(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0085668
(43) 공개일자 2025년06월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01S 7/4861 (2020.01) *G01S 17/931* (2020.01)
H03M 1/12 (2006.01) *H03M 1/66* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01S 7/4861 (2013.01)
G01S 17/931 (2020.01)
(21) 출원번호 10-2024-0179912
(22) 출원일자 2024년12월05일
심사청구일자 2024년12월05일
(30) 우선권주장
1020230174588 2023년12월05일 대한민국(KR)

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
김용신
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교안암캠퍼스
곽승수
서울특별시 강남구 일원로5길 78, 302호
(74) 대리인
김등용

전체 청구항 수 : 총 6 항

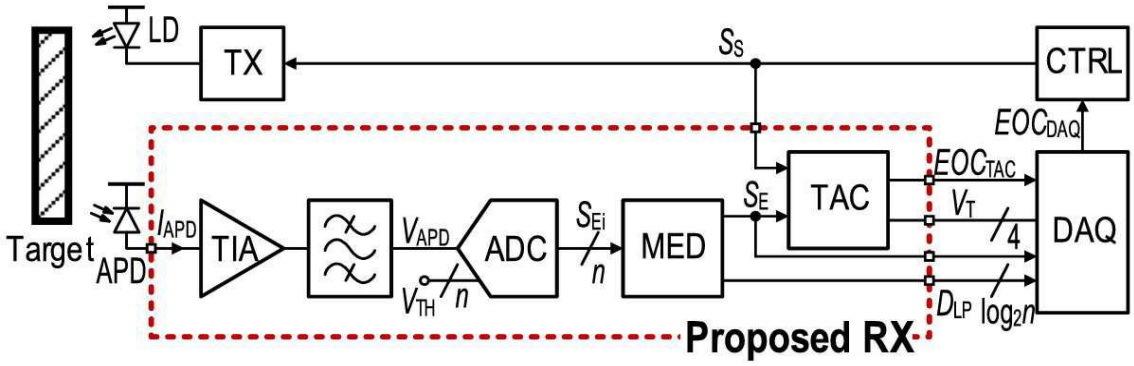
(54) 발명의 명칭 **펄스 방식의 LiDAR에 쓰이는 다중 이벤트 검출 광수신기**

(57) 요 약

펄스 방식의 LiDAR(Light Detection and Ranging)에 쓰이는 다중 이벤트 검출 광수신기와 이를 포함하는 LiDAR가 개시된다. 일 실시예에 따른 펄스 방식의 LiDAR는 다중 이벤트를 감지하는 광 수신기를 포함하고, 상기 광 수신기는, 타겟에 의해 반사된 광에 대응하는 전류(I_{APD})를 생성하는 APD(Avalanche Photodiode), 상기 APD의 출력

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도5



을 전압으로 변환하는 TIA(Trans-Impedance Amplifier), 상기 TIA의 출력을 수신하고 노이즈가 제거된 전압(V_{APD})를 출력하는 BPF(Band-Pass Filter), n(n은 2 이상의 자연수) 개의 임계 전압을 이용하여, n-비트의 엔드 신호(S_{Ei})를 생성하는 ADC(Analog-to-Digital Converter), 상기 n-비트의 엔드 신호(S_{Ei})를 수신하고 상기 반사된 광의 국소 피크들(local peaks) 각각에 대한 엔드 신호(S_E)를 출력하는 MED(Multi-event Detector), 및 상기 엔드 신호(S_E)와 시작 신호(S_S)를 수신하고, 상기 시작 신호(S_S)와 상기 반사된 광의 국소 피크들 각각 사이의 거리 정보를 포함하는 전압(V_{TAC})을 출력하는 TAC(Time-to-Amplitude Converter)를 포함한다.

(52) CPC특허분류
H03M 1/124 (2019.01)
H03M 1/66 (2019.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711186884
과제번호 2021R1A2C2014652
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 개인기초연구(과기정통부)
연구과제명 모바일 및 차량용 초고속 3D센싱을 위한 초소형 단일 패키지 LiDAR 연구
과제수행기관명 고려대학교
연구기간 2023.03.01 ~ 2024.02.29
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1545027279
과제번호 322029032HD080
부처명 농림축산식품부
과제관리(전문)기관명 농림식품기술기획평가원
연구사업명 노지분야스마트농업기술단기고도화
연구과제명 농작업 환경에 적용가능한 자율주행용 보급형 라이다 센서 기술개발
과제수행기관명 고려대학교 산학협력단
연구기간 2023.01.01 ~ 2023.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

다중 이벤트를 감지하는 광 수신기를 포함하는 펄스 방식의 LiDAR(Light Detection and Ranging)에 있어서, 상기 광 수신기는,

타겟에 의해 반사된 광에 대응하는 전류(I_{APD})를 생성하는 APD(Avalanche Photodiode);

상기 APD의 출력을 전압으로 변환하는 TIA(Trans-Impedance Amplifier);

상기 TIA의 출력을 수신하고 노이즈가 제거된 전압(V_{APD})를 출력하는 BPF(Band-Pass Filter);

n(n은 2 이상의 자연수) 개의 임계 전압을 이용하여, n-비트의 엔드 신호(S_{Ei})를 생성하는 ADC(Analog-to-Digital Converter);

상기 n-비트의 엔드 신호(S_{Ei})를 수신하고 상기 반사된 광의 국소 피크들(local peaks) 각각에 대한 엔드 신호(S_E)를 출력하는 MED(Multi-event Detector); 및

상기 엔드 신호(S_E)와 시작 신호(S_S)를 수신하고, 상기 시작 신호(S_S)와 상기 반사된 광의 국소 피크들 각각 사이의 거리 정보를 포함하는 전압(V_{TAC})을 출력하는 TAC(Time-to-Amplitude Converter)를 포함하는,

LiDAR.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 ADC는,

상기 n-비트의 엔드 신호(SEi)는,

각각이, 상기 전압(V_{APD})이 미리 정해진 임계 전압을 초과할 때 상승하고 미리 정해진 임계 전압에 미만되면 하강하는 펄스로 구현되는 엔드 신호들(S_{E0}, S_{E1}, …, $S_{E(n-1)}$)을 포함하는,

LiDAR.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 엔드 신호(S_E)는 상기 엔드 신호들의 폴링 엣지(falling edge)에 응답하여 상승하고 상기 엔드 신호들의 라이징 엣지에 대응하여 하강하는 펄스 신호인,

LiDAR.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 MED는,

상기 n-비트의 엔드 신호(SEi)를 기초로 생성되는, 상기 국소 피크들 각각의 강도 정보(intensity information)을 나타내는 신호(D_{LP})를 더 출력하는,

LiDAR.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 DAC는 상기 시작 신호(S_S)와 상기 엔드 신호(S_E)의 각 라이징 타임에 기초하여 상기 전압(V_{TAC})을 생성하는,

LiDAR.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 DAC는, 상기 시작 신호(S_S)가 하이(high) 상태로 설정된 이후부터 수행되는 상기 DAC에 포함되는 캐패시터의 충전 동작의 결과로써 생성되는 상기 캐패시터의 전압이 미리 정해진 전압(V_{limit})에 도달한 경우, EOC(End-Of-Conversion) 신호(EOC_{TAC})를 출력하는,

LiDAR.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 펄스 방식의 LiDAR(Light Detection and Ranging)에 관한 것으로, 특히 여러 개의 이벤트를 감지할 수 있는 광수신기 회로와 이를 포함하는 LiDAR에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] LiDAR는 자율주행, 군사 분야, 스마트 디바이스 등과 같은 다양한 필드에서 널리 활용되는 거리 측정 센서이다. LiDAR는 연속파(continuous-wave)와 펄스(pulsed) 방식의 두 가지 타입으로 분류된다. 이 중 펄스 방식의 라이다(Pulsed LiDAR)는, 낮은 복잡도, 높은 해상도, 높은 정확도, 및 빠른 샘플링 타임 등을 이유로 최근의 아웃도어 LiDAR 시스템으로 널리 활용된다. 그러나, 펄스 방식의 LiDAR의 정확도는, 다중 에코를 반사하는 공기 중의 입자들로 인해, 외부 간섭이나 안개, 비(rain), 눈과 같은 환경 조건에 크게 영향받을 수 있다. 도 1의 (a)는, 단일의 레이저 펄스가 방사된 이후에, 빗방울로부터 다수 에코가 수신되는 시나리오를 도시한다. 타겟으로부터의 거리를 감지하기 위해서 $Echo_3$은 유효한 정보이지만, $Echo_1$, $Echo_2$, 및 간섭(Interference)은 원치않은 신호에 해당한다. 종래 LiDAR는, 도 1의 (b)에 도시된 바와 같이, 첫번째로 도착한 $echo_1$에 기초하여 거리 정보를 결정한다. 이에 따라, 유효한 신호인 $echo_3$로부터 거리 정보를 추출하지 못한다. 더 긴 파장(wavelength)를 갖는 레이저 펄스는 용이하게 입자를 투과하고 이러한 문제를 완화하지만, 다른 소스들이나 공격으로부터의 간섭은 피할 수 없다.

