어싱된 프레임들을 생성하기 위해 사용될 수 있다. 프레임은 센서 어레이(130)에 의해 획득되는 완전한 Z 이미지를 나타낸 것으로, 말하자면 어레이 내 각각의 픽셀 검출기(140)는 타겟 오브젝트(20)로부터의 해당 Z 값과 결부된다. 먼저 시스템(200) 내 픽셀 검출기들(140)은 한 번에 한 번의 수집(캡처)만을 수행할 수 있다고 가정한다. 이러한 가정 하에서, 어떤 전형적 시퀀스들은 다음과 같다.

[0072] 첫 번째 케이스가 도 4a에 도시되며, 여기서는 같은 픽셀 검출기가 원하는 위상 쉬프트 데이터 θ_1, θ_2 를 획득하기 위해 여덟 번의 상이한 캡처들을 순차적으로 거친다고 가정한다. 따라서 도 4a에 도시된 바와 같이, 변조 주파수 f_1 에서 동작하는 시스템(200)에서 시간에 따른 캡처들의 시퀀스 $C_1^0, C_1^{90}, C_1^{180}, C_1^{270}$ 가 획득된다.

다음으로, 변조 주파수 f_2 에서 동작하는 시스템(200)에서 캡처들의 시퀀스 $C_2^0, C_2^{90}, C_2^{180}, C_2^{270}$ 가

획득되고, 그 다음 시스템은 변조 주파수 f_1 에서의 동작으로 돌아가고 캡처들의 시퀀스 $C_1^0,$

$C_1^{90}, C_1^{180}, C_1^{270}$ 가 이루어지는 식의 동작이 이루어진다. 그에 따라 도 4a에서(뿐만 아니라 도 4b-4d에서) 캡처들의 관련 시퀀스 밑에 디스플레이되는 위상 정보는 관련 변조 주파수에서 동작하는 시스템(200)에 의해 획득되는 위상 데이터이다. 따라서, 첨자 1은 변조 주파수 f_1 과 연관된 캡처들을 나타내고 첨자 2는 변조 주파수 f_2 와 연관된 캡처들을 나타낸다. 위상 정보 밑에 디스플레이되는 프레임 정보는 보여진 시퀀스에 따라 프레임들

이 어떻게 바람직하게 구성되는지를 보여준다. θ_1 와 θ_2 이 결정되었으면 θ_E 이 $(\theta_1 + \theta_2) / 2$ 으로부터 산출될 수 있다.

[0073] 도 4b는 다른 시퀀스 예를 도시하며, 여기서는 픽셀 어레이 안에서 한 블록으로 보여진 네 개의 인접 픽셀 검출기들이 단일 캡처 안에서 모두 네 개의 위상들을 얻기 위해 사용된다. 도 4a의 여덟 개의 캡처 시퀀스가 모두 여덟 개의 캡처들을 획득하기 위한 시간의 길이로 인해 모션 블러(blur)를 겪는 반면, 도 4b에 도시된 시퀀스는 내재적으로 보다 낮은 모션 블러를 보여야 한다. 그러나 도 4b에서 서로 다른 픽셀들로부터의 데이터를 이용하

여 C^0-C^{180} 오프셋 상쇄가 이루어지며 오프셋들이 완전히 상쇄되지 않는다는 점에서 성능이 문제가 될 수 있다. 전과 같이, θ_E 이 $(\theta_1+\theta_2)/2$ 으로부터 산출된다.

[0074]

도 4c는 또 다른 시퀀스 예를 도시한 것이며, 각각의 위상에 대한 캡처들은 한 블록으로서 도시된 같은 픽셀 검출기를 사용하여 C^0-C^{180} 오프셋과 관련하여 상쇄된다. 이 구성에서 성능은 매우 우수하고 모션 블러는 허용할 수 있는 수준이다. 전과 같이, θ_E 이 $(\theta_1+\theta_2)/2$ 으로부터 산출된다.

[0075]

도 4d는 위상 θ_1 와 θ_2 가 C^0-C^{180} 오프셋 보정되는 대안적 실시예를 도시한다. 결과적으로 데이터 품질은 다소 좋지 않지만 바람직하게도 θ_E 는 C^0-C^{180} 와 $C_1^{90} - C_2^{270}$ 로부터 바로 계산된다. 이 방법은 앞서 기술된 바와 같고, 여기서 C_2^{180} 는 C_2^0 로 대체되고 C_2^{270} 는 C_2^{90} 으로 대체된다. 바람직하게도 θ_E 에 $\theta_D = \theta_1 - \theta_2$ 대한 데이터 품질은 양호하지만 은 열악한 품질을 가지며 그 결과 디앨리어싱 인터벌 결정 품질이 문제가 된다.

[0076]

명시적으로 도시되지 않은 대안적인 일 실시예는 도 4d와 유사하나, 여기서 θ_E 는 $(\theta_1+\theta_2)/2$ 으로부터 산출된다. 앞서 언급한 바와 같이, 획득된 위상 각도들은 바람직하게는 Z=0에 대해 0에서 시작하도록 정규화된다. 그 대안적 실시예에서 만일 θ_1 와 θ_2 사이의 전치 정규화 차이들이 작다면 θ_1 와 θ_2 의 오프셋 원인의 에러들은 서로 반대가 될 것이고 바람직하게는 $\theta_E = (\theta_1+\theta_2)/2$ 을 통해 부분적으로 상쇄할 것이다. θ 가 추정된 작은 오프셋인 경우 수학적 4로부터 $\theta_1 = \text{atan2}(C_1^0 + O, C_1^{90} + O)$ 와 $\theta_2 = \text{atan2}(-C_2^{180} + O, -C_2^{270} + O)$ 이 된다. 변조 콘트라스트가 두 변조 주파수들 f_1 및 f_2 에 있어 유사하고, $\theta_1 \approx \theta_2$ 이면, $C_1^0 \approx C_2^{180}$ $C_1^{90} \approx -C_2^{270}$ 이고 $\theta_1 \approx \text{atan2}(C_1^0 + O, C_1^{90} + O)$ 및 $\theta_2 \approx \text{atan2}(C_1^0 - O, C_1^{90} - O) + \pi$ 이 된다. 그와 같이 위상들 θ_1 와 θ_2 은 오프셋 0를 기준으로 대략 동일한 정도로 반대 방향으로 이동한다. 따라서 바람직하게는 오프셋 0의 효과는 합 $\theta_E = (\theta_1+\theta_2)/2$ 을 통해 부분적으로 상쇄될 것이다. 일부 진보된 TOF 시스템들에서 TOF 픽셀들은 각각의 캡처에서 하나 이상의 위상이

