

# 여러 가지 수열을 적용한 STDR/SSTDR 기법의 성능 비교 및 개선

한정재\*, 박소령<sup>o</sup>

## Performance Comparison and Improvement of STDR/SSTDR Schemes Using Various Sequences

Jeong Jae Han\*, So Ryoung Park<sup>o</sup>

### 요약

이 논문에서는 다양한 길이와 종류의 수열을 사용한 STDR(sequence time domain reflectometry) 및 SSTDR(spread spectrum time domain reflectometry) 기법의 고장위치 탐지 성능을 비교하고, SSTDR 기법의 성능 향상을 위한 인가신호 제거 방식을 제안한다. 대표적인 PN(pseudo-noise) 수열인 m 수열, 자기상관 (autocorrelation) 성질이 우수한 이진(binary) Barker 수열과 4위상 Frank 수열을 사용하였을 때, 전력선 채널 모형에서 고장 유형, 고장위치, 제안 기법 사용 유무를 바꾸어가며 오탐지율을 비교 분석한다. 감쇠가 심할 때와 고장 위치가 매우 가까울 때 제안한 인가신호 제거 방식을 사용하면 고장위치 탐지 성능을 크게 개선시킬 수 있음을 모의실험으로 확인한다.

**Key Words** : time domain reflectometry (TDR), sequence TDR (STDR), spread spectrum TDR (SSTDR), spreading sequence, correlation function

### ABSTRACT

This paper investigates the detection performance of fault location using STDR(sequence time domain reflectometry) and SSTDR(spread spectrum time domain reflectometry) with various length and types of sequences, and then, proposes an improved detection technique by eliminating the injected signal in SSTDR. The detection error rates are compared and analyzed in power line channel model with various fault locations, fault types, and spreading sequences such as m-sequence, binary Barker sequence, and 4-phase Frank sequence. It is shown that the proposed technique is able to improve the detection performance obviously when the reflected signal is weak or the fault location is extremely close.

### I. 서론

전력선에서 고장의 종류와 위치를 탐지하는 기법으

로는 펄스 신호의 시간영역 상관(correlation)을 이용하는 TDR(time domain reflectometry), 시간-주파수 영역의 상관을 이용하는 TFDR(time-frequency

\* 본 연구는 2013년도 민·군겸용기술사업(Dual Use Technology Program)의 연구비 지원 및 2013년도 가톨릭대학교 교비연구비(M-2014-B0002-00032)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

<sup>o</sup> Corresponding Author : The Catholic University of Korea, School of ICEE, CSP Lab., srpark@catholic.ac.kr, 종신회원  
 논문번호 : KICS2014-09-351, Received September 15, 2014; Revised November 3, 2014; Accepted November 3, 2014

domain reflectometry), 펄스를 수열로 확산시켜 사용하는 STDR(sequence TDR), 수열을 정현파로 변조시켜 사용하는 SSTDR(spread spectrum TDR) 기법 등이 있다<sup>1-4)</sup>.

TDR 기법은 가장 간단한 탐지 기법이지만 펄스 신호가 감쇠에 취약하여 원거리 고장에서 탐지 성능이 떨어지는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 펄스 신호를 수열(spreading sequence)로 확산하는 기법인 STDR과 원하는 주파수 대역을 활용할 수 있도록 하기 위해 확산 수열에 정현파 변조를 적용한 SSTDR 기법이 제안되었다.

한편 TFDR은 가우시안 칩(Gaussian chirp) 신호를 사용하여 원하는 주파수 대역을 활용할 수 있으면서 시간과 주파수 영역 모두에서 상관을 분석하기 때문에 고장위치 탐지성능이 우수한 장점이 있으나, 표본화 주파수가 높거나 원거리 탐지인 경우에는 계산량이 매우 증가하는 단점이 있기 때문에<sup>5)</sup> 이 논문에서는 STDR과 SSTDR의 성능 비교와 개선 방법을 고려한다.

현재까지의 연구로는 의사잡음(pseudo-noise) 수열을 인가신호로 이용하는 STDR 기법이 주로 연구되었는데, 항공기에 배선되어 Mil-Std-1553 표준 데이터를 전송하는 선로에 적용한 STDR 기법과, SSTDR 기법의 인가신호로 PN 수열이나 Gold 수열을 사용하였을 때 되돌아오는 신호와의 자기상관(auto-correlation) 형태와 전력밀도에 대한 연구가 있었다<sup>1-2)</sup>.

이 논문에서는 다양한 수열의 길이와 종류, 고장의 종류, 고장위치들을 종합적으로 고려하여 STDR과 SSTDR 기법의 고장위치 탐지 성능을 살펴보고, SSTDR 기법을 사용하는 경우에 반사신호가 약할 때와 고장위치가 인가신호와 매우 가까울 때의 오탐지율을 높이는 기법을 제안한다.

