802.11p 기반 차량 간 통신 환경에서 도플러 효과 극복을 위한 고성능 채널추정 방법에 관한 연구 동향

백승환
한국교통대학교
정보통신공학과

한승호
한국교통대학교
정보통신공학과

송창익
한국교통대학교
정보통신로봇공학전공

Ⅰ. 서 론

국내 자동차 산업은 최근 5년간 153만대에서 181만대로 30만대 가량 꾸준히 성장세를 보이고 있으며, 2030년에는 동남아시아 지역의 자동차 시장의 소비 증가로 1억 5천만대 이상 판매 될 것으로 예상하고 있다. 또한, 최근 자율주행 자동차의 등장으로 국내 · 외적으로 자동차에 대한 관심이 집중되고 있으며 선진 기업 및 연구소들을 중심으로 자율주행 자동차를 포함한 지능형 교통시스템 (ITS: Intelligent Transportation System)이 새로운 신 성장 동력으로 주목받고 있다.

자동차 시장의 확대와 더불어 최근 자율주행 자동차 구현을 위한 핵심기술로써 차량과 무선통신기술을 융합한 C-ITS (Cooperative ITS) 기술이 활발하게 연구되고 있다. C-ITS는 차량을 중심으로 형성된 통신 네트워크를 이용하여 차량 정보와 도로 환경 등을 노변장치 및 다른 차량에게 제공함으로써 협력적으로 도로 교통의 효율성을 높이는 서비스를 통칭하며 운전자의 편리성 뿐 아니라 자율주행 시 안전성을 책임지는 핵심 역할을 수행한다.

C-ITS를 위한 차량 통신 시스템은 현재 차량과 노변 기지국 간 (V2I:Vehicle-to-infrastructure) 멀티미디어 통신을 주로 담당하는 LTE(Long Term Evolution)기반의 셀룰러 규격과 V2I뿐 아니라 차량 간 (V2V: Vehicule-to-Vehicle) 안전 메세지 송 · 수신을 주요 목적으로 하는 WAVE (Wireless Access Vehicular Environment)규격이 사용되고 있으며, 5G 등 차세대 이동통신 시스템에서는 더욱 진화된 형태의 고성능 C-ITS 통신 서비스를 위한 표준화 작업이 활발히 진행이 되고 있다.

이러한 차량 간 통신에 접목되는 통신 기술들은 높은 신뢰성과 낮은 지연 (HR/LL : High-Reliable and Low Latency) 두 가지를 동시에

만족하여야 한다. 하지만 고속으로 이동하는 차량 간 통신 환경에서는 높은 도플러효과와 다중경로지연(multi-path delay)에 의한 간섭 때문에 두 가지 특성을 모두 만족시키는 것이 매우 어렵다. 특히 WAVE 수신기는 제한된 파일럿 (혹은 훈련 심볼) 자원을 이용하여 빠르게 변화하는 채널의 상태정보를 정확히 알아내어야 하는데, 차량의 이동 속도가 증가할수록 채널 변화를 정확하게 추적하기 어렵기 때문에 전체 시스템의 신뢰성이 급격히 감소될 수 있다. 따라서 상대속도 200km/h이상의 고속이동 차량 간 WAVE 통신에서 원하는 수준의 신뢰성을 얻기 위해서는 물리계층에서의 오류를 최소화 하는 고성능 채널추정 기법에 대한 더욱 심화된 연구가 필요하다.

본 고에서는 WAVE 물리계층의 신뢰성 향상을 위해 개발되어 온 다양한 WAVE 채널 추정 기법들의 현재와 미래에 대하여 논의한다. 또한 향 후 진화된 형태의 WAVE 시스템에 적용될 수 있는 고성능 채널추정기법들을 제안하고 그 가능성을 살펴보는 것을 목표로 한다. 먼저 2장에서는 WAVE 물리계층 규격과 채널모델을 설명하고 3장에서는 빠르게 변화하는 채널을 극복하기 위해 제안되어왔던 기존 채널 추정 기법들을 분석하고 최근 새롭게 제안된 기법들과 향후 WAVE규격에 적용될 수 있는 다양한 채널추정 기술들을 소개한다. 4장에서는 본 고에서 소개된 채널 추정 기법들에 대한 패킷에러 (PER: Packet Error Rate)성능을 모의실험 통하여 비교 분석하고 끝으로 5장에서는 결론을 도출한다.

