

연선의 혼합 모드 산란 계수 측정 시스템

안정식*

Mixed-mode S-parameter Measurement System of Twisted Pairs

Jungsik Ahn*

Agency for Defense Development, Daejeon, 34186 Korea

요 약

본 논문에서는 연선의 성능 측정을 위한 혼합 모드 산란계수 측정시스템을 제안하였다. 연선은 균형 형태의 소자로서 일반적으로 동축 형태로 구현된 네트워크 분석기를 이용하여 특성 측정이 불가능하다. 이때, 발룬을 이용하여 균형 신호와 불균형 신호 간 변환을 통해 측정이 가능하지만 측정 주파수 대역폭이 제한되는 문제가 있다. 제안하는 시스템은 발룬을 사용하지 않고 4포트 벡터 네트워크 분석기와 설계한 고정구를 이용하여 혼합모드 산란계수를 측정하여 연선의 성능을 측정한다. 제안하는 시스템을 이용하여 상용 이더넷 케이블의 성능을 측정해보고 발룬의 이용한 결과와 비교해 보았다. 이를 통해 제안하는 시스템을 이용해 연선의 성능 측정이 가능함을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we proposed a mixed-mode s-parameter measurement system for measuring the performance of twisted pairs. A twisted pair is a balanced type component, its characteristics can not be directly measured using network analyzer, which is generally implemented as a unbalanced type. It is possible to convert between balanced signal and unbalanced signal by using a balun but it restricts the frequency range of the measurement system. The proposed system measures the performance of twisted pairs by measuring mixed-mode s-parameters using a 4-port vector network analyzer and a designed fixture, without using a balun. We measured the performance of a commercial Ethernet cable and compared with the results which measured by using baluns. The results showed that the proposed system is capable of measuring the performance of twisted pairs.

키워드 : 혼합 모드, S파라미터, 연선, 네트워크 분석기

Key word : Mixed-mode, S-parameters, Twisted pair, Vector network analyzer

Received 29 March 2018, Revised 8 April 2018, Accepted 12 April 2018

* Corresponding Author Jungsik Ahn(E-mail:jsahn@add.re.kr, Tel:+82-42-821-3749)

Agency for Defense Development, Daejeon, 34186 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.6.888>

pISSN:2234-4772

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

유선 환경에서 안정적인 RF 신호 전송을 위한 방법은 전송선로를 이용하는 것이다. 디지털 통신 시스템은 같은 신호 대비 적은 전력과 잡음 강건성을 위해 차동 신호(differential signaling) 방식을 적용하였다[1]. 차동 신호를 적용한 디지털 장비간의 전송선로로는 두 신호선을 꼬아서 만든 연선(twisted pair)을 많이 사용한다. 연선은 간단하고 저렴하게 구현 가능한 동시에 외부 전자기간섭을 줄이는 좋은 특성을 가지고 있다[2].

