

부호 상관기를 활용한 STDR 기법의 탐지 성능 개선

한정재*, 노상욱*, 박소령^o

Performance Improvement of STDR Scheme Employing Sign Correlator

Jeong Jae Han*, Sanguk Noh*, So Ryoung Park^o

요약

이 논문에서는 STDR(sequence time domain reflectometry) 기법의 상관기 앞단에 부호기를 넣음으로써 계산량을 증가시키지 않고도 원거리 고장의 위치 탐지 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 제안한다. STDR 기법은 PN 수열을 인가하여 시간 영역 상관(time domain correlation)으로 고장 위치를 탐지하는 기법이므로, 상관기 앞단에 부호기를 넣음으로써 고장 위치에서 반사된 신호를 STDR 기법의 인가 신호에 가깝게 복원시켜 상관 값을 증가시킬 수 있다. 제안한 기법을 사용하여 원거리 고장에서 고장위치 탐지 성능을 크게 개선시킬 수 있음을 모의실험으로 확인한다.

Key Words : time domain reflectometry (TDR), sequence TDR (STDR), auto-correlation, sign detector, cable fault

ABSTRACT

This paper proposes an enhanced scheme adding a sign detector at the front of the correlator in STDR (sequence time domain reflectometry) system. We have executed simulations to show the improvement of detection performance in two fault types and various fault locations. Consequently, it can be shown that the proposed scheme improves the detection performance of the location of far-fault without increasing the computational complexity.

1. 서론

케이블의 고장 종류와 위치를 탐지하는 대표적인 기법으로는 시간영역 상관(correlation)을 이용하는 TDR(time domain reflectometry), 주파수영역 상관을 이용하는 FDR(frequency domain reflectometry), 그리고 시간-주파수영역의 상관을 이용하는

TFDR(time-frequency domain reflectometry) 등이 있다^[1-3]. TDR 기법은 펄스 신호를 전송하여 고장 지점에서 반사된 신호를 탐지하는 가장 간단한 기법이지만 펄스 신호가 감쇠에 취약하기 때문에 원거리 고장에 대한 탐지 성능이 떨어지는 단점이 있다. FDR 기법은 특정 주파수의 정현파(sinusoidal wave)를 전송한 후 수신 신호의 주파수 스펙트럼을 분석하여 특정 주파수 성분이 존재하는지 여부를 판단함으로써 고장

* 본 연구는 2013년도 민-군겸용기술사업(Dual Use Technology Program)의 연구비 지원 및 2015년도 가톨릭대학교 교비연구비(M-2015-B0002-00108)의 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : The Catholic University of Korea, School of Information, Communications, and Electronics Engineering (ICEE), Communication Signal Processing (CSP) Lab. DoubleJHan88@gmail.com, 학생회원

^o Corresponding Author : The Catholic University of Korea, School of ICEE, CSP Lab., srpark@catholic.ac.kr, 중신회원

* The Catholic University of Korea, School of Computer Science and Information Engineering (CSIE), Center for Intelligent Systems, sunoh@catholic.ac.kr

논문번호 : KICS2015-04-121, Received April 13, 2015; Revised May 8, 2015; Accepted May 8, 2015

의 유무를 탐지하는 기법이다. 특정 주파수 신호를 선택하여 사용 가능하기 때문에 전선의 스펙트럼 특성에 따라 반사 상태가 좋은 주파수 대역을 사용할 수 있는 장점이 있으나, 주파수영역에서 스펙트럼을 분석하기 때문에 TDR 기법에 비해 계산량이 증가하고 반사 신호의 시작 시간을 정확히 찾아내는 성능이 다소 떨어지는 경향이 있다. 시간과 주파수 두 영역에서 모두 상관을 분석하는 TFDR 기법은 가우시안 칩(Gaussian chirp) 신호를 사용하여 원하는 주파수 대역을 활용할 수 있으면서 고장위치를 탐지하는 성능이 우수한 장점이 있으나, 표본화 주파수가 높거나 원거리 탐지를 해야 하는 경우에는 계산량이 매우 증가하는 단점이 있다.

