

OFDM 기반 고속주행 철도통신 시스템의 ICI 소거 기법 연구

최현균*, 조한벽*, 노승환**, 박성균^o

A Study on ICI Cancellation Technique for OFDM-Based High Speed Railway Communication System

Hyun-Kyun Choi*, Hanbyeog Cho*, Soonghwan Ro**, SeongGyoon Park^o

요약

OFDM 기반의 LTE-R 통신 플랫폼을 갖는 고속주행 철도통신 시스템은 지난 20여 년간 철도 ITS 분야를 담당해 온 GSM-R을 대체할 핵심요소가 되어가고 있다. 고속 이동체(시속 300km/h 이상)에서 높은 데이터 전송률을 갖는 OFDM 전송 시스템을 구현하기 위해서는 수신기에서 신뢰성 있는 데이터 검출 기능이 요구된다. 고속주행 철도통신의 무선 채널은 고속 시변 특성을 갖는다. 이러한 채널 특성을 극복하기 위해서는 정확한 채널 추정과 캐리어간 간섭(ICI) 소거 기법이 개발되어야 한다. 본 논문에서는 파일럿 구간을 갖는 새로운 OFDM 심벌 구조와 큐빅 보간법을 이용하여 정확한 채널 추정과 ICI를 소거하는 기법을 제안하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 기존 ICI 소거 기법들과 수신 성능을 비교함으로써 고속 시변 채널에서의 우수한 성능을 입증하였다.

Key Words : doppler effect, time-variant channel, ICI, pilot interval, cubic interpolation

ABSTRACT

High-Speed Railway(HSR) communication system implemented in LTE-R platform based on OFDM is becoming a key feature to replace the current GSM-R technology supported for Intelligent Transportation Systems(ITS) for the last two decades. In order to support high data-rate OFDM transmission for highly mobile users(more than 300km/h), reliable data detection is required at the receiver. Wireless channel for HSR communication has fast time varying properties. To overcome the channel properties, accurate channel estimation and Inter-carrier Interference(ICI) is demanded. In this paper, a novel OFDM symbol structure with pilot interval and channel estimation algorithm based on cubic interpolation is proposed. And then, through computer simulation, it is proved that symbol error rate(SER) of communication system using ICI cancellation technique with the proposed algorithm outperforms those of the conventional ICI cancellation techniques.

I. 서론

지금까지 유럽, 중국 등 해외 여러 나라들이 기존의

2G 기술을 기반으로 하는 GSM-R을 철도무선통신망 등으로 활용하고 있으나, 전 세계적으로 LTE를 이용한 철도통합무선망 즉, LTE-R의 개발이 진행되고 있

※ 본 연구는 2016년도 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받은 철도기술연구사업(16RTRP-B089546-03) 일환으로 수행함

◆ First Author : Electronics and Telecommunications Research Institute, choihk@etri.re.kr, 정희원

◦ Corresponding Author : Kongju National University, psk@kongju.ac.kr, 종신회원

* Electronics and Telecommunications Research Institute, hbcho@etri.re.kr, 정희원

** Kongju National University, rosh@kongju.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2017-02-058, Received February 28, 2017; Revised June 7, 2017; Accepted June 7, 2017

으며, 우리나라의 철도관련 기관들도 이러한 흐름에 능동적으로 대응하고 있다.^[1] 또한, 국토교통부는 2026년까지 전국 5,000km 철도에 2조원 이상을 투자하여 일반·고속철도용 LTE-R를 설치할 계획이다. 원주-강릉선의 구축을 시작으로, 경부고속(광명~동대구), 원시-소사, 동해남부선, 중앙선, 동해선 등 사업이 계속 이어질 것이다. 과거에는 LTE 기반의 철도통합 무선망의 주파수로 700MHz, 1.8GHz, 2.6GHz 대역이 후보로 거론되었으나 현재는 700MHz 대역에서 국가재난안전통신망과 함께 통합·연계되는 것으로 결정되었다.

일반 열차뿐만 아니라 350km/h 이상의 고속 열차에서 안정적인 철도통신 서비스를 제공하는 것을 목표로 열차 제어 시스템을 포함하는 철도통합무선망 구축이 추진되고 있다. 이럴 경우 기존 철도통신망에서는 볼 수 없는 고속이동통신과 데이터 통신, 그룹통화 등 철도통신의 업그레이드된 기능을 제공할 것이며, 한국형 열차제어시스템(KRTCS)의 핵심 통신기술로 자리 잡을 것으로 전망된다.