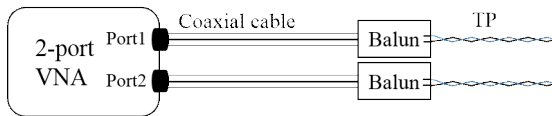


Fig. 1 Measuring a characteristic of a twisted pair using VNA and baluns

통신 케이블의 성능은 S파라미터를 이용하여 표현할 수 있다. 연선 케이블에 대한 S파라미터는 그림 1과 같이 2포트 벡터 네트워크 분석기(vector network analyzer, VNA)를 이용하여 측정할 수 있다. VNA는 포트별 주파수에 따른 삽입 손실(insertion loss)과 반사손실(return loss)을 측정해주는 장비이다. 일반적으로 VNA는 불균형(unbalanced) 형태인 동축(coaxial) 시스템으로 구현되어 있어 균형(balanced) 형태인 연선과 바로 연결하여 특성 측정이 불가능하다. 이런 불균형 시스템과 균형 시스템 간 연결을 위해 발룬(balun)을 이용한다. 발룬은 변압기(transformer)의 원리와 접지를 이용하여 균형 신호를 불균형 신호로 혹은 불균형 신호를 균형 신호로 바꾸어 주는 장비이다. 하지만 실제 구현된 발룬들은 자체의 특성을 보유하고 있어 이를 이용한 정확한 DUT(device under test) 특성 측정에 한계가 있다. 특히 고주파의 경우 성능한계가 존재하여 상용 발룬들은 사용 대역폭을 제한하여 성능을 보장한다. 발룬을 이용한 균형 시스템의 정확한 성능 측정을 위한 캘리브레이션 방법[3]이 소개되었지만 복잡한 단점과 여전히 측정 주파수가 제한되는 단점이 존재한다.

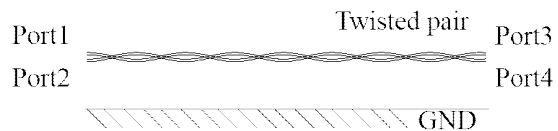
연선과 같은 균형 소자는 차동 네트워크(differential network)로 모델링하여 혼합 모드(mixed-mode) S파라미터로 해석이 가능함이 알려져 있다[4]. 다양한 연구에서 혼합 모드 S파라미터를 이용하여 균형 소자의 특성

을 측정하는 방법을 소개 하였다[5, 6]. 이 방법은 발룬을 사용하지 않고 균형 소자의 특성을 측정할 수 있어 발룬의 문제점인 주파수 제한이나 정확성 문제를 해결하여 균형 소자의 특성을 측정 할 수 있도록 하였다. 최근에는 VNA를 이용하여 연선 케이블의 특성을 측정하는 방법[7]과 이를 이용한 다양한 응용이 소개되었다[8, 9]. 해당 연구들에서는 VNA와 연선의 연결과 측정을 위한 간단한 구현 방법을 소개하였다.

본 논문에서는 혼합 모드 S파라미터를 이용하여 연선의 성능을 측정하는 방법을 소개하고 이전 연구결과에서 간단히 소개된 측정 방법을 구체화한 혼합 모드 S파라미터 측정 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 4포트 VNA와 설계한 고정구(fixture)를 이용하여 발룬을 사용하지 않고 연선의 특성 측정이 가능하도록 한다. 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에선 시스템 모델을 소개하고 혼합모드 신호에 대해 설명한다. 그리고 일반적인 단일 종단(single-ended) S파라미터에서 혼합 모드 S파라미터를 얻어내는 방법을 소개한다. 3장에서는 제안하는 시스템과 그 설계 방법을 소개한다. 4장에서는 제안한 시스템을 이용하여 상용 이더넷 케이블의 성능 측정을 수행하고 고성능 발룬을 이용하여 측정된 결과와 비교해 본다. 5장은 결론을 이야기하고 논문을 마무리한다.

II. 차동 네트워크와 혼합 모드 S파라미터 변환

연선 케이블은 그림 2와 같이 각 단선(wire)을 접지를 기준으로 포트로 생각하여 4포트 단일 종단 네트워크로 모델링할 수 있다. 연선은 통신을 위한 전송 선로로 주로 사용되므로 이 경우 2포트씩 짝을 이뤄 논리적 포트(logical port)로 가정하여 2포트 차동 네트워크로 모델링이 가능하다. 그림 2 (c)와 같이 포트1과 포트2를 차동 포트1로 포트3과 포트4를 차동 포트2로 정의하면 차동 네트워크의 차동 모드(differential-mode)와 공통 모드 (common-mode) 전압, 전류 그리고 임피던스는 다음과 같이 표현 가능하다[4].



