

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.1.71>

IIBC 2018-1-10

광신호의 공간 해상도 향상을 위한 초 분해능 알고리즘 연구

A Study on Super Resolution Algorithm to Improve Spatial Resolution of Optical Signals

이병진*, 유봉국**, 김경석***

Byung-Jin Lee*, Bong-Guk Yu**, Kyung-Seok Kim***

요약 현재 설치된 광섬유의 문제를 모니터링 하는데 가장 널리 사용되는 방법은 Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)이다. OTDR는 FTTx 네트워크를 테스트하기 위해 설계된 계측기이며, 전송 손실 및 접속 손실과 같은 광섬유의 물리적 특성을 평가한다. OTDR을 이용하여 광로상의 문제점을 정확히 파악하기 위해서는 Spatial resolution을 높이는 것이 중요하다. 펄스폭이 두 반사체 사이의 거리 두 배보다 작을 때는 두 반사체에서 반사되는 신호는 상호간에 겹침 없이 반사되므로 반사되는 신호의 구분이 가능하지만 펄스폭이 두 반사체 사이의 거리 두 배보다 클 때에는 두 반사 펄스가 겹쳐져 반사되는 신호가 구분되지 못한다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해서 본 논문에서는 초 분해능 알고리즘을 적용하여 Spatial resolution 향상 방법을 제안하였으며, 시뮬레이션 결과, 초 분해능 알고리즘 적용 시에 분해능이 향상 되어 이벤트 구간을 더 정밀하게 분석할 수 있었다.

Abstract The optical time domain reflectometer (OTDR) is the most widely used method to monitor problems with currently installed optical fibers. The OTDR is an instrument designed to test the FTTx network and evaluates the physical properties of the fiber, such as transmission loss and connection loss. It is important to improve the spatial resolution in order to accurately grasp the optical path problems by using the OTDR. When the pulse width is less than twice the distance between the two reflectors, the signals reflected from the two reflectors are reflected without overlap, so that the reflected signal can be distinguished. However, when the pulse width is larger than twice the distance between the two reflectors, so that the reflected signal can not be distinguished. In order to overcome these limitations, this paper proposed a method of improving spatial resolution by applying a super resolution algorithm. As a result of the simulation, the resolution is improved when the super resolution algorithm is applied, and the event interval can be analyzed more precisely.

Key Words : optical time-domain reflectometer, spatial resolution, cross-correlation, super resolution algorithm

1. 서론

유선 통신 시장은 FTTH (Fiber To The Home)로 옮겨

가고 있다. 제 4 세대 LTE 서비스의 경쟁과 광 중계기의 보급으로 인해 기지국이 소형화됨에 따라 이동 통신 시장은 반경 25km 이내의 안테나 타워에 널리 퍼져 있

*준회원 충북대학교 전파통신공학과

**준회원 ㈜GCI

***정회원 충북대학교 정보통신공학과 부교수(교신저자)

접수일자: 2018년 1월 3일, 수정완료: 2018년 2월 3일

게재확정일자: 2018년 2월 9일

Received: 3 January, 2017 / Revised: 3 February, 2018

Accepted: 9 February, 2018

***Corresponding Author: kseokkim@cbmu.ac.kr

Department of Electrical and Electronic Engineering, Chungbuk National University, Korea