LTE 기반의 철도통합무선망 설계에서 가장 중요한 요소는 통신기기의 고속이동으로 인한 급격한 채널 특성의 변화에 의해 발생하는 캐리어 간 간섭문제를 해결하는 것이다. 고속으로 이동하는 통신기기로 다중 경로를 거쳐 수신되는 전파신호는 각 경로의 도플러 천이 주파수가 다르므로 부반송파간의 직교성에 손상을 입힌다. 즉, 캐리어간 간섭문제를 야기하게 된다. 특히, 고속으로 주행하는 열차에서 송수신하는 신호에 대한 채널 특성은 한 OFDM 심볼 구간 내에서도 급격하게 변할 수 있으므로 다중 경로의 다양한 도플러 천이는 수신기에서 불완전한 동기를 유발하게 된다. 이러한 불완전한 캐리어간 동기화는 캐리어 주파수 오프셋과 유사할 수도 있으나, 다중 경로로 인한 불완전한 캐리어 동기화를 보상하기 위해서는 각 경로의 도플러 천이 주파수를 정확하게 예측하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 고속 이동체에서의 무선통신 시 발생할 수 있는 고속 시변 채널에 대응하는 ICI 소거 기법을 제안하고, 기존 ICI 소거 기법들과 비교·분석하고자 한다.

II. 도플러 효과와 캐리어 주파수 오프셋 소거 기법 비교 분석

2.1 도플러 효과 분석

고속 주행 철도 차량에서 운영되는 통신기기의 도

플러 주파수는 열차의 속도 및 캐리어 주파수에 따라 달라진다. 뿐만 아니라 실제 도플러 주파수는 LOS (Line-Of-Sight), 반사 및 회절을 포함하는 많은 성분들로 구성되며, 이 중 LOS 성분이 주된 성분이다. 이론적으로 도플러 주파수는 다음 식과 같이 계산된다.

$$F_{D_k} = \frac{v \cdot f_c}{c} \cdot \cos \theta_K \quad (1)$$

F_{D_k} : K번째 도착신호의 도플러주파수
 v : 이동체의 속도, f_c : 캐리어주파수, c : 빛의 속도
 θ_K : 이동체와 K번째 도착신호의 방향사이의 각도

LOS 성분뿐만 아니라 다수의 반사 성분들이 함께 포함되는 도플러 스펙트럼의 형태에 대해 설명하기 위해 그림 1과 같이 열차가 역을 향해 이동하는 경우를 가정한다.

그림 1의 조건에서 다양한 도플러 성분들이 합쳐져서 수신되는 신호들의 스펙트럼을 구해보면 다음 그림 2와 같다. 만약, 열차가 그림 1과 반대로 기지국으

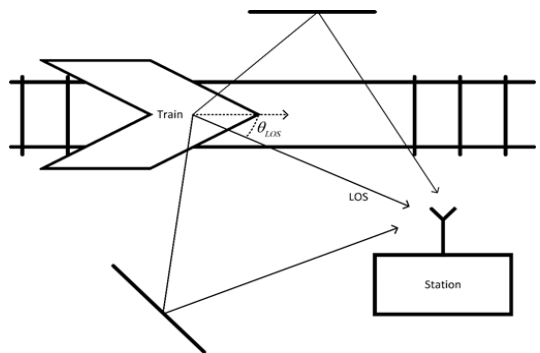


그림 1. 기지국 방향으로 이동하는 열차로부터 도착하는 도플러 성분들
 Fig. 1. Different doppler components arrived from trains towards base-station

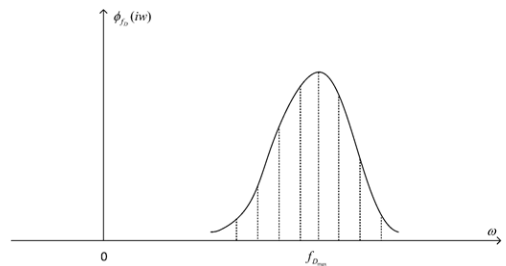


그림 2. 열차가 기지국 방향으로 이동하는 경우의 도플러 스펙트럼
 Fig. 2. Doppler spectrum in case train travels towards base-station

로부터 멀어지는 경우에는 도플러 스펙트럼은 음의 값을 가지게 되어 수신되는 주파수가 원래 캐리어 주파수보다 작아질 것이다.

일반적으로 고속주행 철도통신에서는 도플러 스펙트럼 전력이 주로 LOS 성분 근처에 집중되지만, 다중 경로 성분들의 스펙트럼 전력도 의미 있는 비중을 차지한다. 도플러 효과에 의한 다중 경로 시변 채널 특성을 살펴보기 위해 다음 식과 같은 수학적 모델링을 적용한다.

$$h(\tau, t) = \sum_{i=0}^{M-1} a_i(t) e^{j(2\pi f_{D_i}(t)t + \theta_i)} \delta(t - \tau_i) \quad (2)$$