## II. 고장위치 탐지 기법 및 채널 모형

이 장에서는 STDR 및 SSTDR 기법의 고장위치

탐지 원리와 특성, 그리고 모의실험에 사용할 전력선 채널의 모형화에 대하여 설명한다. 그림 1에 STDR/SSTDR 기법의 블록도를 간략히 나타내었다. STDR 기법은 발생시킨 수열을 그대로 인가신호로 사용하고 SSTDR 기법은 발생시킨 수열을 정현파 변조하여 인가신호로 사용한다. 전력선에 인가된 신호는 고장으로 인해 반사된 신호와 함께 수신되고, 상관기로 구성된 신호처리 부분에서 반사신호의 시간지연 값을 구하여 고장 위치를 탐지한다.

### 2.1 STDR

STDR 기법은 자기상관 성질이 좋은 수열을 전력선에 인가한 뒤 고장 지점에서 반사되어 되돌아오는 신호의 도착시간과 위상을 관측하여 고장위치와 고장 유형을 탐지하는 기법이다. 신호를 인가한 지점에서 고장 지점까지의 거리  $d$ 는 다음과 같이 구할 수 있다<sup>1)</sup>.

$$d = \frac{v_p \times \tau_D}{2} \tag{1}$$

여기서,  $v_p$ 는 전력선에서 인가신호의 전파속도(velocity of propagation)이고  $\tau_D$ 는 신호가 인가된 지점에서부터 고장 지점에서 반사되어 되돌아오기까지 걸린 시간이다.

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

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n p_{T_c}(t - nT_c) \tag{2}$$

$$p_{T_c}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_c \\ 0, & \text{그 밖} \end{cases} \tag{3}$$

여기서,  $T_c$ 는 칩 구간(chip duration)이다. 또한  $r(t)$ 를 신호 인가 후 전력선에서 관측된 신호라 할 때, 인가신호  $s(t)$ 와 관측신호  $r(t)$ 의 시간영역 상관함수

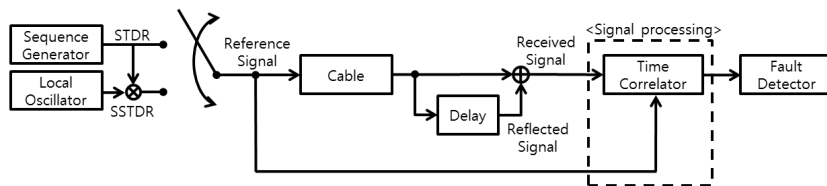


그림 1. STDR/SSTDR 기법의 블록도  
Fig. 1. A block diagram of STDR/SSTDR

$R_{sr}(\tau)$ 는 다음과 같다.

$$R_{sr}(\tau) = \frac{1}{NT_c} \int_0^{NT_c} s(t)r^*(t+\tau)d\tau \quad (4)$$

$r(t)$ 에  $s(t)$ 의 반사신호가 포함되어 있을 때에는 고장위치의 상관함수 값이 크게 나타나므로 식 (4)를 이용하면 반사신호의 시간지연 값인  $\tau_D$ 를 얻을 수 있고, 따라서 고장 지점  $d$ 를 찾아낼 수 있다.

그림 2는 인가신호가 크기 1, 길이 7인 수열, 정규 잡음의 분산이 0.5, 크기가 절반으로 감소된 반사파가 하나인 경우에 관측신호  $r(t)$ 와 상관함수  $R_{sr}(\tau)$ 의 예이다.  $|R_{sr}(\tau)|$ 의 최대 극대값과 두 번째 극대값의 시간차가  $\tau_D=300[\text{ns}]$ 이므로  $v_p$ 가 주어지면 식 (1)을 사용하여 고장위치를 얻을 수 있다.

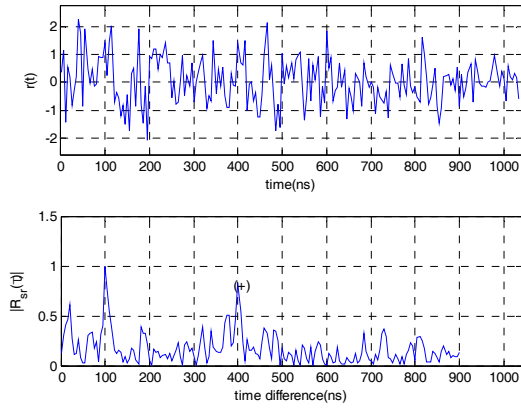


그림 2. 관측신호와 상관함수의 보기  
Fig. 2. An example for the measured signal and its correlation function with reference signal

### 2.2 SSTDR

SSTDR 기법은 자기상관 성능이 우수한 수열을 사용하여 대역을 확산하고 위상편이변조(phase shift keying)한 신호를 인가한 뒤, 고장 지점에서 반사되어 되돌아오는 신호의 도착시간과 위상을 관측하여 고장 위치와 고장 유형을 탐지하는 기법이다. 신호를 인가한 지점에서 고장 지점까지의 거리  $d$ 는 STDR과 마찬가지로 식 (1)와 같이 구할 수 있다<sup>[2]</sup>.

