

칩 신호 파라미터 추정 기반 통신 케이블 고장점 탐지에 관한 연구

이춘구\*, 한슬기\*, 박진배\* 윤태성\*\*  
 연세대학교 전기전자공학과\*, 창원대학교 전기공학과\*\*

Communication Cable Fault Localization Based on Chirp Signal Parameter Estimation

Chun Ku Lee\*,Seul Gi Han\*, Jin Bae Park\*, Tae Sung Yoon \*\*

Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei Univ.\*, Dept. of Electrical Engineering, Changwon National Univ.\*\*

**Abstract** - Reflectometry that has been used to localize faults on a cable is introduced. One of the key point of reflectometry is finding time delay between the incident and reflected signals. In this paper, we propose new reflectometry that use Gaussian enveloped linear chirp signal, and use Kalman filter to estimate frequency rate parameter of the chirp signal. From the estimated frequency rate parameter, we can measure the time delay. In a simulation assuming open ended cable, the proposed method is proved to give a good estimation results.

1. 서 론

정보 전달 및 제어 신호 전송을 목적으로 시스템 내에 설치된 케이블은 주변의 진동과 부식등과 같이 물리적, 화학적인 요인으로 인하여 열화가 진행되며 열화된 케이블은 전체 시스템의 안정성과 신뢰성을 저하시키는 원인이 된다. 열화로 인한 케이블의 단락 및 단선은 시스템의 오작동과 고장을 유발하여 이로 인한 물적, 인적피해를 야기하기 때문이다. 케이블의 열화에 의한 인적, 물적 피해를 예방하기 위해서는 케이블의 상태를 정확하게 진단하고, 사고 전이나 후에도 신속한 복구를 위하여 고장점을 정확하게 탐지하는 것이 중요하다. 기존의 케이블 진단 방법은 케이블을 진단하는 과정에서 추가적으로 케이블에 손상을 주거나 고장점 탐지가 부정확하며 전문 인력과 시간 및 비용이 많이 필요하다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 레이더 시스템이나 소나 시스템과 같이 반사 현상을 이용한 반사파 계측법을 이용하여 고장점의 위치를 탐지하고, 케이블의 고장점 위치를 정확하게 탐지하기 위한 선형 칼만 필터 기반 분석 기법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 반사파 계측법

케이블의 고장점 탐지를 위한 반사파 계측법은 금속 도체에 전자기 신호를 인가하였을 때 케이블 고장점과 같이 임피던스 불일치 지점에서 신호가 반사되는 현상을 이용한 것이다. 반사파 계측법은 그림 1과 같이 기준신호(reference signal)를 케이블에 인가하고, 기준 신호와 반사파(reflected signal)간의 시간 지연을 구한 뒤 케이블 내 전파속도를 곱하여 측정 지점으로부터 반사된 지점까지의 거리를 측정하게 된다. 측정 지점에서 고장점까지의 거리를 구하는 식은 식 (1) 과 같다.

$$d_{fault} = \frac{v_p \times t_d}{2}, \tag{1}$$

여기서  $d_{fault}$ ,  $v_p$  그리고  $t_d$ 는 각각 측정지점에서 고장점까지의 거리, 케이블 내 전파속도, 기준신호와 반사파간 시간 지연을 의미한다.  $t_d$ 는 기준신호와 반사파간 시간 지연으로 측정지점과 고장점간 신호의 왕복 시간을 의미하므로 측정지점에서 고장점까지 도달하는데 걸리는 시간은  $t_d$ 의 절반이 된다.

반사파를 분석하는 기법과 인가하는 기준 신호의 종류에 따라서 반사파 계측법을 분류할 수 있다. 대표적으로 시간 영역 반사파 계측법(TDR time domain reflectometry), 주파수 영역 반사파 계측법(FDR frequency domain reflectometry), 시간-주파수 영역 반사파 계측법(TFDR time frequency domain reflectometry)으로 분류할 수 있다. TDR과 FDR은 각각 시간 영역, 주파수 영역에서 반사파를 분석하며, TFDR은 위그너-빌 분포(Wigner-Ville distribution)을 이용하여 시간 주파수 영역에서 반사파를 분석한다. TDR과 FDR에서는 각각 스텝 펄스파와 정현파를 기준신호로 이용하며, TFDR에서는 가우시안 포락선 선형 칩 신호(Gaussian enveloped linear chirp signal)를 사용한다. 가우시안 포락선 선형 칩 신호는 시간 영역과 주파수영역에서 케이블의 물리적 특성에 적합한 시간 폭과 주파수대역을 설정 할 수 있다는 특징이 있다[1]. 주파수가 선형적으로 증가하는 칩 신호는 레이더나 소나시스템

