Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol.53, NO.4, April 2016 http://dx.doi.org/10.5573/ieie.2016.53.4.012
ISSN 2287-5026(Print) / ISSN 2288-159X(Online)

논문 2016-53-4-2

철도 환경에서 ZigBee 수신기를 위한 효율적인 채널 추정 기법

(Efficient Channel Estimation Method for ZigBee Receiver in Train Environment)

이 진 구*, 김 대 현*, 김 재 훈**, 김 영 록***

(Jingu Lee, Daehyun Kim, Jaehoon Kim, and Younglok Kim©)

요 약

고속 열차에 무선 센서 네트워크를 구성하여 센서 데이터를 이용한 모니터링 시스템에 대한 연구들이 진행됨에 따라, 열차 외부와 내부 간의 통신 시에 발생하는 철도 무선 채널 특성에 대한 연구가 요구된다. 특히, 무선 채널에 다중경로 지연특성이 있는 경우 심볼간 간섭에 따른 성능 열화를 막기 위한 등화기 및 채널 추정기가 요구될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 실제 고속열차에서 IEEE 802.15.4 규격으로 구성되는 ZigBee 송수신기를 이용하여 수신신호를 측정하고, 측정된 수신신호를 분석하여 다중경로가 최대 두 개인 다중경로 지연특성을 확인하였다. 그리고, 확인 된 철도 환경에서 다중경로 지연특성을 고려하여, IEEE 802.15.4 데이터 칩 시퀀스 특성을 이용한 저복잡도의 채널 추정 기법을 제안하고, 제안 기법에 대한 복잡도 및 성능 오차 분석 후 적용 가능성을 검증하였다.

Abstract

The monitoring system in railway is under study to forecast any derailment and accident by defect of train. Because the monitoring system is composed of wireless sensor network based on ZigBee-communication between inside and outside of train, the study for wireless channel analysis is required. Especially, if multipath delay profile exist in the channel, the equalizer and channel estimator can be required for preventing receiver performance degradation. Therefore, we analyzed the wireless channel in train environment using measured data and, proposed the channel estimation method through the characterisitic of chip code, under the consideration of the channel characteristics in train. To show the performance of proposed method, we demonstrate the performance by mean square error(MSE), computational complexity and bit error rate(BER).

Keywords : Channel estimation, IEEE 802.15.4, ZigBee, Railway, Train

Ⅰ. 서 론

최근에 열차의 결함에 의한 탈선 및 각종 사고를 방지하기 위하여, 열차 외부에 진동 센서 및 온도 센서와 같은 각종 센서를 장착하고 이를 무선 센서 네트워크로 구성하여 열차의 상태를 실시간으로 모니터링 하기 위한 연구가 진행되고 있다.[1] 센서의 데이터를 송신하기 위한 송신부는 열차 외부에 독립적으로 위치하여 전력공급의 한계가 있기 때문에, 기존의 열차의 구조를 변형하지 않고 전력을 공급하기 위하여 자가발전을 통한 전력공급 방식을 채택하고 있다.[2~3] 하지만 자가발전 전력량의 한계 때문에 무선 센서 네트워크 시스템을 구성하는데 있어서 저전력으로 운용하기 위한 연구가 요구된다. 저전력 운용을 위하여, 저전력 무선 통신에 이점이 있는 IEEE802.15.4 시스템 규격[4]을 철도 환경에서 모니터링 시스템을 위한 센서 네트워크로 적용시키는 다양한 연구들이 진행되고 있다.[5~6]

* 학생회원, *** 정회원 서강대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering Sogang University)
** 정회원, 한국철도기술연구원
(Korea Railroad Research Institute)
© Corresponding Author(E-mail: ylkim@sogang.ac.kr)
※ 본 연구는 미래창조과학부/국가과학기술연구회 융합연구사업의 지원으로 수행되었음(과제번호:B551179-12-06-00)
Received ; October 26, 2015 Revised ; March 4, 2016
Accepted ; March 30, 2016

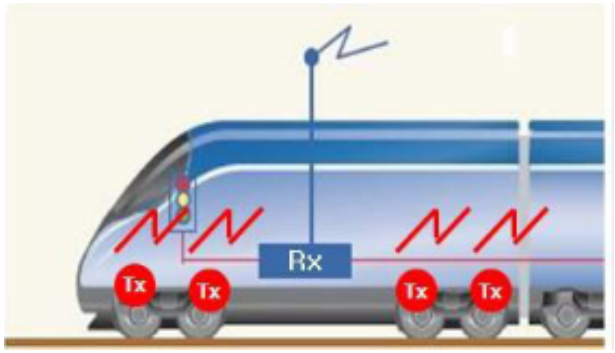

그림 1. 열차에서의 센서 네트워크
Fig. 1. Sensor network configuration in a train.