[0003] 따라서, 다수 이벤트(multiple event)로부터 인스턴스 및 강도 정보(instance and intensity information)를 수신하고 유효한 신호를 식별하는 것은 펄스 방식의 LiDAR의 강건성을 향상시키는 데에 중요하다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허 제2022-0024177호 (2022.03.03. 공개)

비특허문헌

[0005] (비특허문헌 0001) S. Kurtti and J. Kostamovaara, "An integrated receiver channel for a laser scanner," in Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf., May 2012, pp. 1358-1361.

(비특허문헌 0002) H.-J. Kim, E.-G. Lee, and C.-Y. Kim, "A high-multi target resolution focal plane array-based laser detection and ranging sensor," Sensors, vol. 19, no. 5, p. 1210, Mar. 2019.

(비특허문헌 0003) M. Hintikka and J. Kostamovaara, "Experimental investigation into laser ranging with sub-ns laser pulses," IEEE Sensors J., vol. 18, no. 3, pp. 1047-1053, Feb. 2018.

(비특허문헌 0004) J.-E. Joo, S. Choi, Y. Chon, and S.-M. Park, "A low-cost measurement methodology for LiDAR receiver integrated circuits," Sensors, vol. 23, no. 13, p. 6002, Jun. 2023.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명이 이루고자 하는 기술적인 과제는 펄스 방식의 LiDAR(Light Detection and Ranging)에 쓰이는 다중 이벤트 검출 광수신기와 이를 포함하는 LiDAR을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0007] 본 발명의 일 실시예에 따른 펄스 방식의 LiDAR(Light Detection and Ranging)는 다중 이벤트를 감지하는 광수신기를 포함하고, 상기 광 수신기는, 타겟에 의해 반사된 광에 대응하는 전류(I_{APD})를 생성하는 APD(Avalanche Photodiode), 상기 APD의 출력을 전압으로 변환하는 TIA(Trans-Impedance Amplifier), 상기 TIA의 출력을 수신하고 노이즈가 제거된 전압(V_{APD})를 출력하는 BPF(Band-Pass Filter), n(n은 2 이상의 자연수) 개의 임계 전압을 이용하여, n-비트의 엔드 신호(S_{Ei})를 생성하는 ADC(Analog-to-Digital Converter), 상기 n-비트의 엔드 신호(S_{Ei})를 수신하고 상기 반사된 광의 국소 피크들(local peaks) 각각에 대한 엔드 신호(S_E)를 출력하는 MED(Multi-event Detector), 및 상기 엔드 신호(S_E)와 시작 신호(S_S)를 수신하고, 상기 시작 신호(S_S)와 상기 반사된 광의 국소 피크들 각각 사이의 거리 정보를 포함하는 전압(V_{TAC})을 출력하는 TAC(Time-to-Amplitude Converter)를 포함한다.

발명의 효과

[0008] 본 발명의 실시예에 따른 펄스 방식의 LiDAR에 쓰이는 다중 이벤트 검출 광수신기와 이를 포함하는 LiDAR에 의할 경우, 외부 또는 자연광에 의한 영향을 감소시켜 정확한 거리 측정이 가능하다.

도면의 간단한 설명

[0009] 본 발명의 상세한 설명에서 인용되는 도면을 보다 충분히 이해하기 위하여 각 도면의 상세한 설명이 제공된다.

도 1은 다수 에코와 간섭 하에서 동작하는 기존 LiDAR 시스템으로서, (a) 시나리오와 (b) 수신된 에코의 타이밍 정보를 도시한다.

도 2는 종래 LiDAR의 기본 블럭 다이어그램을 도시한다.

도 3은 종래의 비선형 3-스테이지 인버터 기반 TIA를 도시한다.

도 4는 다중 국소 피크가 존재할 때 종래 TD의 타이밍도를 도시한다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 LiDAR의 블럭도이다.

도 6은 다중 국소 피크를 감지하기 위한 4 개의 참조값을 갖는 TD의 타이밍도를 도시한다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 LiDAR로써(n =4), (a) MED의 블럭도, (b) MED와 TAC의 타이밍도, 및 (c) TAC의 블럭도를 도시한다.

도 8은 3pF 입력 커패시턴스를 갖는 도 3의 3-스테이지 인버터 기반 TIA의 주파수 응답을 도시한다.

도 9는 시간에 따른 V_{TI} 및 V_{TI}의 미분에 대한 시뮬레이션 결과를 도시한다.

도 10은 네 개의 이벤트를 갖는 제안된 TAC의 과도 시뮬레이션 결과(transient simulation results)를 도시한다.

도 11은 제안된 LiDAR의 마이크로그래프를 도시한다.

도 12는 제안된 LiDAR의 실험 설정을 도시한다.

도 13은 과도 디지털 출력에 대한 실험 결과를 도시한다.

도 14는 광 입력 파워에 기초하여 TIA를 정량화하기 위한 실험 결과를 도시한다.

도 15는, R_{TIA}가 5 kΩ(a)과 50 kΩ(b)로 설정될 때, V_{APD}의 측정된 피크 노이즈를 도시한다.

도 16은 오브젝트와 수신기 사이의 글라스의 물방울로 다중 이벤트를 생성하기 위한 실험 결과로써, (a) 다이오드 전류의 파형과 (b) 이의 FFT 결과를 도시한다.

도 17은 실험에 사용된 입력 APD 전류와 측정된 V_{APD}를 도시한다.

도 18은 디지털 코드 D_{LP}에 대한 실험 결과를 도시한다.

도 19는 TAC 출력 V_{TAC}와 V_{TAC}의 최대 에러를 도시한다.

도 20은 디지털 코드 D_{TAC}에 대한 실험 결과를 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0010] 본 명세서에 개시되어 있는 본 발명의 개념에 따른 실시예들에 대해서 특정한 구조적 또는 기능적 설명들은 단지 본 발명의 개념에 따른 실시예들을 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로서, 본 발명의 개념에 따른 실시예들은 다양한 형태들로 실시될 수 있으며 본 명세서에 설명된 실시예들에 한정되지 않는다.

[0011] 본 발명의 개념에 따른 실시예들은 다양한 변경들을 가할 수 있고 여러 가지 형태들을 가질 수 있으므로 실시예들을 도면에 예시하고 본 명세서에서 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명의 개념에 따른 실시예들을 특정한 개시 형태들에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물, 또는 대체물을 포함한다.

[0012] 제1 또는 제2 등의 용어는 다양한 구성 요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성 요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하는 목적으로만, 예컨대 본 발명의 개념에 따른 권리 범위로부터 벗어나지 않은 채, 제1 구성 요소는 제2 구성 요소로 명명될 수 있고 유사하게 제2 구성 요소는 제1 구성 요소로도 명명될 수 있다.

[0013] 어떤 구성 요소가 다른 구성 요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성 요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성 요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성 요소가 다른 구성 요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는 중간에 다른 구성 요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다. 구성 요소들 간의 관계를 설명하는 다른 표현들, 즉 "~사이에"와 "바로 ~사이에" 또는 "~에 이웃하는"과 "~에 직접 이웃하는" 등도 마찬가지로 해석되어야 한다.