Ⅱ. WAVE 물리계층 패킷 구조

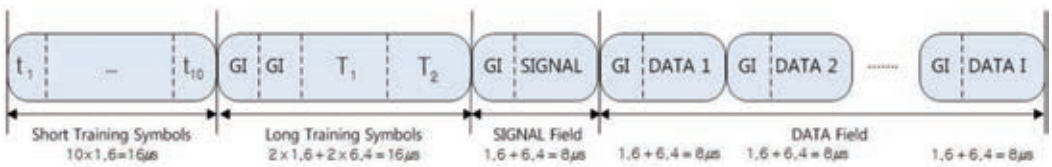
차량통신에 결합되는 무선통신 기술은 높은 신뢰성과 낮은 지연시간을 만족하여야 한다. 이러한 서비스 요구조건을 충족하기 위해 IEEE 위원회에서는 PHY와 MAC 계층을 포함하는 802.11p규격과 자원관리, 보안, 멀티채널 동작 등의 서비스 관련 규격을 담당하는 IEEE 1609를 결합하여 WAVE규격을 탄생시켰다. 특히 802.11p는 기존 WLAN(802.11a)와 DSRC (Direct Short Range Communications) 규격을 차량 환경에 적합하게 개량한 모델로 변조방식은 심볼당 64개의 부반송파를 갖는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 사용한다.

기존 WLAN 대비 WAVE의 가장 큰 차이점은 기존 VANET (Vehicular ad-hoc network)기술과의 호환성을 유지하기 위해 대역폭을 20MHz에서 10MHz로 축소시킨 점이다. 또한 WAVE는 저지연(LL) 요구조건을 만족하기 위해 IEEE1609.3을 정의하여 기존의 TCP/IP 구조에서 발생하였던 인증 지연을 TCP/IP와 WSMP (WAVE Short Message Protocol)를 선택적으로 사용하는 Dual Networking 구조를 사용함으로써 지연을 최소화한다.

IEEE 802.11p의 물리계층 패킷 구조는 〈그림 1〉과 같다. 프리앰블 (preamble) 구간은 패킷 시작 결정과 시간 주파수 동기화를 담당하는 STF (Short Training Field)와 초기 채널 추정을 담당하는 LTF (Long Training Field)로 구성이 되어있다. 신호영역 (Signal Field)은 패

〈표 1〉 802.11p 물리계층 파라미터

Parameters	IEEE 802.11p
Data rate (Mb/s)	3, 4, 5, 6, 9, 12, 18, 24, 27
Modulation Mode	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Code rate	1/2, 2/3, 3/4
Number of subcarriers	52
Symbol duration	8 μs
Guard time	1.6 μs
FFT period	6.4 μs
Preamble duration	32 μs
Subcarrier spacing	0.15625 MHz
Center frequency	5.9 GHz



〈그림 1〉 802.11p 패킷구조

킷 전송 속도와 길이, 변복조 방식, 부호율과 같은 전송 정보를 포함하며, 데이터 영역 (Data Field)은 패킷의 크기 및 전송속도에 따라 수십~수백의 OFDM 심볼로 구성될 수 있다. 신호 및 데이터 영역의 각 OFDM심볼은 위상을 추정하기 위한 용도로 −21, −7, 7, 21번째 위치에 고정적으로 4개의 comb type파일럿 신호를 삽입한다.

송신단은 CQI(Channel Quality Indicator) 레벨에 따라 코드율 (1/2, 2/3, 3/4)과 변조레벨 (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM)을 결정할 수 있으며, 전송 비트율은 3Mbps에서 최대 27Mbps까지 지원 가능하다. 오류 정정 및 무선채널의 연집에러(burst error) 극복을 위하여 길쌈부호기(convolutional encoder)와 비트 단위의 인터리버(interleaver)를 사용하며 수신단은 비터비 복호기(Viterbi decoder)와 deinterleaver를 사용하여 신호를 복원한다. 그 외 802.11p의 물리계층 파라메터들은 〈표 1〉에 잘 정리되어 있다.