300 Km/h 이상의 고속으로 이동하고 금속으로 구성된 고속 열차에서 IEEE 802.15.4 시스템 기반의 무선 통신을 열차 외부와 내부 사이에 철제 구조물이 존재하는 통신 상황에 적용을 하기 때문에 열악한 무선 채널 환경을 가진다.[7~8] 이에 따라 실제 고속 열차에서의 무선 채널 특성에 대한 연구가 필요하며, 특히 무선 채널의 다중경로 지연 성분은 심볼간 간섭을 유발하여 수신 성능을 열화시키기 때문에 다중경로 지연성분에 대한 분석이 요구된다. 또한, 다중경로 지연 성분에 따른 성능열화를 줄이기 위한 등화기와 이를 위해 채널을 추정하는 채널 추정기가 필요하다. 일반적으로 채널을 추정하기 위한 알고리즘으로는 Least Square(LS) 기법과 Minimum Mean Square Error(MMSE) 기법이 있지만, 무선 통신 규격이나 무선 채널 특성을 고려하였을 때 추정하고자 하는 채널 특성에 비해 상대적으로 높은 복잡도를 가질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 IEEE 802.15.4 시스템을 열차 외부와 내부에 위치시키고 열차 내부 수신기의 측정신호를 이용하여 무선 채널 지연 성분에 대해 추정 후 특성을 확인하여, 고속열차에서의 무선 채널의 다중경로 지연특성을 고려한 저복잡도 채널 추정 기법을 제안한다. 제안한 기법의 추정 성능 및 복잡도에 대해 분석을 하고, 제안 기법의 적용 가능성을 검증하기 위해 등화기에 접목하여 비트오류율(Bit Error Rate: BER)로 수신 성능을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 열차에서의 무선 센서 네트워크 구성 및 측정 실험에 대한 특성을 설명하며, Ⅲ장에서는 실제 고속 열차에서 열차 내부와 외부 간의 측정 실험에 따른 측정신호에 LS 채널 추정 기법을 적용하여 무선 채널 특성을 확인한다. Ⅳ장에서는 Ⅲ장의 고속 열차에서 무선 채널의 특성을 고려하여 간단한 저복잡도의 채널 추정 기법에 대해 제안하고, Ⅴ장에서는 제안한 기법에 대한 복잡도 분석 및 성능 평가 모의실험을 통해 분석을 하고, Ⅵ장에서는 결론을 맺는다.

Ⅱ. 철도 환경 및 데이터 측정

1. 철도 환경

온도, 가속도, 진동 등을 측정하는 센서는 열차 외부 하단에 위치한 차축에 부착되어 있으며, 센싱된 데이터는 열차 내부의 수신기로 무선통신을 이용하여 전송된다. 이 때, 열차 외부 하단에 위치한 센서는 전력선을 통한 전원공급이 불가능함에 따라 '에너지 하베스팅'이라는 자가발전 방법을 통하여 발생되는 전력을 공급받아 구동된다. 에너지 하베스팅을 통해 발생하는 전력량은 극히 제한되기 때문에 저전력 통신 시스템이 요구되며, 이와 동시에 무선 센서 네트워크를 구성해야 함으로 이에 적합한 무선 전송방법인 IEEE 802.15.4 시스템 규격을 이용한다.

열차에서 무선 센서 네트워크를 구성하는데 있어서 철도 무선 채널 환경은 물리적으로 많은 방해 요소를 가지고 있다. 철도 무선 채널 환경은 열차 외부의 송신기와 열차 내부의 수신기 간의 통신을 의미하는데, 일반적으로 철도 차량은 금속으로 구성되어 있어서 송신기와 수신기 간의 Line of Sight(LOS) 성분이 존재하기 힘들며, 신호는 유리로 구성된 창문을 통하여 수신될 가능성이 높다. 더구나 선로에서의 이동에 따른 극심한 진동과, 무선 통신 채널환경에 의한 다중경로 페이딩, 그리고 고속이동에 의한 고속 페이딩이 발생할 가능성이 높을 수 있다.

2. 데이터 측정 실험

철도의 무선 채널을 분석하기 위해, IEEE 802.15.4 시스템 규격을 기반의 ZigBee 송신기를 열차 외부 하단의 바퀴에 위치시키고 수신기를 열차 내부에 위치시킨 후 수신 신호에 대한 데이터 수집을 하였다. 측정은 그림 2와 표 1에 나타낸 바와 같이 송신기를 열차 외부 하단에 위치시켜 데이터 패킷을 일정한 주기로 송신하고, 수신기는 통신 데이터 수집 장비인 USRP를 이용하여 열차 내부 창문에 위치 시켜서 데이터를 수집하는 방식으로 하였으며 샘플링은 칩 속도의 다섯 배인 10 MS/s로 오버샘플링 하였다. 이 때 송신기는 8 dBm 의 출력을 가지는 상용모듈을 사용하였으며, 전파거리는 약 5 미터 이고, 5 dBi의 다이폴 안테나를 사용하였다.