식 (2)에서 M개의 다중 경로 까지 고려한다고 가정할 때 $f_{D_i}(t)$ 는 i번째 경로와 연관된 도플러 주파수이다. 이와 같은 수학적 모델링을 기반으로 시간 영역에서 시속 300km/500km에 해당하는 최대 도플러 주파수를 갖는 다중 경로 채널의 특성을 몬테 카를로 (Monte Carlo) 방법을 사용하여 분석한 결과는 문헌 [2]에 제시되었다. OFDM 기반의 통신 환경을 가정하고 수행된 연구결과에서 고속 주행 열차에서 도플러 효과에 의한 무선채널은 시간영역에서 상당히 빠르게 변화하는 임펄스 응답 특성을 보였으며, 주행 속도가 증가할수록 그 변화가 심해서 하나의 OFDM 심볼 내에서도 채널 특성이 변화함을 볼 수 있었고, 채널 추정이 매우 중요한 역할을 수행하는 LTE-R 시스템의 경우 고속 주행 시 상당한 성능 저하가 있을 것으로 예상할 수 있었다. 따라서 채널 특성 변화가 선형적으로 이루어진다고 가정하여 선형 보간법을 통한 채널 추정 방법을 제안하고 고속 시변 채널 응답을 어느 수준 이상으로 잘 추정할 수 있음을 보여 주었다.

2.2 캐리어 주파수 오프셋 소거 기법 비교 분석

대개의 경우 캐리어 주파수 오프셋은 불완전한 주파수 동기화에 의해 발생하게 된다. LOS 성분만을 고려하게 된다면 캐리어 주파수 오프셋과 도플러 주파수 천이 효과는 비슷한 결과를 갖는다. 캐리어 주파수 오프셋 모델링은 그림 3과 같이 매우 단순하게 모델링

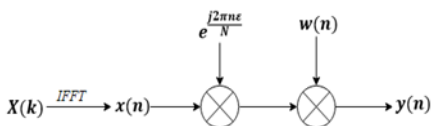


그림 3. 캐리어 주파수 오프셋 모델링
Fig. 3. Modeling of carrier frequency offset

할 수 있다.

결국 주파수 영역에서 신호는 Δf_c 주파수만큼 이동하며, 서브 캐리어 간격(Δf)에 대한 비율로 오프셋 양을 변수화한다.

$$\epsilon = \frac{\Delta f_c}{\Delta f} \quad (3)$$

OFDM 시스템에서 수신된 신호에 대한 캐리어 주파수 오프셋 영향은 모든 서브 캐리어 상의 주파수 인자 ϵ 만큼 천이된다. 문헌 [3]에서 이러한 캐리어 주파수 오프셋 영향을 수학적으로 잘 서술하였으며, 이 논문에서 k번째 서브 캐리어에서 수신된 데이터 심벌은 다음 식과 같이 표현된다.

$$Y(k) = X(k)S(0) + \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} X(l)S(l-k) + n_k \quad (4)$$

$$S(l-k) = \frac{\sin(\pi(l+\epsilon-k))}{N \sin(\pi(l+\epsilon-k)/N)} e^{j\pi(1-\frac{1}{N})(l+\epsilon-k)} \quad (5)$$

식 (5)는 OFDM 신호에서 캐리어 주파수 오프셋으로 인한 간섭에 해당하는 부분으로서 신호 전력에 대한 간섭 전력의 비율인 CIR(Carrier to Interference ratio)은 다음 식과 같이 정의된다.

$$CIR = \frac{S(k)^2}{\sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} S(l-k)^2} = \frac{S(0)^2}{\sum_{l=1}^{N-1} S(l)^2} \quad (6)$$

한편, 캐리어 주파수 오프셋으로 인한 ICI 제거 방법은 크게 자체 상쇄 기법, 파일럿 심벌 등을 이용한 ICI 소거 기법, 칼만 필터를 이용한 캐리어 주파수 오프셋 추정 기법의 3가지 범주로 나눌 수 있다.

- ▶ 자체 상쇄 기법(self cancellation)^[3-6]
 - ICI self cancellation using adjacent carrier(AC)
 - ICI self cancellation using data conjugate(CC)
 - Improved ICI self cancellation(IC)
- ▶ 파일럿 등을 이용한 ICI 소거 기법 (ICI cancellation using the pilot symbol)
 - Moore method for frequency offset estimation^[7]
 - Classen method for frequency offset estimation^[8]
 - CP(Cyclic Prefix)-based carrier frequency offset

estimation^[9,10]

▶ 칼만 필터를 이용한 캐리어 주파수 오프셋 추정 기법
- Carrier frequency offset estimation by using the Extended Kalman Filter(EKF)^[11]

이러한 세 가지 범주의 캐리어 주파수 오프셋 소거 기법들의 장단점을 살펴보기 위하여 모의실험을 수행하였다. 적용 환경은 현재 표준화가 진행 중인 OFDM 기반의 고속 철도 통신 시스템인 LTE-R 시스템을 가정하였다. 실제 시뮬레이션에 적용한 것은 그림 4와 표 1과 같다.

