

論文2003-40SD-11-3

Complementary Correlation OTDR에서의 긴 코드 길이에 따른 측정시간 증가에 의한 Dynamic Range 증가 제한에 대한 연구

(A Study on the Limit of Dynamic Range Improvement of Complementary Correlation OTDR Caused by the Increased Measurement Cycle at Long Code Length)

金東瑄*, 朴宰弘*

(Dong Sun Kim and Jae hong Park)

요약

CCOTDR (complementary correlation optical time domain reflectometer) 의 dynamic range는 사용된 코드의 길이와 평균 횟수에 따라 증가한다. OTDR의 전체 측정 시간이 제한된 경우에는 코드를 늘리게 되면 평균 횟수를 줄여야 한다. 이와 같은 관계 때문에 코드 길이가 일정 이상 증가하면 dynamic range의 증가 정도가 어느 이상 커지지 않는다. 본 논문에서는 전체 측정 시간이 제한된 경우에 단일 펄스를 사용한 측정 방법에서 1회 측정에 걸리는 시간과 코드를 사용한 측정 방법에서 1회 측정에 걸리는 시간을 비교하였다. 이를 바탕으로 코드를 길게 해서 dynamic range를 개선시키는 데에 한계가 있음을 보였고, 길이가 짧으면서 최대 dynamic range를 달성할 수 있는 코드 길이를 제시하였다.

Abstract

The limitation on the dynamic range improvement of the complementary correlation optical time domain reflectometer (CCOTDR) is presented. In CCOTDR, the improvement of dynamic range is function of both the averaging number of measurement cycles and the length of codes. The trade off between the averaging number and the code length restricts the improvement of the dynamic range and a very long code is not effective to improve the dynamic range. In this paper, the improvement limitation on dynamic range caused by the trade off between the averaging number and the code length is presented. For derivation of the trade off, the number of one measurement cycles employing a conventional single pulse method and employing a complementary code method are presented and compared. And the effective maximum code length is presented in addition.

Keyword : OTDR, CCOTDR, Golay code, dynamic range, correlation,

I. 서론

Optical time domain reflectometer (OTDR)는 광선

* 正會員, 서울大學敎 電氣컴퓨터工學部

(School of Electrical Engineering and Computer Sciences, Seoul National University)

接受日字:2002年11月6日, 수정완료일:2003年11月6日

로에 짧은 펄스의 빛을 보내고 이 빛이 진행되는 동안 반사되는 빛을 측정하여 광선로 상의 특성을 파악한다. 이 반사는 주로 Rayleigh backscattering이나 Fresnel 반사에 의한 것이며, 광섬유의 구성성분 같은 물리적 특성이나 구부러짐과 같은 구조적 특성 혹은 연결 부위의 상태에 따라 그 크기가 달라지게 된다. OTDR은 이러한 반사가 일어나서 돌아오는데 걸리는 시간과, 크

기를 측정하여 광선로의 특성을 알아볼 수 있는 광계 측기이다^[1].

일반적으로 반사돼서 돌아오는 빛의 세기는 거리에 지수 적으로 비례하여 작아진다. 반사되는 빛의 세기가 OTDR의 잡음 수준 이하로 내려가게 되면 반사된 빛의 크기를 측정할 수 없기 때문에 더 먼 거리에서 나타나는 광선로상의 이상 유무를 검사할 수 없다. 따라서 OTDR의 측정 거리를 늘리기 위한 방법으로 입력하는 빛의 세기를 크게 하여 상대적으로 반사되는 빛의 세기를 크게 하거나, 잡음을 줄이는 방법이 사용되고 있다^[2]. 반사가 시작할 때의 빛의 세기의 최대값과 측정 가능하면서 가장 작은 반사된 빛의 세기 사이의 비를 dynamic range라 한다. 동일한 광섬유 내에서는 길이에 따른 빛의 반사량이 감소하는 정도가 0.2 [dB/km] 정도로 일정하기 때문에 dynamic range가 OTDR이 측정할 수 있는 광선로의 길이를 나타내게 된다. (즉, 40[dB]의 OTDR은 200[km]를 측정할 수 있다.)^[1]

Dynamic range를 높이기 위하여 센 빛을 입력하는 방법과 잡음을 줄이는 방법을 사용하는데, 센 빛을 입력하는 방법으로는, 긴 펄스의 빛을 입력하거나, 출력이 높은 LD(Laser diode)를 사용하는 방법^[3, 5]이 있으며, 잡음을 줄이는 방법으로는 잡음이 적은 증폭단을 사용하거나, 여러 번 측정된 파형을 평균하는 방법이 있다. 긴 펄스를 사용하게 되면 입력되는 빛의 에너지가 높게 되어 반사되는 빛의 세기가 커지게 되는 반면, 펄스의 길이보다 작은 구간에서 발생하는 광선로상의 이상을 감지할 수 없게 되는 단점이 있다^[6, 7]. 또한 빛을 발생시키는 LD의 출력을 높이는 것은 한계가 있다. 저잡음의 증폭단을 사용하는 것 또한 소자의 한계가 있고, 회로 주위의 온도를 낮게 하여 열잡음을 줄이는 것도 휴대용 OTDR 제작에는 사용되기 어려운 기술이다. 이에 비하여 여러 번 측정해서 평균을 내는 방법은 하드웨어를 수정하지 않고 쉽게 구현할 수 있으며, 잡음의 크기를 비교적 크게 줄여주기 때문에 대부분의 OTDR에서 사용된다^[6].