[0014] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로서, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 본 명세서에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성 요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성 요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0015] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가진다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 명세서에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0016] 이하, 본 명세서에 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 실시예들을 상세히 설명한다. 그러나, 특허출원의 범위가 이러한 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부

재를 나타낸다.

[0017] 우선, 종래의 LiDAR를 설명한다.

[0018] 도 2는 AFE(analog front-end), TD(time discriminator), TC(timing circuit), 및 DAQ(data qcquisition)의 네 개의 주요 블럭들을 포함하는 종래 LiDAR의 기본 블럭 다이어그램을 도시한다.

[0019] 컨트롤러(CTRL)에 의해 시작 신호 S_S가 하이(high)로 설정될 때, 송신기 TX 내의 레이저 다이오드는 타겟으로 광(light)을 방사한다. 타겟에 의해 반사된 광을 수신한 APD(avalanche photodiode)는 I_{APD}를 생성한다. I_{APD}는 TIA(trans-impedance amplifier)에 의해 V_{APD}로 변환된다. V_{APD}에 포함된 노이즈 등은 BPF(band-pass filter)에 의해 제거되거나 완화된다.

[0020] 도 3은 고이득(high gain), 고대역(high bandwidth), 저노이즈(low noise), 및 저전력 소모(low power consumption)을 위한 종래의 비선형 3-스테이지 인버터 기반 TIA를 도시한다. TIA의 이득 R_{TIA}는, V_{APD}를 적절한 값으로 조정하기 위해, 제어될 수 있다. TD는 아날로그 신호 출력(analog signal output)을, 임계 전압 V_{TH}에 기초하여, 시간 판별(time discrimination)에 적절한 디지털 엔드 신호(digital end signal) S_E로 변환한다. 그러면, 시작 신호 S_S와 디지털 엔드 신호 S_E의 시간 차이는, TDC(time-to-digital converter) 또는 TAC(time-to-amplitude converter)에 의해, 거리 정보(distance information)로 변환된다.

[0021] 그러나, 종래의 TD는, 도 4에 도시된 바와 같이, 펄스 내의 각 국소 피크(local peak)를 단일의 참조 전압으로 판별하지 못한다. 즉, 도 4에서, $echo_1$과 $echo_4$는 감지되지 않는다. 다중 에코를 감지하기 위해 멀티-채널 TDC(multi-channel TDC)가 활용될 수 있지만, 하드웨어 비용과 전력 소모량이 증가한다. TDC에 비교하여 TAC의 가장 중요한 장점은, 다중 이벤트 감지가 단일의 TAC와 작은 멀티-채널 S&H 회로(sample and hold circuit)로 구현가능하므로, 감소된 하드웨어 비용이다.

[0022] 이하에서는, 본 발명의 일 실시예에 따른 LiDAR를 설명한다.

[0023] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 LiDAR의 블럭도이다.

[0024] 도 5를 참조하면, LiDAR는 다중 이벤트(multiple event)를 감지할 수 있고, 비선형 TIA, BPF, TD, MED(multi-event detector, 다중 이벤트 감지기), TAC, 및 DAQ(데이터 획득 회로)를 포함할 수 있다. 여기서, TD는, n(n은 2 이상의 자연수) 개의 참조값을 갖는 플래시 ADC(flash ADC)로 구현될 수 있다. ADC는, 다중 이벤트 감지를 위해, n 개의 참조값(참조 전압)을 이용하여 n-비트의 엔드 신호 S_{Ei}를 생성한다. 종래의 TD와는 달리, 본 발명에서 제안하는 TD는, 도 6에 도시된 바와 같이, 다중 국소 피크들(multiple local peaks)을 감지할 수 있다.

[0025] 도 7의 (a)는 n-비트의 S_{Ei}로부터 스탑 신호(stop signal, end signal(엔드 신호)로 명명될 수도 있음) S_E를 생성하는 MED의 블럭도를 도시한다. MED는 라이징 엣지 감지기(rising edge detector)와 폴링 엣지 감지기(falling edge detector)를 포함한다. 신호 S_{RA} 및 S_{FA}의 경우, S_{Ei}의 라이징 엣지와 폴링 엣지 각각에 대한 감지 결과를 나타내는 (미리 정해진 펄스 폭을 갖는 짧은) 펄스이다(도 7의 (b) 참조). 엔드 신호 S_E는 S_{FA}의 라이징 시간(rising time)에 상승하고 S_{RA}의 라이징 타임에 하강한다. 엔드 신호 S_E의 라이징 엣지에 대응하는 시간(t_{E1}, t_{E2}, t_{E3}, 및 t_{E4})은 각 국소 피크를 위한 시간(즉, 시작 신호와 각 국소 피크까지의 시간 차이)을 나타낸다. 각 국소 피크에서 강도 정보(intensity information)의 경우, $\log_2$n-비트의 신호 D_{LP}가, DAQ에서, 추출된다.

[0026] 도 7의 (c)는 제안하는 TAC의 블럭도를 도시한다. TAC는, S_S와 S_E의 각 라이징 타임에 기초하여, 다중 이벤트(예컨대, 최대 4 개의 이벤트)의 시간 정보를 저장한다. S_S가 상승하면, 캐패시터 C_1은 I_1의 DC 전류에 기초하여 충전을 시작하고, 이는 V_{TI}가 선형적으로 상승하도록 한다. t_{E1}, t_{E2}, t_{E3}, 및 t_{E4}에서 S_E가 상승할 때, S&H 블럭에서 전용 캐패시터들(dedicated capacitors)로, V_{TI}는 샘플링되고 4-채널 V_{TAC}로 홀딩된다(또는 유지된다).

[0027] I_1은 V_{TI}의 함수일 수 있기 때문에, V_{TI}는, V_{TI}의 선형성을 보장하기 위해, 전압 V_{limit}에 제한된다. V_{TI}가 V_{limit}에 도달할 때, 비교기는 EOC 신호(end-of-conversion signal) EOC_{TAC}를 출력하고, 이에 따라 도 5에 도시된 DAQ가 동작한다. 그러면, 4-채널 V_{TAC} 내의 거리 정보는 디지털화되고, $\log_2$n-비트 강도 데이터(intensity data) D_{LP}는

각 국소 피크 또는 펄스에 대해 V_{TAC}와 함께 출력으로 전달된다.

[0028] **시뮬레이션 결과**

[0029] TSMC 0.18㎛ 공정 매개변수를 갖는 Cadence Spectre를 사용하여 1.8V 전원으로 SPICE 시뮬레이션이 수행한다. 도 8은 3pF 입력 커패시턴스를 갖는 도 3의 3-스테이지 인버터 기반 TIA의 주파수 응답을 도시한다. TIA의 이득은, 5kΩ 또는 50kΩ으로 R_{TIA}의 값을 변경하여, 각각 73.8dB 및 93.7dB로 획득되었으며, 차단 주파수는 각각 113MHz 및 14MHz로 획득되었다.

[0030] V_{TI}의 선형 작동 범위를 정량화하기 위해, 도 9는 시간에 따른 V_{TI} 및 V_{TI}의 미분에 대한 시뮬레이션 결과를 도시한다. 시간 경과에 따라 dV_{TI}/dt가 감소하기 때문에, 비선형성은 증가하며, 이에 따라 거리 정보가 저하될 수 있다. 시작 지점 t = 0에서, dV_{TI}/dt는 5.04mV/ns로 획득되었다. dV_{TI}/dt의 1% 감소에 대해 V_{limit}는 850mV로 설정되며, 이때 제안된 TAC의 동적 범위(dynamic range)는 156.9ns로 나타났다.

[0031] 도 10은 네 개의 이벤트를 갖는 제안된 TAC의 과도 시뮬레이션 결과(transient simulation results)를 도시한다. S_S 신호가 하이(high)가 되면, 주어진 V_{APD}의 프로파일에 기초하여, V_{TAC}의 네 채널이 획득된다.