시뮬레이션에 적용한 파라미터는 LTE-A 표준을 차용하였으며, 채널 코딩은 적용하지 않았다. 시뮬레이션을 통해 먼저 자기 상쇄(SC) 기법과 확장된 칼만 필터를 이용한 기법(EKF)의 2개 범주의 성능을 비교하여 보았는데 그 결과는 다음 그림 5와 같다.

여기서 적용한 SC 기법은 IC기법으로서 메커니즘은 AC 또는 CC 기법과 유사하지만 성능은 크게 향상되며, 대신에 데이터 속도가 1/4로 감소된다. 그림 5의 두 그래프로부터 보는 바와 같이 주파수 오프셋이 비교적 작을 때는 SC, EKF 기법을 적용한 것과 ICI 소

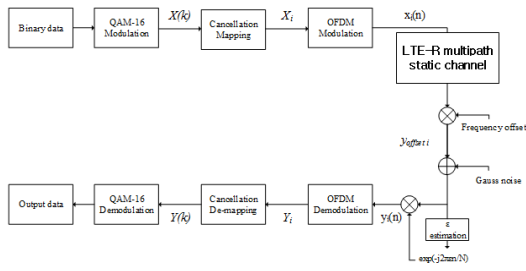


그림 4. 주파수 오프셋을 고려한 OFDM 기반의 LTE-R 시스템
Fig. 4. OFDM-based LTE-R system with considering frequency offset

표 1. 시뮬레이션 적용 파라미터
Table 1. Parameters for simulation

Parameters	Value					
System bandwidth	10 MHz					
FFT length	1,024					
Δf	9.7 kHz					
Guard interval length	12					
Frequency offset [Hz]	194	324	500	722	833	1,204
ϵ	0.0200	0.0334	0.0515	0.0744	0.0859	0.1241
Modulation scheme	QAM-16					

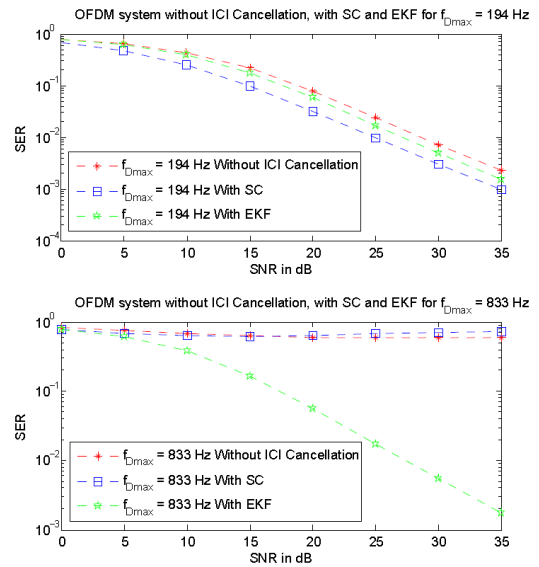


그림 5. ICI 소거 기법을 적용하지 않은 경우와 SC, EKF 기법의 성능(Symbol Error Rate) 비교 분석
Fig. 5. Comparative analysis of SER for SC, EKF, w/o ICI

거 기법을 적용하지 않은 것의 심벌 에러율이 많이 차이 나지 않는다.

그러나 주파수 오프셋이 비교적 큰 경우에는 SC 기법을 적용한 것과 ICI 기법을 적용하지 않은 것이 모두 비슷하게 성능이 열화 되지만 EKF 기법을 적용한 것은 상대적으로 상당한 성능 이득 효과를 보여준다. 앞서도 언급한 것처럼 주파수 오프셋은 LOS만 있는 무선통신 환경에서 도플러 효과에 의해 발생할 수도 있다. 따라서 오픈 사이트에서 고속 주행하는 열차가 기지국과 통신할 경우 비교적 큰 주파수 오프셋이 발생하게 될 것이므로 이럴 경우 EKF 기법 적용이 효과를 볼 것으로 예상된다.

EKF 기법은 고속 주행으로 인한 도플러 효과에 의해 비교적 큰 주파수 오프셋이 발생한 경우에도 좋은 수신 성능을 보여준다. 하지만 단지 1개의 파라미터만을 추정하여 활용할 수 있으며, SC 기법에 요구되지 않는 채널 상태 정보(CSI: Channel State Information)가 필요하다는 단점을 갖고 있다.

이러한 단점을 해결하기 위하여 채널 상태 정보 없이 ICI를 소거하기 위해서는 파일럿 심벌 등을 이용하는 Classen, Moore 그리고 CP기반 오프셋 추정 기법들을 적용할 수 있다. 이 추정 기법들과 EKF 기법의 성능을 비교 분석하면 다음 그림 6과 같다.