표 1. 데이터 수집을 위한 실험 조건
Table 1. Experimental conditions for data collection.

송신기 위치	열차 외부 하단의 바퀴
수신기 위치	열차 내부의 창가
거리	약 5 m
송신 전력	8 dBm
데이터수집장비	USRP 2921
샘플링주파수	10 MS/s

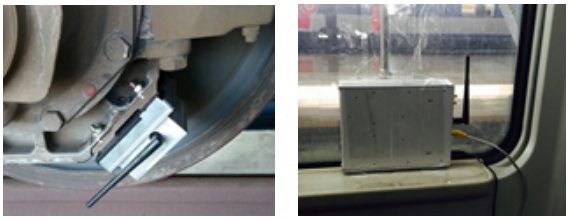

그림 2. 송신기 위치(좌)와 수신기 위치(우)
Fig. 2. Location of transmitter(left) and receiver(right).

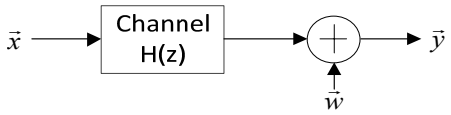

그림 3. 수신 신호의 블록도
Fig. 3. Block diagram of received signal.

Ⅲ. 철도 무선 채널 추정 및 분석

무선 채널 환경에서 신호는 다중경로 성분이 존재할 경우 심볼간 간섭(ISI)이 발생하여 왜곡된다. 일반적으로 무선 채널 성분을 고려한 수신 신호에 대한 블록도는 아래의 그림 3과 같이 표현될 수 있다.

수신신호 벡터 $\vec{y}=[y_0\ y_1\ \cdots\ y_{N-1}]^T$는 송신신호 벡터 $\vec{x}=[x_0\ x_1\ \cdots\ x_{N-1}]^T$ 가 채널 임펄스 응답 벡터 $\vec{h}=[h_0\ h_1\ \cdots\ h_{L-1}]^T$ 에 의해서 왜곡되고 백색 잡음과 각종 간섭 신호가 포함된 잡음 벡터 $\vec{w}=[w_0\ w_1\ \cdots\ w_{N-1}]^T$ 가 더해져서 식 (1)과 같이 벡터 형태로 표현될 수 있다. 이 때, N은 송신신호의 길이를 나타내며, L은 채널 탭의 길이를 나타낸다.

$$\vec{y}=\vec{x}*\vec{h}+\vec{w} \tag{1}$$

여기서, 연산기호 $*$는 컨볼루션을 의미하며, $\vec{x}*\vec{h}$을 행렬 연산 형태로 다시 표현하면 식 (2)와 같다.

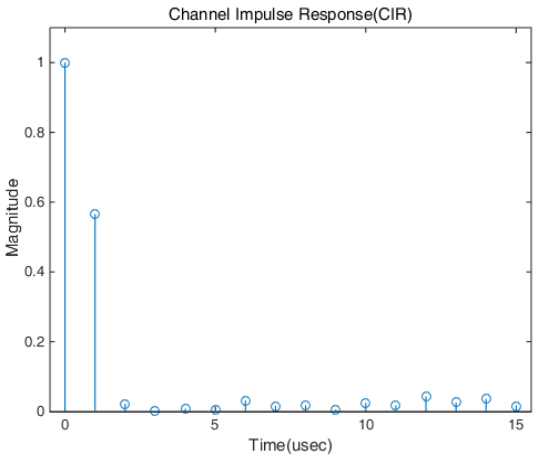

그림 4. 철도환경에서의 무선 채널 임펄스 응답(선형 스케일)
Fig. 4. Wireless channel impulse response in train environment(linear scale).

$$\vec{y}=X\bullet\vec{h}+\vec{w} \tag{2}$$

이 때, 행렬 X 는 $(N)\times(L)$의 크기를 갖는 행렬로 다음과 같은 형태를 가진다.

$$X=\begin{bmatrix} x_0 & x_{-1} & \cdots & x_{1-L} \\ x_1 & \ddots & \cdots & x_{2-L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-1} & x_{N-2} & \cdots & x_{N-L} \end{bmatrix}$$

측정신호에 LS 기법을 적용하여 채널을 추정하는데, LS 기법을 통한 채널 추정의 해는 식 (3)과 같이 주어진다.[9]

$$\hat{h}_{LS}=(X^H\bullet X)^{-1}X^H\vec{y} \tag{3}$$

그림 4는 열차가 고속 주행 시 철도 환경에서의 측정 신호를 이용하여 추정된 채널 임펄스 응답이며 특정 구간에서의 열악한 채널 특성을 갖는 경우의 대표적인 결과이다. 결과를 보면, 첫 번째 경로 성분이 가장 크고 다음으로 두 번째 경로 성분이 주요하게 나타남을 알 수 있다. 이 때, 전력이 가장 크게 나타나는 첫 번째 경로를 기준으로 정규화하면, 두 번째 경로는 첫 번째 경로에 비해 약 -5 dB의 전력 감쇄가 있다. 여기서, 경로 지연 성분 간의 간격은 칩 주기 T_c로 500 nsec 이다.

