

수중 음향센서의 원거리 데이터 전송에 관한 연구

A study on the long distance data transmission of underwater acoustic sensor

한정희,[†] 이병화,¹ 김동욱,¹ 이정민¹

(Jeong-Hee Han,[†] Byung-Hwa Lee,¹ Dong-Wook Kim,¹ and Jeong-Min Lee¹)

¹국방과학연구소

(Received November 6, 2018; accepted March 26, 2019)

초 록: 본 논문은 수중 음향센서 데이터의 원거리 케이블 전송에 관한 연구 결과이다. LVDS(Low Voltage Differential Signaling) 전송 방식으로 설계된 데이터 송수신기의 케이블에 대한 원거리 전송 신호를 측정하고 지터 특성을 분석하였다. 지터 특성을 저감하기 위하여, 원거리 전송에 따라 감쇠될 송신 신호를 역 보상하는 고역 강조(pre-emphasis) 기법을 적용하였으며, 전송 거리에 따라 송신 특성을 검증하였다.

핵심용어: 수중 음향센서, 데이터 송수신기, 저전압 차동 신호, 고역 강조

ABSTRACT: This paper is a study result on long distance transmission of underwater acoustic sensor data over cable. The data transceiver is designed using the LVDS (Low Voltage Differential Signaling) transmission scheme, and the jitter characteristics are analyzed by measuring the long distance transmission signal through the cable. In order to reduce the jitter, a pre-emphasis technique is applied to compensate the transmitting signal to be attenuated by long distance transmission, and the transmission characteristics were verified according to the distance.

Keywords: Underwater acoustic sensor, Data transceiver, LVDS (Low Voltage Differential Signaling), Pre-emphasis

PACS numbers: 43.60.Qv, 43.30.Wi

1. 서 론

수중 음향센서는 탐지 성능의 향상을 위해 다채널로 구성되며, 함 외부의 수중 환경에 분산되어 설치된다. 분산 배치된 음향센서의 미세 아날로그 음향 신호는 전처리 과정 및 디지털 변환을 거친 후 수중 케이블을 통해 함 내부까지 원거리 전송된다. 원거리 전송 과정에서 디지털 신호는 전송 선로 특성에 의한 감쇠와 외부 전기적 잡음의 유입 및 간섭으로 지터가 발생하게 된다. 신호의 이상적 시간 기준으로부터의 변위를 나타내는 지터의 증가는 통신 품질의 저하를 의미한다. 지터를 저감하기 위한 일환으

로 지터의 측정 및 분석에 관한 연구가 폭넓게 수행되고 있으나,^[1-3] 수중 음향센서 데이터의 원거리 전송에 대한 지터 연구 사례는 부족한 실정이다. 그 외 수신부에서의 지터 영향을 감소시키기 위한 등화기에 대한 연구도 수행되었으나,^[4] 등화기의 적용은 회로복잡도 및 소비전력의 증가를 수반하므로 소형화와 저전력 구동이 요구되는 수중 음향센서에 적용하기에는 어려움이 따른다.

한편 선체에 적용되는 수중 케이블은 광섬유 케이블과 연선이 사용되고 있다. 광섬유 케이블은 신호의 손실 없이 대용량 데이터의 고속 전송이 가능하지만, 외력에 의한 파손에 취약하고 유지보수가 어려워 제한적으로 적용되고 있다. 운용 환경에 따른 내구성 측면에서는 연선이 수중 케이블에 널리 사용

[†]Corresponding author: Jeong-Hee Han (jhhan@add.re.kr)
Agency for Defence Development, P.O.Box 18, Jinhae-gu, Changwon, Gyeongnam 51678, Republic of Korea
(Tel: 82-55-540-6142, Fax: 82-55-542-3737)

되고 있다. 차폐 연선(Shielded Twisted Pair,STP)은 신호 간섭에 강인하지만 제작비용이 높고, 설치성이 제한되므로 수중케이블에는 비차폐 연선(Unshielded Twisted Pair,UTP)의 적용이 비교적 유리하다.