다. 5G 시대의 도래와 IoT (Internet of Things) 시장의 활성화로 향후 광섬유 보급이 급격히 증가 할 것이다. 현재 설치된 광섬유의 문제를 모니터링 하는데 가장 널리 사용되는 방법은 Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)이다^[1]. OTDR는 FTTx 네트워크를 테스트하기 위해 설계된 계측기이며, 전송 손실 및 접속 손실과 같은 광섬유의 물리적 특성을 평가한다. OTDR은 광섬유 통신 시스템의 제조, 건설 및 유지 보수에 널리 사용된다. OTDR을 이용하여 광로상의 문제점을 정확히 파악하기 위해서는 Spatial resolution을 높이는 것이 중요하다. Spatial resolution은 dynamic range와 더불어 OTDR의 성능을 나타낼 수 있는 가장 대표적인 파라미터 이다. 펄스폭이 두 반사체 사이의 거리 두 배보다 작을 때는 두 반사체에서 반사되는 신호는 상호간에 겹침 없이 반사되므로 반사되는 신호의 구분이 가능하지만 펄스폭이 두 반사체 사이의 거리 두 배보다 클 때에는 두 반사 펄스가 겹쳐져 반사되는 신호가 구분되지 못한다. 이러한 신호를 구분하기 위해서는 Spatial resolution을 높여야 한다. Spatial resolution을 높이려면 10ns 이하의 좁은 펄스폭을 사용해야 하지만, 펄스의 폭이 좁아짐에 따라 측정 가능한 광파이버의 거리가 짧아지고, 수신 대역폭이 큰 수신기가 필요하게 된다. 수신 대역폭이 증가함에 따라 수신기의 잡음 양은 비례 적으로 증가하므로 OTDR의 dynamic range가 감소한다. 즉, 종래의 단일 펄스에 기초한 OTDR의 Spatial resolution과 dynamic range 사이에는 트레이드오프 관계가 있다^[2]. 이러한 문제를 극복하기 위해 교차 상관 기반 OTDR 방법을 사용하는 방법이 제안되었다^{[3][4]}. 이 방법은 공간 분해능을 희생시키지 않고 dynamic range를 증가시키는 것과 같은 몇 가지 장점을 가지고 있지만, 이는 여전히 전자 변조 대역폭에 의해 제한된다^[5]. 따라서 이와 같은 한계를 극복하고 해상도 향상을 위해서는 새로운 초 분해능 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 초 분해능 알고리즘을 적용하여 교차 상관 기반 OTDR의 Spatial resolution 향상 방법을 제안한다. 우리는 시뮬레이션을 통해 제안한 방법을 교차 상관 기반 OTDR과 비교하여 OTDR의 Spatial resolution 성능을 평가한다.

II. 교차 상관 기반 OTDR 시스템

교차 상관기반 OTDR은 그림 1과 같이 downstream

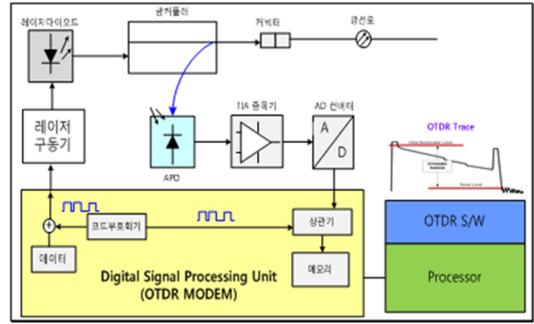


그림 1. 교차 상관 기반 OTDR 시스템 모델
Fig. 1. Cross-correlation based OTDR System Model

데이터 신호와 유사잡음 신호를 섞어서 전송하는 transmitter 부분과 여러 가지 손실, 반사를 겪게 되는 광섬유 부분, 광섬유 내에서 후방 반사되어 돌아온 신호를 수신하고 분석하는 receiver 부분 이렇게 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 데이터 신호를 tap을 이용하여 상관을 위한 reference 신호로 분리해 내고, 광섬유 내에서 후방 반사되어 돌아온 신호를 광 검출기를 통하여 수신한 후, reference 신호와 교차 상관 연산을 통하여 OTDR trace를 그릴 수 있게 된다. 먼저 Golay 신호인 $s(t)$ 는 +1과 -1 값을 번갈아 갖는 이진신호이며, $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_k(t)]$ 로 구성되어 있고 여기서 k 은 signal의 수를 의미한다. 데이터 전송을 위해 광섬유로 들어가는 광신호의 파워는 식 (1)과 같다.