[0032] **실험 결과**

[0033] 제안된 LiDAR는 1.8V 전원 공급 장치를 사용하여 TSMC 0.18㎛ CMOS 기술로 제작된다. 도 11은 제안된 LiDAR의 마이크로그래프를 도시하며, 활성 면적(active area)은 약 0.5×1.2㎟ 이다. 배선 연결로 인한 지연을 줄이기 위해, 수신기와 레이저 다이오드 드라이버를 단일 프로토타입 PCB(printed circuit board)에 장착하였다(도 12 참조). 제안된 LiDAR는, 레이저 다이오드(LD)가 펄스 광(pulsed light)을 방출하면, 물체로부터 반사된 광을 수신한다. 이 프로세스와 관련된 반사된 광의 시간 지연(time delay) 및 강도(intensity)는 각 이벤트에 대해 추출된다.

[0034] 도 13은 신호들 S_S, EOC_{TAC}, EOC_{DAQ}, 그리고 리드 신호(read signal) RD를 포함한 제안된 LiDAR의 디지털 출력에 대한 실험 결과를 도시한다. 제안된 LiDAR는 MCU(micro-controller unit)를 DAQ로써 10-비트 ADC와 통합한다. S_S 신호는 매 50㎲마다 샘플링을 위해 상승한다. 광 방출 후 0.2㎲ 후, 이벤트 감지를 위한 샘플링이 EOC_{TAC} 라이징 엣지 직전에 완료된다. 그러면, 거리 정보에 대한 디지털화는 EOC_{DAQ}의 라이징 엣지까지 진행되며, 이 과정은 6㎲가 소요된다. 리드 신호 RD 신호가 EOC_{DAQ}이 인에이블된 이후 상승하면, 거리 및 강도 정보가 최종 출력으로 준비된다.

[0035] 도 14는 입력 광 전력(optical power)에 따른 TIA의 측정된 특성을 도시한다. 여기서 APD의 이득은 905nm 파장에서 50A/W이다. 도 15는, R_{TIA}를 5kΩ 및 50kΩ으로 설정했을 때 각각 약 26mV 및 31mV로 측정된 피크 노이즈의 측정 결과를 도시한다. 다중 이벤트 조건 하에서 제안된 LiDAR를 정량화하기 위해, 물체와 제안된 LiDAR 사이의 글라스에 물방울을 떨어뜨려 전기적 모델을 얻는 실험을 진행하였다(도 16의 (a) 참조). 외부 APD(C30737)는 50ns 폭을 갖는 905nm 레이저 다이오드 펄스에서 I_{APD} 전류 프로파일을 생성한다. 도 16의 (b)는 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT)을 사용한 주파수 분석 결과를 보여주며, I_{APD}의 주요 주파수(dominant frequency)는 약 14.4MHz로 나타났다. 실험에서 사용된 I_{APD}의 전기적인 모델은 다음과 같이 함수 생성기(function generator)를 사용함으로서 생성된다: 도 17의 (a)는 사인-형태 펄스(sine-shaped pulse)의 단일 이벤트를 나타낸다. 도 17의 (b)는 다중 이벤트를 위한 동일한 형태의 네 가지 펄스를, 도 17의 (c)는 크기가 다른 네 가지 펄스를, 도 17의 (d)는 도 16의 (a)에서 모방한 I_{APD}를 모델링한 결과를 도시한다.

[0036] 도 18은 단일 펄스 전기 입력에 기반한 3-비트 진폭 정보(amplitude information)에 대한 실험 결과를 도시하며, LSB 스텝은 매 20㎂마다 증가함을 보여준다. 전류가 146㎂를 초과하면, 진폭 출력(amplitude output)은 최대값에 도달하여 포화된다. 제안된 TAC의 전형성을 조사하기 위하여, 도 19는 S_S 및 S_E의 라이징 엣지 사이의 시간 차이 △t를 도시한다. △t는, V_{limit} = 850m에서 최대 150ns(거리에서 22.2 m에 대응함)까지 변화한다. 각 △t는는 20회 반복하여 수행되며, 최소 및 최대 값을 갖는 에러 바(error bar)가 도시되어 있다. 최대 에러는 정합된 라인(fitted line)과 실제 전압 출력 VTAC 사이의 최대 전압 차이를 나타낸다. 여기서, 각 플롯은 도 17의 전기적 입력에 기초하여 추출된다. 결과적으로, 동적 범위에 대한 최대 절대 에러(maximum

absolute errors)는 120 및 150 ns로 제한되며, 이는 각각 1.12%와 2.68%에 해당한다.

[0037] 도 20은 도 17의 (a)의 입력을 사용하고 △t를 0에서 150ns까지 변경했을 때의 10-비트 DAQ 출력에 관한 실험 결과를 도시한다. D_{TAC}의 INL(integral non-linearity)은 도 19의 (a)의 선형성 에러(linearity error)와 잘 일치한다. 동적 범위가 120ns 및 150ns로 제한되면, 최악의 경우 INL은 각각 -1.17 LSB 및 -4.74 LSB가 된다.

[0038] 실험 결과에 대한 요약은 표 1에, 기존 연구와의 성능 비교는 표 2에 나타나 있다. 제안된 LiDAR는, TAC를 사용하여 복잡도와 칩 면적을 줄이며, 다중 국소 피크 감지를 가능하게 한다. 제안된 LiDAR는, 외부 간섭과 가혹한 환경 조건으로 인해 유발되는 다중 이벤트 및 다중 국소 피크의 강도 및 거리 정보를 활용하여, 중거리 LiDAR 응용 분야에 적합할 수 있다.

[0039] [표 1]

	Case 1	Case 2
Dynamic range (ns)	120	150
Dynamic range (m)	18	22.5
Maximum error (%)	1.12	2.68

[0040]

[0041] [표 2]

	This work	2012 [13]	2018 [14]	2019 [9]	2023 [26]
Technology (nm)	180	350	180	180	180
Timing circuit	TAC	TDC	TAC	TDC	TDC
APD	off-chip	off-chip	off-chip	on-chip	on-chip
Intensity detection	**Y**	N	**Y**	N	N
Multi-event detection	**Y**	**Y**	**Y**	**Y**	N
Multi-local peak detection	**Y**	N	N	N	N
Dynamic range (m)	22.5	9	120	10	2.7
Resolution (ps)	146.5	144	N/A	10	1,000
Chip area (mm^2)	0.60	N/A	0.01	2.20	0.227

[0042]

[0043] 상기 표 2에서, [13]은 S. Kurtti 등의 연구(S. Kurtti and J. Kostamovaara, "An integrated receiver channel for a laser scanner," in Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf., May 2012, pp. 1358-1361.)를, [14]는 H. -J 등의 연구(H.-J. Kim, E.-G. Lee, and C.-Y. Kim, "A high-multi target resolution focal plane array-based laser detection and ranging sensor," Sensors, vol. 19, no. 5, p. 1210, Mar. 2019.)를, [9]는 M. Hintikka 등의 연구(M. Hintikka and J. Kostamovaara, "Experimental investigation into laser ranging with sub-ns laser pulses," IEEE Sensors J., vol. 18, no. 3, pp. 1047-1053, Feb. 2018.)를, [26]은 J. -E. Joo 등의 연구(J.-E. Joo, S. Choi, Y. Chon, and S.-M. Park, "A low-cost measurement methodology for LiDAR receiver integrated circuits," Sensors, vol. 23, no. 13, p. 6002, Jun. 2023.)를 나타낸다.

[0044] 본 발명에서는, 외부 간섭 및 가혹한 환경 조건으로 인해 발생한 최대 네 가지 이벤트의 강도 및 거리 정보를 추출하는 강력한 다중 이벤트 감지 LiDAR를 제안한다. 추가적인 S&H 회로를 통해 더 많은 이벤트를 감지할 수 있다. 제안된 LiDAR에 TAC를 통합함으로써 하드웨어 복잡성을 줄이고 추가 메모리 회로의 필요성을 줄이는 이점을 제공한다.