무선 채널 성분 추정 결과를 요약하면, 첫 번째 경로와 T_c만큼 지연된 두 번째 경로 성분이 크게 발생하고 그 이외의 성분은 미비하다. 이러한 특성을 이용하여 채널 임펄스 응답을 시불변 채널이라 가정하고

Tapped-delay-line(TDL) 채널 모델에 적용하면, IEEE 802.15.4 규격에서 O-QPSK변조 및 half-sine pulse shaping을 고려한 수신 신호 모델은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} y[n] &= \sum_{l=0}^{L-1} h(n,l)(x[n]p(T_c l) + \\ &\quad + x[n-1]p(T_c(l-1))) + w[n] \\ &= h(n,0)x[n] + h(n,1)x[n-1] + w[n] \\ &= h(0)x[n] + h(1)x[n-1] + w[n] \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, $x[n]$는 수신신호, $h[n]$는 채널 임펄스 응답을 의미한다. 그리고 L은 채널 탭 길이로 2 값을 갖는다. 또한, half-sine pulse shaping 함수는 식 (5)와 같다.

$$p(t) = \begin{cases} \sin\left(\pi \dfrac{T_c + t}{2T_c}\right) & , -T_c \le t \le T_c \\ 0 & , \quad otherwise \end{cases} \tag{5}$$

Ⅳ. 채널 추정 기법 제안

본 장에서는, Ⅲ장에서 확인된 철도 무선 채널 특성을 고려했을 때, IEEE 802.15.4 규격의 칩 시퀀스 특성을 이용한 저 복잡도의 채널 추정 기법에 대해 제안한다.

IEEE 802.15.4 표준의 2.45 GHz 대역에서는 4 비트의 데이터가 16 개 중 1 개의 심볼로 맵핑되고, 각 심볼은 32비트의 비트 칩 시퀀스로 확산되고 O-QPSK 변조되어 전송된다. 인접 심볼의 비트 칩 시퀀스는 4 비트씩 순환 자리 이동시킨 것과 같으며 서로 직교 관계에 있다.[4,7] 직교 특성을 확인하기 위하여, 비트 칩 시퀀스 행렬 C_m을 다음과 같이 구성한다. 여기서 m은 심볼 인덱스를 의미하며, 0 - 15 사이의 값을 갖는다.

$$C_m = \begin{bmatrix} c_{m,0} & c_{m,1} & c_{m,2} \cdots c_{m,28} & c_{m,29} & c_{m,30} & c_{m,31} \\ c_{m,28} & c_{m,29} & c_{m,30} \cdots c_{m,24} & c_{m,25} & c_{m,26} & c_{m,27} \end{bmatrix}^T$$

이 때, C_m의 자기 상관 행렬은

$$C_m^H C_m = \begin{bmatrix} 32 & 0 \\ 0 & 32 \end{bmatrix} = 32I$$

이다. 여기서 I 는 항등행렬을 의미한다. 이러한 직교 특성을 이용하면, 식 (6)의 연산과정을 통하여 무선 채널의 첫 번째 경로와 $4T_c$만큼 지연된 다섯 번째 경로 성분을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{h}_a &= \frac{1}{32} C_m^H \overrightarrow{y_s} = \frac{1}{32} C_m^H (C_m \overrightarrow{h_a} + \overrightarrow{w}) \\ &= \frac{1}{32} \begin{bmatrix} c_{m,0}^* & c_{m,1}^* \cdots c_{m,31}^* \\ c_{m,28}^* & c_{m,29}^* \cdots c_{m,27}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{m,0} & c_{m,28} \\ c_{m,1} & c_{m,29} \\ \vdots & \vdots \\ c_{m,31} & c_{m,27} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_4 \end{bmatrix} \\ &\quad + \frac{1}{32} C_m^H \overrightarrow{w} \\ &= \overrightarrow{h_a} + \frac{1}{32} C_m^H \overrightarrow{w} \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, $\overrightarrow{y_s}$는 하나의 심볼에 대해 수신되는 32 비트의 비트 칩 시퀀스 벡터를 의미하고, $\overrightarrow{h_a}$는 첫 번째와 다섯 번째 경로 채널 탭으로 이루어진 벡터이며, $\hat{h}_a$는 $\overrightarrow{h_a}$의 추정된 값이다.