이 외에 하드웨어를 변경하지 않고 신호 처리 기법을 도입하여 dynamic range를 개선하는 방법들이 제시되었는데^[6, 8, 11] 그중 하나가 일반적인 빛의 펄스 대신에, 특정한 코드에 따라 빛을 보내는 방법이다^[6]. 특정한 코드로 complementary 코드를 사용하는 OTDR을 complementary correlation OTDR (CCOTDR)이라 부른다. 일반적인 OTDR에서 긴 펄스를 사용하면 민감도

가 떨어지는 반면, CCOTDR의 경우 코드를 사용하기 때문에 민감도를 보존하면서 빛의 에너지를 높이는 효과를 얻을 수 있다. 이 방법은 평균법과 병행하여 사용할 수 있기 때문에, 코드길이와 평균횟수를 동시에 늘임으로써 dynamic range를 크게 증가시킬 수 있다.

그러나 평균 횟수와 코드 길이의 관계가 독립적이지 않기 때문에 둘 중 한 값을 늘이면 다른 한 값이 줄어들게 되어 dynamic range는 무한히 증가하지 못한다. Dynamic range는 평균 횟수가 늘어날 수록 증가하므로, 정해진 시간동안 측정된 결과를 기준으로 dynamic range를 결정하게 된다. 따라서 전체 측정 시간과 1회 측정시간에 의하여 평균횟수가 제한된다. CCOTDR의 경우 긴 코드를 사용하면 1회 측정에 걸리는 시간이 일반적인 OTDR보다 길어지게 되고 결국 정해진 시간 동안 측정할 수 있는 횟수가 줄어들게 된다. 측정 횟수가 줄어들면 평균을 통해 dynamic range를 개선하는 정도가 줄어들게 되므로, 코드를 사용한 개선이 있더라도 전체 dynamic range는 예상만큼 증가하지 못한다.

본 논문에서는 코드의 길이가 길어지면, 평균 횟수가 줄어들기 때문에 dynamic range의 개선이 제한됨을 보였다. CCOTDR의 dynamic range 개선 정도를 비교하기 위하여 일반적인 OTDR을 LTI(linear time invariant) 시스템으로 가정하고, 수학적 모델을 구한 다음, 평균 횟수에 따른 dynamic range 개선정도를 제시하였다^[6, 8]. 또한 코드를 사용한 경우와 펄스 형태의 빛을 사용한 경우의 dynamic range를 계산하는 방법을 요약하였다. 이것을 토대로 코드를 사용한 경우와 펄스 형태의 빛을 사용한 경우의 1회 측정할 때 걸리는 시간을 계산하고, 일정한 시간동안 측정할 수 있는 횟수를 각각 구하였다. 이 측정 횟수와 코드 길이를 적용하여 dynamic range 개선 정도를 구하고, 코드의 길이가 일정정도 이상 길어지면 dynamic range의 개선이 없음을 밝히고 개선량의 최대값을 구하였다.

또한, dynamic range 증가율이 줄어들어 코드 길이 증가에 대한 효율이 감소하는 지점을 정의하고, 그 때의 최대 코드 길이를 얻을 수 있는 방법을 제시하였다. 이것으로 CCOTDR을 설계할 때 적절한 코드의 길이를 결정할 수 있다.

II장에서는 OTDR의 dynamic range와 평균을 이용한 dynamic range 개선에 대하여 정리하였다. III장에서는 [6]에 따라 OTDR의 수학적 모델을 설명하고, CCOTDR의 기본이 되는 complementary 코드 pair에

대하여 설명하고, 코드를 사용한 경우의 dynamic range를 계산하는 방법을 요약하였다. IV장에서는 CCOTDR의 dynamic range 개선 정도의 한계를 제시하였다. 이 과정에서 1회 측정시간을 계산하여 코드를 사용한 경우와 단순한 펄스를 사용한 경우의 평균 횡수를 비교하였다. CCOTDR에서 dynamic range 가 더 이상 늘어나지 않는 코드 길이의 한계를 구하는 방법을 제시하였다.

CCOTDR의 코드 길이에 따른 최대 dynamic range 개선량을 알아봄으로써 코드를 무한히 늘리는 것이 효과가 없음을 보였고, CCOTDR을 설계할 때에 필요한 코드 길이를 결정할 수 있다.

II. 평균을 이용한 dynamic range 개선

1. Dynamic range

Dynamic range는 OTDR 측정 파형에서 최초로 반사된 신호의 세기와 측정 가능한 가장 작은 신호의 크기의 비율로 정의된다. 일반적으로 잡음의 수준보다 크기가 큰 신호만 측정 가능하므로, 가장 큰 신호와 신호가 없을 때의 잡음의 크기의 비율로 계산하고, SNR과 비슷한 의미를 지니게 된다. <그림 1>에서 보는 것처럼 잡음의 최대 크기의 98%나 RMS값을 기준으로 dynamic range를 정의할 수 있다^[1].

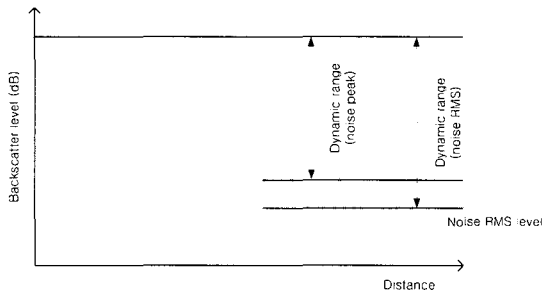


그림 1. OTDR의 일반적 파형과 dynamic range
Fig. 1. A generic wave form of OTDR and dynamic range.