그림 6의 결과를 통해 주파수 오프셋이 1,204Hz로 비교적 큰 경우에도 파일럿 심벌을 이용하는 Classen

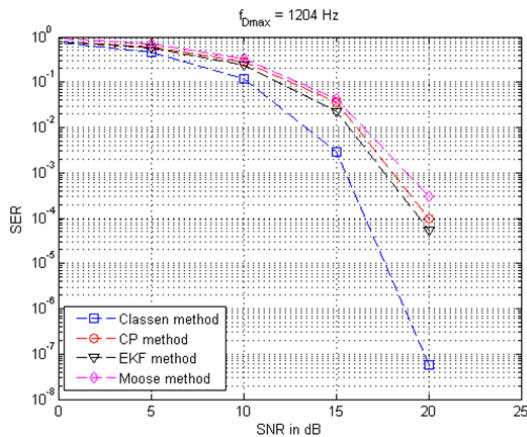


그림 6. 여러 기법들의 주파수 오프셋 추정 및 보상에 의한 OFDM 기반 통신시스템 성능
 Fig. 6. Performance of OFDM-based communication system for different techniques using frequency offset estimation & compensation

기법은 가장 뛰어난 성능을 보여줌을 알 수 있다. 그러나 이 방법은 다른 방법들에 비해 캐리어 주파수 오프셋 추정에 더 긴 지연시간이 필요하다는 단점이 있다.

지금까지의 시뮬레이션 결과를 요약하면, 주파수 오프셋으로 인한 ICI를 보상하기 위해 신호 품질, 열차 속도, 또는 수신기의 복잡성 요구 사항에 따라 AC, CC, IC, EKF, Classen 및 Moore 기법 등의 모든 방법을 적용할 수 있다. AC, CC 및 IC 기법은 복잡성이 낮은 편에 속하지만 주파수 오프셋이 커질 경우 낮은 성능을 제공하며 알고리즘의 여유도(redundancy)가 커져 데이터 속도가 감소되는 문제가 있다. EKF는 높은 성능을 제공하지만 복잡도가 높고 1개의 파라미터만 추정할 수 있는 문제가 있으며, Classen 및 Moore의 추정 기법은 추가적인 파일럿 심벌이 필요하고 긴 지연시간이 요구된다는 문제가 있다.

III. 새로운 OFDM 심벌 구조를 이용한 ICI 소거 기법 및 모의 실험

제2장에서 언급한 ICI 소거 기법들 중 우수한 성능을 보이는 추정 기법들은 완벽한 채널 상태 정보(CSI)를 제공할 수 있다는 전제 조건 하에서 시뮬레이션한 결과들이다. 또한, 각 반사 경로들의 도플러 주파수는 통계적으로 독립인 파라미터이고 모든 다중 경로에 대해 도플러 효과들이 고려되지 못했다. 고속으로 주행하는 열차에서 무선통신하는 시스템이 LOS뿐만 아니라 다중 경로가 일정한 비중을 차지할 경우 모든 반사 경로의 도플러 주파수를 추정하는 것이 필요한데

EKF, Classen, Moore 등의 기법들은 적용할 수 없다.

문헌 [2]에서 제시된 OFDM 심벌 구조는 하나의 OFDM 심벌 내에 부분적인 파일럿 심벌을 포함시키는 형태이다. 수신되는 OFDM 심벌 내의 파일럿 정보로부터 선형 보간법을 이용하여 채널 추정을 비교적 정확하게 수행하며, 해당 OFDM 심벌의 다중 경로들의 채널 정보들로 모두 추정해낼 수 있게 되어 고속주행 열차의 무선통신시스템이 겪게 되는 고속 시변 채널 특성을 다중 경로에 대해서도 잘 극복해낼 수 있는 방법을 제시하였다.

그러나 실제 열차의 주행 속도가 매우 높을 경우, 고속 시변 채널 특성은 완전히 선형함수로 근사화할 때 오차가 커지게 되어 채널 추정 성능이 감소하게 된다. 이에 따라 본 장에서는 문헌 [2]에서 제안된 OFDM 심벌을 시간 영역에서 여유도를 약간 개선하기 위해 파일럿 정보를 실는 부분을 개조한 새로운 OFDM 심벌 구조를 제안하며, 고속 시변 채널 추정 특성을 향상시키기 위하여 큐빅(Cubic) 보간법을 적용하여 그 효과를 검증한다.

그림 7은 OFDM 심벌의 보호구간(guard interval)에 파일럿 정보를 갖는 새로운 구조를 제안하며, 파일럿 정보가 포함된 보호구간을 ‘파일럿 구간’이라고 정의한다. 이러한 파일럿 구간을 갖는 심벌 구조를 이용함으로써 매 OFDM 심벌마다 데이터 정보 수신과 함께 파일럿 정보도 수신하여 심벌 단위로 빠르게 변화하는 채널 특성을 추정함으로써 데이터 정보 검출 성능을 제고할 수 있다. 또한, 기존의 다른 채널 추정 기법들과는 달리 별도의 파일럿 심벌을 요구하지 않는 장점도 있다.