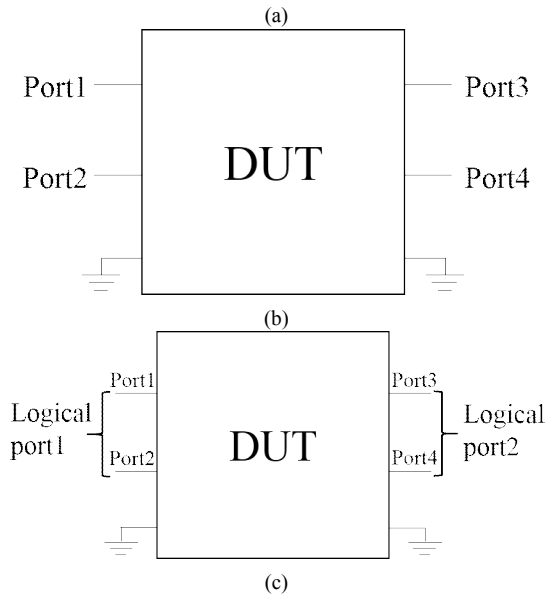


Fig. 2 Modeling of a twisted pair, (a) Schematic of twisted pair and ground, (b) Diagram of a 4-port single-ended network model, (c) Diagram of a 2-port differential network model

$$V_{dn} = V_{2n-1} - V_{2n}, \quad I_{dn} = \frac{I_{2n-1} - I_{2n}}{2} \quad (1)$$

$$V_{cn} = \frac{V_{2n-1} + V_{2n}}{2}, \quad I_{cn} = I_{2n-1} + I_{2n} \quad (2)$$

$$Z_{dn} = 2Z_{0o}, \quad Z_{cn} = \frac{Z_{0e}}{2} \quad (3)$$

여기서 $n=1, 2$ 이며, V_n 은 n 번 포트 전압, I_n 은 n 번 포트의 전류, Z_{0o} 은 기수-모드(odd-mode) 임피던스이며, Z_{0e} 은 우수-모드(even-mode) 임피던스이다. 그리고 단일 종단 모델의 경우처럼 차동 모드와 공통 모드의 정규화된(normalized) 입사 전력(incident power) a_{dn} , a_{cn} 과 반사 전력(reflection power) b_{dn} , b_{cn} 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$a_{dn} = \frac{V_{dn} + Z_{dn}I_{dn}}{2\sqrt{Z_{dn}}}, \quad a_{cn} = \frac{V_{cn} + Z_{cn}I_{cn}}{2\sqrt{Z_{cn}}} \quad (4)$$

$$b_{dn} = \frac{V_{dn} - Z_{dn}I_{dn}}{2\sqrt{Z_{dn}}}, \quad b_{cn} = \frac{V_{cn} - Z_{cn}I_{cn}}{2\sqrt{Z_{cn}}} \quad (5)$$

여기서 $n=1, 2$ 이다.

위의 관계가 성립 할 때, $Z_{0o} = Z_{0e} = Z_0$ 라고 가정하면 단일 종단 S파라미터 행렬 $[S_{se}]$ 은 혼합 모드 S파라미터 행렬 $[S_{mm}]$ 와 다음의 관계가 성립한다[4].

$$[S_{mm}] = [M][S_{se}][M]^{-1} \quad (6)$$

여기서 $[S_{mm}]$, $[S_{se}]$ 그리고 $[M]$ 은 다음과 같다.

$$[S_{mm}] = \begin{bmatrix} S_{dd11} & S_{dd12} & S_{dc11} & S_{dc12} \\ S_{dd21} & S_{dd22} & S_{dc21} & S_{dc22} \\ S_{cd11} & S_{cd12} & S_{cc11} & S_{cc12} \\ S_{cd21} & S_{cd22} & S_{cc21} & S_{cc22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[S_{se}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[M] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 $S_{ddij}(S_{ccij})$ 는 차동 네트워크의 논리적 j 포트의 차동 모드(공통 모드) 입력에 따른 논리적 i 포트의 차동 모드(공통 모드) 응답의 비(ratio)이며, $S_{cdij}(S_{dcij})$ 는 논리적 j 포트의 차동 모드(공통 모드) 입력에 따른 논리적 i 포트의 공통 모드(차동 모드) 응답비이다. 그림 2 (a)의 연선의 경우 삽입 손실은 S_{dd12} 또는 S_{dd12} 로 표현 가능하며, 반사 손실은 S_{dd11} 또는 S_{dd22} 로 표현된다. 연선 쌍의 경우 각 연선 끝단을 터미네이션 시켜 근단 누화(near-end crosstalk, NEXT)와 원단 누화(far-end crosstalk, FEXT)를 S_{dd21} 또는 S_{dd12} 으로 표현할 수 있다.