이상적인 반사 신호를 시간에 대한 함수 $s(t)$ 라 하고, 이에 대응하는 잡음을 $n(t)$ 라 하면, OTDR에서 측정되는 신호는 $s(t) \cdot n(t)$ 라고 할 수 있다. 이 경우 SNR을 구하면 식 (1)을 얻는다.

$$SNR = \frac{\max(s(t))}{RMS(n(t))} \quad (1)$$

일반적으로 dynamic range는 SNR을 dB단위로 표현하는데, 빛이 진행하다 반사되는 크기를 측정하는 것이므로 optical decibel을 따로 정의하여 $5\log_{10}$ 을 사용하면 식 (2)를 얻는다.

$$\text{dynamic range} = 5\log_{10} \frac{\max(s(t))}{RMS(n(t))} \quad (2)$$

2. 평균을 사용한 dynamic range 개선

일반적인 OTDR은 같은 파형을 여러 번 측정하여 평균을 취함으로써 잡음을 줄인다. 한번 측정하였을 때 검출되는 신호를 $r(t)$ 라 하면 식 (3)을 얻는다.

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (3)$$

이 경우 잡음의 평균은 0이므로 표준편차와 RMS가 같고, 잡음의 표준편차를 σ_n 이라 하면 식 (4)를 얻는다.

$$\begin{aligned} E\{[n(t)]^2\} &= \{[r(t) - s(t)]^2\} \\ &= \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)의 측정을 N번 반복하고, i번째의 측정 결과를 $r_i(t) = s(t) + n_i(t)$ 라 할 때 $n_i(t)$ 가 백색 가우시안 잡음이고 iid라 가정하면, 평균한 결과를 구하면, 식 (5)를 얻는다.

$$\begin{aligned} E\{r(t)\} &= E\left\{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i(t)\right\} \\ &= E\left\{s(t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i(t)\right\} \\ &= s(t) \end{aligned} \quad (5)$$

측정된 신호 $r(t)$ 의 분산을 구하면 식 (6)을 얻는다.

$$\begin{aligned} E\{[r(t) - s(t)]^2\} &= E\left\{\left[s(t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i(t) - s(t)\right]^2\right\} \\ &= \frac{1}{N^2} E\left\{\left[\sum_{i=1}^N n_i(t)\right]^2\right\} \\ &= \frac{\sigma_n^2}{N} \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 평균을 N회 취해 dynamic range를 구하면 식 (7)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \text{dynamic range} &= 5 \log_{10} \frac{\max(s(t))}{\frac{1}{\sqrt{N}} \text{RMS}(n(t))} \\ &= 5 \log_{10} s_{\max} - 5 \log_{10} n_{\text{RMS}} + 2.5 \log_{10} N \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 평균 횟수가 10배 증가할 때 마다 dynamic range가 2.5 dB 증가함을 알 수 있다^[8, 12].

III. Complementary correlation

1. OTDR의 기본 구조

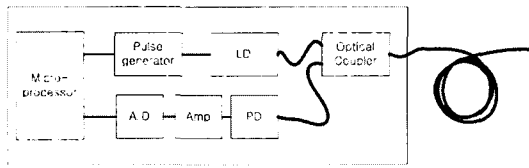


그림 2. OTDR의 구조
Fig. 2. Generic Structure of OTDR.

CCOTDR에서 dynamic range가 어떻게 결정되는지를 살펴보기 위하여 OTDR의 구조, 수학적 모델 그리고 complementary correlation code의 성질을 정리하였다. 일반적인 OTDR의 구조는 <그림 2>와 같다. LD에서 방출된 펄스 형태의 빛이 광커플러를 통과하여 측정하고자 하는 광선로에 입사된다. 광선로에서 반사된 빛은 다시 광커플러를 통과하여 PD (photo diode)에 입력된다. PD는 입력된 빛의 세기에 비례하는 전류를 출력하고, 이 전류가 TIA (transimpedance amplifier)단에서 전압으로 바뀌고 증폭된 후 A/D를 거쳐 마이크로프로세서로 입력된다. 마이크로프로세서는 측정된 전압 파형을 처리할 뿐 아니라, LD에서 발생하는 펄스의 모양과 세기를 제어하는 역할을 한다.

2. OTDR의 수학적 모델

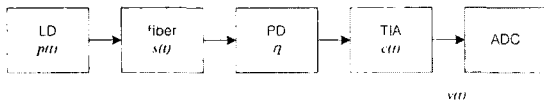


그림 3. OTDR의 수학적 모델
Fig. 3. A model of generic OTDR.

위에서 제시한 일반적인 OTDR 구조에 대한 수학적 모델은 <그림 3>과 같다. $p(t)$ 는 LD가 출력하는 빛의

세기이고, $s(t)$ 는 실제 광선로의 응답특성, η 는 PD의 증폭계수, $c(t)$ 는 TIA의 응답특성, $v(t)$ 가 최종 적으로 출력되는 전압이다. OTDR 시스템을 LTI 시스템이라 가정하고 수학적 모델을 세워보면 식 (8)을 얻는다.

$$\begin{aligned} v(t) &= c(t) * \eta s(t) * p(t) \\ &= \eta c(t) * s(t) * p(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 * 연산자는 convolution 연산을 의미한다.

측정 데이터를 A/D로 샘플링을 하고 마이크로프로세서에서 이산형태로 처리하기 때문에, 식 (8)을 이산 수열로 바꾸면 식 (9)를 얻는다.

$$v_k = \eta c_k * s_k * p_k \quad (9)$$

가 된다. 만약 TIA의 입출력 특성이 이상적이어서 이득 c_0 으로 모델링 할 수 있다면 식 (10)을 얻는다.

$$v_k = \eta c_0 s_k * p_k \quad (10)$$

가 된다. 이를 사용하여 코드를 사용하였을 경우의 dynamic range를 분석하고 비교할 수 있다.