한편, 고속 시변 채널 임펄스 응답을 보다 정확하게 예측하기 위하여 큐빅 헤르미트(Cubic Hermite) 함수를 이용한 보간법을 적용한다. 그 적용 개요를 설명하면 다음과 같다.

그림 8은 제안한 OFDM 심벌을 적용한 무선 프레임 고속 시변 채널을 통해 송수신하는 상황을 표현

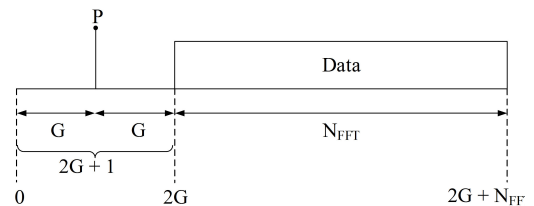


그림 7. 시간 영역에서 파일럿 정보를 삽입한 새로운 OFDM 심벌 구조
 Fig. 7. A novel OFDM structure in the time domain

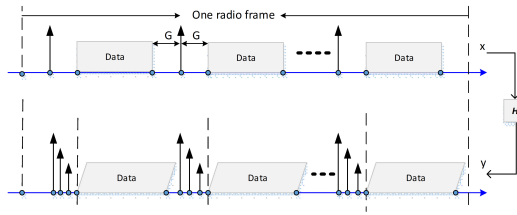


그림 8. 제안된 OFDM 심벌을 적용한 송수신 무선 프레임 구조
 Fig. 8. A radio frame with the proposed OFDM symbol structure at Tx & Rx

한 것이다. 채널 임펄스 응답이 이루어지는 N_p 개의 경로가 있다고 가정하면, 파일럿 구간에서 수신되는 심벌 신호는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$y_{l,p}(t) = \sum_{l=0}^{N_p-1} h_{l,p}(t)P + w_{l,p}(t) \quad (7)$$

이 식에서 $h_{l,p}$ 는 p번째 OFDM 심벌의 l번째 경로에서의 채널 임펄스 응답을 나타내며, $w_{l,p}$ 는 시간 t에서의 AWGN 잡음을 의미하는 것으로 p값의 범위는 0~M사이의 정수이며, M은 무선 프레임에서 OFDM 심벌 개수이다. 시간 t는 $t_p = (k+l)t_a$ (t_a 는 샘플링 간격)로 대치하고, $kt_a = G + 1 + pT_s$ 를 의미하며, 식 (7)은 다음 식 (8)과 같이 표현된다.

$$y_{l,p}[t_p] = \sum_{l=0}^{N_p-1} h_{l,p}[t_p]P + w_{l,p}[t_p] \quad (8)$$

$h_{l,p}$ 의 추정치인 $\tilde{h}_{l,p}$ 는 다음 식 (9)와 같이 파일럿 정보를 통해 구해질 수 있다.

$$\tilde{h}_{l,p}[t_p] = \frac{y_{l,p}[t_p]}{P} \quad (9)$$

또한, p와 p+1번째 OFDM 심벌 사이의 데이터 심벌에서의 채널 임펄스 응답을 추정하여야 한다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 다음 식 (10)과 같은 큐빅 헤르미트 함수를 이용한다.

$$\tilde{h}_{l,p}[t] = C_3(t-t_p)^3 + C_2(t-t_p)^2 + C_1(t-t_p) + C_0 \quad (10)$$

구간 $0 \leq t_k \leq T_s$ 와 $t = pT_s + t'_k$ 에서 계수

$C_k(k=0,1,2,3)$ 는 다음 식 (11)처럼 표현될 수 있다.

$$C_3 = \frac{d_{l,p} + d_{l,p+1} - 2\delta_p}{(\Delta t_p)^2}, C_2 = \frac{-2d_{l,p} - d_{l,p+1} + 3\Delta\delta_p}{\Delta t_p}, \\ C_1 = d_p, C_0 = \tilde{h}_{l,p}[t_p] \quad (11)$$

이 식에서 $d_{l,p}, d_{l,p+1}$ 는 l번째 경로에서 p와 p+1번째 파일럿 심벌의 채널 임펄스 응답의 일차 미분이며, $\Delta\delta_p = \frac{\tilde{h}_{l,p+1} - \tilde{h}_{l,p}}{\Delta t_p}$ 이고, $\Delta t_p = t_{p+1} - t_p$ 는 p번째 서브 인터벌의 길이를 의미한다. 반송주파수가 2.6GHz이고 열차 주행 속도가 300km라고 가정할 때, 최대 도플러 주파수는 722Hz이다. 이러한 조건에 기반하여 실제 채널 특성과 큐빅 보간법을 적용하여 추정된 채널 특성을 비교한 결과를 다음 그림 9에 제시하였다. 3가지 반사 경로들의 각각에 대한 실제 채널 특성과 추정된 채널 특성을 비교한 결과를 살펴보면 모두 거의 일치하는 것으로 나타난다.