III. 제안하는 측정 시스템

본 논문에서는 식 (6)을 이용하여 연선의 4포트 단일 종단 S파라미터를 측정하여 혼합 모드 S파라미터를 얻음으로써 케이블의 성능을 측정하는 방법을 이용한다. 연선의 4x4 $[S_{se}]$ 를 얻기 위해선 4포트 VNA의 각 포트

와 연선의 각 단선을 연결해주어야 한다. 또한 VNA의 각 포트의 접지가 공통 접지가 되도록 하여야 한다.

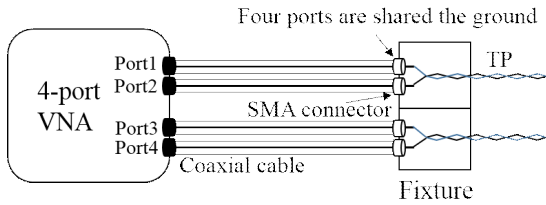


Fig. 3 The proposed twisted pairs characteristic measurement system

이를 위해 그림 3과 같은 시스템 설계하였다. VNA 각 포트와 연결된 동축 케이블을 SMA (SubMiniature version A) 커넥터를 이용하여 전도가 가능한 재질로 만들어진 고정구에 연결한다. 고정구의 새시를 통해 VNA의 각 포트의 접지가 연결된다. SMA 커넥터의 핀에 연선의 각 단선을 연결하여 VNA 포트마다 하나의 단선이 연결되도록 한다. 고정구의 SMA 커넥터 위치는 시료 연결 시 연선의 꼬임이 최대한 풀리지 않아 케이블 특성의 변형이 일어나지 않을 수 있도록 가능한 가깝게 위치시킨다. 그림 3과 같이 각 연선마다 새시를 이용하여 격벽을 세워 분리한다. 이 격벽은 두 가지 역할을 수행한다. 첫 번째는 연선과 고정구의 연결단에서 이웃한 연선끼리 발생하는 누화를 방지한다. 일반적인 VNA들은 포트들이 나란히 배치되어 있는 구조로 되어 있고 정확한 측정을 위해선 동축 케이블도 같은 길이의, 짧은 것을 사용하도록 권장된다. 이런 제약 때문에 시료가 연결 시 나란히 배치될 수밖에 없다. 누화 측정의 경우 측정 신호 레벨이 낮은 정밀한 측정이기 때문에 고정구와 연선을 연결 과정에서 연선 간 확실한 분리가 되지 않아 누화가 발생한다면 측정 결과에 큰 영향을 미친다. 격벽은 연선 연결단에서의 누화를 차단해주는 역할을 제공한다. 두 번째는 연선과 VNA 동축 케이블 사이의 안정적인 필드를 생성 해준다. VNA와 연선이 연결되기 위해서는 어쩔 수 없이 연선의 꼬임이 풀려 균형 형태가 VNA의 불균형 구조 변경될 수밖에 없다. 이때 VNA 포트의 신호 핀과 단선만 연결을 해놓는다면 주위의 환경에 따라 연결 부위 주위의 전자기 필드 분포가 예측 불가능하게 된다. 격벽을 이용하여 일정한 접지면을 제공하면 그림 4와 같이 연선 연결부분의 필드를 일정한 양상으로 분포할 수 있게 해준다. 일정한

필드의 분포는 주위의 환경을 배제하고 안정된 측정 환경을 제공한다.