3. Complementary 코드 적용

LD의 출력 p_k 를 측정된 v_k 와 correlation 연산을 취하면 식 (11)을 얻는다.

$$\begin{aligned} p_k \otimes v_k &= p_k \otimes [\eta c_0 s_k * p_k] \\ &= [p_k \otimes p_k] * [\eta c_0 s_k] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 \otimes 는 correlation 연산을 의미한다.

이때 광선로의 응답특성 s_k 를 정확히 얻기 위하여 $p_k \otimes p_k = A \delta_k$ 인 p_k 를 사용하면 식 (12)를 얻는다.

$$\begin{aligned} p_k \otimes v_k &= [p_k \otimes p_k] * [\eta c_0 s_k] \\ &= A \delta_k * [\eta c_0 s_k] \\ &= A \eta c_0 s_k \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{단, } \delta_k = \begin{cases} 0 & \text{if } k \neq 0 \\ 1 & \text{if } k = 0 \end{cases}$$

[6]은 이러한 조건을 만족시키는 p_k 를 Golay 수열의 쌍을 사용하여 제시하였다. 길이가 L인 Golay의 complementary 코드 쌍은 수열 A_k, B_k 로 이루어지며, 그 특성은

$$A_k \otimes A_k + B_k \otimes B_k = 2L \delta_k \quad (13)$$

$$\text{단, } A_k, B_k = \begin{cases} 0 & \text{if } k < 0 \text{ and } k > L \\ 1, -1 & \text{others} \end{cases}$$

이다. A_k 와 B_k 는 $\{-1, 1\}$ 의 값으로 이루어진다. 이 신호를 LD에서 출력하게 되면, p_k 는 A_k 와 B_k 에 이득 α 가 곱해진 형태가 되고, 그 출력을 구하면 식 (14), (15)를 얻는다.

$$v_k^A = \eta c_0 s_k * \alpha A_k \tag{14}$$

$$v_k^B = \eta c_0 s_k * \alpha B_k \tag{15}$$

가 된다. 이 두 출력 결과 v_k^A, v_k^B 를 원래 입력 수열 A_k, B_k 와 correlation 연산을 취하게 되면 식 (16), 식 (17)를 얻는다.

$$A_k \otimes v_k^A = [A_k \otimes A_k] * [\alpha \eta c_0 * s_k] \tag{16}$$

$$B_k \otimes v_k^B = [B_k \otimes B_k] * [\alpha \eta c_0 * s_k] \tag{17}$$

식 (16), 식 (17)의 결과를 서로 더하면 식 (18)을 얻는다.

$$\begin{aligned} & A_k \otimes v_k^A + B_k \otimes v_k^B \\ &= [A_k \otimes A_k + B_k \otimes B_k] * [\alpha \eta c_0 s_k] \\ &= 2L \alpha \eta c_0 \delta_k * s_k \\ &= 2L \alpha \eta c_0 s_k \end{aligned} \tag{18}$$

이 과정을 거치면 측정 신호는 $2L$ 배 증가하게 되고, 잡음은 $\sqrt{2L}$ 배 증가하게 된다. 그런데, 측정을 2번했으므로, 2회 평균한 것과 동일하므로, 실제로 SNR이 개선된 정도를 구하기 위해 필스를 사용한 경우와 비교하였다. SNR_{coded} 는 코드를 사용한 경우, SNR_{pulsed} 는 필스를 사용한 경우의 SNR이라 하면 식 (19)를 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{SNR_{coded}}{SNR_{pulsed}} &= \frac{\frac{2L}{\sqrt{2L}}}{\frac{2}{\sqrt{2}}} \\ &= \sqrt{L} \end{aligned} \tag{19}$$

식 (19)를 optical dB로 변환하면 식 (20)을 얻는다.

$$5 \log \sqrt{L} = 2.5 \log L \tag{20}$$

가 된다. 즉, 코드길이 L 이 10배 증가할 때마다 dynamic range가 2.5 dB 증가함을 알 수 있다.

4. 적용 알고리즘

실제 OTDR의 LD는 Golay 코드에서 요구하는 -1을 출력할 수 없다. 따라서 [6]에서는 $\{-1, 1\}$ 의 코드를 $\{0, 1\}$ 의 코드로 바꿔주기 위하여 4개의 쌍 $A_k, \overline{A}_k, B_k, \overline{B}_k$ 를 사용하였다. 이 4개의 쌍을 구하면 식 (21)~식 (24)를 얻는다.

$$u_k^A = \frac{1}{2}(1 + A_k) \tag{21}$$

$$u_k^{\overline{A}} = \frac{1}{2}(1 - A_k) \tag{22}$$

$$u_k^B = \frac{1}{2}(1 + B_k) \tag{23}$$

$$u_k^{\overline{B}} = \frac{1}{2}(1 - B_k) \tag{24}$$

이때 각 입력 $u_k^A, u_k^{\overline{A}}, u_k^B, u_k^{\overline{B}}$ 의 관계를 구하면 식 (25), 식 (26)를 얻는다.