[0045] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성 요소, 소프트웨어 구성 요소, 및/또는 하드웨어 구성 요소 및 소프트웨어 구성 요소의 집합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성 요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(Arithmetic Logic Unit), 디지털 신호 프로세서(Digital Signal Processor), 마이크로컴퓨터, FPA(Field Programmable array), PLU(Programmable Logic Unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(Operation System, OS) 및 상기 운영 체제 상에서

수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(Processing Element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 콘트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(Parallel Processor)와 같은, 다른 처리 구성(Processing Configuration)도 가능하다.

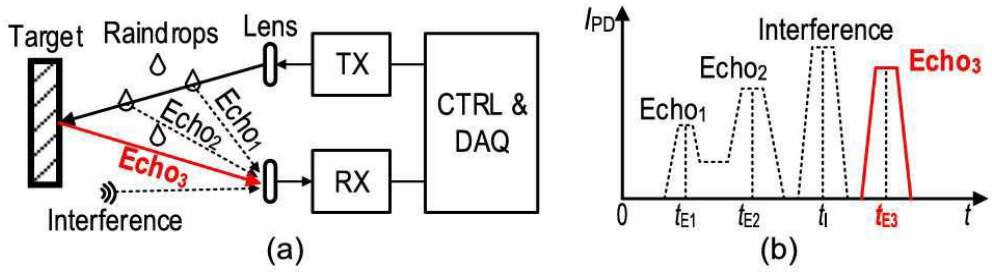
[0046] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(Computer Program), 코드(Code), 명령(Instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(Collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성 요소(Component), 물리적 장치, 가상 장치(Virtual Equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치, 또는 전송되는 신호 파(Signal Wave)에 영구적으로, 또는 일시적으로 구체화(Embody)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

[0047] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(Magnetic Media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(Optical Media), 플롭티컬 디스크(Floptical Disk)와 같은 자기-광 매체(Magneto-optical Media), 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다. 상기된 하드웨어 장치는 실시예의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

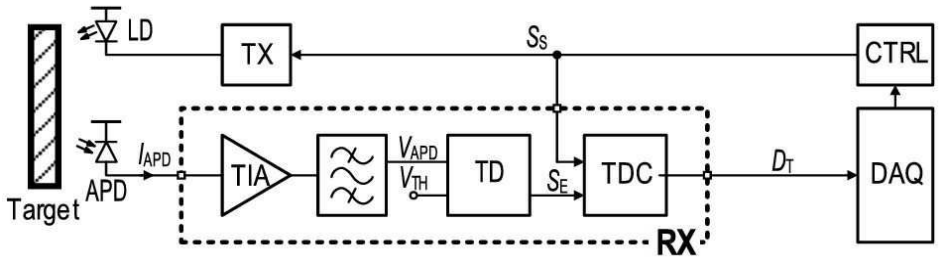
[0048] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 타 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성 요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 등록청구범위의 기술적 사상에 의해 정해져야 할 것이다.