이제 채널 추정 이후 다중 경로들의 각각에 대한 채널 임펄스 응답을 얻을 수 있게 된다. 따라서 OFDM 기반의 통신방식에서 수신기로 수신되는 신호 Y는 수학적으로 다음 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = HX + W \quad (12)$$

이 식에서 $Y = [Y_0, \dots, Y_{N-1}]^T$, $X = [X_0, \dots, X_{N-1}]^T$, $W = [W_0, \dots, W_{N-1}]^T$ 가 되며, X는 전송된 원래 데이터이고, W는 백색잡음이다. 또한, 추정된 채널 특성을 나타내는 행렬인 H는 다음 식(13)과 같이 표현된다.

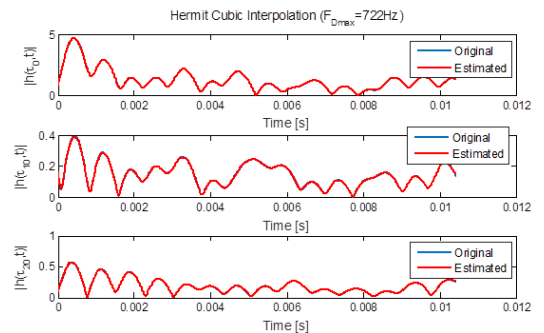


그림 9. 반송주파수 2.6GHz와 최대 속도 300km/h인 경우 큐빅 보간법으로 추정된 CIR과 실제 채널 특성 비교
 Fig. 9. Channel Impulse Response at 2.6GHz and max speed 300km/h with cubic interpolation

$$H = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \cdots & a_{0,N-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \cdots & a_{1,N-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N-1,0} & a_{N-1,1} & \cdots & a_{N-1,N-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$a_{i,j}$ 는 경로 i 번째 경로에 대한 j 번째 경로의 영향으로 간주된다. 식 (12)로부터 원하는 값 X 를 구하기 위해서는 H 의 역행렬을 구하면 된다. 새로운 파일럿 구간을 갖는 OFDM 심벌구조와 큐빅 보간법을 적용한 ICI 소거 기법의 수신 성능을 자기 상쇄 기법의 경우와 비교하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과를 그림 10에 제시하였다.

위의 그림에서 보는 바와 같이 고속 주행 중인 열차에서 OFDM 기반의 무선통신 시스템을 통한 데이터 전송은 큐빅 보간법을 이용한 ICI 소거 기법이 가장 우수함을 알 수 있다. 선형 보간법을 이용한 ICI 소거 기법도 기존 자기 상쇄 ICI 기법보다는 우수하지만 고속 주행으로 인한 다중 경로들의 도플러 효과를 반영한 정확한 채널 추정 능력에서 큐빅 보간법보다는 떨어지므로 수신 성능도 다소 낮아지는 것을 알 수 있다. 앞서 보았던 EKF 기법은 완전한 채널 상태를 얻는다면 고속 주행에서 좋은 수신 성능을 보여주지만 완전한 채널 정보를 항상 보장하기는 어려울 뿐만 아니라 EKF 기법은 낮은 속도의 주행에서 작은 주파수 오프셋을 가질 경우에는 오히려 자기 상쇄 ICI 소거 기법보다도 수신 성능이 떨어져서 효율성이 다소 부족한 것으로 나타난다.

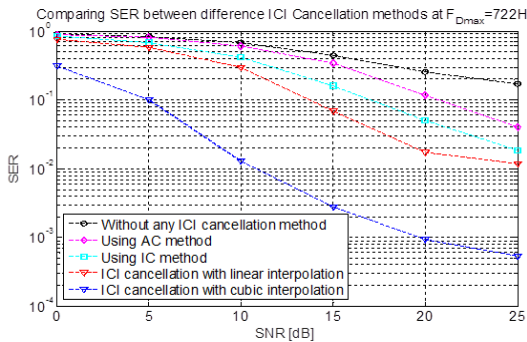


그림 10. 최대 속도 300km/h에서 여러 가지 ICI 소거 기법들간의 SER 비교
Fig. 10. SER comparison between different ICI cancellations at max speed 300km/h

IV. 결론

본 논문에서는 고속으로 주행하는 열차의 안정적

제어와 고속 데이터 서비스를 위한 OFDM 기반 무선 통신시스템에서 발생할 수 있는 캐리어간 간섭(ICI) 문제 해결을 위한 방법을 모색하였다. 먼저 기존 캐리어 주파수 오프셋 제거 기법들을 탐색함으로써 캐리어간 간섭 문제 해결에서 기법들 간의 장단점을 분석하였다. 이러한 분석을 기반으로 시간 영역이나 주파수 영역에서 데이터 전송 능력의 손실을 보다 작게 할 수 있으면서 다중 경로별 도플러 효과에 의한 성능 저하 문제를 극복할 수 있는 기법의 필요성을 명확히 제시하였다.