$$u_k^A - u_k^{\overline{A}} = A_k \tag{25}$$

$$u_k^B - u_k^{\overline{B}} = B_k \tag{26}$$

각 입력에 따른 LD 출력을 $p_k = \alpha u_k$ 라 할 때, OTDR 측정을 거친 후 ADC에서 얻는 출력전압 $v_k^A, v_k^{\overline{A}}, v_k^B, v_k^{\overline{B}}$ 를 구하면 식 (27)~식 (30)을 얻는다.

$$v_k^A = \frac{1}{2} \alpha \eta c_0 s_k * (1 + A_k) \tag{27}$$

$$v_k^{\overline{A}} = \frac{1}{2} \alpha \eta c_0 s_k * (1 - A_k) \tag{28}$$

$$v_k^B = \frac{1}{2} \alpha \eta c_0 s_k * (1 + B_k) \tag{29}$$

$$v_k^{\overline{B}} = \frac{1}{2} \alpha \eta c_0 s_k * (1 - B_k) \tag{30}$$

이때 출력전압 $v_k^A, v_k^{\overline{A}}, v_k^B, v_k^{\overline{B}}$ 를 쌍끼리 빼주면 식 (31), 식 (32)을 얻는다.

$$y_k^A \equiv v_k^A - v_k^{\overline{A}} = \alpha \eta c_0 s_k * A_k \tag{31}$$

$$y_k^B \equiv v_k^B - v_k^{\overline{B}} = \alpha \eta c_0 s_k * B_k \tag{32}$$

출력 y_k^A, y_k^B 에 원래의 코드 A_k, B_k 를 correlation 연산을 해 주고 더하면 식 (33)를 얻는다.

$$\begin{aligned} & A_k \otimes y_k^A + B_k \otimes y_k^B \\ &= \alpha \eta c_0 [A_k \otimes A_k + B_k \otimes B_k] * s_k \end{aligned} \tag{33}$$

$$= 2a\eta c_0 L s_k \quad (33)$$

이때 식을 간단히 하기 위하여 $a\eta c_0 = \beta$ 로 치환하면 식 (34)을 얻는다.

$$A_k \otimes y_k^A + B_k \otimes y_k^B = 2L\beta s_k \quad (34)$$

이다. 결국 Golay 수열을 변형하여 LD에서 출력할 수 있는 on/off의 신호를 만들었고 이를 통하여 측정했을 때 원래 신호가 복원되며, 그 크기가 $2L$ 배 커짐을 알 수 있다.

5. SNR 분석

코드를 사용한 경우에 코드의 길이가 L 이고, 각각의 측정횟수가 N_{coded} 일 경우, 측정 파형의 최고 크기는 (34)에서 볼 수 있듯이 $2L\beta s_{k, \max}$ 이고, 잡음의 RMS값은 $2\sigma_n \sqrt{\frac{L}{N_{coded}}}$ 이다. 이에 따른 SNR을 구하면 식 (35)를 얻는다.

$$\begin{aligned} SNR_{coded} &= \frac{2L\beta s_{k, \max}}{2\sigma_n \sqrt{\frac{L}{N_{coded}}}} \\ &= \frac{\beta s_{k, \max}}{\sigma_n} \sqrt{N_{coded} L} \end{aligned} \quad (35)$$

이다. 이와 비교하기 위해 단일 펄스를 $N_{pulsed} = 4N_{coded}$ 번 평균한 경우, 측정 파형의 최고 크기는 $\beta s_{k, \max}$ 이고, 잡음의 RMS값은 $\frac{\sigma_n}{\sqrt{N_{pulsed}}}$ 이다. 이에 따른 SNR을 구하면 식 (36)를 얻는다.

$$\begin{aligned} SNR_{pulsed} &= \frac{\beta s_{k, \max}}{\frac{\sigma_n}{\sqrt{N_{pulsed}}}} \\ &= \frac{\beta s_{k, \max}}{\sigma_n} \sqrt{N_{pulsed}} \end{aligned} \quad (36)$$

따라서 코드를 사용한 경우 일반 펄스를 사용한 경우보다 dynamic range가 개선된 정도를 구하면 식 (37)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{SNR_{coded}}{SNR_{pulsed}} &= \frac{\beta s_{k, \max}}{\sigma_n} \sqrt{N_{coded} L} \\ &\times \left(\frac{\beta s_{k, \max}}{\sigma_n} \sqrt{N_{pulsed}} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\sqrt{LN_{coded}}}{\sqrt{N_{pulsed}}} \\ &= \frac{\sqrt{L}}{2} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\therefore N_{pulsed} = 4N_{coded}$$

이것을 optical dB단위로 바꾸면 식 (38)을 얻는다^[6].

$$5 \log \left(\frac{SNR_{coded}}{SNR_{pulsed}} \right) = 2.5 \log L - 5 \log 2 \quad (38)$$

결국 코드길이 L 을 10배 증가시킬 때마다 dynamic range를 2.5 [dB] 증가시킬 수 있게 된다. 또한 같은 폭의 펄스를 사용했으므로 해상도는 손상시키지 않는다.

IV. Dynamic range 증가의 제한

1. 코드길이와 평균횟수

식 (35)에 따라 dynamic range (dr)을 구하면 식 (39)을 얻는다.

$$\begin{aligned} dr &= 5 \log \frac{\beta s_{k, \max}}{\sigma_n} \sqrt{N_{coded} L} \\ &= 5 \log \beta s_{k, \max} - 5 \log \sigma_n \\ &\quad + 2.5 \log N_{coded} + 2.5 \log L \end{aligned} \quad (39)$$

코드 길이 L 과 평균횟수 N_{coded} 이 10배 증가할 때마다 dynamic range가 2.5 [dB]씩 증가한다. L 과 N_{coded} 이 상호 독립인 경우에는 L 과 N_{coded} 을 증가시킴으로써 dynamic range를 계속 증가시킬 수 있다. 그러나 L 이 증가하면, 1회 측정에 걸리는 시간이 길어지기 때문에, 일정한 시간동안 측정할 수 있는 횟수 N_{coded} 을 감소시키게 된다. 결국 L 과 N_{coded} 의 종속적인 관계 때문에 dynamic range는 무한히 증가할 수 없다.