802.11p 패킷 구조는 프리앰블의 LTF와 신호/데이터 영역의 4개의 Pilot신호만을 수신단의 채널추정을 위해 허용하고 있기 때문에, 시변 채널 환경에서 그 성능이 매우 제한적이다. 특히 시간, 주파수 상관도가 현저하게 떨어지는 고속도로 Non-LOS (NLOS) 환경에서는 성능열화를 피할 수 없다. 또한 WAVE와 같이 OFDM을 기반으로 하는 시스템의 경우, 고속이동 시 한 OFDM심볼 내 각 샘플시간 간격에서도 채널이 변화할 수 있기 때문에 부반송파 간의 직교성을 보장받지 못하며, 이 경우 부 반송파 간 간섭 (ICI: Inter Carrier Interference)으로 인해 PER 성능 열화를 가속화 한다. 따라서 기존 WAVE 패킷 구조를 크게 손상시키지 않는 범위에서 높은 신뢰성을 갖는 WAVE시스템을 구현하기 위해서는 고성능 디코더의 활용, 수신단 ICI 제거 기법, 송 · 수신 다이버시티 기법 등과 결합된 보다 진화된 형태의 고성능 WAVE 채널추정에 대한 심화된 연구가 필요하다.

Ⅲ. WAVE 채널 추정 기법

본 장에서는 WAVE 패킷구조에서 LTF 및 데이터영역의 4개의 알고 있는 pilot 신호만을 이용하여 채널을 추정하는 기존 WAVE 채널 추정 알고리즘들에 대하여 소개하고 문제점을 분석한다. 이 후, 다음 장에서는 보다 높은 신뢰성을 얻기 위해 최근 개발된 다양한 advanced 채널 추정기법들에 대하여 논의할 것이다.

1. LS 기법 (Least Square)

LS 추정 기법은 기존 802.11a에서 사용된 기본적인 채널추정기법으로 LTF의 알려진 긴 훈련심볼을 이용하여 채널을 추정하고, 이렇게 추정된 채널을 바탕으로 모든 데이터 필드의 신호를 등화하는 기법이다. 시간 영역에서 노이즈와 함께 수신된 긴 훈련 심볼을 $T_1[n]$과 $T_2[n]$(n은 시간 인덱스)이라 하고 이를 각각 64-point FFT (Fast Fourier Transform)를 수행하여 획득한 주파수 영역 심볼을 $Y_1(k)$, $Y_2(k)$(k는 부반송파 인덱스)라 할 때 LS 채널 추정 기법에 의한 k번째 부반송파의 채널 추정치 $H_0(k)$는 다음과 같이 정의된다.

$$H_0(k) = \frac{Y_1(k) + Y_2(k)}{2X(k)} \tag{1}$$

여기서 $X(k)$는 사전에 약속된 k번째 부반송파에서의 훈련 신호이다.

$H_0(k)$는 이후 패킷 내에서 수신된 모든 데이터 심볼 $R_i(k)$를 등화하는데 적용된다. 이 때 $R_i(k)$는 한 패킷 내 데이터 영역에서 전송되는 i번째 OFDM 심볼의 k번째 부반송파의 심볼을 의미한다. 등화된 i번째 OFDM 심볼의 k번째 부반송파 심볼은 다음과 같다.

$$\hat{X}_i(k) = Q\left(\frac{R_i(k)}{H_0(k)}\right), \quad i = 1, \cdots, I \tag{2}$$

여기서 $Q(\cdot)$는 〈그림 2〉과 같이 등화된 신호를 원래 성좌점(constellation)으로 디매핑하는 양자화 연산을 의미하여 I는 한 데이터 필드를 구성하는 OFDM 심볼의 개수를 의미한다.

이러한 LS 채널 추정 방법은 시변하지 않는 채널에서는 낮은 계산 복잡도로 우수한 성능을 얻는 좋은 기법일 수 있으나, 차량 환경과 같이 고속이동 상황에서는 채널의 변화를 반영하지 못하기 때문에 패킷의 후반부로 갈수록 심각한 오류를 초래할 수 있다.

2. STA 기법(Spatial Temporal Average)[1]

LS 기반 채널추정의 문제점을 해결하기 위하여 [1]에서는 STA기법을 제안하였다. STA 기법은 특정 i번째 데이터 심볼의 추정 값을 이용하여 지속적으로 채널 추정 값을 업데이트해 나가는 데이터 기반의 채널 추정 기법(data-aided channel estimation)이다. 구체적인 STA 채널 추정과정은 다음과 같이 설명될 수 있다.