비차폐 연선에 적용하기 용이한 LVDS(Low Voltage Differential Signaling) 전송 기술은 차등 신호를 사용하므로 외부로부터 유입되는 동위상 잡음의 제거가 가능하다. 낮은 전압으로 신호를 출력하는 LVDS 전송 기술은 신호의 상승 및 하강 시간이 짧아 고속 데이터 전송에 유리하다. 또한 신호간 간섭 영향이 작으므로 다수의 통신선으로 구성된 센서 케이블에 적합하다. 그러나 기존 LVDS 전송에 관한 연구는 컴퓨터 그래픽 카드 등과 같은 근거리 전송 분야에 특화되어 있으며,^[5] 수중 케이블 특성에 의한 신호의 감쇠와 지터의 증가로 원거리 전송에는 어려움이 따른다. 전송 거리의 확장을 위해 LVDS 출력 신호의 크기를 증가시키는 기법이 활용되기도 하지만, 소비전력이 제한되는 수중 음향센서의 전송 기법으로는 적합하지 않다.

따라서, 본 논문에서는 수중 음향센서 데이터를 LVDS로 원거리 전송하기 위한 방안을 연구하였다. 수중 케이블로 적용하기 용이한 비차폐 연선에 대하여 LVDS 데이터의 원거리 전송 시험을 수행하고, 수신 신호의 지터 특성을 분석하였다. 그 결과를 바탕으로 데이터 전송 기법을 보완하고, 시험을 통해 원거리 전송 가능성을 검증하였다.

II. 전송 거리에 따른 지터 특성

2.1 지터 일반 특성

지터는 신호의 이상적 기준으로부터의 위상 변위로 정의되며, Fig. 1과 같이 표현된다.

수신 신호 $S(t)$ 는 신호 펄스의 함수 P , 전송률 f_d 및 위상 에러의 함수 $\phi(t)$ 로 Eq. (1)과 같이 정의되며,

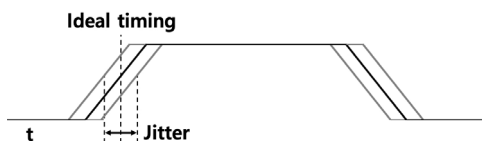


Fig. 1. Definition of the jitter.

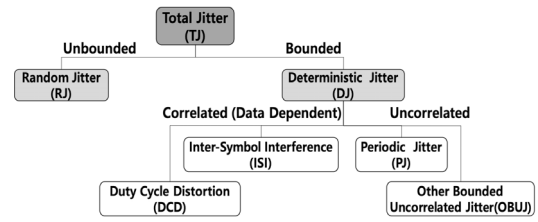


Fig. 2. Diagram of the total jitter.

지터 J 는 Eq. (2)와 같이 위상 변위 $\Delta\phi$ 에 비례하여 영향을 크게 받는다.^[2]

$$S(t) = P(2\pi f_d t + \phi(t)). \tag{1}$$

$$J = \frac{1}{2\pi f_d} \Delta\phi. \tag{2}$$

한편, 지터는 Fig. 2와 같이 구성된다. 전체 지터(Total Jitter, TJ)는 열잡음, 습도 등 외부 영향으로 제한 없이 발생하는 랜덤 지터(Random Jitter, RJ)와 하드웨어, 전송 데이터 등의 조건에 의해 제한적으로 발생하는 결정성 지터(Deterministic Jitter, DJ)로 구분된다.