2. 1회 측정 시간 비교

코드 길이와 평균 횟수의 관계를 구하기 위하여 각각의 경우에 필요한 측정 시간을 계산해 보았다. 한 펄스에 대한 출력 파형을 측정하는 시간은 광섬유를 진행하는 빛의 속도와 광섬유의 길이에 따라 정해진다. 이를 원하는 측정거리 D [m]에 대해 정리하면 1회 측정에 걸리는 시간을 구하면 식 (40)을 얻는다.

$$\frac{D}{c_{of}} + W \quad [s] \quad (40)$$

단, W 는 한 펄스의 폭[s]이고, c_{of} 는 광섬유를 진행하는 빛의 속도인데, 빛이 광섬유를 왕복해야 측정이 가능하므로, 광섬유 내부에서 빛이 진행되는 속도의 1/2을 사용한다.

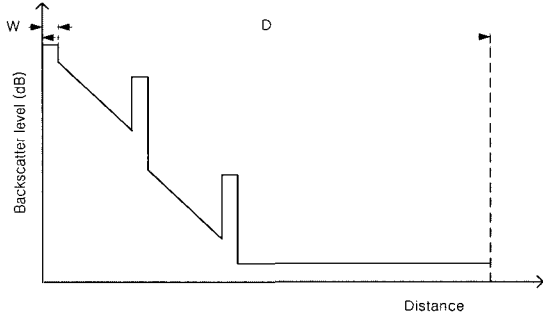


그림 4. Pulse 형태로 빛을 출력했을 경우 필요한 측정 거리

Fig. 4. The Measurement distance when the light is emitted as a pulse form.

그러나 CCOTDR의 경우 빛을 방출하는 시간이 길어지기 때문에 그만큼 긴 시간을 측정해야 한다. 코드길이 L 이고 한 펄스의 폭이 W 인 경우 코드 전체의 폭은 LW 가 된다. 따라서 1회 측정시간을 구하면 식 (41)를 얻는다.

$$\frac{D}{c_{of}} + LW \quad [s] \quad (41)$$

결국, 코드를 사용한 경우 코드길이가 길어지면 1회 측정에 걸리는 시간이 펄스를 사용할 때 보다 길어짐을 알 수 있다.

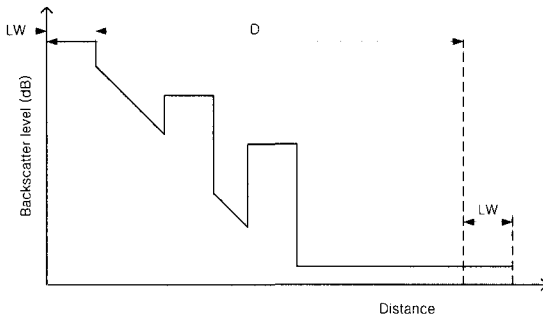


그림 5. L 길이의 코드 형태로 빛을 출력했을 경우 필요한 측정 거리

Fig. 5. The Measurement distance when the light is emitted as a form with code length L .

3. 평균 횟수 계산

코드를 사용한 경우 한 펄스를 사용한 경우보다 측정시간이 길어지므로 총 측정시간을 동일하게 하기 위해서는 측정 횟수를 줄여야 한다. 코드를 사용하는 경우 4종류의 코드를 사용해야 하므로 한 코드에 대한 측정 횟수를 N_{coded} 라 하면 총 $4N_{coded}$ 번 측정을 하게 되고, 한 펄스를 사용한 경우에는 N_{pulsed} 번 측정을 하게 되므로 각각의 총 측정시간 T_{coded} , T_{pulsed} 를 계산하면 식 (42), 식 (43)를 얻는다.

$$T_{coded} = \left(\frac{D}{c_{of}} + LW\right) \times 4N_{coded} \quad [s] \quad (42)$$

$$T_{pulsed} = \left(\frac{D}{c_{of}} + W\right) \times N_{pulsed} \quad [s] \quad (43)$$

총 측정시간이 동일해야 비교가 가능하므로 각각의 총 측정시간 T_{pulsed} 와 T_{coded} 를 같도록 하고 그에 따른 측정 횟수 N_{coded} 와 N_{pulsed} 를 비교하면 식 (44)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{D}{c_{of}} + LW\right) \times 4N_{coded} \\ = \left(\frac{D}{c_{of}} + W\right) \times N_{pulsed} \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \therefore N_{coded} &= \frac{\frac{D}{c_{of}} + W}{4\left(\frac{D}{c_{of}} + LW\right)} \times N_{pulsed} \\ &= \frac{1}{4} \frac{1 + \frac{c_{of}W}{D}}{1 + \frac{c_{of}LW}{D}} \times N_{pulsed} \end{aligned}$$

이것으로 코드를 사용한 경우와 펄스를 사용한 경우 전체 측정 시간이 정해졌을 때, 각각 평균을 할 수 있는 횟수의 비율을 알 수 있다. 이 비율을 사용해서 코드를 사용한 경우와 펄스를 사용한 경우의 SNR비를 계산하게 된다.