한편, TDR 기법을 보완하기 위하여 펄스 신호 대신 확산 수열(spreading sequence)을 인가 신호로 사용하는 기법인 STDR(sequence TDR)과 원하는 주파수 대역을 활용할 수 있도록 하기 위해 확산 수열에 정현파 변조를 적용한 SSTDR(spread spectrum TDR) 기법이 제안되었다^{4,6)}. 확산 수열로는 PN(pseudo-noise) 수열을 인가 신호로 이용하는 STDR 기법이 주로 연구되었는데, 항공기에 배선되는 Mil-Std 1553 표준 전기선의 고장위치를 판단해내는 STDR 기법과, SSTDR 기법의 인가 신호로 PN 수열이나 Gold 수열을 사용하였을 때 되돌아오는 신호와의 자기상관(auto-correlation) 형태와 전력밀도에 대한 연구가 있었고, 길이가 다양한 m-수열이나 자기상관 성질이 우수한 바커(Barker) 수열과 프랭크(Frank) 수열을 사용한 STDR 및 SSTDR 기법의 성능에 대한 연구도 진행되었다.

이 논문에서는 계산량을 늘이지 않으면서도 원거리 고장에 대한 반사 신호의 상관 값을 증가시켜 고장 위치 탐지 성능을 높이기 위하여, 상관기 앞단에 부호기(sign detector)를 두어 반사 신호 형태를 초기 인가 신호에 가깝도록 복원하는 STDR 방식을 제안한다. II장에서는 기존 STDR 기법과 제안한 고장 탐지 기법에 대하여 비교하여 설명하고, III장에서는 성능 비교를 위한 모의실험에 사용할 케이블 전송 채널 모형과 고장 위치 탐지 성능 모의실험 결과를 살펴보고, IV장에서 결론을 맺는다.

II. STDR 기법과 제안한 고장 탐지 기법

이 장에서는 기존의 STDR 기법의 원리와 단점을 예를 들어 설명하고 제안한 고장 탐지 기법을 STDR과 비교하여 설명한다.

2.1 STDR 기법^{4,6)}

STDR 기법은 자기상관 성질이 좋은 수열을 케이블에 인가한 뒤 고장 지점에서 반사되어 되돌아오는 신호의 도착 시간과 위상을 관측하여 고장 위치와 고장 유형을 탐지하는 기법이다. 그림 1에 STDR 기법의 블록도를 간략히 나타내었다. PN 수열 발생기에서 생성된 수열에 펄스를 곱하여 인가 신호로 사용한다. 케이블에 인가된 신호는 고장으로 인해 반사된 신호와 함께 수신되고, 상관기로 구성된 신호처리 부분에서 반사 신호의 시간지연 값을 구하여 고장 위치를 탐지한다.

길이가 N 인 이진 수열(binary sequence) $\mathbf{c} = [c_0, c_1, \dots, c_{N-1}]$, $c_i \in \{-1, 1\}$ 를 사용한 STDR의 인가 신호 $s(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n p_{T_c}(t - nT_c) \quad (1)$$

$$p_{T_c}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_c \\ 0, & \text{그 밖} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, T_c 는 칩 구간(chip duration)이다.

$r(t)$ 를 신호 인가 후 전력선에서 관측된 신호라 할 때, 인가 신호 $s(t)$ 와 관측 신호 $r(t)$ 의 시간영역 상관함수는 다음과 같다.

$$R_{sr}(\tau) = \frac{1}{NT_c} \int_0^{NT_c} s(t)r^*(t+\tau)dt \quad (3)$$

$r(t)$ 에 $s(t)$ 의 반사 신호가 포함되어 있을 때에는 반사 신호가 존재하는 시간에서 상관함수의 절대값이 크게 나타나므로, 신호를 인가한 지점에서 고장 지점까지의 거리 d 는 인가 신호와 반사 신호의 시간 차 τ_D 를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d = \frac{v_P \times \tau_D}{2} \quad (4)$$

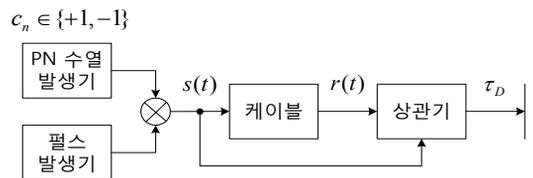


그림 1. STDR 시스템의 블록도
Fig. 1. A block diagram of STDR system

여기서, v_p 는 인가신호의 전파속도(velocity of propagation)이다.