이렇게 위와 같은 방법을 이용하면, 첫 번째 경로와 $4T_c$만큼 지연된 다섯 번째 경로 성분의 채널을 간단하게 추정할 수 있다. 하지만, 앞서 고속철도 환경에서의 열차 내부와 외부 간의 통신 상황에서의 측정된 신호를 이용하여 채널을 추정하였을 때에는 첫 번째 경로와 T_c만큼 지연된 두 번째 경로 성분이 주요하게 발생하는 것을 확인하였다. 이에 따라 식 (4)과 같이 수신 신호 모델링을 하였다. 따라서 이를 고려하여, 이번에는 앞서 언급한 방법을 변형하여 T_c만큼 순환 자리 이동시킨 $\hat{C}_m$의 행렬을 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{C}_m = \begin{bmatrix} c_{m,0} & c_{m,1} & c_{m,2} \cdots c_{m,28} & c_{m,29} & c_{m,30} & c_{m,31} \\ c_{m,31} & c_{m,0} & c_{m,1} \cdots c_{m,27} & c_{m,28} & c_{m,29} & c_{m,30} \end{bmatrix}^T$$

이 때, $\hat{C}_m$의 자기 상관 행렬은

$$\hat{C}_m^H \hat{C}_m = \begin{bmatrix} 32 & 4j \\ 4j & 32 \end{bmatrix}$$

이다. $\hat{C}_m$의 첫 번째 열과 두 번째 열이 서로 직교하지 않기 때문에 $4j$ 값이 발생한다.

첫 번째 경로와 두 번째 경로로 구성된 채널 벡터 $\overrightarrow{h_b}$를 추정하기 위해 식 (7)과 같이 연산하면, $\hat{h}_b$값이 $\hat{C}_m^H \hat{C}_m$ 연산에서 발생하는 $4j$ 값에 의해 발생되는 에러 성분 $\vec{e}$으로 인하여 다소 부정확하게 추정된다. 하지만, IEEE 802.15.4 시스템의 등화기 성능을 위해서 충분

히 정확한 채널을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned}\hat{h}_b &= \frac{1}{32}\hat{C}_m^H\overrightarrow{y_s} = \frac{1}{32}\hat{C}_m^H(\hat{C}_m^H\overrightarrow{h_b}+\overrightarrow{w}) \\ &= \frac{1}{32}\begin{bmatrix} c_{m,0}^* & c_{m,1}^* \cdots c_{m,31}^* \\ c_{m,31}^* & c_{m,0}^* \cdots c_{m,30}^* \end{bmatrix}\begin{bmatrix} c_{m,0} & c_{m,31} \\ c_{m,1} & c_{m,0} \\ \vdots & \vdots \\ c_{m,31} & c_{m,30} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0.125j \\ 0.125j & 1 \end{bmatrix}\overrightarrow{h_b}+\frac{1}{32}\hat{C}_m^H\overrightarrow{w} \\ &= \overrightarrow{h_b}+\begin{bmatrix} 0 & 0.125j \\ 0.125j & 0 \end{bmatrix}\overrightarrow{h_b}+\frac{1}{32}\hat{C}_m^H\overrightarrow{w} \\ &= \overrightarrow{h_b}+\overrightarrow{e}+\frac{1}{32}\hat{C}_m^H\overrightarrow{w} \end{aligned} \quad (7)$$

V. 모의실험 및 분석

1. 복잡도 분석

제안한 기법은 LS 채널 추정기법에 비해 다소 성능이 떨어질 것으로 예상되지만, 간단하게 채널을 추정하는데 목적이 있다. 따라서 우리는 복잡도에 대해 분석 및 비교하기 위하여 복소수 연산(complex operations: COPs)의 수를 카운팅 하는 방법을 이용하였다. 일반적으로 사용되는 채널 추정기법인 LS 기법과 비교하며, LS 기법은 LU 분해 연산 과정을 적용[10~11]하여 비교한다. 복소수 연산의 수를 카운팅 하는 방법을 사용하여 복잡도를 분석하기 위해 복소수 곱셈, 복소수 나눗셈, 그리고 실수 제곱근으로 구분하고, 각각 1 COPs, 4 COPs, 10 COPs인 것으로 가정한다. 표 2에는 COPs의 수를 N과 K에 대하여 정리한 내용이다. 이 때, N은 비트 칩 시퀀스의 비트 수 32이며, K는 추정에 사용되는 심볼의 수를 의미한다. IEEE 802.15.4 규격에서 프리앰블 구간과 SFD는 정해져 있는 신호[4]로 파일럿 신호처럼 사용할 수 있으며, 총 10개의 심볼을 이용할 수 있다. 따라서 K는 10까지 적용가능 하다. K 값에 따른 연산복잡도를 표 3에 정리하였으며, 정리된 결과를 보면 LS 기법과 비교하여 약 87% 연산복잡도가 감소됨을 알 수 있다.