$(i-1)$번째에서 추정된 채널값 $H_{i-1}(k)$는 아래와 같이 i번째 수신된 데이터 심볼 $R_i(k)$를 등화하는 데 이용된다.

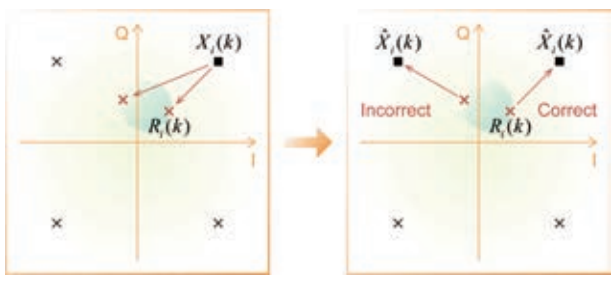
$$\hat{X}_i(k) = Q\left(\frac{R_i(k)}{H_{i-1}(k)}\right),\ i=1,\cdots,I \tag{3}$$

이 때 $i=1$인 경우 $R_1(k)$를 등화하기 위해 사용되는 $H_0(k)$는 식 (1)과 같이 추정된다. 그리고 복원된 데이터 심볼 $\hat{X}_i(k)$는 i번째 심볼에 대한 채널 값을 업데이트하기 위한 데이터 파일럿 신호로 이용된다.

$$\hat{H}_i(k) = \frac{R_i(k)}{\hat{X}_i(k)} \tag{4}$$

이러한 채널 추정 값과 데이터 복원 값의 연쇄적인 업데이트를 통해 시변 채널 환경에서도 채널 추정 오차를 줄일 수 있다. 그러나 변조 심볼 $\hat{X}_i(k)$를 추정하는 과정에서 여전히 채널 추정 오차가 남아있을 뿐만 아니라 잡음으로 인해 디매핑 오차 (demapping error)가 발생하고, $H_i(k)$에도 채널 추정 오차가 반영되게 된다. 따라서 디매핑 오차에 의한 채널 추정 오차를 완화하기 위해서 마지막으로 주파수 영역과 시간 영역에서 순차적으로 추정된 채널 값의 평균을 취하는 smoothing과정이 수행된다[1].

STA 기법은 시간, 주파수 측으로의 평균을 취하는 smoothing과정으로 인해 잡음이 비교적 큰 낮은 SNR (Signal-to-Noise Ratio)에서는 노이즈가 감소 효과가 나타나 비교적 좋은 성능을 보이지만 SNR이 증가하면, 채널 추정 오차에 따른 심볼 간 간섭으로 SNR이 증가해도 오류가 감소하지 않는 오류 플로어(Error Floor) 현상이 발생하는 단점이 있다.



〈그림 2〉 디매핑 과정

3. CDP 기법 (Constructed Data Pilot)[2]

CDP 기법은 시간 영역에서 인접한 두 OFDM 심볼 사이의 채널 상관도가 크다는 특성을 이용하여 채널의 신뢰성 테스트를 통해 디매핑 오류를 최소화 하여 채널을 추정하는 기법이다.

구체적으로 수식 (4)와 같이 STA 방법을 통하여 얻은 채널 추정 값 $\hat{H}_i(k)$을 이용하여 $i-1$번째 수신 심볼 $R_{i-1}(k)$을 다음과 같이 등화 및 디매핑 한다.

$$\hat{X}'_{i-1}(k) = Q\left(\frac{R_{i-1}(k)}{\hat{H}_i(k)}\right) \tag{5}$$

그리고 동일 수신 심볼에 대하여 이전 채널 추정 값인 $H_{i-1}(k)$로 같은 과정을 반복한다.

$$\hat{X}''_{i-1}(k) = Q\left(\frac{R_{i-1}(k)}{H_{i-1}(k)}\right) \tag{6}$$

이 후 시간영역에서 $\hat{H}_i(k)$와 $H_{i-1}(k)$에 대하여 다음과 같은 신뢰성 테스트를 수행 한다.

$$H_i(k) = \begin{cases} \hat{H}_i(k) & ,\ \hat{X}'_{i-1}(k) = \hat{X}''_{i-1}(k) \\ H_{i-1}(k) & ,\ else \end{cases} \tag{7}$$

만일 디매핑 후 복원된 두 데이터 값이 같다면 채널 추정 값 $\hat{H}_i(k)$을 신뢰할 수 있다고 판단하고, 그렇지 않다면 현재 채널 추정 값 $\hat{H}_i(k)$는 버리고 이전 채널 추정값을 현재 채널 추정 값으로 사용하게 된다.