이러한 고속 주행 철도통신 시스템에서 요구되는 ICI 소거 기법 조건들을 만족시키기 위해 OFDM 심벌에서 보호구간을 파일럿 정보를 삽입한 파일럿 구간으로 대체한 새로운 OFDM 심벌 구조를 제안하고, 이를 통해 고속 시변 채널 특성을 보다 정확하게 추정하기 위한 큐빅 보간법도 제안하였다. 새로운 OFDM 심벌과 큐빅 보간법을 적용하여 채널 특성을 정확히 추정함으로써 다중 경로의 도플러 주파수들에 의한 채널 특성 변화를 보다 정확히 보상할 수 있으므로 전송 데이터 복원 성능이 기존 다른 기법들에 비해 우수함을 보여 주었다.

다만, 본 논문에서 제안한 기법은 큐빅 보간법으로 추정하여 구한 채널 행렬의 역행렬을 구하여야 하는데, 행렬의 크기가 커서 역행렬을 구하기 위해 복잡도 및 계산 시간이 증가하는 문제점을 갖는다. 따라서 채널 행렬의 특성을 분석하여 역행렬 계산을 간소화함으로써 복잡도와 계산 시간을 절감할 수 있는 후속 연구가 필요하다.

References

- [1] R. He, et al., "High-speed railway communications: From GSM-R to LTE-R," in *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 11, no. 3, pp. 49-58, Sept. 2016.
- [2] H. G. Choi, et al., "Channel estimation method for OFDM-based LTE-R system on fast time-varying channels," *CEIC*, pp. 179-182, 2016.
- [3] Y. Zhao and S. G. Haggman, "Sensitivity to doppler shift and carrier frequency errors in OFDM systems - The consequences and solutions," *IEEE VTC*, pp. 2474-2478, 1996.
- [4] Y. Zhao and S. G. Haggman, "Inter-carrier interference self-cancellation scheme for OFDM

mobile communication systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 7, pp. 1185-1191, Jul. 2001.

[5] I. J. Jung, et al., “A new sampling frequency Offset estimation algorithm using a single OFDM symbol,” *J. KICS*, vol. 30, no. 11A, pp. 1004-1011, Nov. 2005.

[6] J. H. Park and H. M. Kim, “An efficient ICI self-cancellation method with frequency offset and phase noise in OFDM systems,” *J. KICS*, vol. 34, no. 2, pp. 155-163, Feb. 2009.

[7] P. H. Moose, “A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no. 10, pp. 2908-2914, Nov. 1994.

[8] F. Classen, “Frequency synchronization algorithms for OFDM systems suitable for communication over frequency selective fading channels,” *IEEE VTC 44th*, pp. 1655-1659, 1994.

[9] A. G. Abshir, et al., “A comparative study of carrier frequency offset(CFO) estimation techniques for OFDM systems,” *ISOR J. Electron. Commun. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 1-6, Jul.-Aug. 2014.

[10] M. S. A. Raboh, *Carrier frequency offset(CFO) estimation methods, A comparative study*, Retrieved Feb. 23. 2017, from <http://www.bu.edu.eg/>

[11] S. B. Senevirathna, et al., “Carrier frequency offset estimation for OFDM system using extended kalman filter,” *4th Int. Conf. Inf. and Automat. for Sustainability*, pp. 351-354, 2008.

최 현 균 (Hyun-Kyun Choi)



1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업
 1997년 2월 : 경북대학교 전자공학과 석사
 2015년 2월 : 충남대학교 전자공학과 박사
 2000년 6월~현재 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 무선통신, 텔레메틱스/ITS, V2X 통신

조 한 벽 (Hanbyeog Cho)



1981년 2월 : 아주대학교 산업공학과 졸업
 1983년 2월 : 한양대학교 산업공학과 석사
 1992년 2월 : 한양대학교 산업공학과 박사
 1984년 3월~현재 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 철도 통신, 차량 통신, ITS/텔레메틱스

노 승 환 (Soonghwan Ro)



1987년 8월 : 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1989년 8월 : 고려대학교 전자공학과 석사(공학석사)
 1993년 8월 : 고려대학교 전자공학과 박사(공학박사)
 1994년 3월~현재 공주대학교 교수

<관심분야> 이동성 관리프로토콜, 임베디드 시스템

박 성 균 (SeongGyoon Park)



1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업
 1987년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사
 1994년 2월 : 연세대학교 전자공학과 박사
 1994년 9월~현재 공주대학교 교수

<관심분야> 무선통신, 재난통신, 통신신호처리