2. 추정 성능 비교

본 논문에서는 철도 무선 채널의 다중경로 지연특성을 기반으로 하여, 두 개의 경로를 추정하는 저복잡도 채널 추정 기법을 제안하였다. 따라서 제안한 채널 추정 성능을 확인하기 위하여 평균제곱오차(Mean Square Error: MSE)를 비교분석한다. 그림 5는 첫 번째와 두 번째 경로로 구성되는 다중경로 지연 성분을 가지는 환경

표 2. 연산 방식에 따른 복소수 연산 수
Table 2. Number of complex operations corresponding to various methods.

	곱셈	나눗셈	실수 제곱근
LS 기법 (LU 분해 적용)	NK	NK	NK
제안 기법	$2NK+2$	0	0

표 3. 제안 기법과 LS 기법의 복소수 연산 수 비교
Table 3. Number of complex operations for the proposed and LS methods.

K	2	4	6	8	10
LS 기법	960	1920	2880	3840	4800
제안 기법	130	258	386	514	642
복잡도 감소율	86%	86%	87%	87%	87%

에서 제안된 기법인 식 (7)를 적용하였을 경우와 LS 채널 추정 기법의 평균제곱오차를 비교한 모의실험 결과이다. 모의실험 결과를 보면 제안된 기법은 LS 채널 추정 기법에 비해 부정확한 채널 추정하는 것을 알 수 있다.

본 장의 1절과 2절의 결과를 종합하면, 철도 무선 채널 특성을 고려하여 제안된 채널 추정 기법은 LS 채널 추정 기법에 비해 성능은 떨어지지만, 복잡도 측면에서는 비교적 간단하게 채널을 추정해 낼 수 있음을 보여준다.

3. 수신 성능 비교

일반적으로 추정된 채널 정보를 이용하여 등화기에 Zero-forcing(ZF)기법이나 MMSE 기법을 적용하면 다중경로 성분을 제거 할 수 있다. 따라서 본 절에서는 제안된 채널 추정 기법의 적용 가능성을 검증하기 위해, 추정된 채널 정보를 등화기에 적용하여 비트오류율(BER)을 통한 수신 성능을 비교분석한다.

기존 IEEE 802.15.4 시스템에서는 심볼 검출 시 채널에 의한 왜곡을 고려하지 않으며, 수신신호와 송신신호의 상관을 이용하는 상관 검출 방식을 이용한다. 상관 검출 방식은 모든 심볼의 칩 시퀀스와 수신 신호 사이의 상관값을 계산하여 그 중 가장 높은 값을 가지는 심볼을 찾아내는 방식을 의미한다. 따라서 수식으로 나타내면, 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $c_m = [c_{m,0} \cdots c_{m,31}]^T$ 이며, $\hat{X}(k)$는 k번 째 수신 심볼로써 상관값이 최대가 되는 심볼 m 값을 갖는다.

$$\hat{X}(k) = \arg\max\left\{c_m^H \bullet \overrightarrow{y_s}\right\} \quad (8)$$

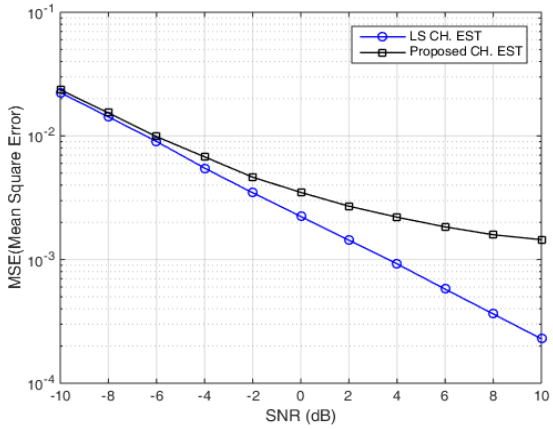

그림 5. 제안 기법과 LS 기법의 평균제곱오차 비교
Fig. 5. Comparison of MSE between the proposed and LS methods.