따라서 전체 지터 Δt_{TJ} 는 Eq. (3)과 같이 랜덤 지터 Δt_{DJ} 와 결정성 지터 Δt_{RJ} 의 합으로 정의되며, 전체 지터 확률밀도함수(Probability Density Functions, PDF) f_{TJ} 는 Eq. (4)와 같이 결정성 지터와 랜덤 지터 확률밀도함수 f_{DJ}, f_{RJ} 의 합성곱으로 표현된다.^[6]

$$\Delta t_{TJ} = \Delta t_{DJ} + \Delta t_{RJ}. \tag{3}$$

$$f_{TJ}(\Delta t) = f_{DJ}(\Delta t) * f_{RJ}(\Delta t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{DJ}(u) f_{RJ}(\Delta t - u) du. \tag{4}$$

랜덤 지터는 등의 외부 요인에 의해 발생하여 예측이 불가능한 반면, 결정성 지터는 조건에 의해 발생하는 인위적 특성을 가지므로 원인에 대한 예측이 가능하다.^[1] 결정성 지터는 세부적으로 심볼간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI), 주기 찌그러짐(Duty Cycle Distortion, DCD) 및 주기적 지터(Periodic Jitter, PJ)로 구분된다. 심볼간 간섭과 주기 찌그러짐은 전송하는

데이터에 연관되어 영향을 받기 때문에 데이터 의존적 지터(Data Dependant Jitter, DDJ)로도 표현된다. 주기적 지터는 전송 데이터와 무관하게 전원 특성과 접지 등에 의한 신호 간섭에 의해 발생된다.^[3]

이처럼 지터는 세부적으로 발생 원인이 구분되므로 지터 성분 분석을 통해 저감 방안을 도출할 수 있다. 따라서 LVDS 데이터 전송에 따른 지터 특성을 시험을 통해 분석하였다.

2.2 원거리 전송 음향 데이터의 지터 특성

전송 거리에 따른 수중 음향센서 전송 신호의 지터를 측정하였다. 본 시험에 적용된 센서용 데이터 송수신기의 내부 구성은 Fig. 3과 같다.^[7]

센서 데이터 송수신기는 전원을 공급하는 전원변환부, 아날로그 음향신호의 증폭 및 디지털 변환을 수행하는 전처리부, 데이터 송수신과 동기 제어를 수행하는 디지털부로 구성된다. 특히, 디지털부는 전처리된 디지털 음향신호를 LVDS로 원거리 전송하는 역할을 담당한다. 송수신기에 적용된 저전력 LVDS 드라이버의 출력 전압은 350 mV이며, 수신 신호 식별을 위한 기준 전압은 100 mV이다. 송수신기의 데이터 전송 주파수는 약 20 MHz로 설정하였다.

데이터 전송 거리에 따른 지터 특성을 측정하기 위한 시험의 구성은 Fig. 4와 같다.

전송 매체는 CAT5e 사양의 상용 UTP 케이블이 사용되었으며, 송수신기로부터 전송된 신호의 지터 특

성을 전송 거리 0 m(Ⓐ), 50 m(Ⓑ), 100 m(Ⓒ)에서 오실로스코프로 각각 측정하였다. 또한 각 전송 거리의 송수신기에서 수신한 데이터의 정상 여부를 확인하여 통신 상태를 점검하였다. 지터 측정에 사용된 오실로스코프는 1 GHz 대역폭 및 20 GSa/s 샘플 속도의 사양을 갖으며, 지터 측정을 위한 전용 소프트웨어가 탑재되었다.

시험 결과, LVDS 전송 방식의 센서 데이터 송수신기는 전송거리 50 m에서 통신이 가능한 반면 100 m에서는 통신이 불가하였다. 전송거리 100 m에 대한 LVDS 수신 신호의 아이 패턴을 Fig. 5에 나타내었다.

지터가 증가할수록 신호가 교차하지 않은 눈 열림 영역은 감소하며, 수신기의 신호 검출 구간보다 작을 경우 통신 오류가 발생된다. 주기 찌그러짐은 데이터의 최소 시간 간격(Unit Interval, UI) 내에서 신호의 상승 및 하강 구간의 비율을 통해 식별된다. 센서 데이터 송수신기에서 정상 통신을 위한 수신 신호의 눈 열림 크기는 약 12 ns, ± 100 mV 이상이 요구된다. 전송 거리 100 m에서 수신된 신호의 눈 열림 크기는 주기적 지터와 주기 찌그러짐으로 인해 신호 검출을 위한 최소 크기를 충족시키지 못하였다. 한편 전송 환경의 잡음에 의한 최대 왜곡은 눈 열림 구간의 크기에 영향을 미치지 않았다.