도면

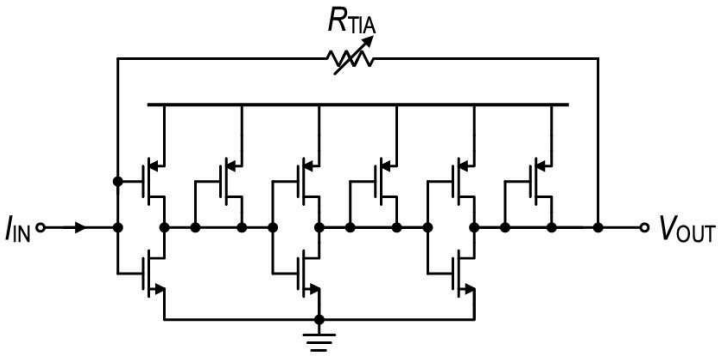
도면1



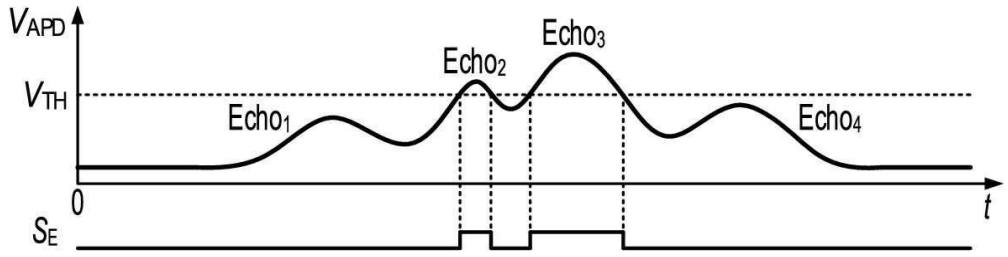
도면2



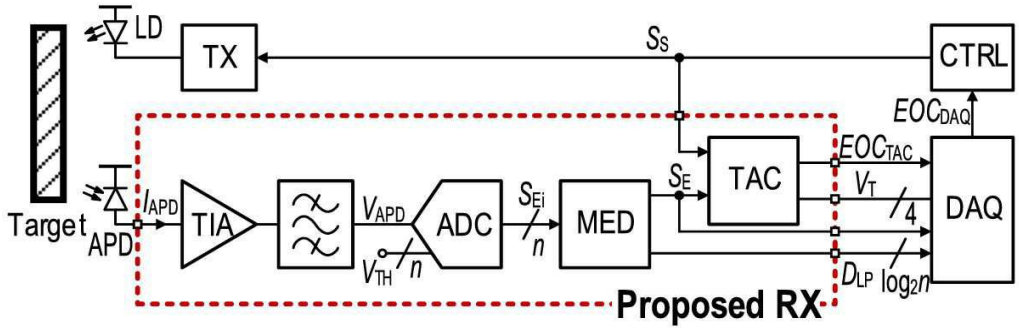
도면3



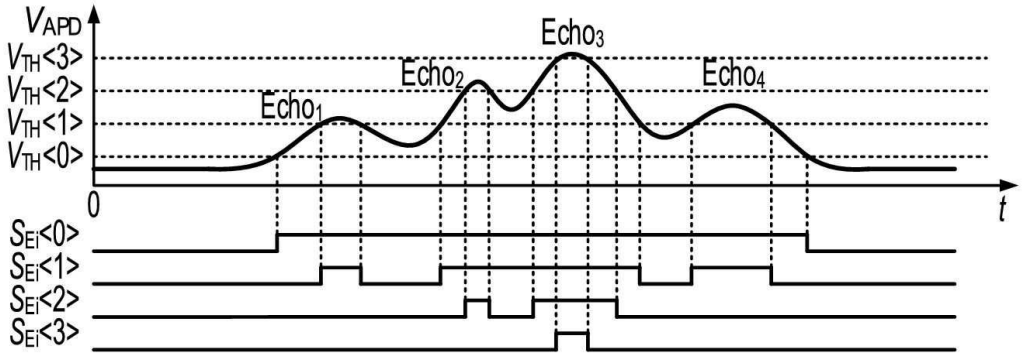
도면4



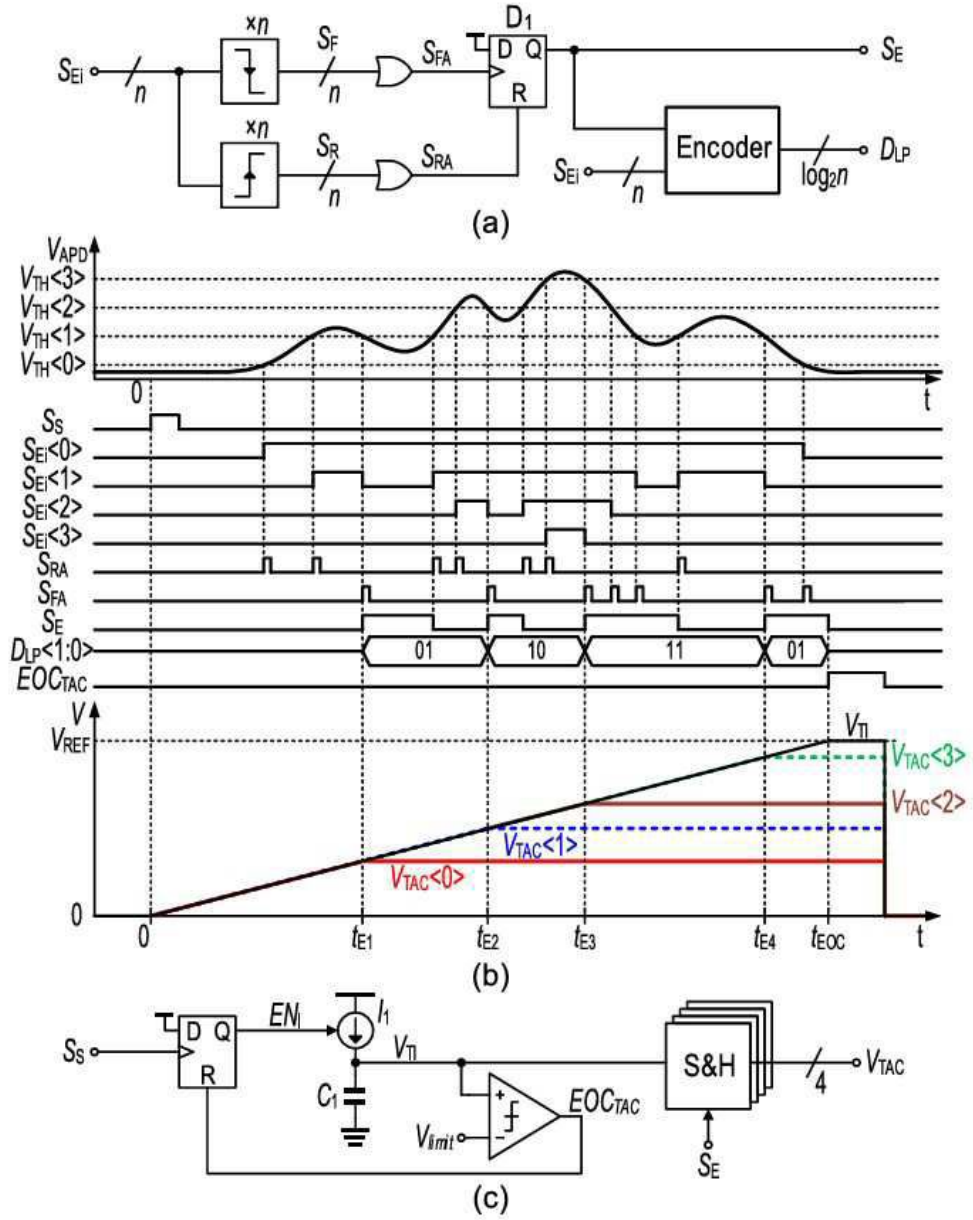
도면5



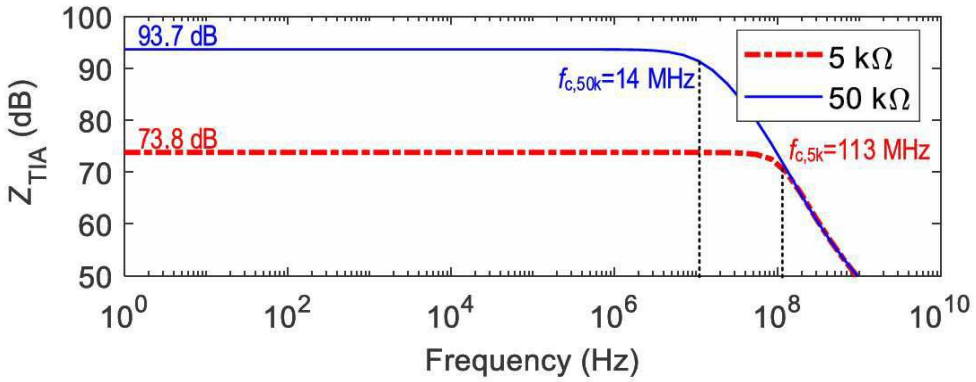
도면6


VAPD
VTH<3>
VTH<2>
VTH<1>
VTH<0>
Echo1
Echo2
Echo3
Echo4
0
t
SEI<0>
SEI<1>
SEI<2>
SEI<3>

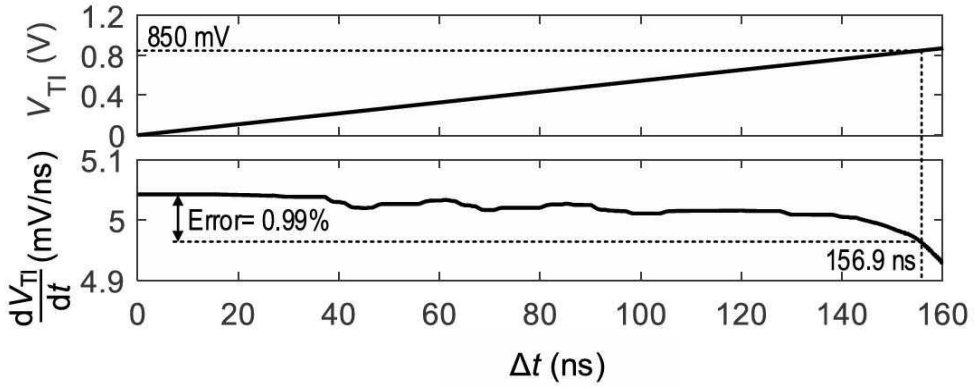
도면7


SEi
n
×n
SF
SFA
D1
D Q
R
SE
SR
SRA
Encoder
DLP
log2n
(a)
VAPD
VTH<3>
VTH<2>
VTH<1>
VTH<0>
0
t
SS
SEI<0>
SEI<1>
SEI<2>
SEI<3>
SRA
SFA
SE
DLP<1:0>
EOCTAC
01
10
11
01
V
VREF
VTI
VTAC<3>
VTAC<2>
VTAC<1>
VTAC<0>
0
tE1
tE2
tE3
tE4
tEOC
t
(b)
SS
D Q
R
EN
I1
VTI
C1
Vlimit
EOCTAC
S&H
4
VTAC
SE
(c)

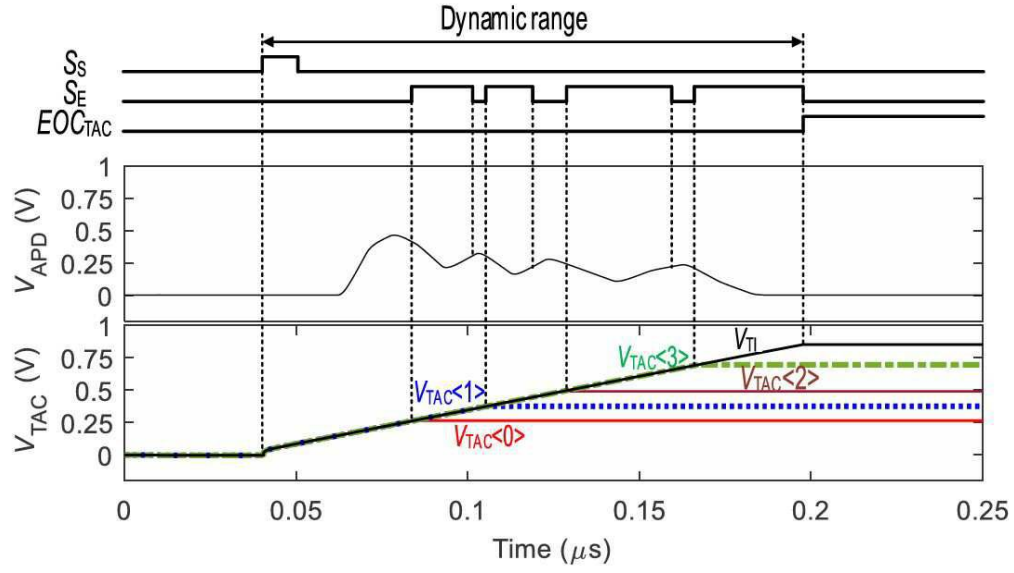
도면8


93.7 dB
73.8 dB
$f_{c,50k}$=14 MHz
$f_{c,5k}$=113 MHz
5 kΩ
50 kΩ
Z_{TIA} (dB)
Frequency (Hz)