$$P_{input}(t) = P_{avg}(1 + S(t)) \quad (1)$$

여기서 P_{avg} 는 평균 입력 광신호의 파워이다. 광섬유가 절단되거나 굴절률이 다른 매질을 만났을 때 프레넬 반사가 발생하며, 빛이 광섬유를 진행함에 따라 겪는 후방 반사 요인 중에 가장 큰 요인을 차지하는 레일리 산란이다. 따라서 광섬유 내의 distribution of reflectivity $R(\gamma)$ 는 프레넬 반사와 레일리 후방산란을 모두 더해 나타낼 수 있으며, 다음 식과 같다.

$$R(\gamma) = R_{Frenel}\delta(\gamma) + R_0 \frac{v_c}{2} \exp(-av_c\gamma) \quad (2)$$

여기서 a 는 단위길이 당 광섬유 손실을 나타내는 상수이고, R_0 는 단위길이 당 레일리 산란 계수이며 R_{Frenel} 는 프레넬 반사 상수이며 v_c 는 광섬유에서의 빛 속도이다. 광섬유로부터 후방 반사되어 돌아온 신호 $P_b(t)$ 는 PIN-PD를 통하여 전기적인 신호로 검출되며, output power P 의 Laser diode를 통해 modulation 된 후, $R(\gamma)$

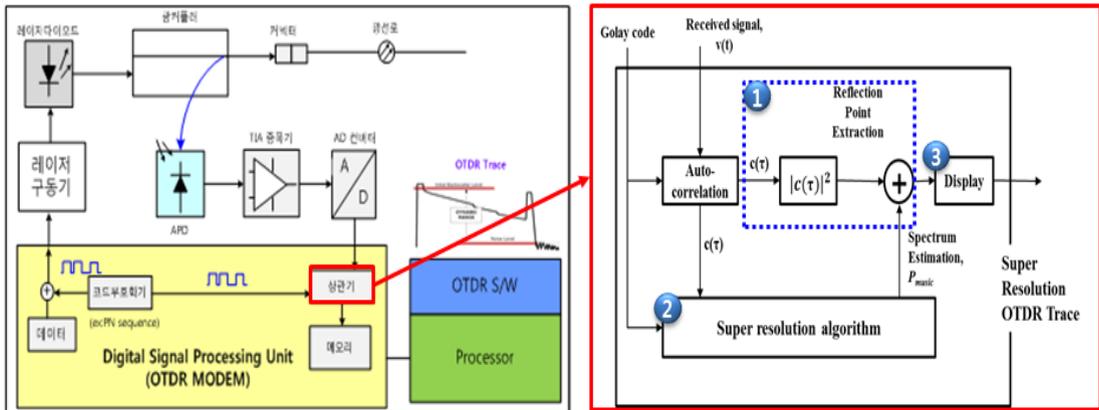


그림 2. OTDR 기반 초 분해능 알고리즘 구현을 위한 프로시저
 Fig. 2. Procedure for Implementing OTDR-based Super Resolution Algorithm

의 reflectivity distribution을 갖는 광섬유를 거쳐 돌아온 신호는 reflectivity distribution과 input signal의 convolution으로 나타낼 수 있으며, 다음 식과 같다.

$$P_b(t) = \eta P \int R(\gamma) s(t-\gamma) d\gamma \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 receiver에 의한 LPF 필터링 효과와 thermal noise, quantization noise를 모두 고려하면 다음 식(4)과 같다.

$$v(t) = \Phi \left[\eta P \int R(\gamma) s(t-\gamma) d\gamma + n_{thm}(t) \right] + n_q(t) \quad (4)$$