길이가  $N$ 인 이진 수열  $\mathbf{c} = [c_0, c_1, \dots, c_{N-1}]$ ,  $c_i \in \{-1, 1\}$ 을 사용한 인가신호  $s(t)$ 는 식 (3)에서 칩 파형에 해당하는  $p_{T_c}(t)$ 가 다음과 같이 달라진 형태이다.

$$p_{T_c}(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_c t), & 0 \leq t < T_c \\ 0, & \text{그 밖} \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $f_c = n/T_c$ 는 반송파(carrier) 주파수이고  $n$ 은 정수이다. STDR 기법에서의 고장 탐지 원리와 마찬가지로 신호 인가 후 전력선에서 관측된 신호를  $r(t)$ 라 할 때, 인가신호와 관측신호의 상관함수는 식 (4)와 같고  $r(t)$ 에  $s(t)$ 의 반사신호 성분이 존재할 때 고장 지점  $d$ 를 찾아낼 수 있다.

그림 3은 길이가 7인 수열을 동일한 인가신호로 채택하였을 때 각 기법별 신호의 파형과 정규화된(normalized) 비주기(aperiodic) 상관 함수를 나타낸다. SSTDR 기법에서는 STDR 기법의 경우와 달리 정현파를 수열에 곱하기 때문에 상관함수의 절대값에서 크기가 비교적 큰 부엽(side-lobe)이 생기는 것을 볼 수 있다. 따라서, SSTDR 기법에서는 상관함수의 절대값인  $|R_{sr}(\tau)|$ 의 극대값이 큰 지점을 찾아서 고장 위치를 판단할 때, 인가신호의 부엽(side-lobe)의 크기가 감소되어 되돌아오는 반사신호의 주엽(main-lobe)보다 커지는 경우가 발생하여 탐지율을 떨어뜨리는 원인이 되기도 한다.

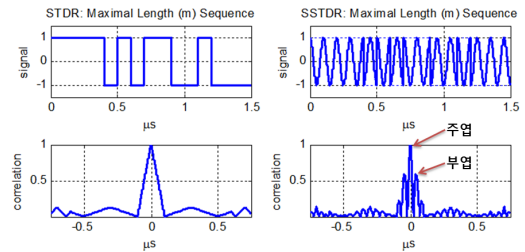


그림 3. 길이가 7인 동일한 수열을 사용한 STDR/SSTDR 인가신호와 비주기 상관함수  
Fig. 3. STDR/SSTDR reference signals and their aperiodic correlation functions using sequence with length 7

### 2.3 전력선 채널 모형

전력선 채널은 감쇠(attenuation), 반사(reflection), 지연(delay), 다중경로(multipath), 잡음(noise)을 고려하여 다음과 같이 모형화할 수 있다<sup>[5-7]</sup>.

$$H(f) = \sum_{i=1}^{L_n} \underbrace{\rho_i}_{\text{reflection efficient}} \underbrace{e^{-\alpha(f)l_i}}_{\text{attenuation portion}} \underbrace{e^{-j2\pi f(l_i/v_p)}}_{\text{delay portion}} + \underbrace{H_n(f)}_{\text{AWGN portion}} \quad (6)$$

여기서,  $H_n(f)$ 는 가산성 백색 정규 잡음(AWGN):

additive white Gaussian noise) 부분,  $L_p$ 는 경로의 수,  $l_i$ 는  $i$ 번째 신호 경로의 길이,  $\alpha(f)$ 는 주파수에 따른 감쇠성분,  $\rho_i$ 는  $i$ 번째 신호의 반사계수(reflection coefficient)를 나타낸다. 반사계수는 전력선의 특성 임피던스  $Z_C$ 와  $i$ 번째 신호 반사지점의 종단 임피던스  $Z_{L_i}$ 를 사용하여 다음과 같이 정의할 수 있다<sup>5)</sup>.

$$\rho_i = \frac{Z_{L_i} - Z_C}{Z_{L_i} + Z_C} \quad (7)$$

고장 형태가 단선인 경우의 종단 임피던스는  $\infty$ 로 가정하여 반사계수는 1이 되고, 합선인 경우의 종단 임피던스는 0으로 가정하여 반사계수는  $-1$ 이 된다. 완전한 단선이 아닌 반단선과 같은 고장에서 반사된 신호의 경우에는  $0 < Z_{L_i} < \infty$ 인 임피던스를 사용하여 반사계수를 생성한다.