전송 거리 50 m와 100 m에서 측정한 수신 신호의 지터 히스토그램을 Figs. 6과 7에 나타내었다. 히스토그램에서 각 지터 성분은 확률밀도함수의 형태로 시간 x축에 대한 면적으로 표현되며, y축은 각 성분의 크기를 나타낸다.

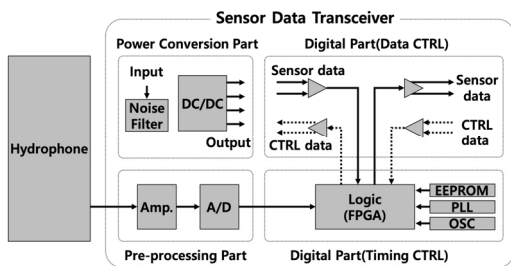


Fig. 3. Diagram of the sensor data transceiver.

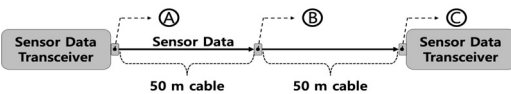


Fig. 4. Test setup for jitter analysis (transmission distance: 0 m, 50 m, 100 m).

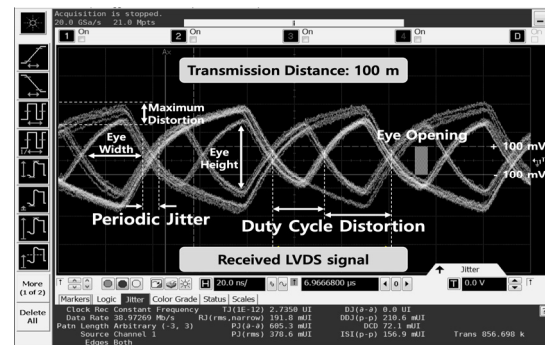


Fig. 5. Eye-pattern for received LVDS (single driver) signal through the 100 m cable (measured by a differential probe).

케이블 전송 거리에 따른 지터 히스토그램의 상세 측정 결과를 Table 1에 종합하여 나타내었다.

전송 거리가 증가함에 따라 전체 지터량이 증가하였으며, 랜덤 지터의 증가폭에 비해 결정성 지터는 큰 증가폭을 나타내었다. 특히 결정성 지터 중에서도 주기적 지터와 주기 찌그러짐이 크게 증가하였다.

주기적 지터는 전원 스위칭으로 인한 누화 또는 전자파 간섭에 의해 주로 발생한다. 본 시험에서 센서

데이터 송수신기는 보드 상태로 시험됨에 따라 전자파 간섭에 다소 취약한 것으로 판단된다. 따라서 향후 송수신기의 차폐를 통해 전자파 취약성을 보완할 수 있다.

반면 주기 찌그러짐(DCD)은 전송 신호의 상승 및 하강 속도 비대칭성에 의해 발생하므로 등화기의 적용을 통해 경감이 가능하다. 그러나 등화기의 적용은 회로복잡도, 소비전력 및 비용의 증가를 수반하므로 다채널을 다루는 장비에서는 보다 간결한 방법이 요구된다. 따라서 기존 센서 데이터 송수신기의 회로 변경과 전력소모를 최소화하면서 주기 찌그러짐을 감소시키는 방안을 제안하였다.

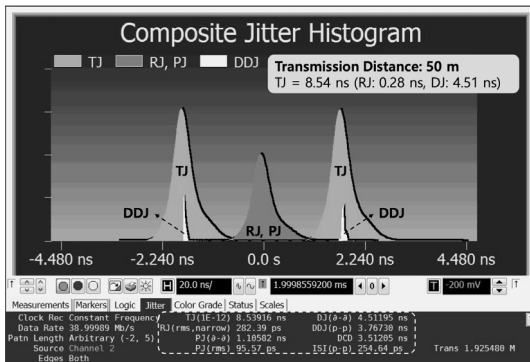


Fig. 6. Jitter measurement result for received LVDS (single driver) signal through the 50 m cable.