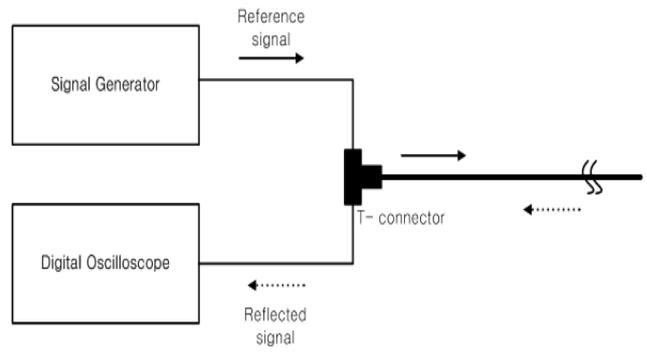


그림 1 반사파 계측 시스템 구성도

Block diagram of reflectometry system

에서 많이 사용되어 왔으며 칩 신호의 파라미터를 추정하는 문제는 꾸준히 이슈화 되어왔다[2][3]. 따라서 본 논문에서는 가우시안 포락선 선형 칩 신호의 파라미터를 칼만 필터를 사용하여 추정하고 추정된 파라미터값을 기반으로 기준 신호와 반사파간 시간 지연을 구하는 반사파 계측법을 제안한다.

2.2 칩 신호를 사용한 반사파 계측법

본 논문에서 기준신호로 사용되는 가우시안 선형 칩 신호는 식 (2)와 같다.

$$s(k) = e^{\frac{(k-m)^2}{2\sigma^2}} \cos(0.5\beta k^2 + \omega_0 k) = e^{\frac{(k-m)^2}{2\sigma^2}} \cos(\phi_k), \tag{2}$$

여기서  $m$ ,  $\sigma$ 는 가우시안 포락선의 중심과 폭을 나타내며,  $\beta$ ,  $\omega_0$ 는 각각 각주파수 증가율, 시작 각주파수를 나타낸다. 가우시안 선형 칩 신호의 위상 성분을  $\phi_k$ 로 표기할 수 있다. 그림 1에 제시한 시스템에서 진단 대상 케이블에 가우시안 포락선 선형 칩 신호를 인가한 뒤 취득한 반사파 신호는 식 (3)과 같이 모델링 할 수 있다.

$$r(k) = s(k) + \sum_{i=1}^n \alpha_i s(k - d_i), \tag{3}$$

여기서  $r(k)$ 는 기준신호와 반사파를 포함한 취득 신호를 나타낸다.  $\alpha_i$ 는 각 반사파에 대한 감쇠계수이며  $d_i$ 는 각 반사파에 대한 시간 지연을 의미한다. 취득 신호의 위상  $\phi_k$ 와 크기를 구하기 위한 취득 신호의 해석적인 신호(analytic signal)는 식 (4)와 같다.

$$r_a(k) = r(k) + jH(r(k)), \tag{4}$$

여기서  $H$ 는 힐버트 변환(Hilbert transform)을 의미한다. 식 (4)로부터 취득 신호의 위상  $\phi_k$ 와 크기를 측정 후 이를 기반으로 선형 칼만 필터를 사용하여 각주파수 증가율에 해당하는  $\beta$ 값을 추정하게 된다.

2.3 가우시안 포락선 선형 칩 신호 파라미터 추정

기준 신호인 가우시안 포락선 선형 칩 신호는 각주파수가 선형적으로 증가하므로 일정한 각주파수 증가율  $\beta$ 를 가지게 된다. 기준신호와 반사파의  $\phi_k$ 로부터  $\beta$ 값을 추정하기 위해서 선형 칼만 필터를 사용하였다. 선형 칼만 필터의 상태 방정식은 식 (5),(6)과 같다.

$$x_{k+1} = Fx_k + Gw_k \tag{5}$$

$$y_k = Hx_k + v_k \tag{6}$$

여기서  $x_k = [A_k \phi_k \Delta\phi_k \Delta^2\phi_k]^T$  이며  $A_k$ ,  $\phi_k$ ,  $\Delta\phi_k$ ,  $\Delta^2\phi_k$ 는 각각 취득 신호의 크기, 위상, 순간 각주파수, 각주파수 증가율을 의미한다.

$F, H$ 는 각각 상태 천이 행렬, 측정 행렬을 나타내며 다음과 같이 주어진다.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. w_k, v_k \text{는 각각 천이 잡음, 측정 잡음}$$

로 공분산이 각각  $Q_k, R_k$ 인 영평균 백색 잡음이다. 취득 신호의 파라미터를 구하기 위한 선형 칼만 필터는 식 (8)-(12)와 같다.

$$K_k = P_{k|k-1} H^T (H P_{k|k-1} H^T + Q)^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H \hat{x}_{k|k-1}) \quad (9)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k H P_{k|k-1} \quad (10)$$

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_k \hat{x}_{k|k} \quad (11)$$

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + R_k \quad (12)$$

선형 칼만 필터를 사용하여 각주파수 증가율인  $\beta$  값을 추정하였다.  $\beta$  값은 기준신호와 반사파가 존재하는 구간에서 존재하게 되며, 나머지 구간에서는 값을 가지지 않게 된다. 이러한 특성을 이용하여  $\beta$  값이 존재하는 구간을 구하게 되면 기준신호와 반사파 간의 시간 지연을 구할 수 있다.