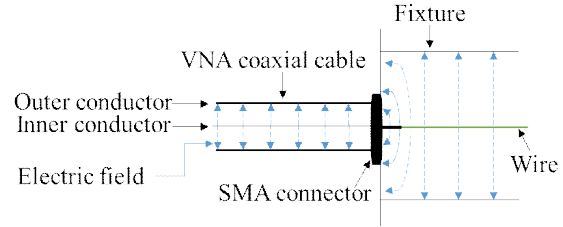
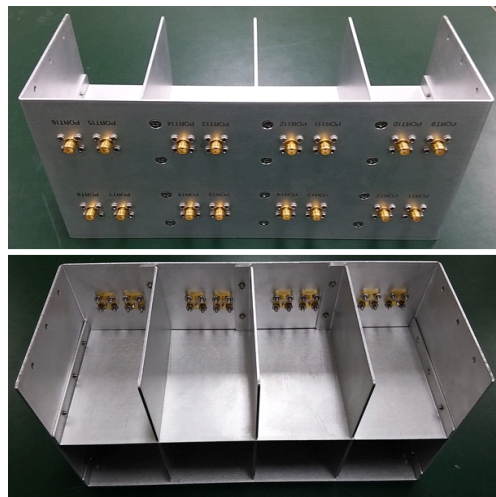


Fig. 4 Cross section of a connection part of wire and fixture with electric field lines

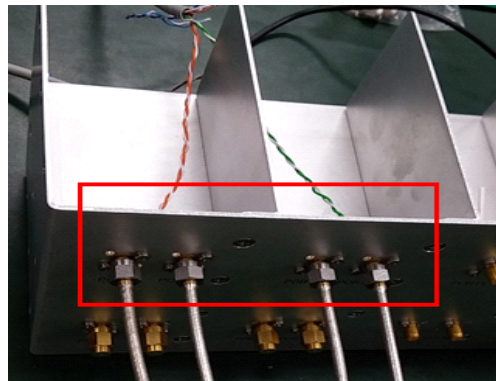
IV. 시스템 제작 및 측정 결과

제안된 시스템을 이용하여 상용 이더넷 케이블의 성능을 측정해보았다. 시료는 2m 길이의 Category 5e 케이블을 사용하였다. 실제 제작된 실험 고정구와 구성은 그림 5와 같다.

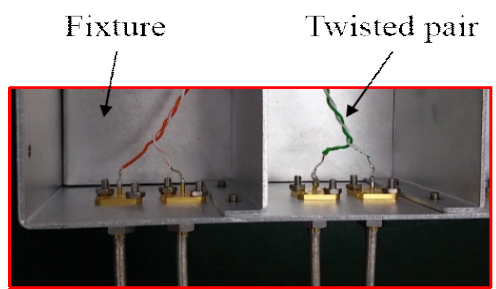
고정구의 새시는 알루미늄 재질을 이용하여 제작하였고 커넥터는 50Ω SMA 커넥터를 이용하였다. SMA 커넥터를 쌍으로 배치하여 시료 연결 시 연선의 꼬임 풀림이 최소가 될 수 있도록 한다. 시료 연결단은 각 연선마다 새시 격벽으로 충분히 분리되도록 하였다. 측정 시료와 SMA 커넥터는 납땜을 이용하여 연결하였다. VNA의 캘리브레이션은 동축 케이블 끝단에서 4포트 캘리브레이션을 수행하였다. 시스템의 검증을 위해서 같은 시료를 고성능 발룬을 이용하여 그림 1과 같은 구성으로 측정하였다. 캘리브레이션은 동축 케이블과 연결된 발룬 끝단에서 2포트 캘리브레이션을 수행하였다. 발룬은 Category 7 시험용 제품(BH Electronics, 모델명 040-0092)을 이용하였다. 발룬의 성능 보장 주파수 범위 내에서 두 방법의 측정 결과를 비교하여 그림 6에 나타내었다.