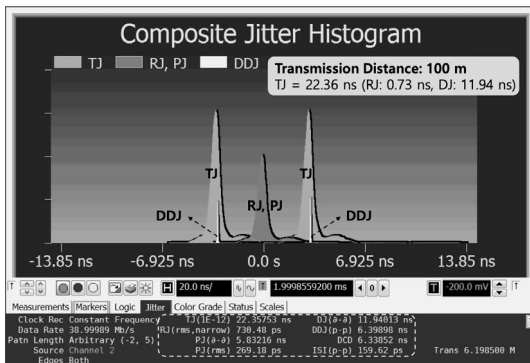


Fig. 7. Jitter measurement result for received LVDS (single driver) signal through the 100 m cable.

Table 1. Jitter measurement results.

Jitter	Jitter per transmission distance [ns]		
	0 m	50 m	100 m
TJ (1E-12)	2.88	8.54	22.36
- RJ	0.07	0.28	0.73
- DJ	1.87	4.51	11.94
· PJ	0.24	1.11	5.83
· DDJ	1.39	3.77	6.40
: DCD	1.66	3.51	6.34
: ISI	0.05	0.25	0.16

III. 원거리 데이터 전송 시스템 설계

단일 드라이버 구동 방식에서의 주기 찌그러짐을 개선하기 위하여 출력 전압을 높인 병렬 드라이버 구동 방식과 감쇠 신호를 선보상하는 고역 강조 구동 방식을 센서 데이터 송수신기에 각각 적용하였다. LVDS 전송 방식에 따른 입력 신호, 회로 구성 및 출력 신호는 Fig. 8과 같이 구분된다.

단일 드라이버 구동 방식은 가장 일반적인 LVDS 구성으로 하나의 드라이버로 신호를 전송한다. 병렬 드라이버와 고역 강조 구동 방식은 출력 신호를 증폭하기 위해 송신부에만 LVDS 드라이버가 추가 적용되므로, 기존 송수신기 회로의 설계 변경을 최소화한다는 점에서 이점을 갖는다. 병렬 드라이버 구동 방식이 출력 신호의 전체 구간을 증폭하는 반면, 고역 강조 구동 방식은 케이블 특성에 의해 원거리 전송 후 감쇠될 고주파 성분을 고려하여 Fig. 8과 같

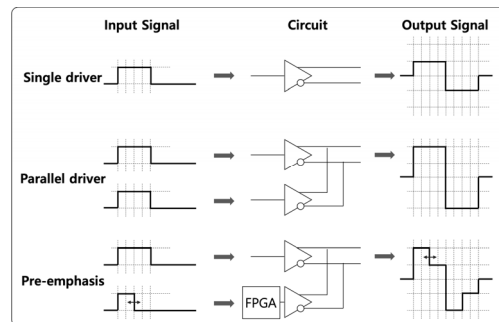


Fig. 8. LVDS data transmission techniques.

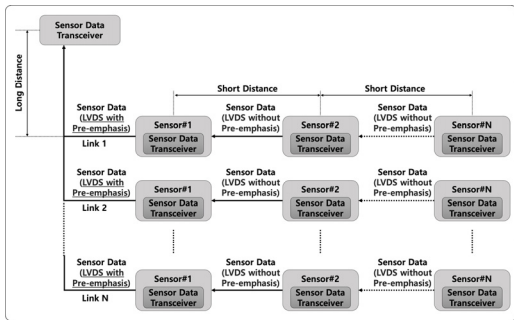


Fig. 9. Diagram of the long distance cable transmission for underwater acoustic sensor data.