### III. 여러 가지 수열을 사용한 기법의 성능 비교

이 장에서는 STDR 기법과 SSTDR 기법에서 자기상관 성질이 우수한 여러 가지 수열들을 사용하였을 때 고장위치와 고장종류에 따른 오탐지율 성능을 모의실험으로 살펴본다.

#### 3.1 여러 가지 수열

STDR 기법과 SSTDR 기법에서 수열의 자기상관 성능은 고장위치 탐지에 큰 영향을 미친다. 수열의 자기상관 성질이 우수하다는 의미는 식 (4)에서의  $R_{ss}(0)=1$ 이 최댓값이고  $R_{ss}(\tau) \approx 0, \tau \neq 0$ 인 것을 의미한다. 수열은 대역확산이나 동기화 기법에서 매우 중요한 역할을 하기 때문에 상관 성질이 우수한 수열에 대한 연구는 지속적으로 진행되고 있다<sup>8-11)</sup>. 이 논문에서는 이러한 수열 중에서 자기상관 성질이 좋다고 알려진 m, Barker, Frank 수열을 고려해본다.

m(maximal length) 수열은 최대 차수가  $m$ 인 원시(primitive) 다항식을 사용하여 만들 수 있는 최대 길이인  $N=2^m - 1$ 의 길이를 가지는 이진(binary) 수열로서, 주기적으로 반복되는 수열에서의 자기상관 값이  $\tau \neq 0$ 일 때  $1/N$  이하의 값이다. Barker 수열은 자기상관 값이 주기적이거나 비주기적인 경우에서 모두  $|R_{ss}(\tau)| \leq 1/N, \tau \neq 0$ 이므로 동기를 획득할 때 유용한 수열이지만, 현재까지 이진 수열에서는 최대 길이가 13으로 알려져 있다. Frank 수열은 위상을  $p$ 개 사

용하는 길이  $N=p^2$ 인 다상(polyphase) 수열이며, 주기적으로 반복되는 수열에서의 자기상관 값이  $\tau \neq 0$ 일 때 0이다<sup>11)</sup>.

#### 3.2 성능 비교 모의실험

이 논문에서는 MATLAB<sup>®</sup> 시뮬레이션으로 고장위치 탐지 성능을 모의실험 하였고, 표본화 주파수는  $f_s=200$ [MHz], 전력선 전파속도는  $v_p=2 \times 10^8$ [m/s], 칩 구간은  $T_c=20$ [ns], 감쇠성분은  $\alpha(f)=-15.86$ [dB/400m]로 가정하였다. 그리고 전력선의 고장 유형을 단선( $Z_L = \infty$ )일 때와 경미한 고장( $Z_L = 150$ )일 때의 두 종류로 설정하고, 고장위치가 신호 인가 지점으로부터 3[m], 10[m], 30[m]인 경우의 탐지 성능을 살펴보았다. 길이 7( $m=3$ ), 15( $m=4$ ), 31( $m=5$ )인 이진 m 수열, 길이 13인 이진 Barker 수열, 길이  $2^4=16$ 인 4위상 Frank 수열을 사용할 때, SNR(signal to noise power ratio)의 변화에 따른 고장위치 오탐지율을 비교하였다. 실제 전력선의 SNR은 배선 환경에 따라  $-15 \sim -20$ dB 구간에서 나타날 수 있으나, 모의실험에서는 적용 기법들의 오탐지율 차이가 잘 드러나는  $0 \sim 10$ dB 구간으로 SNR을 설정하였고 그 외 구간에서는 실험결과를 활용하여 성능을 유추할 수 있다.

그림 4는 고장종류가 단선이고 길이가 15( $m=4$ ), 31( $m=5$ )인 m 수열을 사용하였을 때 고장위치에 따른 탐지 기법별 오탐지율을 나타내고 있다. 먼저, 고장 지점을 살펴보면, 전반적으로 고장위치가 가까울수록 반사신호의 감쇠의 정도가 낮기 때문에 오탐지율이

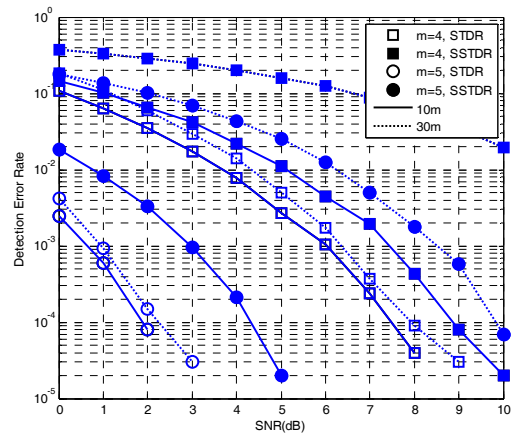


그림 4. 고장위치에 따른 탐지 기법별 오탐지율  
Fig. 4. Detection error rates with different fault locations and detection methods