그림 2는 크기가 1이고 길이가 15인 m-수열을 인가 신호로 사용하였을 때 STDR 기법의 관측 신호 $r(t)$ 와 상관함수 $R_{sr}(\tau)$ 의 예를 보여주고 있다. 상관함수의 첫 번째 피크는 케이블에 인가된 신호가 그대로 측정되는 지점인 $0.1\mu s$ 에서 나타나고, 두 번째 피크는 고장 지점에서 반사된 신호가 측정되는 $0.6\mu s$ 에서 나타난다. 이 두 피크의 차는 $\tau_D = 0.5\mu s$ 이므로 $v_p = 2 \times 10^8 m/s$ 일 때 고장 위치는 50m로 추정할 수 있다.

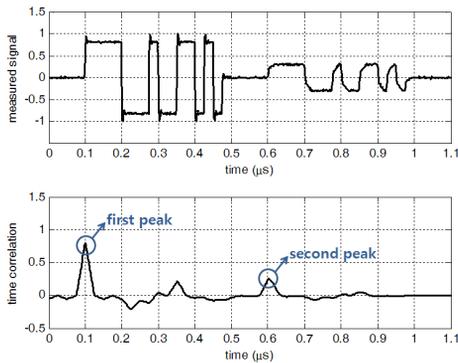


그림 2. STDR 기법의 관측 신호와 상관함수의 예
Fig. 2. An example for the measured signal and its correlation function with reference signal in STDR

2.2 제안한 고장 탐지 기법

STDR 기법에서 고장이 비교적 가까운 위치에서 발생하였다면 반사 신호의 감쇠가 크지 않아서 그림 2와 같이 두 번째 피크에서 반사 신호를 검출하여 고장 위치를 탐지할 수 있으나, 그림 3과 같이 고장이 먼 위치에서 발생한 경우에는 반사 신호의 감쇠가 커서 두 번째 피크가 반사 신호의 위치가 아닌 곳에서 발생할 수 있다. 이 논문에서는 관측 신호의 부호를 복원한 후 상관함수를 얻음으로써 반사 신호의 감쇠가 큰 경우에도 고장 위치를 잘 추정할 수 있는 방법을 제안한다.

그림 4에 제안한 기법의 간략한 블록도를 보였다. 그림 1의 기존 STDR 기법과 달라진 부분은 관측 신호 $r(t)$ 가 부호기를 통과한 후 상관기에 입력되는 것이다. 부호기는 다음과 같이 입력의 부호를 출력하는 회로이다.

$$z(t) = \begin{cases} +1, & r(t) > 0 \\ 0, & r(t) = 0 \\ -1, & r(t) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

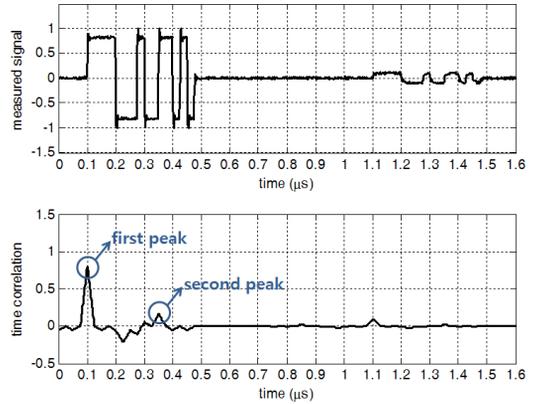


그림 3. 고장 위치가 먼 경우, STDR 기법의 관측 신호와 상관함수의 예
Fig. 3. An example for the measured signal and its correlation function with reference signal in STDR when the fault location is far