$\Phi[\cdot]$ 은 LPF의 필터링 연산을 나타내는 수식기호이고, $n_{thm}(t)$ 과 $n_q(t)$ 는 각각 thermal noise와 ADC의 quantization noise를 나타낸다. goly 신호를 이용한 교차 상관기반 OTDR은 그림 1처럼 PD를 통해 수신된 $v(t)$ 와 goly 신호의 교차 상관을 통해 OTDR trace를 얻을 수 있다. 두 신호의 교차 상관 결과를 $C(\gamma)$ 이라고 하면 $C(\gamma)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C(\gamma) &= \int_0^{m\Delta t} v(t)s(t-\gamma)dt \\ &= \int_0^{m\Delta t} v_0(t)s(t-\gamma)dt + \int_0^{m\Delta t} n_{thm}(t)s(t-\gamma)dt \\ &\quad + \int_0^{m\Delta t} n_q(t)s(t-\gamma)dt \\ &= C_0(\gamma) + C_{thm}(\gamma) + C_q(\gamma) \end{aligned} \quad (5)$$

OTDR에서 반사되어 돌아온 신호와 goly신호와와의 교차 상관은 $0 \sim m\Delta t$ 의 범위를 갖는다. 여기서 m 은 $m = 2^{goly} - 1$ 로 주어지는 goly 신호의 length이고, Δt 는 goly신호에서 한 bit간의 간격을 의미한다. 즉, $m\Delta t$ 는 goly신호의 한 주기에 해당하는 시간이다.

$C_0(\gamma)$ 은 측정된 reflectivity를 나타내고, $C_{thm}(\gamma)$ 항은 TIA로부터 생겨난 thermal noise를 의미하며, $C_q(\gamma)$ 항은 ADC quantization을 나타내는 항이다. $C_{thm}(\gamma)$ 항과 $C_q(\gamma)$ 항은 OTDR trace상에서 더 이상 backscattering 되는 신호가 없을 때 나타나는 noise level과 관련된 항이고, $C_0(\gamma)$ 은 실제로 OTDR trace의 모양을 결정하는 항이다.

III. 분해능 향상을 위한 초 분해능 알고리즘 분석

펄스폭이 두 반사체 사이의 거리 두 배보다 클 때에는 두 반사 펄스가 겹쳐져 반사되는 신호가 구분되지 못한다. 따라서 이를 구분하기 위한 초 분해능의 알고리즘이 필요하다. 그 중 MUSIC(Multiple Signal Classification) 알고리즘은 가장 널리 사용되는 신호 처리 방식으로 연산의 복잡도는 높은 편이나, 고 정밀 추정이 가능한 기술로 알려져 있다^{[6][7]}. MUSIC 알고리즘은 인코히어런트(Incoherent) 신호의 공간 스펙트럼 추정에 사용된다. 신호가 간섭성 일 때, 간섭성 신호는 하나의 신호로 결합될 것이고, 수신된 독립적인 신호는 간섭 신호로 인해 크기가 감소할 것이고, 이는 공분산 매트릭스 랭크 감소 및 더 큰 고유 값의 수를 인입 신호보다 적게 유도할 것이다. 여기서 코히어런트(Coherent)란 단일 주파수 스펙트럼을 갖으며, 위상이 일치된, 균일한 정현파의 광파, 레

이저, 형광등처럼 열이 나지 않는 광이며, 완전한 코히어런트한 광은 단일 파장의 광 즉, 단색광(Monochromatic Light)이다. 따라서 코히어런트 신호를 정확하게 추정하기 위해서는 신호 간의 상관관계를 제거해야 한다. 이를 해결하기 위해서 데이터 행렬의 공액 행렬을 재구성하는 것으로 제안되었다^[8]. 제안된 기법은 수신된 신호 $C(\gamma)$ 에 공분산행렬(Autocorrelation matrix)의 고유 값 분해(Eigenvalue Decomposition)에 기반 한다. 본 논문에서 제안하는 OTDR 기반 초 분해능 알고리즘 구현을 위한 프로시저는 다음 그림2와 같다. 우선 raw데이터 신호의 반사지점을 찾기 위해 교차상관을 거친 신호 $c(\tau)$ 의 Energy값을 계산 후 Peak값 추출한다. 이는 알고리즘을 적용하지 않은 결과이다. 두 번째로 $c(\tau)$ 를 초 분해능 알고리즘에 적용해서 반사지점 결과를 도출한다. 그리고 첫 번째와 두 번째의 결과 값을 함께 출력함으로써 초 분해능 알고리즘 성능을 비교한다. 우선, 수신된 신호의 공분산행렬 R 은 식(6)과 같다.