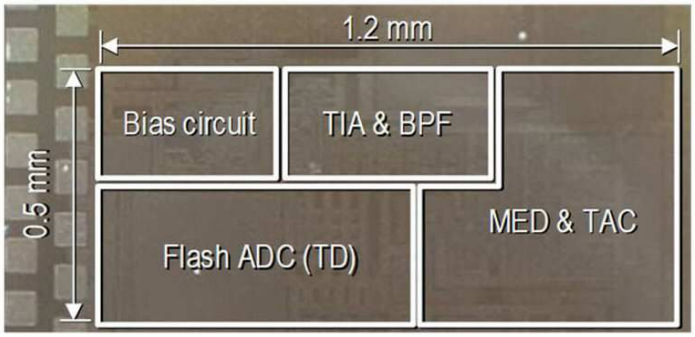
도면9


850 mV
V_{TI} (V)
Error= 0.99%
156.9 ns
$\frac{dV_{TI}}{dt}$ (mV/ns)
Δt (ns)

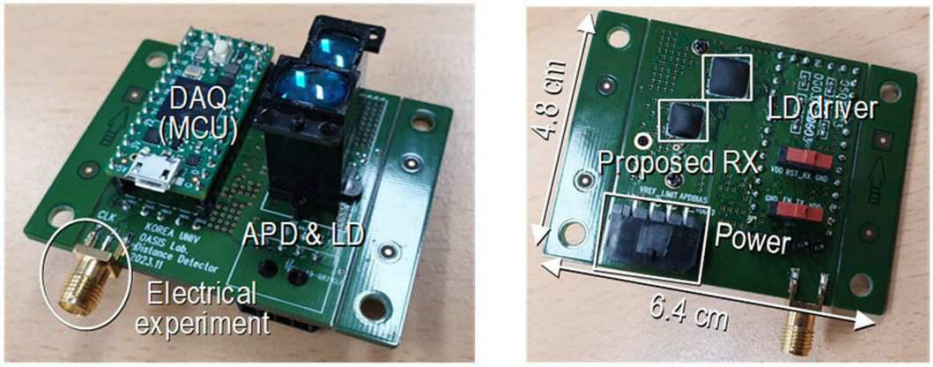
도면10


Dynamic range
S_S
S_E
EOC_{TAC}
V_{APD} (V)
V_{TAC} (V)
V_{TI}
V_{TAC}<3>
V_{TAC}<2>
V_{TAC}<1>
V_{TAC}<0>
Time (μs)