4. SNR 비교

3에서 구한 평균 횟수를 식 (37)에 따라 코드를 사용한 경우의 SNR_{coded} 와 펄스를 사용한 경우의 SNR_{pulsed} 의 비율에 대한 식으로 바꾸면 식 (45)을 얻는다.

$$\frac{SNR_{coded}}{SNR_{pulsed}} = \frac{\sqrt{LN_{coded}}}{\sqrt{N_{pulsed}}}$$

$$= \frac{\sqrt{L}}{2} \sqrt{\frac{1 + \frac{c_{of} W}{D}}{1 + \frac{c_{of} LW}{D}}} \quad (45)$$

가 된다. 이것을 optical dB scale로 변환하면 식 (46)을 얻는다.

$$\begin{aligned} 5 \log \frac{SNR_{coded}}{SNR_{pulsed}} & \\ &= 2.5 \log L - 5 \log 2 \\ &\quad - 2.5 \log \left(1 + \frac{c_{of} LW}{D} \right) \\ &\quad + 2.5 \log \left(1 + \frac{c_{of} W}{D} \right) \end{aligned} \quad (46)$$

코드 길이 L 이 길어지면 $2.5 \log L$ 에 의하여 dynamic range가 증가하지만, $2.5 \log \left(1 + \frac{c_{of} LW}{D} \right)$ 에 의하여 감소하게 됨을 알 수 있다.

5. 코드 길이에 따른 dynamic range 개선정도

일반적으로 펄스폭 W 는 측정시간보다 매우 작으므로 $W \ll \frac{D}{c_{of}}$ 무시할 수 있으나, 코드를 사용한 경우의 펄스폭 LW 는 코드의 길이에 따라 측정시간 만큼 커질 수 있으므로 고려해야 한다. 코드의 길이에 따라 각각의 경우에 계산을 해 보면,

i) $1 \gg \frac{c_{of} LW}{D}$ 인 경우를 살펴보면 식 (47)를 얻는다.

$$\begin{aligned} 5 \log \frac{SNR_{coded}}{SNR_{pulsed}} & \\ &\approx 2.5 \log L - 5 \log 2 - 2.5 \log 1 \\ &\quad + 2.5 \log 1 \\ &= 2.5 \log L - 5 \log 2 \end{aligned} \quad (47)$$

즉, III장에서의 예상대로 dynamic range가 코드길이 L 이 커질 수록 개선됨을 알 수 있다.

ii) $1 \ll \frac{c_{of} LW}{D}$ 인 경우를 살펴보면 식 (48)을 얻는다.

$$\begin{aligned} 5 \log \frac{SNR_{coded}}{SNR_{pulsed}} & \\ &\approx 2.5 \log L - 5 \log 2 \\ &\quad - 2.5 \log \left(\frac{c_{of} LW}{D} \right) \end{aligned}$$

(828)

$$\begin{aligned} &= -5 \log 2 - 2.5 \log c_{of} \\ &\quad - 2.5 \log W + 2.5 \log D \end{aligned} \quad (48)$$

즉, dynamic range가 무한히 개선되지 않고 일정 수준에서 멈추게 되고, dynamic range 개선 정도의 상한 dr_{max} 를 구하면 식 (49)를 얻는다.

$$dr_{max} = 2.5 \log \frac{D}{4 \times c_{of} W} \quad (49)$$

200 [km]을 1[μs]의 pulse로 측정하는 경우에 코드 길이에 다른 dynamic range의 제한을 살펴보면 다음과 같다. 광섬유 내부를 진행하는 빛의 속도는 2×10^8 [m/s]이고, 빛이 광섬유를 왕복해야 측정이 가능하므로, c_{of} 를 1×10^8 [m/s]로 가정하였다. 또한 코드의 길이는 1에서 220 까지 증가시키면서 살펴보았다.

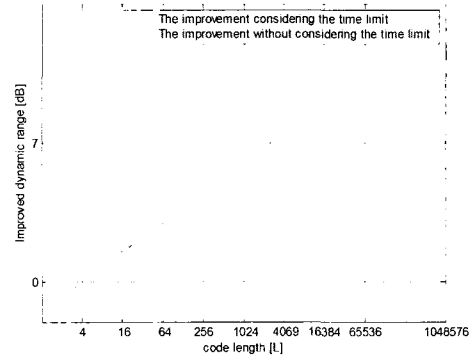


그림 6. CCOTDR의 dynamic range 개선량의 상한
Fig. 6. The upper bound of the dynamic range improvement of CCOTDR.

<그림 6>에서 볼 수 있듯이 코드의 길이가 1024를 지나면 서서히 dynamic range 증가 비율이 감소하여, 16384를 지나면 정체되고 그 값은 약 6.75 [dB]가 된다.

6. 최대 유효 코드 길이

코드 길이가 길어지면 correlation 계산이나 데이터 처리에 어려움이 증가한다. 또한 dynamic range의 개선 정도가 줄어들기 때문에 코드길이를 무한히 늘리는 것은 비효율적이다. 따라서 사용 가능한 최대 코드 길이를 알아야 할 필요가 있다. 이를 위하여 식 (49)에 의한 최대 dynamic range 개선을 달성할 수 있는 CCOTDR 이론에서의 코드 길이를 최대 유효 코드 길이로 정의하였다.