낮고, 고장 지점이 신호 인가 지점으로부터 멀어질수록 반사신호의 감쇠가 커지므로 오탐지율이 커지는 현상을 볼 수 있다. 또한 기법별 오탐지율에 대하여 고찰해 보았을 때 STDR 기법보다 SSTDR 기법의 오탐지율이 더 높은 것으로 보인다. 이는 반사신호 감쇠가 반사신호의 세기를 약하게 하여 반사된 신호의 주엽(main-lobe)의 크기가 인가신호의 부엽(side-lobe)보다 작아지게 되어 반사신호의 위치에서 두 번째 극대값을 찾을 수 없기 때문이다. 이런 이유로 IV장에서는 SSTDR 기법을 사용할 때 인가신호를 제거하는 기법을 제안하고 성능을 모의실험 한다.

그림 5는 STDR 기법을 사용하고 고장유형이 단선이며 고장위치가 30m일 때에 수열의 종류와 길이에 따른 오탐지율을 보여주고 있다. 일반적으로 수열의 길이가 길수록 탐지 성능이 우수한 특성이 그림 5에도 잘 나타나있다. 조금 더 주목할 만한 결과는 길이 13인 Barker 수열과 길이 15인 m 수열의 성능차이가 상대적으로 적고, 길이 16인 Frank 수열과 길이 15인 m 수열의 성능차이가 상대적으로 적게 나타난 것이다. 길이가 13인 Barker 수열과 길이가 16인 Frank 수열 그리고 길이가 15인 m 수열의 위상이 어긋난(out-of-phase) 비주기 자기상관의 최대값은 각각 0.0769, 0.0884, 0.2000이고, 그림 5는 이와 같은 수열들의 상관 특성이 반영된 결과로 볼 수 있다.

그림 6은 길이가 15(m=4)인 m 수열을 사용하고 고장종류를 단선과 경미한 고장으로 나누었을 때 고장위치(5m, 10m, 30m)별 오탐지율을 나타내고 있다. 경미한 고장의 경우 반사신호의 반사계수가 고장 유형이 단선일 경우보다 작기 때문에 STDR과 SSTDR 두 기법 모두 모든 고장위치에서 거의 고장위치를 탐

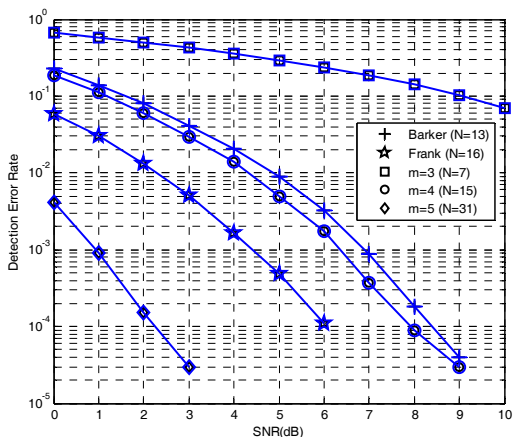


그림 5. 수열의 종류와 길이에 따른 오탐지율  
Fig. 5. Detection error rates with different sequences

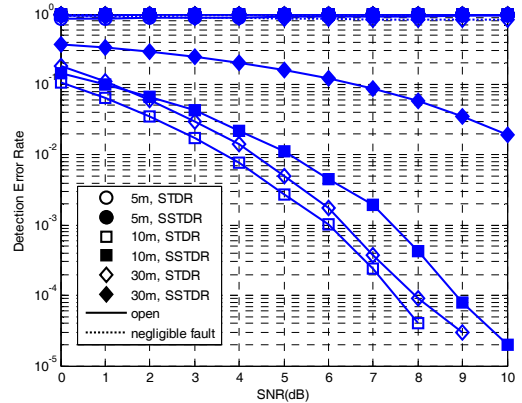


그림 6. 고장종류에 따른 거리별 오탐지율  
Fig. 6. Detection error rates with different fault types and locations

지를 하지 못하는 것으로 나타난다. 또한 앞의 모의실험에서 보았듯 고장위치가 아주 가까울 때(5m)는 인가신호와 반사신호가 중첩되어 반사신호의 시간지연을 제대로 구할 수 없기 때문에 탐지기법에 관계없이 고장위치 탐지성능이 매우 낮고, 감쇠에 따른 영향으로 고장위치가 30m일 때 보다 10m일 때의 오탐지율이 낮았다. 마지막으로 그림 4에서 살펴본 바와 같이 SSTDR 기법을 사용할 때 고장위치가 인가된 신호의 위치에서 멀어지면 감쇠로 인해 인가신호의 부엽보다 반사되어 돌아오는 신호의 주엽이 작아지므로 고장위치가 먼 곳에서의 오탐율은 높아진다.