이 방식은 등화를 적용하지 않았기 때문에 심볼 간 간섭으로 인해 성능 열화가 유발될 수 있으므로, 심볼 간 간섭을 제거하기 위한 등화를 적용하여 심볼 검출 방식에 대해 수식으로 정리하면, 식 (9)와 같다.

$$\widetilde{X}(k) = \arg\max\left\{c_m^H \bullet (W\overrightarrow{y_s})\right\} \tag{9}$$

여기서, W는 등화를 위한 가중 행렬을 의미한다. 본 논문에서는 MMSE 등화 기법을 적용하여 성능을 비교 분석하며, MMSE 등화 기법에 대한 가중 행렬은 식 (10)과 같다. 이 때, H 는 다중 경로 지연 채널 탭의 벡터에 대한 컨볼루션 행렬이며, σ_w^2는 잡음의 분산이다.

$$W_{MMSE} = (H^H H + \sigma_w^2 I)^{-1} H^H \tag{10}$$

다음은 제안된 채널 추정 기법을 통하여 추정된 채널 $\hat{h}_b[n]$의 적용 가능성을 평가하기 위해, 이상적인 채널 $h[n]$ 그리고 LS 기법으로 추정된 채널 $\hat{h}_{LS}[n]$과 함께 각각을 MMSE 등화 기법에 적용하여 수신 성능을 비교한 모의실험 내용이다. 모의실험은 완벽하게 동기가 이루어졌다는 가정 하에 주파수 오프셋은 고려되지 않았으며, 사용된 파라미터는 표 4에 나타내었다. 파라미터 중 다중경로 지연은 앞서 철도 무선 채널 결과를 고려하여 첫 번째와 두 번째 경로로 구성되는 두 가지 경로를 가지는 무선 채널을 가정하며, AWGN 채널임을 가정하여 진행한다. 또한 경로 지연 성분이 두 번째가 아닌 세 번째에서 나타났을 경우에 대해서도 성능을 확인한다.

표 4. 모의실험 파라미터
Table 4. Simulations parameters.

파라미터	값
칩 속도	2 MHz
패킷 구조	데이터 패킷 (802.15.4)
변조	O-QPSK
확산 인자	32 (DSSS)
반송파 주파수	2.45 GHz
패킷 사이즈	50 KBytes
채널	AWGN Channel
채널의 지연 및 파워	0 nsec (0 dB), 500 nsec(-5 dB)
등화 기법	MMSE

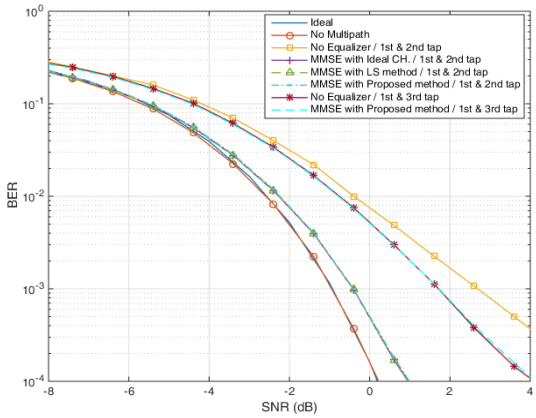

그림 6. 채널 정보에 따른 비트 오류율 성능 비교
Fig. 6. BER performance comparison by channel information.

그림 6의 모의실험 결과는 이상적인 채널, LS 기법으로 추정된 채널 그리고 제안된 기법을 통해 추정된 채널, 총 세 가지 채널 정보를 MMSE 등화 기법에 적용하였을 때의 수신 성능 평가 모의실험 결과이다. 결과를 보면 비트 오류율(BER)이 10^{-3}을 기준으로 등화기법이 적용되지 않은 상태에 비해 SNR이 약 3 dB 성능 향상이 있으며, 이상적인 채널정보와 제안된 기법으로 추정된 채널정보를 MMSE 등화에 적용하였을 때는 거의 동일한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이를 미루어보아 제안된 채널 추정 기법이 적용 가능함을 알 수 있다. 그러나 경로 지연 성분이 두 번째가 아닌 세 번째 지연 경로에 있을 경우, 제안한 기법으로는 세 번째 경로 지연 성분에 대한 추정이 안 됨에 따라 등화로 인한 성능 개선이 없는 한계가 존재한다.

결과적으로 제안된 채널 추정 기법은 T_c만큼 지연된 성분에 대해서만 추정 가능하므로 여타 경로 지연 성분

에 대해서는 추정할 수 없는 문제가 있다. 하지만, 철도 무선 센서 네트워크를 위한 채널 환경에서는 평균적으로 T_c 만큼 지연되어 들어오는 경로 지연 성분이 발생하므로, 제안한 채널 추정 기법을 이용하여 추정할 수 있으며 등화를 통하여 성능을 개선시킬 수 있다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 실제 고속열차에서 IEEE 802.15.4 통신 시스템을 기반으로 측정한 수신 신호를 이용하여 채널의 다중경로 지연성분을 추출하였으며, 추출된 다중경로 지연성분은 두 개의 경로 성분이 주요하게 발생함을 확인하였다. 따라서 이를 기반으로 두 개의 경로를 추정하기 위한 저복잡도를 갖는 채널 추정 기법을 제안하였고, 제안된 기법이 LS 채널 추정방식에 비해 다소 정확도는 떨어지지만 비교적 간단하게 채널을 추정해냄을 복잡도 측면에서 분석하였다. 그리고 제안된 채널 추정 기법의 적용 가능성을 위하여 등화기의 채널정보로 적용 후 수신 성능을 비교하였고, 성능열화가 거의 없음을 확인하였다. 이렇게 제안된 채널 추정 기법은 두 개의 경로 지연 성분이 두드러지게 나타나는 철도환경에 최적화된 방법이라 예상된다.