$$R_x = E\{C(\gamma)C^H(\gamma)\} = APA^H + \sigma_n^2 I = R_s + R_w \quad (6)$$

여기서 H 는 에르미트전치(Hermitian transpose)를 의미하며 A 는 신호 이득 값이다 ($A=1$). 수식 (1)로부터, 공분산행렬 R 은 신호 공분산행렬 R_s 와 잡음공분산행렬 R_w 의 합으로 나타낼 수 있음을 볼 수 있다. $P = E\{C_0(\gamma)C_0^H(\gamma)\}$ 는 $k \times k$ 행렬의 신호의 공분산행렬 행렬이며, R_w 는 잡음공분산행렬이다. 부가잡음은 서로 상관관계가 없으며, 잡음의 평균은 0, 분산은 σ_n^2 으로 동일하다고 가정하면, 잡음공분산행렬은 $R_w = \sigma_n^2 I$ 로 나타낼 수 있다. R_s 는 명백히 행렬계수(Rank)가 k 인 m by m 행렬이다. 여기서 m 은 이벤트 구간에서 반사되어 들어오는 신호의 수이다. 그러므로 각 $(m-k)$ 고유벡터(Eigen vector)는 고유 값(Eigen value) 0을 갖고 있는 잡음 벡터 m by k 에 상응한다. 그 결과 k 신호 벡터는 $(m-k)$ 잡음 벡터와 직교성을 갖는다. k 개의 신호들 간의 상관관계가 없을 경우, $\text{rank}(APA^H) = k$ 이다. 이를 이용하여 공분산행렬 R 은 신호 부분공간과 잡음 부분 공간으로 구분하여 다음 식(7)과 같이 표시 할 수 있다.

$$R_x = APA^H + \sigma_n^2 I = U_S A_S U_S + U_N A_N U_N \quad (7)$$

여기서, $U_S = [u_1, u_2, \dots, u_k]$ 는 signal eigenvector matrix이며, $U_N = [u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, u_m]$ 는 noise eigenvector matrix이다. 그리고 변환 행렬 T 을 만든다. 여기서 T 는 전이 행렬로 일컫는 m 차 역 단위행렬이다.

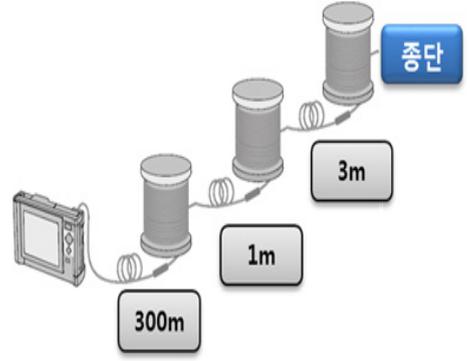


그림 3. OTDR 측정 환경

Fig. 3. OTDR Measurement Environment

$$T = \begin{bmatrix} 00 \cdots 1 \\ 00 \cdots 0 \\ \cdots \cdots 0 \\ 1 0 \cdots 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$Y = TC_0^*(\gamma)$ 라고 할 때, $C_0^*(\gamma)$ 는 $C_0(\gamma)$ 의 복소 공액이다. 공분산 행렬 Y 는 다음과 같다.

$$R_x = E\{YY^H\} = TRY^*(\gamma)T \quad (9)$$

여기서 R 은 R_x 및 R_y 의 합이며, 위의 식을 이용하여 다음과 같이 재구성된 공액 행렬을 얻을 수 있다.