다음 장에서는 고장위치가 가깝거나 감쇠가 심한 환경에서 고장위치 탐지를 보다 우수하게 할 수 있는 인가신호 제거 기법을 제안한다.

#### IV. 인가신호 제거 기법

SSTDR 기법을 사용할 때 고장위치가 멀어서 감쇠가 크거나 경미한 고장 유형에서 반사신호의 세기가 약한 경우에는 성능 저하가 심해진다. 이러한 상황을 극복하기 위해 상관함수  $|R_{sr}(\tau)|$ 의 최대 극대값 위치  $\tau_1$ 를 구하여 인가신호의 위치를 얻은 후 관측신호  $r(t)$ 에서 인가신호  $s(t)$ 를 제거하여  $e(t) = r(t) - s(t - \tau_1)$ 를 만들고,  $e(t)$ 와  $s(t)$ 의 상관함수  $|R_{se}(\tau)|$ 에서 최대 극대값 위치  $\tau_2$ 를 구하여 최종적으로  $\tau_D = \tau_2 - \tau_1$ 을 얻는 두 단계 방식을 제안한다. 제안하는 신호처리 알고리즘을 그림 7에서 블록도로 나타내었다. 첫 번째 상관기에서 인가신호의 위치( $\tau_1$ )를 구하여 제거한 후, 두 번째 상관기에서 반사

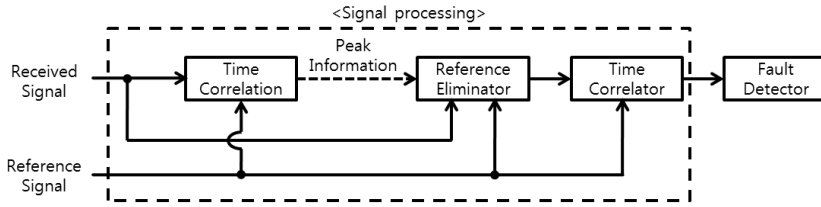


그림 7. 제안하는 기법의 블록도  
Fig. 7. A block diagram of proposed technique

신호의 위치( $\tau_2$ )를 얻어 고장 위치를 찾아낸다. 제안한 방식은 고장 위치가 가까워서 인가신호와 반사신호가 중첩된 경우에 인가신호를 제거함으로써 남아있는 반사신호의 위치를 쉽게 찾아낼 수 있게 하고, 거리가 멀거나 경미한 고장에서 감쇠가 심하여 반사신호의 상관 크기가 작을 경우에도 상대적으로 큰 인가신호를 제거함으로써 고장의 위치를 탐지할 수 있게 한다.

그림 8은 인가신호가 크기 1, 길이 7인  $m$  수열이고, 정규잡음의 분산이 0.25, 크기가 절반으로 감소된 반사파가 하나인 경우, 제안한 방식의 신호처리 흐름을 예로 보여준다.  $|R_{sr}(\tau)|$ 에서는 두 번째 극대값이 반사신호 상관함수의 주엽이 아닌 인가신호 상관함수의 부엽이므로 반사신호의 위치를 정확히 알 수 없으

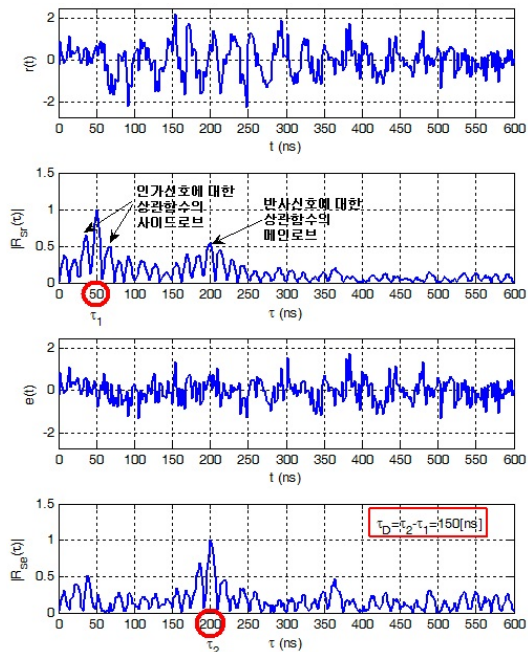


그림 8. 제안하는 기법을 사용할 때의 신호처리 예  
Fig. 8. An example of signal processing in proposed technique

나  $|R_{sr}(\tau)|$ 의 최대 극대값 위치  $\tau_1 = 50$ [ns]과  $|R_{sb}(\tau)|$ 의 최대 극대값 위치  $\tau_2 = 200$ [ns]을 구하여  $\tau_D = 150$ [ns]를 얻을 수 있다.