나 변조 주파수를 획득할 수 있다. 예를 들어 그러한 다중 위상 캡처 픽셀들은 마치 그들이 C_1^0 과 C_1^{90} 을 캡처한 것처럼 효과적으로 기능한다. 그러한 효과적 기능은 예컨대 서로 다른 변조 주파수들 및/또는 위상들 사이의 신속한 타임 슬라이싱 또는 타임 멀티플렉싱에 의하거나, 서로 다른 변조 주파수들 및/또는 위상들에서 동작하는 여러 검출기들을 이용함으로써 주입될 수 있다. 그러한 픽셀들을 사용하여 디앨리어싱된 프레임에 대한

시퀀스들을 구성하는 시간이 상당히 단축된다. 앞서 기술된 기본적인 방법론이 여기에서 동일하게 유지된다.

[0077] 지금까지 다양하게 기술된 디앨리어싱 실시예들은 무손실이었다, 예컨대 디앨리어싱이 매우 적은 TOF 시스템 성능 불이익을 가지고 실행되었다. 손실을 가진 소위 최소 공통 다중(LCM: least common multiple) 디앨리어싱 실시예가 이제 도 5a 및 5b를 참조하여 기술될 것이다. 도 5a 및 5b에서 두 개의 변조 주파수들 f_1 및 f_2 를 사용한 두 개의 거리 계측이 이루어지며, 여기서 주파수들 Z_{AIR1} 및 Z_{AIR2} 는 관련된 최대 명확 앨리어싱 인터벌 범위들을 나타낸다. 도 5a에서 f_1 은 25MHz이고 Z_{AIR1} 은 3M이며 도 5b에서 f_2 는 보다 낮은 18.75MHz이고 Z_{AIR2} 는 보다 긴 4M이다. 타겟 오브젝트는 TOF 센서 어레이로부터 7m 상에 존재한다고 가정한다. 단일 변조 주파수 $f_1=25\text{MHz}$ 가 데이터를 획득하는데 사용되는 경우, 오브젝트의 Z 거리는 도 5a의 빗금친 직사각형 영역들에 의해 제시되는 것과 같은 1m, 4m, 7m, 또는 12m임을 추정할 수 있다. 반면, 단일 변조 주파수 $f_2=18.75\text{MHz}$ 가 사용되면, 타겟 오브젝트는 거리는 도 5b의 빗금친 직사각형 영역들에 의해 제시되는 것과 같은 3m, 7m 또는 11m 상에 있다고 추정할 수 있다.

[0078] LCM 실시예에 따르면, 상기 두 결과들이 결합되어 타겟 오브젝트가 7m 거리 상에 있다는 결론에 이를 수 있다. 타겟 오브젝트는 도 5a 및 도 5b에서 허상으로 그려진 허상 위치들과 구분되도록 굵은 선으로 그려진다. 타겟 오브젝트의 실제 위치는 아직도 19M 상의 또 다른 거리와 혼동될 수 있으나, 하나의 변조 주파수 케이스와 비교할 때, 두 개의 변조 주파수들의 사용이 명확한 인터벌 범위를 실질적으로 확장시켰다. 제12/459,033호 출원에 따르면 두 개의 변조 주파수들이 사용된 경우 유효 명확 인터벌 범위는 Z_{AIR1} 및 Z_{AIR2} 의 LCM 최소 공통 다중에 따라 증가된다. 변조 주파수들을 선택하는 하나의 전략은 서로 인접한 두 개의 주파수를 선택함으로써 상응하는 명확한 인터벌 범위들의 LCM을 극대화하는 것이다.

[0079] 제12/459,033호 출원의 또 다른 실시예는 디앨리어싱에 대해 손실 있는 소위 브랜치 및 바운드(branch and bound) 계층적 접근 방식을 제공한다. 이 실시예에 따르면, 상대적으로 매우 낮은 변조 주파수가 타겟 오브젝트가 제1 Z 범위에 있는지 제2 Z 범위에 있는지 빈(bin) 안에 있는지, 예컨대 0m 내지 50m 사이에 있는지 여쭙면 50m에서 100m 사이에 있는지 여부를 판단하는데 사용될 수 있다. TOF 시스템(200)이 타겟 오브젝트가 말하자면 0m에서 50m 내에 있다고 판단한 경우, 소프트웨어(200)는 타겟 오브젝트가 0m에서 25m 하위 범위(또는 보다 좁은 빈) 안이나 25m 내지 50m 하위 범위(또는 보다 좁은 빈) 안에 있는지 여부를 판단하기 위해 클럭(180')이 변조 주파수를 두 배가 되게 하도록 할 수 있다. 오브젝트가 초기에 50m 내지 100m 범위에 있다고 발견되었을 때 유사한 분석 및 변조 주파수 변경이 수행된다. 이러한 타겟 오브젝트에 대한 거리 범위를 산정하고 그 후 그 거리 범위를 보다 잘 찾아내기 위해 변조 주파수를 변경하는 방법이 그 범위가 원하는 범위의 세분도를 가지고 판단될 때까지 반복됨이 바람직하다. 또한 이 방법은 소프트웨어(220)의 명령 하에서 자동으로 수행됨이 바람직하다. 물론 이러한 예는 다양한 대안적 범위들이나 빈들이 2배 떨어져 있다고 추정하였지만 다른 비율도 사용될 수 있다.