이 일부 구간만 증폭한다. 고역 강조 구동 방식은 추가 드라이버의 출력단에 커패시터를 적용하거나, 드라이버의 출력을 제어하여 구현이 가능하다. 고역 강조 구동 방식을 커패시터로 구현할 경우, 부품 변경 없이는 강조 신호의 길이 조절이 어려우며 항상 고역 강조로 구동되는 단점을 지닌다. 이를 보완하기 위해 기존 회로의 FPGA를 활용하여 LVDS 드라이버의 출력을 디지털로 제어하였다. 디지털 제어 방식은 전송 거리에 따라 강조 신호의 길이 조절이 가능하므로 필요에 따라 단일 드라이버와 병렬 드라이버 및 고역 강조 구동 방식의 형태로 운용할 수 있다.

다채널의 수중 음향센서 운용 환경을 고려하여 제안하는 원거리 전송 방식의 구성 예시는 Fig. 9와 같다.

센서 데이터 송수신기는 수중 음향센서와 일체형으로 구성된다. 각 센서는 통신 링크 단위로 상위의 센서 데이터 송수신기와 연동하며, 각 통신 그룹의 첫 번째 센서는 제어 명령을 수신하여 그룹 내 센서로 전달하고 센서들로부터 음향 데이터를 수신하여 상위의 송수신기로 원거리 전송한다. 제안된 원거리 전송 방식은 고역 강조를 전송 거리가 긴 구간에서만 적용하고, 비교적 짧은 구간은 미적용하여 불필요한 전력의 소모와 신호간 간섭 영향을 최소화하였다.

IV. 시험 결과

병렬 드라이버 구동 방식으로 신호를 전송하고, 케이블 전송 거리 50 m, 100 m에 대한 수신 신호의 중첩파형을 Figs. 10과 11에 각각 나타내었다. 병렬 드라이버 구동 방식은 출력 신호의 증가를 통해 케이

블 전송 거리 50 m에서는 눈 열림 크기 18.9 ns를 확보하여 통신이 가능하였다. 반면, 케이블 전송 거리 100 m에서는 주기 찌그러짐 현상은 개선되었으나 신호간 간섭에 의한 지터 증가로 눈 열림 크기가 2.2 ns로 감소하여 통신 오류가 발생하였다.

고역 강조 기법은 구조적으로 병렬 드라이버 구동 방식과 유사하지만 전체 출력 신호의 크기를 증가시

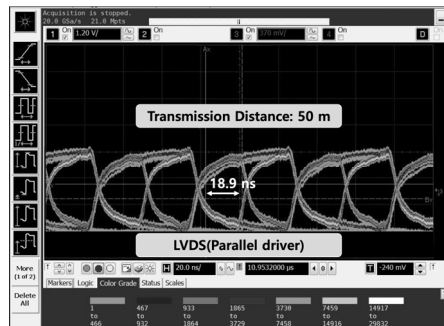


Fig. 10. Eye-pattern for received LVDS (parallel driver) signal through 50 m cable (measured by single-ended probes).

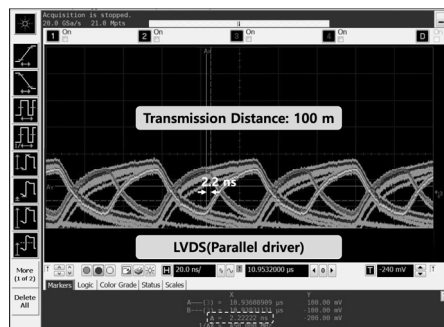


Fig. 11. Eye-pattern for received LVDS (parallel driver) signal through 100 m cable (measured by single-ended probes).

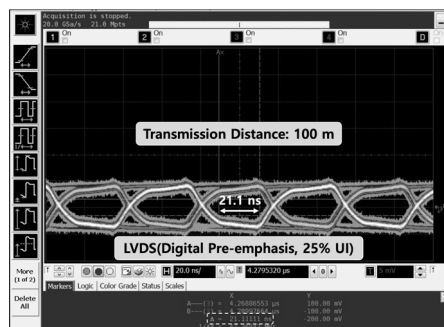


Fig. 12. Eye-pattern for received LVDS (pre-emphasis) signal through 100 m cable (measured by a differential probe).