앞으로 진행될 연구에서는 실제 고속열차가 다양한 구간에서 주행할 때에 대한 무선 채널 특성을 분석하고, 각각의 주행구간에 따른 채널 특성을 고려한 채널 추정 기법에 대한 연구가 진행될 필요가 있다.

REFERENCES

[1] J. H. Kim, J. Y. Lee, “A Study on the Wireless Monitoring System for the Railroad Vehicle Maintenance Using the Energy Harvesting Technology”, Proceedings of the 41st International Conference on Computers & Industrial Engineering, LA, USA, Oct. 2011.

[2] J. H. Kim, J. Y. Lee, “A Study on the Applicability of Energy Harvesting Technology for the Sensor Network of Railroad System by Thermal Deviation,” International Conference on sensor Technologies and applications 2012, Rome, Italy, Aug. 2012.

[3] Y. S. Kim, K. H. Kim, J. G. Lee, Y. L. Kim, “Analysis of Sensing Data for Low Power Transmission under High-speed Railway Environment”, International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics 2013, Bangkok, Taiwan, Sept. 2013.

[4] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Netwroks(LR-WPANs), IEEE Std. 802.15.4-2011.

[5] S. H. Lim, H. N. Kim, Y. I. Kim, “The Relay Scheme over MAC for Data Transmission Performance in Railway Wireless Sensor Network”, 16th International Conference on Advanced Communications Technology, Pyeong Chang, Korea, Feb. 2014.

[6] K. M. Yeo and Y, I, Kim, “A Long-range Packet Transmission Algorithm in Railroad Sensor Networks”, Proceedings of KSPE 2013 Autumn conference, Busan, Korea, Oct, 2013.

[7] S. Y. Lee, D. S. Kim H. S. Kim, and D. J. Chung, “Design and Verification of IEEE 802.15.4 LR-WPAN 2.4GHz Base-band for Ubiquitous Sensor Network” Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 43, No. 1, pp. 49-56, Jan. 2006.

[8] S. M. Moon, B. R. Kim, S. Malik, D. J. Kim, C. S. Kim, and I. T. Hwang, “Advanced Sensor Communication Algorithm based on IEEE 802.15.4/ZigBee for High Speed Train Environment”, Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 50, No. 10, pp. 2455-2463, Oct. 2013.

[9] J. H. Choi, “Optimal Combining and Detection”, 1st ed., Cambridge University Press, pp. 49-77, 2010.

[10] G.H. Golub and C. F. Van Loan, “Matrix Computations 3rd ed.”, Johns Hopkins University Press, 1996.

[11] J. Y. Lee, J. H. Lee, J. H. Kim, Y. L. Kim, “Low-Complexity ICI Reduction Method for OFDM Systems with Large Subcarrier numbers”, IEEE Trans. Veh. Tech., early access article.

저 자 소 개

이 진 구(학생회원)
2013년 2월 공주대학교 전파공학과 학사 졸업
2015년 2월 서강대학교 전자공학과 석사 졸업
2015년 3월 서강대학교 전자공학과 박사과정
<주관심분야 : 무선통신, 레이더, 신호처리>

김 대 현(학생회원)
2014년 2월 서강대학교 전자공학과 학사 졸업
2014년 3월 서강대학교 전자공학과 석박사과정
<주관심분야 : 무선통신, 레이더, 신호처리>

김 재 훈(정회원)
1999년 2월 서강대학교 기계공학과 학사 졸업
2002년 2월 서강대학교 기계공학과 석사 졸업
2010년 2월 서강대학교 기계공학과 박사 졸업.
2002년~현재 한국철도기술연구원 선임 연구원
<주관심분야 : 피로해석, 자가발전>

김 영 록(정회원)
1991년 2월 서강대학교 전자공학과 학사 졸업
1993년 2월 New York University 전기공학과 석사 졸업
1998년 2월 New York Universiy 전기공학과 박사 졸업
1999년~2003년 Inter Digital Comm. Corp., NY, USA 연구원
2003년~현재 서강대학교 전자공학과 교수
<주관심분야 : 무선통신, 레이더, 신호처리>