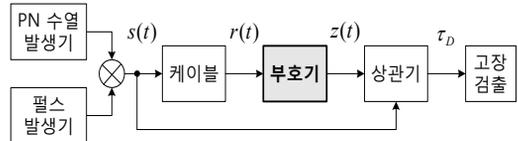


그림 4. 제안한 고장 탐지 시스템의 블록도
Fig. 4. A block diagram of proposed system

부호기 통과 신호 $z(t)$ 와 인가 신호 $s(t)$ 의 시간영역 상관함수

$$R_{sz}(\tau) = \frac{1}{NT_c} \int_0^{NT_c} s(t)z^*(t+\tau)dt \quad (6)$$

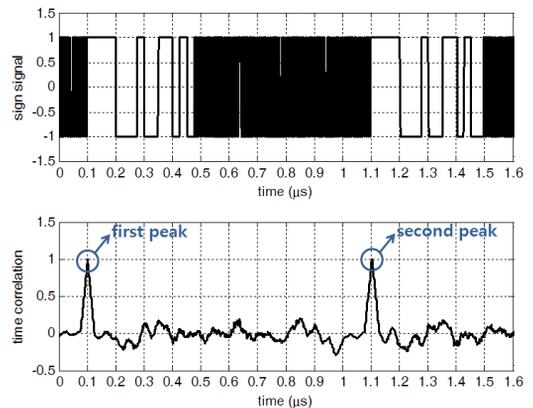


그림 5. 고장 위치가 먼 경우, 제안한 기법의 부호기 통과 신호와 상관함수의 예
Fig. 5. An example for the sign signal and its correlation function with reference signal in STDR when the fault location is far

에서 첫 번째 피크와 두 번째 피크의 시간 차를 이용하여 고장 위치를 검출할 수 있다.

그림 5에 제안한 기법의 동작 예를 보였다. 상단은 그림 3의 관측 신호를 부호기에 통과시킨 $z(t)$ 이고, 하단은 부호기 통과 신호와 인가 신호의 상관함수인 $R_{sz}(\tau)$ 이다. 관측 신호의 부호 정보만을 사용함으로써 고장 지점에서 반사된 신호를 인가 신호의 형태에 가깝게 복원시킬 수 있기 때문에, 반사 신호가 존재하는 1.1μs에서 큰 상관 값을 얻을 수 있고, 따라서 고장 위치를 알맞게 추정할 수 있다.

III. 고장 탐지 성능 비교

이 장에서는 제안한 기법과 기존 STDR 기법을 사용하였을 때 사용한 수열의 종류, 고장 위치, 고장 종류에 따른 오탐지율 성능을 모의실험으로 비교해본다.

3.1 케이블의 전송 채널 모형

수신 신호 $r(t)$ 는 인가 신호 $s(t)$ 가 충격응답(impulse response)이 $h(t)$ 인 시스템을 통과하고 AWGN(additive white Gaussian noise) $n(t)$ 가 더해진 형태로 나타낼 수 있다.

$$r(t) = s(t) * h(t) + n(t) \quad (7)$$

$h(t)$ 의 푸리에 변환인 전달함수(transfer function) $H(f)$ 는 크기 감쇠(attenuation), 고장 지점 반사(reflection), 시간 지연(delay), 다중경로(multipath)를 종합적으로 고려하여 다음과 같이 모형화할 수 있다 [1,7,8].

$$H(f) = \sum_{i=1}^{L_p} \underbrace{\rho_i}_{\text{reflection coefficient}} \underbrace{e^{-\alpha(f)l_i}}_{\text{attenuation portion}} \underbrace{e^{-j2\pi f(l_i/v_p)}}_{\text{delay portion}} \quad (8)$$

여기서, L_p 는 경로의 수, l_i 는 i 번째 경로의 길이, $\alpha(f)$ 는 주파수에 따른 감쇠성분, ρ_i 는 i 번째 경로의 반사계수(reflection coefficient)를 나타낸다. 반사계수는 전력선의 특성 임피던스 Z_C 와 i 번째 신호 반사지점의 종단 임피던스 Z_L 를 사용하여 다음과 같이 정의할 수 있다^[1].

$$\rho_i = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (9)$$

고장 형태가 단선(open)인 경우의 종단 임피던스는 ∞로 가정하여 반사계수는 1이 되고, 합선(short)인 경우의 종단 임피던스는 0으로 가정하여 반사계수는 -1이 된다.

보기를 들어, 200m 길이의 케이블 한 끝에서 신호를 인가하고 인가 지점에서 150m 떨어진 위치에 합선 고장이 있다고 가정하면 $L_p = 3$, $\rho_1 = 1$ (인가 신호), $\rho_2 = -1$ (고장 지점 반사 신호), $\rho_3 = 1$ (케이블 종단 반사 신호)인 세 가지 경로로 모형화 할 수 있다.