인가신호를 제거하여 고장위치를 탐지하는 기법을 III장의 모의실험에서와 같은 조건으로 모의실험을 수행하였다. 그림 9는 길이가 15( $m=4$ )인  $m$  수열을 사용하고 제안하는 기법을 적용을 하였을 때와 하지 않았을 때의 거리에 따른 고장 유형별 오탐지율을 나타내고 있다. 모든 고장 유형과 고장 거리에서 제안하는 기법을 적용하였을 때 오탐지율이 낮아지는 것을 알 수 있었다.

제안한 기법에서 채널 추정 오류에 따른 효과를 살펴보기 위하여, 첫 번째 상관 결과인  $\tau_1$ 에 오류가 있을 경우(인가신호를 완전히 제거하지 못했을 경우)와 오류가 없을 경우에 최종 고장위치 탐지에 미치는 영향을 비교하였다. 그림 10은 그림 9와 마찬가지로 길이가 15( $m=4$ )인  $m$ 수열을 사용하고 고장유형이 단선이며 고장위치가 인가신호 주입 지점으로부터 10m일 때, 첫 번째 상관 결과인  $\tau_1$ 에 오류가 있으면서 오탐

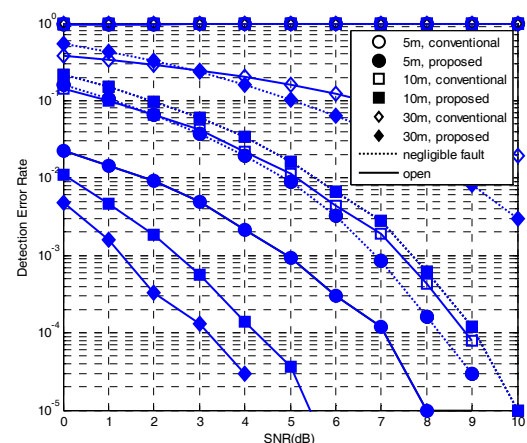


그림 9. 고장탐지 제거 기법별, 고장유형별 오탐지율  
Fig. 9. Detection error rates of the conventional and proposed SSTDR

지할 확률  $p_{e1,e2} = P(\tau_1 \text{ error}, \tau_2 \text{ error})$ 와 오류가 없으면서 오탐지할 확률  $p_{d1,e2} = P(\tau_1 \text{ no error}, \tau_2 \text{ error})$ 를 첫 번째 상관 결과인  $\tau_1$ 에 오류가 있을 확률  $p_{e1} = P(\tau_1 \text{ error})$  및 전체 오탐지율  $p_{e2} = P(\tau_2 \text{ error})$ 와 비교하여 나타내었다. 고장위치를 탐지하지 못한 경우의 대부분은 인가신호를 완전하게 제거하지 못하였을 때 발생한다는 것을 알 수 있으며, 한편으로는 인가신호를 완전하게 제거하지 못하였을 때에도 고장위치를 어느 정도 찾아내고 있음을 볼 수 있다.

표 1은 그림 10의 모의실험과 동일한 환경에서 첫 번째 상관 결과인  $\tau_1$ 에 오류가 있으면서도 고장위치를 올바르게 찾을 확률  $p_{e1,d2} = P(\tau_1 \text{ error}, \tau_2 \text{ no error})$ 을 나타내고 있다. 인가신호를 완전히 제거하지 못하였을 경우에도 SNR이 증가할수록 고장 위치를 찾아낼 확률이 증가함을 알 수 있다.

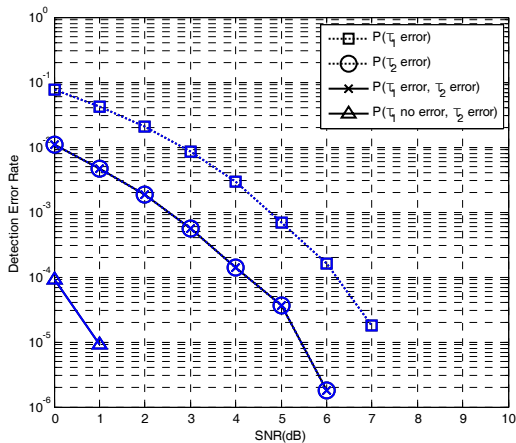


그림 10. 인가신호 제거 오류가 오탐지율에 미치는 영향  
Fig. 10. The effect of erroneous elimination on detection error rate

표 1.  $\tau_1$ 에 오류가 있으면서도 고장위치를 찾아내는 확률  
Table 1. The probability  $p_{e1,d2} = P(\tau_1 \text{ error}, \tau_2 \text{ no error})$