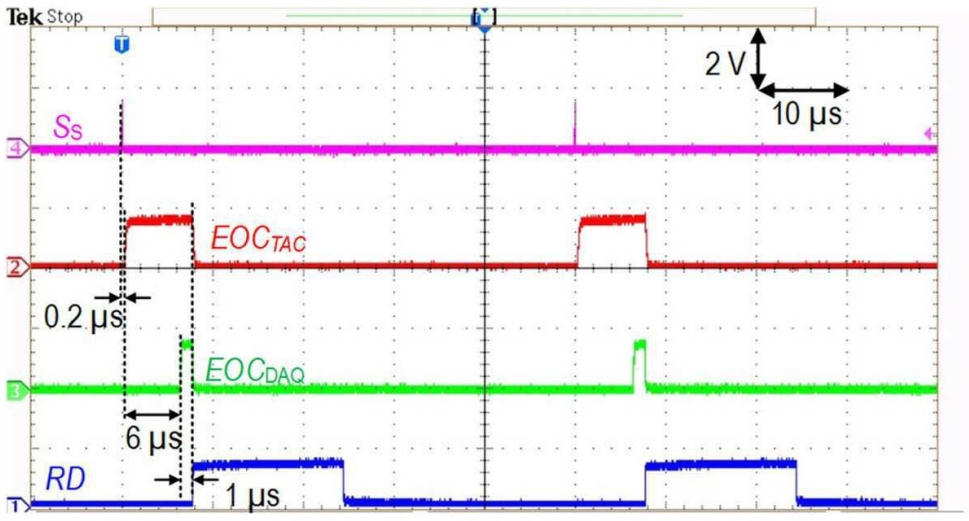
도면11



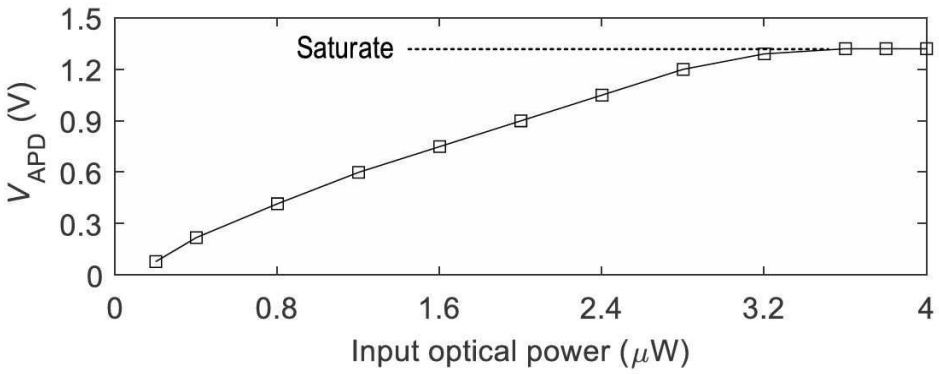
도면12



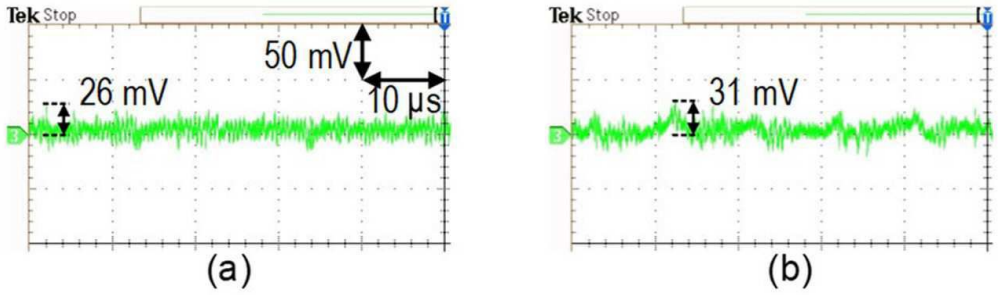
도면13



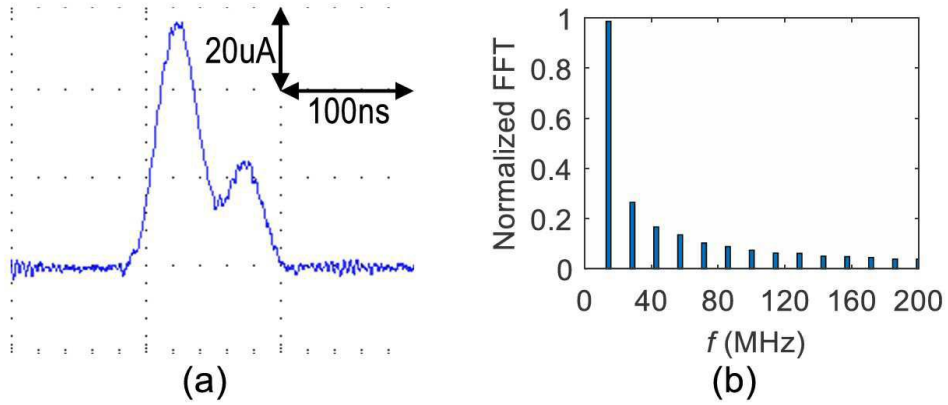
도면14



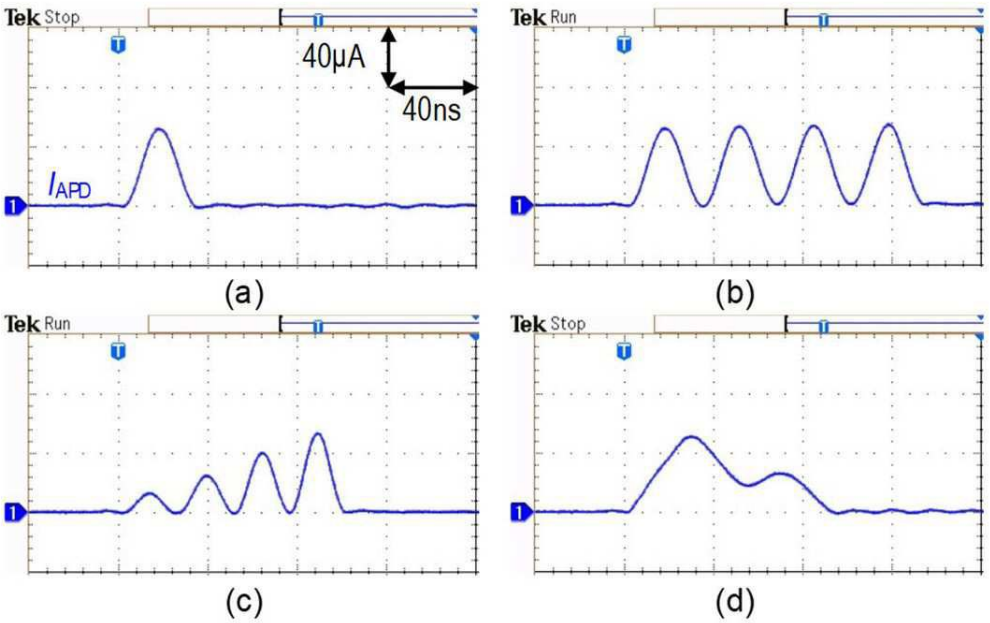
도면15



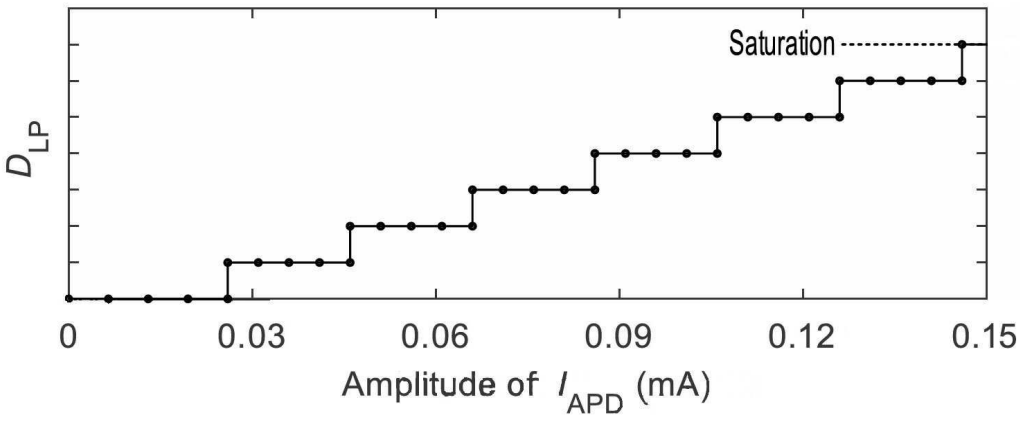
도면16



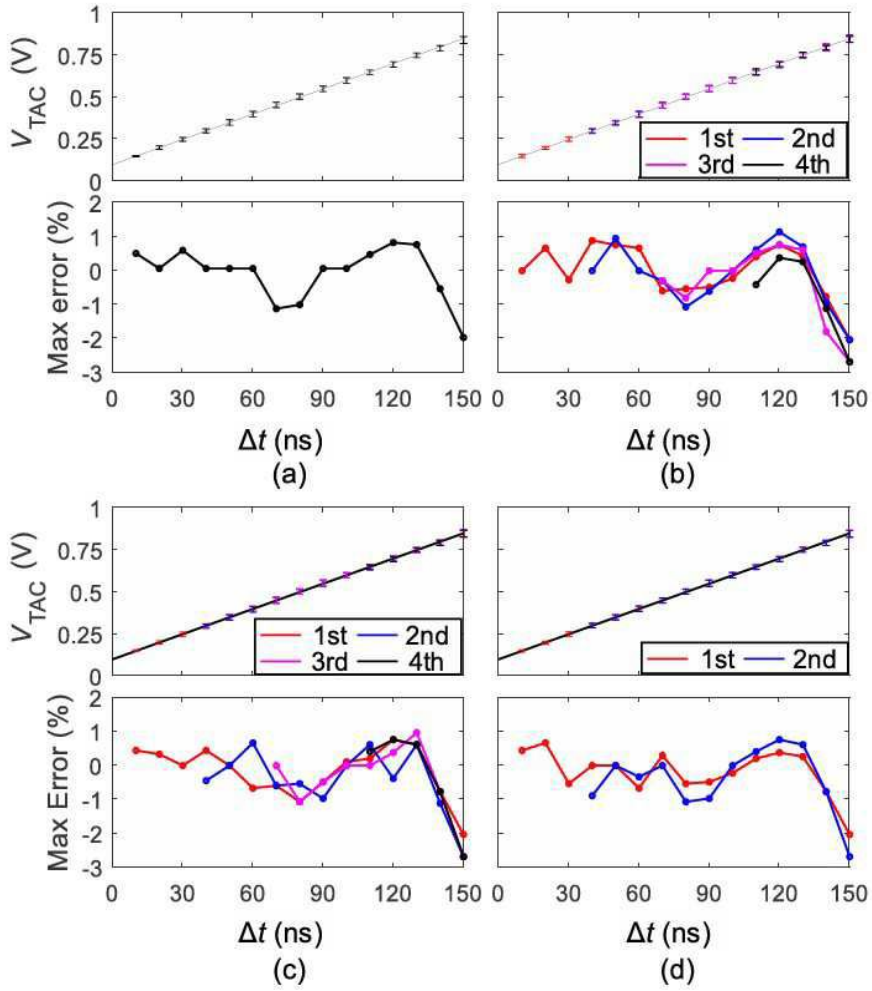
도면17


Tek Stop
40μA
40ns
I_{APD}
(a)
Tek Run
(b)
Tek Run
(c)
Tek Stop
(d)

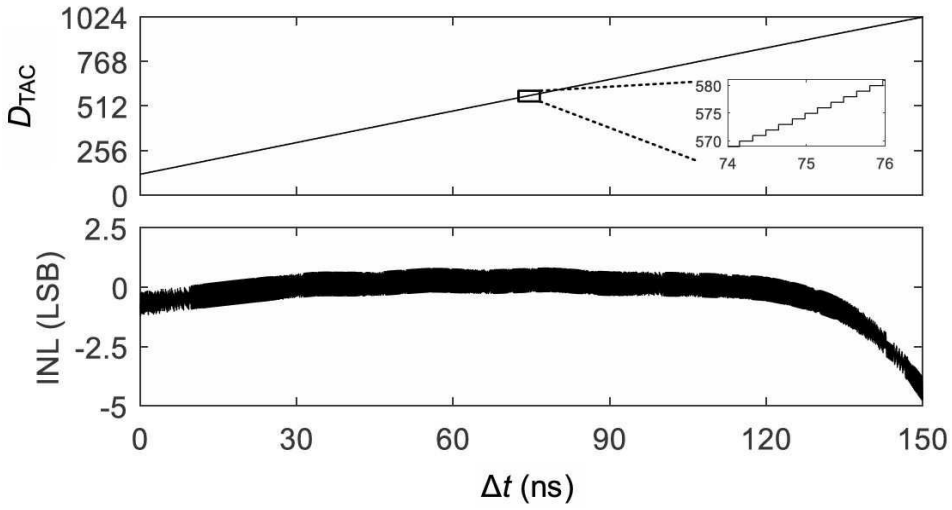
도면18


Saturation
D_{LP}
0
0.03
0.06
0.09
0.12
0.15
Amplitude of I_{APD} (mA)

도면19


V_{TAC} (V)
1st 2nd
3rd 4th
Max error (%)
Δt (ns)
(a)
(b)
Max Error (%)
(c)
(d)

도면20


D_{TAC}
1024
768
512
256
0
580
575
570
74
75
76
INL (LSB)
2.5
0
-2.5
-5
0
30
60
90
120
150
Δt (ns)