$$R = R_x + R_y = APA^H + T[APA^H]^* T + 2\sigma_n^2 I \quad (10)$$

행렬 이론^[9]에 따르면, u 가 행렬 APA 의 제로 고유치에 해당하는 고유 벡터이면, u 는 행렬 $T[APA^H]^* T$ 의 제로 고유치에 해당하는 고유 벡터여야 한다. 따라서 행렬 R_x, R_y 및 R 은 동일한 잡음 부분 공간을 갖는다. R 을 고유 값 분해를 수행하면 고유 값과 고유 벡터가 얻어진다. 다음 식과 같이 추정될 신호의 수에 따라 고유 벡터들 사이의 잡음 부분 공간이 구별 될 수 있다.

$$R = \hat{U}_S \hat{A}_S \hat{U}_S + \hat{U}_N \hat{A}_N \hat{U}_N \quad (11)$$

새로운 잡음 부분 공간으로 MUSIC 공간 스펙트럼을 구성 하면 다음과 같다.

$$F_{Improved} = \frac{1}{A^H \hat{U}_N \hat{U}_N^H A} \quad (12)$$

V. 시뮬레이션 결과 및 분석

이번 장에서는 초 분해능 알고리즘을 실제 측정데이터에 적용해서 성능을 분석한다. 측정환경은 다음 그림 3과 같다. OTDR의 측정환경은 3개의 이벤트 구간을 생성