키지 않고 전송 시 감쇠될 부분만 증가시킨다는 점에서 차이점을 갖는다. 본 시험에서는 디지털 제어를 통해 출력 신호의 강조 구간을 UI 길이의 25%로 설정하고, 수신 신호의 눈 열림 크기를 확인하였다. 케이블 전송 거리 100m에 대한 수신 신호의 눈 열림 크기는 Fig. 12와 같이 21.1 ns를 확보하여 안정적인 통신이 가능하였다.

시험 결과를 통해 병렬 드라이버 전송 방식은 신호간 간섭이 증가하여 원거리 전송 성능이 저하됨을 확인하였다. 반면 고역 강조 기법은 주기 찌그러짐 현상 개선을 통해 수신 신호의 눈 열림 크기를 확보하여 원거리 전송에 적합함을 확인하였다.

V. 결 론

수중 음향센서 데이터의 원거리 케이블 전송에 따른 지터 특성을 분석하였다. 센서 데이터송수신기의 전송 거리가 증가함에 따라 케이블 손실에 의한 신호 감쇠와 지터 성분 중 주기 찌그러짐이 크게 발생함을 확인하였다. 분석 결과를 바탕으로 전송 매체의 전송 손실을 선보상하는 고역 강조 LVDS 전송 방식을 제안하고, CAT5e 사양의 상용 UTP 케이블에 대한 원거리 전송 시험을 수행하여 성능을 검증하였다. 제안된 전송 방식은 전송 거리에 따른 고역 강조 신호의 적용 및 길이 최적화를 통해 원거리에서도 안정적인 전송이 가능하였다.

따라서 본 연구 결과는 수중에 위치한 다채널의 센서 음향데이터를 케이블을 통해 원거리 전송하는 시스템에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

References

1. J. Hancock, "Jitter-Understanding it, measuring it, eliminating it; Part 3: Causes of jitter," in HFE PDF Archives (HFE, Available from: <https://www.highfrequencyelectronics.com/>, 2004)
2. R. Stephens, "Jitter analysis: The dual-Dirac model, RJ/DJ, and Q-scale," Agilent Technologies Inc., White Paper, 2004.
3. P. Heydari, "Analysis of the PLL jitter due to power/ground and substrate noise," IEEE Trans. Cir. Sys. I Reg. Pap. **51**, 2404-2416 (2004).

4. J. Buckwalter and A. Hajimiri, "A 10 Gb/s Data-Dependent Jitter Equalizer," Proc. IEEE CICC, 39-42 (2004).
5. J. Goldie, "LVDS goes the distance," SID Int. Symp. Dige. Tech. Pap., 126-129 (1999).
6. INCITS, "Fibre Channel Methodologies for Jitter and Signal Quality Specification," MJSQ, Tech. Rep. Rev. 10.0, 2003.
7. J. H. Han, B. H. LEE, J. S. Seol, and J. M. Lee, "Experimental analysis and design of digital telemetry system with LVDS for sonar" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. Suppl. 2(s), **32**, 89-90 (2013).

저자 약력

▶ 한 정 희 (Jeong-Hee Han)



2007년 2월: 제주대학교 해양산업공학 학사
2009년 2월: 제주대학교 해양정보시스템 석사
2009년 3월 ~ 2011 8월: 한국해양연구원 연구원
2011년 9월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임 연구원

▶ 이 병 화 (Byung-Hwa Lee)



2005년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터 공학부 학사
2007년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 석사
2018년 8월: 포항공과대학교 전자공학과 박사수료
2007년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임 연구원

▶ 김 동 욱 (Dong-Wook Kim)



2009년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터 공학부 학사
2011년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터 공학부 석사
2015년 2월: 경북대학교 전기공학과 박사
2015년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임 연구원

▶ 이 정 민 (Jeong-Min Lee)



1990년 2월: 전북대학교 전기공학과 학사
2001년 8월: 부산대학교 전자공학과 석사
2010년 2월: 부산대학교 전자공학과 박사
1990년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임 연구원