[0080] 브랜치 및 바운드 계층적 디앨리어싱 프로세스 중에 각각의 변조 주파수에서 완전한 확실성(가령, 최선의 세분도)을 획득할 필요는 없다. 보다 낮은 변조 주파수들에 대해 보다 낮은 분해능을 얻는 것으로 충분할 수 있다. 예를 들어 0m 내지 50m, 및 50m 내지 100m 범위의 빈들 사이를 결정하기 위해 매우 조악한 수준의 분해능으로 충분하다. 예를 들어 시스템(200)에 의해 획득되는 최고 품질 깊이 이미지가 말하자면 10 비트를 사용하는 경우 매우 조악한 수준의 분해능은 오직 3 내지 4 비트의 분해능을 필요로 할 수 있다. 따라서 바람직하게는 낮은 변조 주파수에서의 캡처들이 그러한 완화된 요건을 반영하기 위해 짧은 셔터 시간을 가질 수 있다. 일반적으로 변조 주파수들, 예컨대 1MHz, 10MHz, 100MHz의 계층적 스위프(sweep)을 위해 셔터는 최고 스위프된 주파수, 여기서는 100MHz 외 모두에 대해 짧을 것이다. 그러한 것은 바람직하게도 센서 어레이가 낮은 변조 주파수들에서 동작되는 노출 시간의 정도를 줄이며, 이것은 효과적 성능을 한층 더 지원한다.

[0081] 브랜치 및 바운드 계층적 디앨리어싱을 이용하여 각각의 상대적으로 낮은 변조 주파수에 대한 빈들의 개수를 최소화하는 것이 바람직한 것임을 이해할 수 있다. 이어서 계층적 변조 주파수 스위프 프로세스는 각각의 보다 낮은 변조 주파수에서의 분해능 요건을 가능한 한 적게 유지함으로써 효과적인 시스템 TOF 변조 주파수를 극대화하기 쉽다. 원하는 경우 브랜치 앤 바운드 실시예는 계층적 프로세스의 하나 이상의 단계들에서 무손실 디앨리어싱 실시예와 결합될 수 있다.

[0082] 상기 설명은 손실을 가진 계층적 타입 디앨리어싱 실시예들에 관한 것이었다. 제12/459,033호 출원의 무손실 계층적 디앨리어싱 실시예가 이제부터 기술될 것이다. 앞서 여기에서는 $\theta_D * f_E / f_D / 2\pi$ 이 실질적으로 0.5 미만

이어야 한다는 것이 보여졌다. 매우 긴 엘리머싱 인터벌이 요망되는 일 실시예에서, 상대적으로 높은 변조 주파수들 f_1 및 f_2 의 사용은 매우 커서 $\theta_D * f_E / f_D / 2\pi \ll 0.5$ 을 유지하기 어렵게 하는 f_E / f_D 비율을 가져온다. 그러한 응용예들에 있어서 무손실 디엘리어싱 방법이 역시 계층적으로 적용될 수 있다. 이러한 방식으로 잡음에 대한 고려에 따라 관리되고 소프트웨어(220)에 의해 제어되는 계층적 프로세스의 각 단계에서 비율 f_E / f_D 은 상대적으로 작게 유지된다.

[0083] 변조 주파수들 $f_a = 100\text{MHz}$, $f_b = 110\text{MHz}$, $f_c = 111\text{MHz}$ 이 사용되고 차이 주파수들 $D_1 = f_b - f_a = 10\text{MHz}$, $D_2 = f_c - f_a = 11\text{MHz}$ 로 규정되며 차이 주파수 $E_1 = D_2 - D_1 = 1\text{MHz}$ 가 계층적으로 적용되는 이하의 예를 고려할 수 있다.

[0084] 소위 톱-다운 스위프(top-down sweep)에서 D_1 및 D_2 에 대해 획득된 위상 데이터를 디엘리어싱 하기 위해 최초로 주파수 E_1 이 사용된다. 이 초기 단계에서 $f_1 = D_1$, $f_2 = D_2$ 그리고 $f_D = E_1$ 이다. 비율 f_E / f_D 는 바람직하게는 그다지 크지 않으며 여기서는 대략 10이다. 따라서, 이 예에서 디엘리어싱된 Z 값들은 유효 주파수 $\theta_E = (\theta_1 + \theta_2) / 2$ 에 대해 구해질 수 있다.

[0085] 계층적 단계에서 한 단계 내려가면, 위에서 구해지고 디엘리어싱된 θ_E 의 값이 이제 유효 주파수 $0.33(f_a + f_b + f_c)$ 및 유효 위상 $\theta_E = 0.33(\theta_a + \theta_b + \theta_c)$ 에 대한 디엘리어싱 위상 θ_D 으로서 현재의 단계에서 사용될 것이다. 바람직하게는 비율 f_E / f_D 가 상대적으로 작게, 여기에서 대략 10으로 유지된다는 것을 알

아야 한다. 이러한 방식으로, 계층구조의 기저로서 θ_E 는 $0.33(100\text{MHz} + 110 + 111\text{MHz})$, 예컨대 100MHz에 가깝고, 또한 약 150M의 Z_{AIR} 에서 그 주파수가 $E_1 = 1\text{MHz}$ 인 것처럼 디엘리어싱되었다.

[0086] 또한, TOF 시스템(200)이 반드시 물리적으로 변조 주파수 $f_c = 111\text{MHz}$ 인 위상 데이터를 획득하는 것은 아니다. 주파수 f_c 는 수학적으로, 예컨대 $f_c = (110\text{MHz} + 100\text{MHz}/100)$, 가령, $f_b + (f_a)/100$ 으로서 산출될 수 있다. 따라서 오직 주파수 f_a 및 f_b 만이 TOF 시스템에 의해 물리적으로 계층되어야 한다.

[0087] 요약하면, 제12/459,033호 출원의 실시예들에 따른 디엘리어싱은 무손실이며 낮은 변조 주파수와 어울리는 상대적으로 큰 엘리머싱 인터벌 범위를 제공하였다. 이 실시예들은 또한 최고 변조 주파수 f_m 에 인접한 변조 주파수에 어울리는 주어진 Z 값에 대한 높은 정밀 확실성을 제공한다. 디엘리어싱은 실시예에 따라 상대적으로 무손실로 혹은 손실을 가진 상태로 수행될 수 있다.

[0088] 이제 도 6을 참조하면, 위상 기반 TOF 시스템(300)이 본 발명을 구현한다. TOF 시스템(300)은 도 1a의 클록 유닛(180)에 대해 변형될 수 있는 클록 유닛(180")을 포함하고, 혹은 대안적으로 하드웨어(310) 및/또는 소프트웨어(320)를 포함한다. 소프트웨어(320)는 그러나 프로세서(160)에 의해 실행될 필요가 없을 수 있다. 이러한 하드웨어 및/또는 소프트웨어는 이제부터 기술될 본 발명의 다양한 실시예들을 구현한다.