3.2 성능 비교 모의실험 결과

이 논문에서는 MATLAB[®] 시뮬레이션으로 고장 위치 탐지 성능을 모의실험 하였고, 표본화 주파수는 $f_s = 200\text{MHz}$, 전력선 전파속도는 $v_p = 2 \times 10^8 \text{m/s}$, 칩 구간은 $T_c = 40\text{ns}$, 감쇠성분 $\alpha(f)$ 는 [9]에서 측정된 지중 전력 케이블의 감쇠성분을 활용하였다. 그리고 케이블의 고장 유형을 단선일 때와 합선일 때의 두 종류로 설정하고, 고장위치가 신호 인가 지점으로부터 50m, 100m, 150m인 경우의 탐지 성능을 살펴보았다. 길이 7($m = 3$)과 15($m = 4$)인 m -수열을 사용할 때, SNR(signal to noise power ratio)의 변화에 따른 고장 위치 오탐지율을 비교하였다. 이 논문에서 고장 위치 오탐지율은 실제 고장 위치와 탐지한 고장 위치 간의 거리 오차가 1%를 초과하는 비율을 얻은 것이다. 즉, 100m 고장에 대한 모의실험에서는 거리 오차가 ±1m를 초과하는 경우 오탐지 하였다고 판단한다.

그림 6은 고장 종류가 단선이고 길이가 7인 m -수열을 사용하였을 때 고장 위치에 따른 탐지 기법별 오탐지율을 나타내고 있다. 모든 고장 위치에서 기존 기법보다 제안한 기법을 사용하였을 경우에 오탐지율이 낮은 것을 확인할 수 있다. 특히, 고장 위치가 100m와 150m인 원거리 고장일 때, 기존 STDR 기법은 SNR이 증가하여도 오탐지율이 거의 1인 것에 비하여, 제안한 기법은 SNR의 증가에 따라 오탐지율이 감소하여 원거리 고장에서도 오탐지율을 0에 가깝게 줄일 수 있음을 볼 수 있다. 그 이유는 제안한 기법에서 잡음, 주파수 선택적 감쇠, 지연 등의 영향으로 열화된 반사 신호가 부호기를 통과하면서 인가 신호와 거의 흡사하게 복원되어 상관 값이 매우 증가하였기 때문이다.

그림 7은 고장 종류가 합선이고 그 외의 환경은 그림 6과 같은 경우의 오탐지율을 나타내었다. 길이가 7인 m -수열을 사용하였을 때에는 모든 고장 거리에서 두 기법의 오탐지율이 고장 종류가 단선일 경우와 거

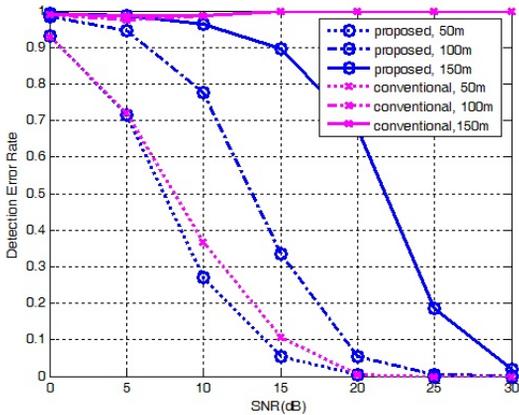


그림 6. 고장 종류가 단선이고 수열의 길이가 7일 때, 고장 위치에 따른 탐지 기법별 오탐지율
Fig. 6. Detection error rates with different fault locations and detection methods when the fault type is 'open' and the length of sequence is 7

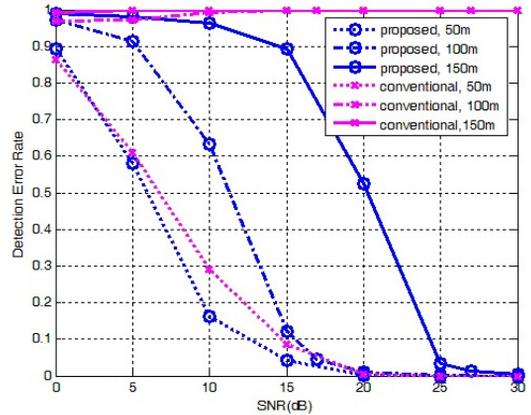


그림 8. 고장 종류가 단선이고 수열의 길이가 15일 때, 고장 위치에 따른 탐지 기법별 오탐지율
Fig. 8. Detection error rates with different fault locations and detection methods when the fault type is 'open' and the length of sequence is 15