(a)



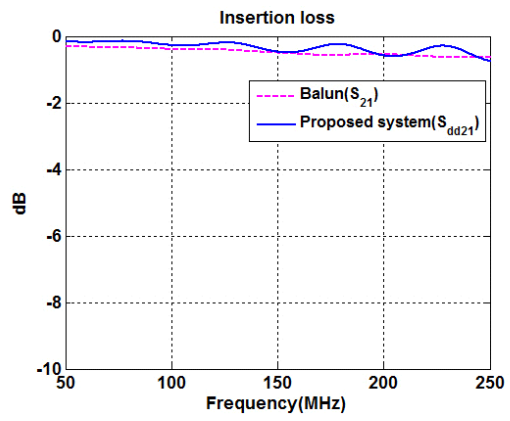
(b)



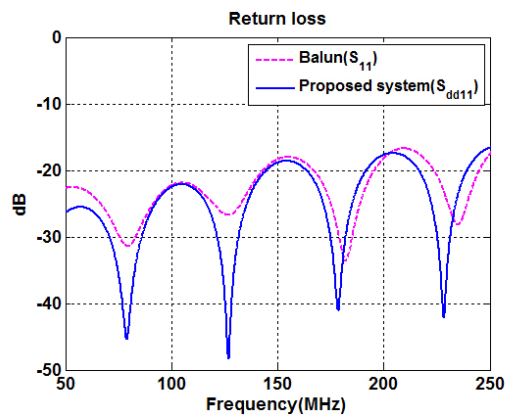
Coaxial cable connected to vector network analyzer

(c)

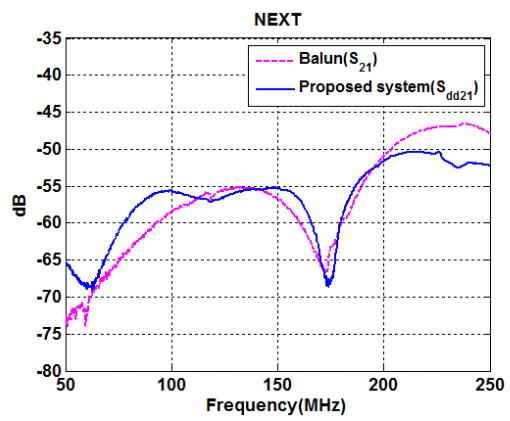
Fig. 5 Fabricated test fixture, (a) fabricated test fixture without upper cover, (b) connection of SMA connectors and VNA coaxial cables on fixture, (c) twisted pairs and SMA connectors were connected by soldering



(a)



(b)



(c)

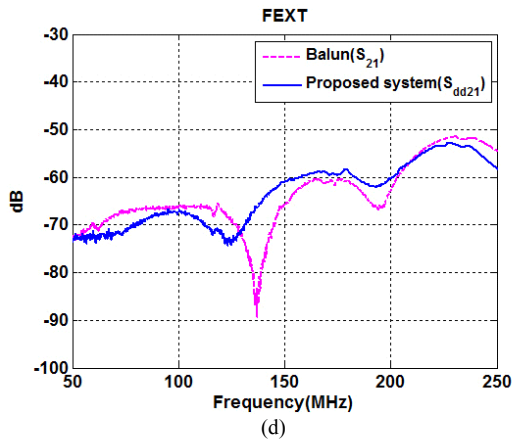


Fig. 6 Comparison of measurement results of a Cat. 5e UTP cable using baluns and the proposed system, (a) insertion loss (b) return loss, (c) NEXT, (d) FEXT