[0089] 이 안에서 앞서 제시된 수학적 2 및 수학적 8로부터 명확한 범위 Z를 보여주는 이하의 관계들은 변조 주파수 f와 반비례한다는 것을 상기하자.

[0090]
$$Z = \frac{c}{2f} \times \frac{\theta}{2\pi} = \frac{\theta c}{4\pi f} \quad \text{및} \quad Z = \frac{C}{4\pi} \frac{\Delta\theta}{\Delta f}$$

[0091] 여기서 $\Delta f = f_D = f_1 - f_2$, 위상 $\Delta\theta = \theta_D = \theta_1 - \theta_2$ 이다. 두 개의 주파수 디엘리어싱의 잡음에 대한 바람직하지 못한 감도가 도 3에서 보여지며, 여기서 θ_{DS} 와 θ_D 의 관계는 다음과 같이 주어진다.

[0092]

$$\theta_{DS} = \frac{f_E}{f_D} \theta_D$$

[0093]

여기서 $f_E = \frac{f_1+f_2}{2}$ 이고, $\theta_D = \theta_1 - \theta_2$ 은 f_D 와 관련된 위상이고, $\theta_E = \frac{\theta_1+\theta_2}{2}$ 는 f_E 와 관련된 위상이다. 위상 θ_D 은 주파수 기울기가 상기 수학식으로 주어지는 θ_{DS} 을 산출하도록 스케일링되었다. $\theta_{DS} \cong \theta_E + 2n\pi$ 라는 것을 알아야 한다.

[0094]

공교롭게도 잡음 존재 시 디앨리어싱의 어려움은 비율 $\frac{f_E}{f_D}$ 이 증가하면서 높아진다. 이는 θ_E 가 θ_{DS} 를 산출하는데 사용될 때 θ_E 에 존재하는 잡음이 이 비율에 의해 증폭될 것이기 때문이다. 따라서, 높은 변조 주파수(큰 유효 주파수 f_E 에 상응)나 매우 큰 명확한 범위(작은 차이 주파수 f_D 에 상응)에 대해, 그렇게 증폭된 잡음은 디앨리어싱 인터벌 K 를 산정함에 있어 예러가 포함된 결과들을 도출할 것이고 명확한 범위 중간에서의 디앨리어싱을 유도할 것이다. 이것은 비율 $\frac{f_E}{f_D}$ 이 증가하거나 감소될 때 θ_{DS} 의 각도(또는 기울기)가 $\theta_{DS} \cong \theta_E + 2n\pi$ 와 같이 증가했거나 감소했다고 가정한 경우 도 3으로부터 자명해진다. 따라서 증가된 비율 $\frac{f_E}{f_D}$ 은 θ_D 의 증폭된 잡음을 나타내며 잘못된 디앨리어싱 결정에 기여하기 때문에 바람직하지 못하다. 바람직한 것은 동시에 작은 비율을 유지하면서 작은 f_D 와 관련된 디앨리어싱 범위 및 큰 f_E 와 관련된 깊이의 정밀도를 얻는 것이다. 이것은 이제보일 보여지겠지만 바람직하게는 적어도 세 개의 변조 주파수들을 사용하여 달성된다. 본 발명의 실시예들은 θ_E 내 잡음의 매우 큰 증폭으로 인해 비롯되는 앨리어싱 문제들을 피하기 위한 n 단계의 계층적 디앨리어싱 접근 방식을 바람직하게 이용한다.

[0095]

m 개의 변조 주파수들 f_1, f_2, \dots, f_m ($f_1 > f_2 > \dots > f_m$) 존재하고 TOF 시스템(300)이 $Z_D = \frac{\phi c}{4\pi f_D}$. $Z_D = \frac{\phi c}{4\pi f_D}$ 에서와 같은 주파수 f_D 에 상응하는 명확한 범위 Z_D 를 얻는것이 요망된다고 가정할 수 있다. 일 실시예는 유효 주파수 f_E 의 거리 분해능을 디앨리어싱 및 달성하기 위해 f_D 를 사용하며, 여기서 $f_E = g_0(f_1, f_2, \dots, f_m)$ 는 변조 주파수들 f_1, f_2, \dots, f_m 의 함수, 바람직하게는 산술적 평균 또는 가중 평균이다.

[0096]

한 단계 디앨리어싱에서 유효 주파수 f_E 에 대한 위상을 디앨리어싱하기 위해 f_D 를 사용하는 대신, 본 발명의 실시예들은 $N-1$ 개의 중간 주파수들 $f_{DE1}, f_{DE2}, \dots, f_{DE(N-1)}$ 의 집합을 생성함이 바람직하며, 여기서 $f_D < f_{DE1} < f_{DE2} < \dots < f_{DE(N-1)} < f_E$ 이다.

[0097]

$f_D < f_{DE1} < f_{DE2} < \dots < f_{DE(N-1)} < f_E$. 중간 주파수들 각각은 $f_{DEk} = g_k(f_1, f_2, \dots, f_m)$ 에 서와 같이 변조 주파수들 f_1, f_2, \dots, f_m 의 함수이며, 여기서 $k=1,2,3,\dots,N-1$.

[0098]

$f_{DEk} = g_k(f_1, f_2, \dots, f_m)$ 이고, 여기서 $k=1,2,3,\dots,N-1$ 이며 $f_{DE0} = f_D$ 이고 $f_{DEN} = f_E$ 라 하

자.

[0099] 계층적 디엘리어싱의 각 단계에서, 바람직한 방법은 $\theta_{DEk_scaled} \cong \theta_{DE(k+1)} + m_k 2\pi$, $w\theta_{DEk_scaled} \cong \theta_{DE(k+1)} + m_k 2\pi$ 이고 여기서

$\theta_{DEk_scaled} = \frac{f_{DE(k+1)}}{f_{DEk}} \theta_{DEk}$ 이 되도록 올바른 디엘리어싱 인터벌 m_k 를 찾음으로써 $f_{DE(k+1)}$ ($k = 0, 1, \dots, N-1$) 위상 $\theta_{DE(k+1)}$ 을 이용하여 f_{DEk} 의 위상 θ_{DEk} 을 디엘리어싱한다.