Dynamic range 개선의 최대값 식 (49)와 CCOTDR

에서 그 dynamic range 개선을 달성하기 위하여 필요한 코드 길이 식 (47)을 사용하면 식 (50)을 얻는다.

$$2.5 \log \frac{D}{4c_{of}W} = 2.5 \log L - 5 \log 2 \quad (50)$$

식 (50)을 정리하면 식 (51)을 얻는다.

$$L = \frac{D}{c_{of}W} \quad (51)$$

이 코드 길이를 사용할 경우, 비교적 짧은 코드 길이를 사용하면서 달성 가능한 최대 dynamic range에 근접하는 개선을 얻을 수 있다.

전체 측정시간을 고정시킨 상태에서 코드를 사용한 CCOTDR과 펄스를 사용한 OTDR의 측정 횟수를 비교하여 dynamic range의 개선 정도를 비교해 보았다. 이 결과 코드를 사용한 경우는 코드 길이가 길어질 수록 평균 횟수가 줄어들게 되고, 이것이 dynamic range 개선 정도를 제한하게 된다. 따라서 코드 길이를 늘림으로써 얻을 수 있는 최대 dynamic range의 개선 정도는 식 (49)와 같이 주어지게 된다. 또한 코드 길이 증가에 따른 dynamic range 개선 정도의 효율성을 고려했을 경우 사용 가능한 최대 코드 길이는 식 (51)과 같이 주어진다.

V. 결 론

OTDR의 주요 사양인 dynamic range를 개선하기 위하여 코드를 사용한 CCOTDR의 원리를 정리하였다. 일반적인 펄스형태의 빛이 아니라 Golay 코드에 따라 빛을 출력함으로써 OTDR의 dynamic range가 증가시킬 수 있다. 이러한 CCOTDR은 코드 길이를 늘림으로써 하드웨어를 변경하지 않고 dynamic range를 개선할 수 있는 장점이 있다. 코드 길이와 평균 횟수를 사용해 dynamic range를 얻는 과정을 살펴보았다.

그러나 코드길이가 어느 이상 증가하게 되면 1회 측정 시간이 늘어나 일정 시간동안 측정할 수 있는 평균 횟수가 줄어들게 되어 전체 dynamic range 개선 정도는 제한된다. 이를 계산하기 위하여 일정 시간동안 측정 가능한 횟수를 코드를 사용한 경우와 펄스를 사용한 경우에 대하여 각각 유도하였다. 이를 통해 식 (49)와 같이 dynamic range 개선 정도의 상한이 있음을 보였다. 또한 최대 dynamic range 개선을 달성할 수 있

는 이론적 코드길이를 계산하여 이 때의 코드 길이를 최대 유효 코드 길이로 정의하였다. 이를 통해 코드를 사용할 경우 적절한 코드 길이를 정할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Dennis Derickson, Fiber Optic Test and Measurement, Prentice Hall p.434 -p.474 1998.
- [2] Mitsuhiro Tateda, Tsuneo Horiguchi, Member, IEEE, "Advances in Optical Time-Domain Reflectometry" Journal of Lightwave Technology, VOL 7. No. 8, pp. 1217-1224 August 1989.
- [3] M. P. Gold, A. H. Hartog, "Long-range single-mode OTDR : Ultimate performance and potential uses" Proc. 10th Euro. Conf. Opt. Commun, pp. 128-129, 1984.
- [4] M. Nakazawa, M. Tokuda, Y. Morishige, T. Toratani, "1.55 μ m OTDR for single-mode optical fiber longer than 110km" Electron. Lett. vol. 20. no. 8. pp. 323-325, 1984.
- [5] M. Nakazawa, M. Tokuda, K. Washino, Y. Ashara, "130km long fault location for single-mode optical fiber using 1.55 μ m Q-switched Er+++ : Glass laser", Opt. Lett. vol 9. no 7, pp. 312-314, 1984.
- [6] Moshe Nazarathy, S.A. Newton, R.P. Giffard, D.S. Moberly, F. Sischka, W.R. Trutna jr., S. Foster, "Real-Time Long Range Complementary Correlation Optical Time Domain Reflectometer", Journal of Lightwave Technology, VOL 7 No. 1, pp. 24-38, January 1989.
- [7] P. Healey, "Instrumentation principles for optical time domain reflectometry" J. Phys. E: Scientific Instrum. vol. 19. pp. 334-341, 1986.
- [8] Michael D.Jones, "Using Simplex Codes to Improve OTDR Sensitivity", IEEE Photonics Technology Letters, VOL. 15, No. 7, pp. 822-824, July 1993.
- [9] M. Zoboli, P. Bassi, "High spatial resolution OTDR attenuation measurements by a correlation technique" Appl. Opt, vol. 22 no. 23

pp. 3680-3681, 1983.

[10] P. Healey, "Optical orthogonal pulse compression codes by hopping", Electron Lett. vol 17, no 25, pp 970-971, 1981.

[11] S.A. Newton, M. Nazarathy, R. P. Giffard, D.S. Moberly, F. Sischka, S. Foster, S. Gross, P. Zorabedian, "Spread spectrum optical time-domain reflectometer", Proc. Conf. Lasers and Electroopt. pp. 138-140, 1987.

[12] Dr. William A. Gardner, Introduction to Random Processes, McGraw-Hill p. 46 Second Ed. 1989.

저 자 소 개



金東瑄(學生會員)
 2002년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(학사). 2002년 3월~현재 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (석사과정). <주관심분야 : 계측기 신호처리, 엔진 제어 시스템>

朴宰弘(正會員)
 1983년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 졸업(학사). 1991년 6월 : 미시간대학교(전기공학 박사). 1999년 4월~현재 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 부교수. <주관심분야 : 고장 진단 및 제어 이론, 차량 전장 시스템, 센서 및 계측 시스템, 인공 지능 및 신호 처리 응용>