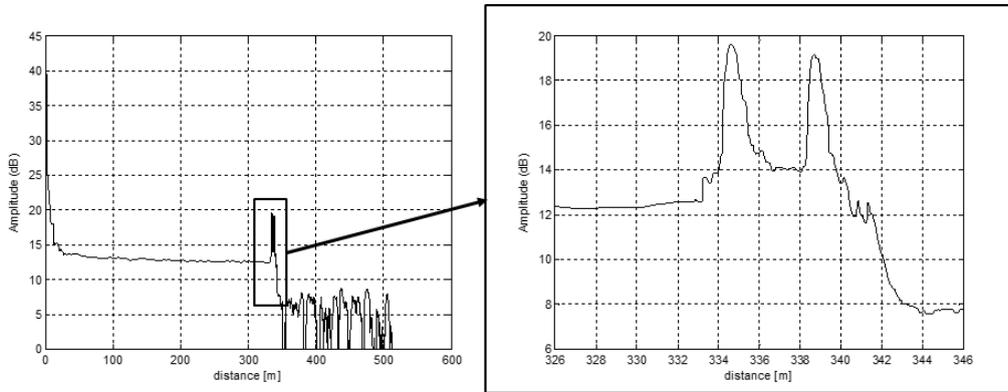


그림 4. OTDR 측정 결과
 Fig. 4. OTDR Measurement Result

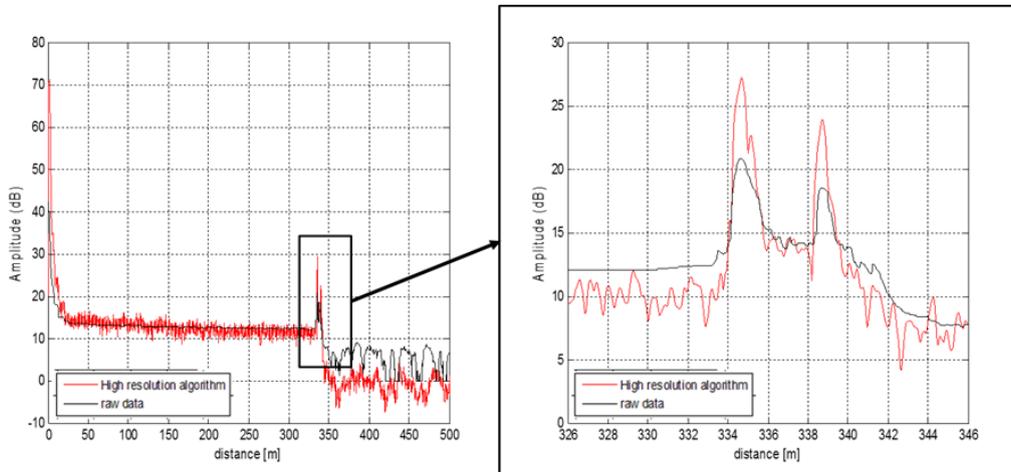


그림 5. 초 분해능 알고리즘 적용 결과
 Fig. 5. Result of Applying the Resolution Algorithm

하였다. 시작점으로부터 334m 지점과 그 뒤로 1m과 3m 지점에 이벤트 구간이 있다. 이벤트 지점은 334m, 335m, 338m이며, 그 뒤로는 종단이다. 측정 파라미터는 파장은 SMI310nm, 거리 레인지는 500m로 설정하였으며, 펄스 폭은 3ns, 데이터의 평균화횟수는 2^{14} 이다. 굴절률은 1.46이며 데이터의 총 크기는 10000의 sample을 가지며, 데이터 샘플링 간격은 5cm이다. 위의 측정 환경에서 측정된 결과는 다음 그림4와 같다. 총 길이 500m에서 330m부근에서 이벤트가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 확대해서 살펴보면 334m 부분에 첫 번째 이벤트가 생긴 것을 확인할 수 있으나 그 뒤에 1m의 이벤트가 있으나 기존의 교차 상관기법으로는 1m를 분해를 할 수 없어 구별할 수가

없다. 그리고 그 뒤 3m지점에서 이벤트가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 실측 데이터에 초 분해능 알고리즘을 적용한 결과이다. 왼쪽 그림은 전체 구간을 나타낸 것이며 오른쪽 그림은 네모 박스 부분을 확대한 것이다. 검정색 그래프는 raw data를 나타내며 빨간색 그래프는 초 분해능 알고리즘을 적용한 그래프이다. 검정색 그래프는 수신 데이터를 나타낸다. raw data와 비교해보면 기존에 분해하지 못했던 1m를 초 분해능 알고리즘을 적용한 결과 분해능이 향상되어서 이벤트 구간을 정확하게 분해하고 있으며, 신호 레벨의 크기도 약 8dB 정도의 성능 향상이 있어서 이벤트 구간을 더 정확하게 구별할 수 있다.

V. 결론

현재 멀티미디어 통신으로 인하여 인터넷 트래픽이 급격히 증가하고 있다. 광통신 기술은 이러한 통신용량의 증가에 핵심적인 솔루션이며 이에 따라 광통신 시스템에서 한 가닥의 광섬유를 통하여 전송되는 데이터도 계속 증가하고 있다. 하지만 싱글 광섬유 링크의 테라비트급 전송용량으로 인하여 만약 링크의 물리적 결합이 생길 경우에 많은 데이터의 손실을 끼치게 된다. 따라서 광섬유 링크의 물리적 결합을 찾아낼 때 사용되는 OTDR(Optical Time Domain Reflectometry)는 광통신 링크에서 매우 중요한 장비라고 할 수 있다. 일반적으로 이 OTDR의 성능은 Dynamic Range와 공간 분해능으로 결정된다. 본 논문에서는 그 중 OTDR의 분해능 성능을 향상 시키는 방법으로 MUSIC 알고리즘을 적용하였으며, MUSIC 알고리즘의 인코히런트한 특성을 보완하기 위해 Improved MUSIC 알고리즘을 구현해서 적용하였다. 시뮬레이션을 통하여 알고리즘의 성능을 분석해 본 결과, 기존에 분해하지 못했던 1m 간격의 이벤트 구간을 정확하게 분해하고 있으며, 신호의 변동도 감소하였다. 기존 raw 데이터와 비교해 볼 때 신호 레벨의 크기도 약 8dB정도 증가해 성능 향상이 있음을 알 수 있다.