[0100] f_E 에 대한 최종 언래핑된(unwrapped) 위상이 다음과 같이 주어질 것이다.

[0101]
$$\theta_E + m_{N-1} 2\pi + m_{N-2} \frac{f_{DE(N-1)}}{f_{DE(N-2)}} 2\pi + \dots + m_k \frac{f_{DE(k+1)}}{f_{DEk}} 2\pi + \dots + m_1 \frac{f_{DE1}}{f_D} 2\pi$$

[0102] 중간 주파수들의 개수 $N-1$ 과 각각의 연속적인 쌍의 주파수들 사이의 비율 $\frac{f_{DE(k+1)}}{f_{DEk}}$ 이 바람직하게 깊이의 불확실성에 의해 결정된다. 경험적으로, 바람직하게는 각 단계에서 증폭 비율의 불확실성은 m_k 를 잘못 선택할 확률이 낮도록 충분히 작다.

[0103] 이단계(삼단계) 계층적 디엘리어싱을 구현하는 실시예들이 도 6 및 도 7a-7d를 참조하여 지금부터 설명될 것이다. 이단계 계층적 디엘리어싱에 있어서 적어도 $N=3$ 변조 주파수들이 필요로 된다. 시스템의 전체 명확한 범위가 f_D 에 의해 결정되며, 그것은 세 개의 변조 주파수들의 함수이다.

[0104] 이하에서 도 3에 보여지는 바와 같이, 제1위상 θ_D 은 f_D 가 어떤 중간 주파수 f_{DE} 의 위상 θ_{DE} 을 디엘리어싱하는데 사용되고, θ_{DE} 에 대한 올바른 디엘리어싱 인터벌 m 은 $\theta_{DS} \cong \theta_{DE} + m 2\pi$ 이 되도록 사용된다.

[0105] 계층적 디엘리어싱의 제2단계에서, θ_{DE} 의 각각의 디엘리어싱 인터벌은 $\theta_{DS} \cong \theta_E + n 2\pi$ 가 되도록 올바른 디엘리어싱 인터벌 n 을 찾음으로써 유효 주파수 f_E 의 유효 위상 θ_E 을 디엘리어싱하는데 사용된다.

[0106] 이제 도 7a-7d를 고려한다. 두 디엘리어싱 단계들의 결합이 $\theta_E + n 2\pi + m \frac{f_{DE}}{f_D} 2\pi$ 로서의 θ_E 에 대한 최종 디엘리어싱의 결정을 가능하게 한다.

[0107] 디엘리어싱 단계들에 대한 증폭 비율은 각각 $\frac{f_{DE}}{f_D}$ 와 $\frac{f_E}{f_{DE}}$ 임을 알아야 한다. 바람직하게도 이 방법은

$\frac{f_E}{f_D} = \frac{f_{DE}}{f_D} \times \frac{f_E}{f_{DE}}$ 로 θ_E 내의 잡음을 증폭하지 않으면서 그 큰 비율을 얻는다. 디엘리어싱 인터벌들 m 및 n 이 각자 정해지고 각각의 방법 단계에서 훨씬 적은 비율로 잡음이 증폭되기 때문에 유용한 결과가 일어난다.

[0108] 이단계의 계층적 디엘리어싱에 대한 전형적인 알고리즘의 세부사항들이 지금부터 도 7a-7d를 참조하여 기술될 것이다. 이 단계들은 바람직하게는 TOF 시스템(300), 예컨대 클록 유닛(180") 및/또는 모듈들(310, 320)을 가지고 수행된다는 것을 알 수 있다. 본 발명의 실시예들은 바람직하게는 적어도 세 개의 변조 주파수들을 사용

한다. 세 개의 변조 주파수 f_1 , f_2 , 및 f_3 가 주어질 때, TOF 시스템 최대 변조 주파수 f_m 에 최대한 가까운 유효 주파수 f_E 를 얻는 것이 바람직하다. $f_D = f_1 - f_2$ 가 전체 디앨리어싱 범위와 관련된 가장 느린 주파수로서 지정

$$f_E = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3}$$

된다고 하고, $f_{DE} = f_1 - f_3$ 는 중간 주파수로서 지정된다고 하자. 최종 유효 주파수는 일 수 있고 혹은 f_1 , f_2 및 f_3 의 다른 가중 선형 결합일 수 있다.

[0109]

도 7a에 도시된 바와 같이, 먼저 어떤 중간 주파수 f_{DE} 의 위상 θ_{DE} 을 디앨리어싱하기 위한 주파수 f_D 의 위상

θ_D 및 $\theta_{DS} \cong \theta_E + m2\pi$ 가 되도록 위상 θ_{DE} 의 올바른 디앨리어싱 인터벌을 사용할 수 있다. 도 7b

에 도시된 바와 같이, $\theta_{DES} \cong \theta_E + n2\pi$ 가 되도록 올바른 디앨리어싱 인터벌 n 을 찾음으로써 유효 주파

수 f_E 의 유효 위상 θ_E 을 디앨리어싱하기 위해 이제 θ_{DE} 의 각각의 디앨리어싱 인터벌을 사용할 수 있다.

도 7c 및 7d는 위상 θ_{DES} 을 사용하여 개별 주파수 f_i (세 개의 주파수에 대해 $i=1, 2$, 또는 3)의 위상 θ_i 을

어떻게 디앨리어싱할지를 묘사한다. 예를 들어 도 7c는 θ_{DE} 및 θ_i 가 서로 다른 거리에서 랩어라운드할 가

능성이 있다는 것을 보여준다. 따라서 θ_{DE} 의 최초 사이클 이상의 위상을 디앨리어싱할 수 없다. (도 7a에

도시된 것과 같이 θ_{DS} 을 디앨리어싱하기 위해, 도면에 도시된 네 사이클 전부에 대한 θ_{DE} 을 디앨리어싱

해야 할 것이다.) 도 7d는 오프셋 정정된 위상 θ_i^{offset} 을 산출할 수 있다는 것을 보여주며, 그것은 항상

θ_{DES} 의 각 사이클 시작 시 0 위상에서 시작할 것이다. 그 후 이 오프셋 정정된 위상을 사용하여 θ_{DES} 의

여러 사이클들에 걸친 위상 θ_i 을 디앨리어싱할 수 있다.