두 방법의 측정 결과, 측정 시료인 Category 5e 이더넷 케이블의 최대 주파수 규격인 100MHz에서 삽입 손실과 반사 손실은 0.2dB 이내, 근단 누화과 원단 누화는 3dB 이내로 일치하였다. 근단 누화과 원단 누화과 같은 측정 신호 수준이 -55dB 이하로 매우 낮은 신호에서도 3dB 이내로 일치하는 결과를 통해 제안한 시스템이 고성능 발룬을 이용하여 측정하는 수준의 정확도를 보여줌을 확인 할 수 있었다. 이 결과를 통해 제안한 방법을 이용하여 연선 케이블 성능 측정이 가능함을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 연선의 성능 측정을 위한 혼합 모드 산란 계수 측정시스템을 제안하였다. 제안한 시스템을 이용하여 상용 이더넷 케이블의 저주파에서의 성능을 측정하였고, 그 결과가 고성능 발룬을 이용하여 얻은 결과와 일치하는 것을 확인했다. 이를 통해 제안한 측정시스템과 방법이 유효함을 확인하였다. 제안된 시스템은 발룬을 이용하지 않기 때문에 발룬의 제한점인 높은 주파수에서의 연선 성능 측정이 가능하다. 제안한 시스템은 레이더와 카메라 등 다양한 센서 네트워크와 기계 학습 및 인공지능 등의 적용으로 연선구조를 적용한 높은 주파수 성능 특성을 필요로 하는 자동차 네트

워크용 케이블이나 군용 통신케이블 등의 성능 측정에 적용할 수 있을 것으로 기대한다[10, 11].

References

- [1] R. Ayyagari and K. Gopal, "Low power LVDS Transmitter Design and Analysis," in *Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Communications*, Pattaya, pp. 42-45, 2014.
- [2] C. R. Paul and J. W. McKnight, "Prediction of crosstalk involving twisted pairs of wires, Part I, a transmission-line model for twisted-wires pairs," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-21, no. 2, pp. 92-105, May 1979.
- [3] C. R. Curry, "How to calibrate through balun transformers to accurately measure balanced systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 3, pp. 961-965, Mar. 2003.
- [4] D. E. Bockelman and W. R. Eisenstadt, "Combined differential and common-mode scattering parameters: Theory and simulation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, no. 7, pp. 1530-1539, July 1995.
- [5] B. Mund and C. Pfeiler, "Balunless measurement of coupling attenuation of screened balanced cables up to 2 GHz," in *Proceedings of the 64th International Wire and Cable Symposium Conference*, Atlanta: GA, pp. 509-518, 2015.
- [6] H. Tran, L. L. Barannyk, A. Elshabini and F. Barlow, "A Study of Differential Signaling: Stable and Accurate Mixed-Mode Conversion and Extraction of Differential S-Parameters," in *Proceedings of the IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices*, Boise: ID, pp. 1-4, 2015.
- [7] Keysight Technologies, Balanced cable measurement using the 4-port ENA - FAQs [Internet]. Available: www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/BalancedCable_FAQ.pdf.
- [8] C. J. Collins and J. R. Bray, "In situ crosstalk measurements of long cables—the multi-network analyzer method," in *Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal/Power Integrity*, Washington: DC, pp. 339-344, 2017.
- [9] C. J. Collins and J. R. Bray, "Worst-case crosstalk measurements of cables—the multinet network analyzer method," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 4, pp. 1061-1068, Aug. 2018.

- [10] Y. J. Ko and S. Y. Yi, "Panorama Imaging System Using Hyperbolic Cylinder Reflector and Image Reconstruction Algorithm for Automative AVM System," *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, vol. 7, no. 6, pp. 807-816, June 2017.
- [11] H. G. Hwang, H. W. Kim, B. S. Kim, Y. T. Woo, I. S. Shin, J. H. Shin, Y. J. Lee and B. W. Choi, "A Development of Integrated Control System for Platform Equipments of Unmanned Surface Vehicle (USV)," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 21, no. 8, pp. 1611-1618, Aug. 2017.



안정식(Jungsik Ahn)

2011년 2월 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 학사
2014년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
2014년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원
※관심분야 : 혼합 모드, 누화 측정