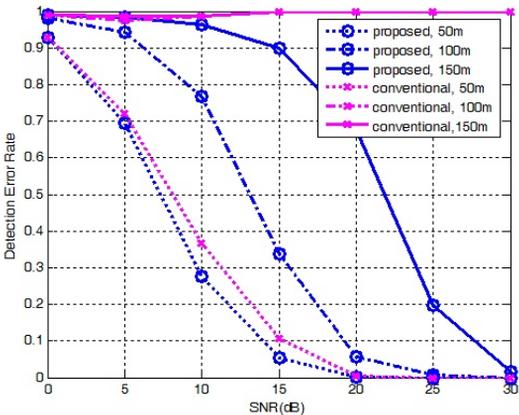


그림 7. 고장 종류가 합선이고 수열의 길이가 7일 때, 고장 위치에 따른 탐지 기법별 오탐지율
Fig. 7. Detection error rates with different fault locations and detection methods when the fault type is 'short' and the length of sequence is 7

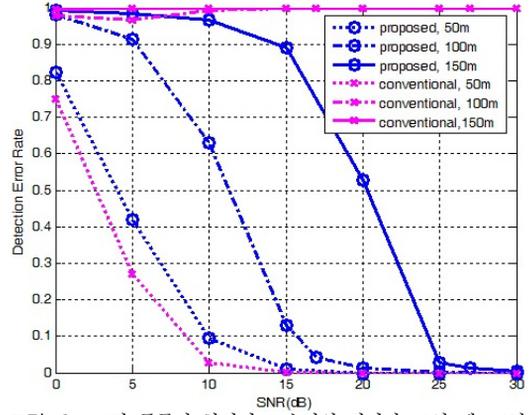


그림 9. 고장 종류가 합선이고 수열의 길이가 15일 때, 고장 위치에 따른 탐지 기법별 오탐지율
Fig. 9. Detection error rates with different fault locations and detection methods when the fault type is 'short' and the length of sequence is 15

의 같은 결과를 보였다.

그림 8과 9는 고장 종류가 각각 단선과 합선일 때, 길이가 15인 m-수열을 사용하여 고장 위치에 따른 오탐지율을 비교한 결과이다. 길이가 7인 m-수열을 사용한 그림 6, 7과 같은 SNR에서 비교하면, 전반적으로 수열의 길이가 긴 경우인 그림 8, 9의 오탐지율이 낮아지는 경향을 볼 수 있다⁶⁾.

수열의 길이가 7일 때와 마찬가지로 기존 STDR 기법을 사용한 경우에는 100m, 150m의 원거리 고장에서는 SNR이 증가하여도 오탐지율이 감소되지 못하는 반면, 제안한 기법을 사용한 경우에는 수열의 길이가 7인 때보다 SNR이 증가할수록 오탐지율이 더 크게 감소함을 볼 수 있다. 한 가지 특이한 점은 고장 중

류가 합선이고 고장 위치가 50m인 경우에는 기존 STDR 기법이 제안한 기법보다 오탐지율 성능이 더 우수하다는 점이다. 그 이유는 수열의 길이가 길어지면서 고장 위치가 가까운 경우에 인가 신호와 반사 신호가 중첩되고, 제안한 기법에서는 부호기의 영향으로 중첩된 부분의 정보가 손실되기 때문으로 분석할 수 있다.

IV. 결 론

이 논문에서는 확산 수열의 시간영역 상관을 이용하는 STDR 기법에서 관측 신호의 부호를 복원한 후 상관 값을 얻음으로써 반사 신호의 감쇠가 큰 경우에

도 고장 위치를 잘 추정할 수 있는 수정된 STDR 기법을 제안하였다. 또한 제안한 기법의 고장 위치 탐지 성능 향상을 살펴보기 위하여, 길이가 7과 15인 m-수열을 사용하였을 때 고장 유형과 고장 위치를 달리하여 기존 STDR 기법의 오탐지율과 제안한 기법의 오탐지율을 모의실험으로 비교하였다.

대부분의 고장 유형과 고장 위치에서 제안한 기법의 오탐지율이 기존 기법의 오탐지율보다 낮은 결과를 보여, 제안한 기법의 성능 향상 정도를 확인할 수 있었다. 특히 원거리 고장인 100m, 150m에서는 기존 기법으로 고장 위치를 거의 탐지할 수 없었던 반면, 제안한 기법으로는 SNR이 높을 때 오탐지율이 0에 가까운 결과를 보여, 제안한 기법이 원거리 고장에서 뛰어난 성능 향상을 보임을 확인할 수 있었다.