[0110]

따라서, 제1방법의 단계는 $f_D = f_1 - f_2$ 을 이용하여 $f_{DE} = f_1 - f_3$ 를 디앨리어싱하는 것이다. θ_1 은 f_1 의 위상

이고 θ_2 는 f_2 의 위상이고 θ_3 는 f_3 의 위상이라고 하자. 먼저

$\theta_1^{unwrap-2}$, $\theta_1^{unwrap-2} = \theta_1 + 2\pi * (\theta_1 < \theta_2)$ 을 얻기 위해 θ_2 을 사용하여 θ_1 을 언래핑하고

$\theta_1^{unwrap-3}$ 을 얻기 위해 θ_3 을 사용하여 θ_2 을 언래핑할 필요가 있다. 그 후 $f_D = f_1 - f_2$ 에 대

한 위상을 $\theta_D = \theta_1^{unwrap-2} - \theta_2$ 로서 얻을 수 있고, $f_{DE}=f_1-f_3$ 에 대한 위상을

$\theta_{DE} = \theta_1^{unwrap-3} - \theta_3$ 로서 얻을 수 있다.

[0111]

이제 θ_{DE} 와 같은 기울기로 θ_D 을 재스케일링하고 θ_{DS} 을 생성할 수 있으며, 여기서

$\theta_{DS} = \frac{f_{DE}}{f_E} \theta_D = \frac{f_1 - f_3}{f_1 - f_2} \theta_D$ 이다. 제1단계를 완료한 후, 다음으로 $m=0,1,2,\dots$ 인 $|\theta_{DS} - (\theta_{DE} + m2\pi)|$ 을 최소화함으로써 올바른 디앨리어싱 인터벌 m 을 찾을 수 있다.

[0112] 이제 $f_{DE} = f_1 - f_3$ 로부터 $f_E = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3}$ 의 디앨리어싱을 수반하는 이 방법의 단계 2를 고려하

자. f_E 를 디앨리어싱하는 것이 바람직하지만, 올바른 랩어라운드 방법을 통해 $f_E = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3}$ 에 대응하는 위상을 얻을 수 없기 때문에 그것은 바로 수행될 수 없다. 대신 본 발명의 실시예들은 $f_1, f_2,$ 및 f_3 을 각

각 디앨리어싱하고 언래핑된 위상들 $\phi_1 = \theta_1 + n_1 2\pi, \phi_2 = \theta_2 + n_2 2\pi,$ 및 $\phi_3 = \theta_3 + n_3 2\pi$ 을 얻는다.

[0113] $f_E = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3}$ 에 대해 언래핑된 위상이 $\phi_E = \frac{\phi_1 + \phi_2 + \phi_3}{3}$ 로서 산출될 수 있다.

[0114] 언래핑된 위상 ϕ_i 을 얻기 위해 $f_i (i=1, 2, 3)$ 를 디앨리어싱하는 것이 이제 도 7c 및 7d를 참조하여 기술될 것이다. 도 7c에 도시된 바와 같이, θ_{DE} 및 θ_i 는 주파수 차이로 인해 상이한 Z 거리에서 랩어라운드할 가능성이 높다. 이것은 주파수들에 대한 추가적 구속요건, 예컨대 θ_i 이 θ_{DE} 의 배수라는 등의 구속요건이 부과되지 않는다면 디앨리어싱의 제2단계에서 문제를 야기할 것이다. 그렇지 않고 만일 θ_{DE} 을 사용하여 θ_i 을 디앨리어싱하기 위한 제1단계로서 디앨리어싱 방법을 바로 적용하면 나머지 사이클에서 θ_i 와 θ_{DE} 이 동일한 위치에서 시작하지 못할 것이기 때문에 θ_{DE} 의 최초 사이클만을 디앨리어싱할 수 있을 것이고 $\theta_{DES} \cong \theta_i + n_i 2\pi$ 의 관계를 만족시킬 수 없다.

[0115] 도 7d를 참조하면, 주파수들의 선택을 제한하는 추가 구속요건들을 더하는 것을 피하기 위해 "오프셋 정정" 방법이 사용됨이 바람직하다. 먼저, θ_{DES} 및 θ_{DES} 의 랩어라운드에 의해 야기된 θ_i 의 오프셋을 제거하고 오프셋 정정된 위상 θ_i^{offset} 을 산출할 수 있다. 오프셋 정정된 위상 θ_i^{offset} 은 항상 θ_{DES} 의 각 사이클의 시작 시에 0 위상에서 시작할 것이다. 그러면 $i=1, 2, 3$ 인 경우 $n_i=0,1,2,\dots$ 에 대해 $|\theta_{DES} - (\theta_i^{offset} + n_i 2\pi)|$ 을 최소화함으로써 올바른 디앨리어싱 인터벌을 찾을 수 있다.

[0116] 각각의 주파수 f_i 에 대해 언래핑된 위상이 다음과 같이 산출된다.

[0117]
$$\phi_i = \theta_i^{offset} + n_i 2\pi + m \frac{f_{DE}}{f_D} 2\pi$$

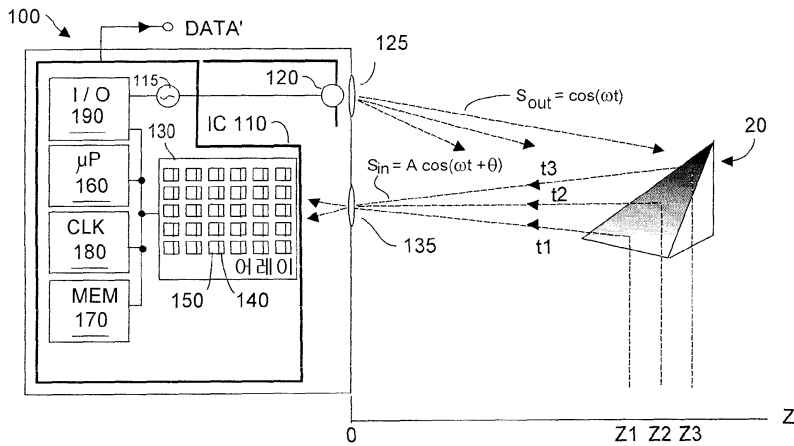
[0118]
$$f_E = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3}$$
에 대해 언래핑된 위상은 이제 $\phi_E = \frac{\phi_1 + \phi_2 + \phi_3}{3}$ 이다.