### 2.4 시뮬레이션

선형 칼만 필터를 이용한  $\beta$  값 추정 기반 케이블 고장점 탐지 알고리즘의 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 그림 1은 측정지점에서 취득한 신호를 나타내며, 첫 번째 신호는 기준신호이고 두 번째 신호는 고장점에서 반사된 신호이다. 그림 2는 취득한 신호의 위상정보를 선형 칼만 필터를 이용하여 추정한 결과를 나타낸다. 잡음이 존재하는 상황에서 신호의 위상을 정확하게 추정함을 알 수 있다. 추정한 위상 정보로부터  $\beta$  를 구한 결과는 그림 4와 같으며 신호가 존재하는 구간에서는 표 1에서 설정한  $\beta$  값인 0.0011이 추정됨을 알 수 있다. 반사파 경계부분에서  $\beta$  값 추정치가 피크를 이루게 되는데 이는 선형 칼만 필터의 수렴 속도에 의하여 발생한 피크이다. 따라서  $\beta$  값 추정치에서 피크점은 반사파의 시작점을 의미하며 이러한 피크로부터 기준신호와 반사파간의 시간 지연을 구할 수 있다. 표 1과 같은 조건하에서 시뮬레이션을 해본 결과 기준신호와 반사파간의 시간 지연은 349[samples]임을 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

주파수가 선형적으로 증가하는 가우시안 포락선 선형 칩 신호를 이용한 케이블의 고장점 탐지를 위하여 취득한 신호의 위상을 선형 칼만 필터를 이용하여 추정하고 이로부터 각주파수 증가율을 추정하였다. 선형 칼만 필터의 수렴 속도에 의한 추정치의 피크로부터 기준신호와 반사파간의 시간지연을 측정하였다. 시뮬레이션 결과 선형 칼만 필터 기반 각주파수 증가율 추정을 통하여 기준신호와 반사파간의 시간지연을 추정할 수 있었다.

표 1 시뮬레이션 조건

sampling rate[Mspss]	200
frequency range[MHz]	5-10
time duration[ns]	700
time delay[sample]	350
$\beta$	0.0011
attenuation	0.5
noise standard deviation	0.0001

이 논문은 2009년도 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 전기전자공학부 TMS사업단의 지원과 산업자원부 전력기반조성사업 센터의 고급인력양성사업을 통한 연세 대학교 계통적용 신전력기기 연구센터의 지원으로 수행되었습니다

### [참 고 문 헌]

[1] Y. J. Shin, E. J. Powers, Tok-Son Choe, Chan-Young Hong, Eun-Seok Song, Jong-Gwan Yook, and Jin-Bae Park, "Applection of Time-Frequency Domain Reflectometry for Detection and Localization of a Fault on a Coaxial Cable", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 54, No. 6, Dec. 2005.

[2] Janos Gal, Andrei Campeanu, Ioan Nafornta, "Estimation of Chirp Signals in Gaussian Noise by Kalman Filtering", Signals, Circuits and Systems, 2007. ISSCS 2007. International Symposium on , vol.1, no., pp.1-4, July 2007.

[3] B.Boashash, "Estimating and Interpreting the Instantaneous Frequency of a Signal- Part 2: Algorithms and Applications", Proceedings of the IEEE, vol.80, no.4, pp 540-568, April 1992.

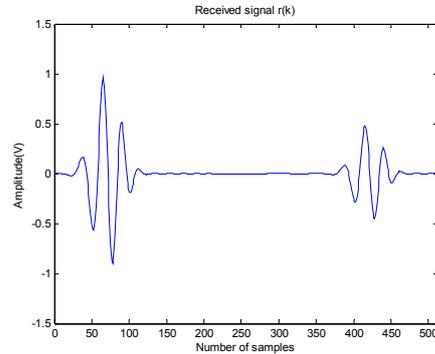


그림 2 취득신호

Received signal

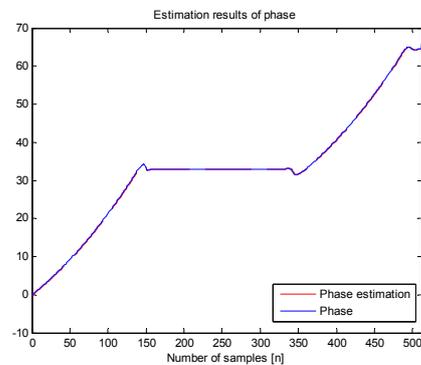


그림 3 취득신호의 위상 추정 결과

Estimation results of phase of received signal

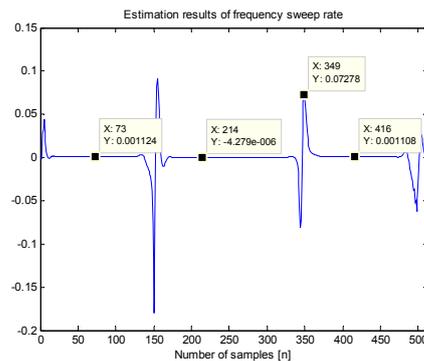


그림 4 취득 신호의  $\beta$  값 추정 결과

Estimation results of  $\beta$  parameter of received signal