SNR (dB)	0	1	2	3	4	5	6	7
$p_{e1,d2}$	.859	.890	.912	.935	.953	.948	.989	1.0

### V. 결론

이 논문에서는 확산 수열의 시간영역 상관을 이용하는 STDR 기법과 SSTDR 기법에서 다양한 길이의 m 수열, 길이 13인 이진 Barker 수열, 길이 16인 4위 상 Frank 수열을 사용하였을 때 고장 유형과 고장위치를 달리하여 각 수열의 오탐지율과 고장위치에 따

른 오탐지율을 비교해 보았다. 일반적으로 반사계수가 큰 단선인 경우가 경미한 고장인 경우보다 탐지 성능이 우수하였고, 고장지점이 신호 인가지점부터 멀리 떨어질수록 감쇠가 많이 일어나기 때문에 오탐지율이 커졌다. 수열의 경우 길이가 긴 수열이 탐지 성능이 우수하였고 비슷한 길이에서는 자기상관 성질이 나은 수열의 탐지성능이 조금 더 우수하였다.

기법별 성능을 알아보면 STDR 기법에 비해서 SSTDR 기법이 감쇠가 큰 고장의 경우나 고장점이 먼 곳에서의 고장에서 인가신호의 부엽의 극대값보다 반사되어 돌아오는 신호의 주엽의 극대값이 작아지는 경우가 생기기 때문에 SSTDR 기법의 오탐지율이 STDR 기법의 경우보다 높았다. SSTDR의 탐지 성능을 높이기 위하여 인가신호의 위치를 파악하여 제거한 후 두 번째 상관을 통해 반사신호의 위치를 파악하는 기법을 제안하였다. 특히 고장점이 가까운 경우에서도 제안한 기법을 사용할 때 오탐지율이 상당히 낮아지는 것을 볼 수 있었으며, 먼 거리의 고장에서도 오탐지율이 낮아지는 것을 알 수 있었다. 감쇠로 인해 SSTDR 기법으로는 경미한 고장을 탐지를 할 수 없었던 것과는 달리 제안한 기법을 사용하면 경미한 고장의 경우에도 오탐지율을 낮출 수 있었다. 또한 제안한 기법을 사용할 때 오탐지율이 발생하는 경우는 대부분 인가신호 제거에 오류가 있을 경우이며, 인가신호를 완전하게 제거하지 못하였을 때에도 SNR이 증가할수록 고장 위치를 찾아낼 확률이 증가함을 확인하였다.

### References

- [1] R. A. Guinee, "A novel transmission line test and fault location methodology using pseudorandom binary sequences," in *Proc. IET Irish Conf. Sign. Syst.*, pp. 350-355, Galway, Ireland, Jun. 2008.
- [2] 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.
- [3] 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. Inst. Electron. Inf. Eng. (IEIE)*, vol. 57, no. 2, pp. 268-275, Feb. 2008.
- [4] 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. Inst. Electron. Inf. Eng. (IEIE)*, vol. 62, no. 2, pp. 239-245, Feb. 2013.

- [5] 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.
- [6] M. Zimmermann and K. Dostert, “A multipath model for the powerline channel,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 4, pp. 553-559, Apr. 2002.
- [7] J. H. Yoo, S. H. Choe, and N. Pine, “MIMO-OFDM BPLC over statistical power line channels with cross-talk,” *J. Korean Inst. Commun. Inf. Sci. (KICS)*, vol. 36, no. 12, pp. 1565-1573, Dec. 2011.
- [8] E. Y. Seo, Y. S. Kim, J. S. No, and D. J. Shin, “Cross-correlation distribution of a  $p$ -ary  $m$ -sequence family constructed by decimation,” *J. Korean Inst. Commun. Inf. Sci. (KICS)*, vol. 33, no. 9, pp. 669-675, Sept. 2008.
- [9] K. S. Ahn, Y. G. Lee, S. Yoon, Y.-J. Kim, J.-G. Park, M. Jeong, Y. Lee, and S. R. Lee, “Performance analysis of sequential estimation schemes for fast acquisition of direct sequence spread spectrum systems,” in *Proc. KICS Fall Conf.*, pp. 292-294, Seoul, Korea, Nov. 2013.
- [10] H.-R. Park and J.-H. Shin, “Eigen-Analysis Based Super-Resolution Time Delay Estimation Algorithms for Spread Spectrum Signals,” *J. Korean Inst. Commun. Inf. Sci. (KICS)*, vol. 38, no. 12, pp. 1013-1020, Dec. 2013.
- [11] A.W. Lam and S. Tantaratana, *Theory And Applications Of Spread-Spectrum Systems*, pp. 93-130, IEEE, NJ, USA, May 1994.

한 정 재 (Jeong Jae Han)



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

박 소 령 (So Ryoung Park)



1997년 2월 : 연세대학교 전자공학 공학사  
1999년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학 공학석사  
2002년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학 공학박사  
2003년 3월~현재 : 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 교수  
<관심분야> 통계학적 신호처리, 무선통신, 다중접속 등