[0119]

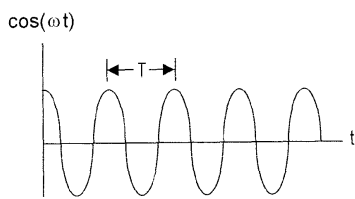
바람직한 실시예들에 대한 설명으로부터 본 발명은 잡음이 존재할 때조차 기능하는 TOF 시스템으로 계층적 디앨리어싱을 지원한다는 이해될 것이다. 바람직하게는, 느린 디앨리어싱 주파수 및 계층적으로 긴 거리를 디앨리어싱하기 위해 사용될 수 있는 적어도 한 개의 중간 주파수를 생성하기 위해 서로 인접한 N , $N \geq 3$ 개의 주파수들이 사용될 수 있다. 유리하게는, 두 주파수 디앨리어싱에서와 같이 매우 큰 비율로 잡음을 증폭하기보다는, 본 발명의 실시예들은 단지 각각의 디앨리어싱 단계에서 작은 비율로 잡음을 증폭한다. 이하의 청구범위에서 규정된 것과 같은 본 발명의 주제와 사상으로부터 벗어나지 않으면서 개시된 실시예들에 대한 변형 및 변경이 이루어질 수 있다.

도면

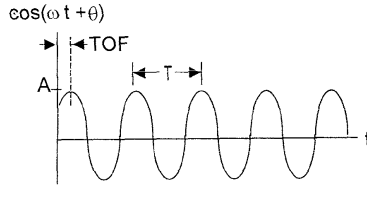
도면1



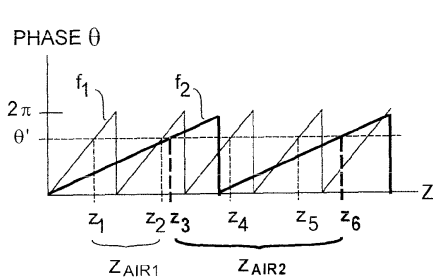
(a) (종래기술)



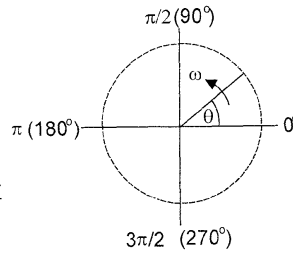
(b) (종래기술)



(c) (종래기술)

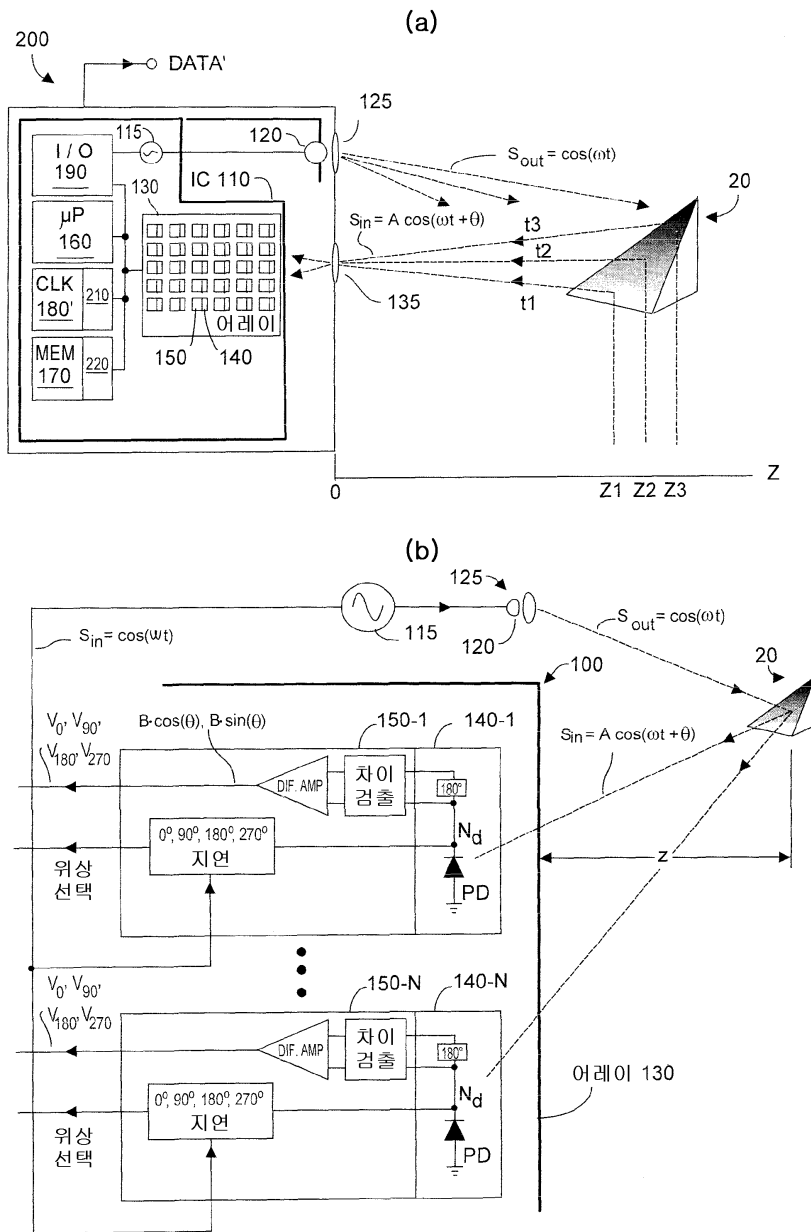


(d) (종래기술)

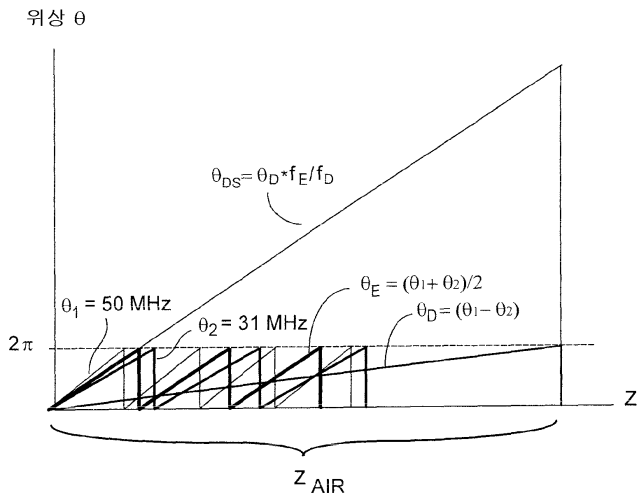


(e) (종래기술)