References

- [1] B. Glisic and D. Inaudi, *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. West Sussex, U.K.: Wiley, 2007, pp. 27 - 28.
DOI: 10.1002/stc.353
- [2] S. Wielandy, M. Fishteyn, and B. Zhu, "Optical performance monitoring using nonlinear detection," *J. Lightw. Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 784 - 793, Mar. 2004.
DOI: 10.1109/JLT.2004.825774
- [3] Y. Takushima and Y. C. Chung, "Optical reflectometry based on correlation detection and its application to the in-service monitoring of WDM passive optical network," *Opt. Exp.*, vol. 15, no. 9, pp. 5318 - 5326, 2007.
DOI: 10.1364/OE.15.005318
- [4] S. Furukawa, K. Tanaka, Y. Koyamada, and M. Sumida, "Enhanced coherent OTDR for long span optical transmission lines containing optical fiber amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. 540 - 542, May 1995
DOI: 10.1109/68.384537
- [5] Xiao Ai, Richard Nock, John G. Rarity, and Naim Dahnoun, "High-resolution random modulation cw lidar", *Applied Optics*, Vol. 50, No. 22, 2011.
DOI: 10.1364/AO.50.004478
- [6] Z. I. Khan, M. MD. Kamal, N. Hamzah, K. Othman, and N. I. Khan, "Analysis of Performance for Multiple Signal Classification (MUSIC) in Estimating Direction of Arrival," *Preceeding of RFM*, pp. 524-528, 2008.
DOI: 10.1109/RFM.2008.4897465
- [7] J. Wang, Y. Zhao, and Z. Wang, "A MUSIC like DOA estimation method for signals with low SNR," *Global Sym. Millimeter Waves*, pp. 321-324, Nanjing, Apr. 2008.
DOI: 10.1109/GSMML.2008.4534634
- [8] Shujing Su, Wenyi Liu, Wenqiang Zheng. "Estimation of Direction of Arrival for Correlation Signals Based on Modified MUSIC Algorithm", *JOURNAL OF INFORMATION & COMPUTATIONAL SCIENCE*, 2013, 10(13): 4027-4035
DOI: 10.3724/SP.J.1087.2012.00592
- [9] Nering, Evar D. (1970), *Linear Algebra and Matrix Theory* (2nd ed.), New York: Wiley, LCCN 76091646

저자 소개

이 병 진(준회원)



- 2013년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
- 2013년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전파공학과 석박사 통합과정
<주관심분야 : 가시광 통신, 전파채널분석, 전파신호처리>

유 봉 국(준회원)



- 2009년 2월 : 충남대학교 대학원 전자공학과 공학박사
- 2010년 12월: 조지아텍(미) 박사후 연구원
- 1994년 1월 ~ 2000년 4월 : SK Telecom(주) 중앙연구원 선임연구원
- 2005년 3월~2009년 7월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 20015년 6월~현재 : (주)지씨아이 CEO
<관심분야> 광통신 및 계층 시스템, CR, MIMO 모뎀 기술, 이동통신 신호처리

김 경 석(정회원)



- 1989년 1월 ~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 무선통신연구단 선임연구원
- 1999년 1월 ~ 2002년 3월 : University of Surrey(영국) 전기전자공학과 대학원 졸업(공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2004년 8월 : 한국전자통신연구원 이동통신연구단 책임연구원
- 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 전북대학교 생체정보공학부 전임강사
- 2005년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 부교수
<주관심분야 : SDR, Cognitive Radio, MIMO-OFDM, 전력선통신, 가시광통신, 디지털라디오, 전파채널분석, 전파감시/관리시스템, 전파신호처리>

※ 본 연구는 중소벤처기업부 창업성장기술개발사업의 연구비 지원(S2430967)에 의해 수행되었습니다.