수열의 길이를 기준으로 성능을 비교해보면 일반적으로 길이가 긴 m-수열의 상관 성질이 좋기 때문에 오탐지율이 낮아지는 것을 볼 수 있었다. 하지만 고장 위치가 50m일 때 길이가 15인 m-수열을 사용하고 고장 유형이 합선인 경우, 인가 신호와 고장 위치에서 반사된 신호가 중첩되어 부호기를 통과할 경우 정보 손실이 일어나기 때문에 제안한 기법의 오탐지율이 기존의 오탐지율보다 조금 높아지게 된다. 단선($\rho=+1$)일 경우에도 중첩으로 인한 정보 손실은 존재하지만 합선($\rho=-1$)일 때에는 위상이 반전된 반사 신호이므로 중첩된 부분의 정보 손실의 효과가 더 크게 나타나기 때문이다.

References

[1] N. H. Rahim, I. S. Chairul, S. A. Ghani, M. S. A. Khair, N. Abas, and Y. H. M. Thayoob, "Simulation of TDR circuit for the analysis of wave propagation in XLPE cable model," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power and Energy*, pp. 796-801, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, Dec. 2012.

[2] S. H. Doo, K. S. Kwak, and J. B. Park, "Estimation of fault location on a power line using the time-frequency domain reflectometry," *J. IEIE*, vol. 57, no. 2, pp. 268-275, Feb. 2008.

[3] J. J. Han, J. Moon, and S. R. Park, "Performance comparison of fault detection method using Gaussian enveloped linear chirp," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 1065-

1066, Jeongseon, Korea, Jan. 2015.

[4] R. A. Guinee, "A novel transmission line test and fault location methodology using pseudo-random binary sequences," in *Proc. IET Irish Conf. Sign. Syst.*, pp. 350-355, Galway, Ireland, Jun. 2008.

[5] P. Smith, C. Furse, and J. Gunther, "Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location," *IEEE Sensors J.*, vol. 5, no. 6, pp. 1469-1478, Dec. 2005.

[6] J. J. Han and S. R. Park, "Performance comparison and improvement of STDR/SSTDR applying various sequences," *J. KICS*, vol. 39, no. 11, pp. 637-644, Nov. 2014.

[7] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 4, pp. 553-559, Apr. 2002.

[8] J. H. Yoo, S. H. Choe, and N. Pine, "MIMO-OFDM BPLC over statistical power line channels with cross-talk," *J. KICS*, vol. 36, no. 12, pp. 1565-1573, Dec. 2011.

[9] C. K. Lee, T. S. Yoon, and J. B. Park, "Localization of concentric neutrals corrosion on live underground power cable based on time-frequency domain reflectometry," *J. IEIE*, vol. 62, no. 2, pp. 239-245, Feb. 2013.

한 정 재 (Jeong Jae Han)



2014년 2월 : 가톨릭대학교 정보통신전자공학 공학사
 2014년 3월~현재 : 가톨릭대학교 정보통신전자공학 석사과정
 <관심분야> 통신신호처리, 무선통신, 전력선통신

노 상 욱 (Sanguk Noh)



1987년 2월: 서강대학교 생명
과학 이학사

1989년 2월: 서강대학교 컴퓨
터공학 공학석사

1999년 8월: 텍사스주립대학교
컴퓨터공학 공학박사

1989년 2월~1995년 7월: 국방
과학연구소 연구원

2000년 8월~2002년 2월: 미조리주립대학교 컴퓨터
학과 교수

2002년 3월~현재: 가톨릭대학교 컴퓨터정보공학부
교수

<관심분야> 지능형 분산 시스템, 지식관리, 결정이론,
기계학습 등

박 소 령 (So Ryoung Park)



1997년 2월: 연세대학교 전자공
학 공학사

1999년 2월: 한국과학기술원 전
기및전자공학 공학석사

2002년 2월: 한국과학기술원 전
기및전자공학 공학박사

2003년 3월~현재: 가톨릭대학
교 정보통신전자공학부 교수

<관심분야> 통계학적 신호처리, 무선통신, 다중접속 등