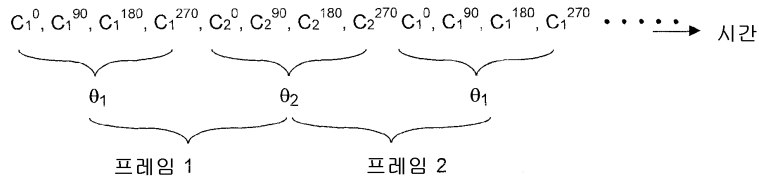
도면2



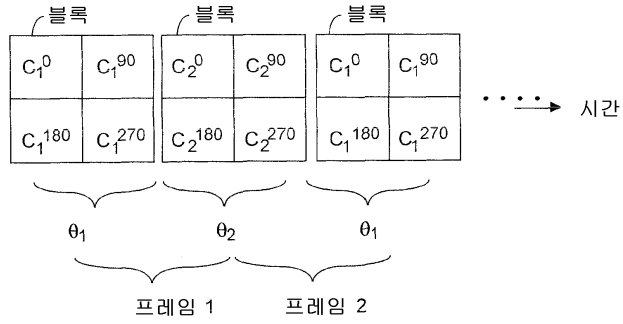
도면3



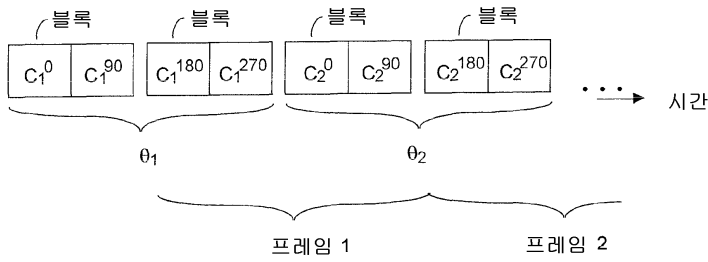
도면4



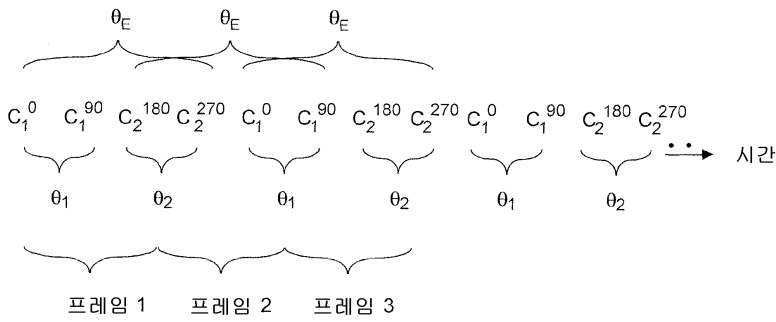
(a)



(b)

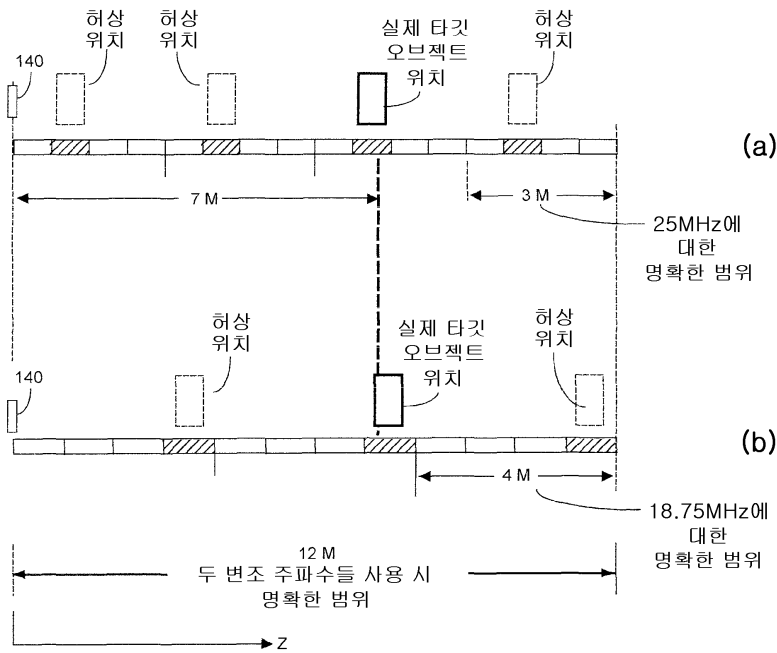


(c)

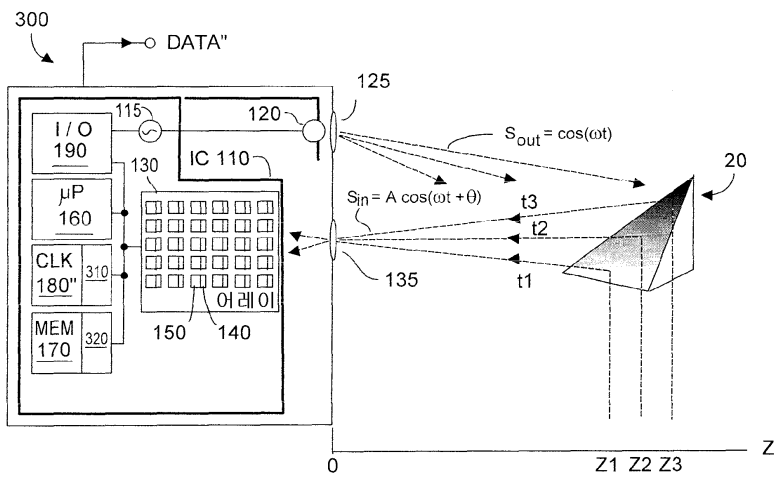


(d)

도면5



도면6



도면7