CDP 기법은 STA기법 대비 높은 SNR영역에서 좋은 성능을 얻는 반면 낮은 SNR영역에서는 여전히 STA기법이 우수한 성능을 보인다. 또한 시간 축으로 신뢰성이 없다고 판단되었다고 하더라도, 이전 채널 추정 값을 그대로 사용하기 때문에 시변 하는 채널의 변화를 반영하기 어렵다는 단점이 있다.

4. TRFI 기법 (Time domain Reliability test and Frequency Domain Interpolation)[3]

TRFI 기법은 CDP 기법에서 디매핑 오류가 발생하였을

때 이전 심볼의 채널 값을 현재 채널 추정치로 그대로 사용함으로 발생하는 문제점을 보완하기 위해 제안 된 방법이다. CDP와 달리 TRFI는 신뢰성 테스트 이 후 특정 심볼의 특정 부 반송파에서 추정된 채널이 신뢰성이 결여되었다고 판단되면 채널 추정을 잠시 보류한 후 4개의 파일럿 부 반송파로 추정된 채널값과 신뢰성이 있다고 판단된 부 반송파들의 채널 값들을 이용하여 주파수 측으로 보간(interpolation)을 수행한다. TRFI 채널 추정 알고리즘은 다음과 같이 요약된다.

① 4개의 파일럿 심볼은 수신단에서 이미 알고 있는 심볼로서 파일럿 심볼의 인덱스를 집합 Γ_i에 포함시킨다. 이 때, 집합 Γ_i는 $_i$번째 심볼에서 신뢰성 있는 채널 추정 값의 부반송파 인덱스 집합을 의미한다.

② $_i$번째 심볼에서 데이터 부반송파 인덱스 집합을 Φ_i라 할 때, 집합에 포함되는 모든 원소 $_k$에 대해서 $\hat{X}_{i-1}(k) = \hat{X}'_{i-1}(k)$가 참인지 거짓인지 판별한다. 참인 경우 $H_i(k) = \hat{H}_i(k)$이고, $_k$는 Γ_i에 포함된다. 거짓인 경우 $_k$는 신뢰성 없는 채널 추정 값의 부반송파 인덱스 집합인 Θ_i에 포함된다.

③ 집합 Γ_i에 포함된 $_k$에 대해서는 집합 Γ_i에 속한 부반송파의 채널 추정값을 주파수 영역에서 보간하여 $H_i(k)$를 추정한다.

TRFI 기법은 시간과 주파수 상관 특성을 이용하여 채널 추정 값의 디매핑 오차를 감소시킴으로써 STA대비 SNR이 높은 영역에서 채널 추정 정확도가 향상되고 주파수 상관 특성이 높아지는 장점을 가진다. 특히 CDP와 비교하였을 경우, 64QAM이상의 높은 변조레벨 (혹은 전송률)에서 더 좋은 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 CDP와 마찬가지로 SNR이 낮은 영역에서는 잡음에 의한 디매핑 오차가 커지게 되어 성능 열화가 발생하는 문제점을 가진다.

5. ACE 기법 (Adaptive Channel Estimation)[4]

앞서 설명한 바와 같이 STA 채널 추정기법은 잡음이 강한 Low-SNR에서 우수한 성능을 제공하고, CDP 및 TRFI 채널 추정기법은 높은 SNR에서 좋은 성능을 보인다. 따라서 STA와 TRFI 채널 추정기법중 성능이 우수한 채널 추정기법을 적응적으로 선택하는 ACE(Adaptive Channel Estimation)기법을 통해 낮은 SNR과 높은 SNR 전 영역에서 고른 성능을 얻을 수 있다.

ACE기법은 LTF에서 오류 전력을 계산하여 STA와 TRFI 중 현재 채널환경에 적합한 채널추정 기법을 결정한다. 먼저 두 개의 LTF신호 중 첫 번째 수신신호 $Y_1(k)$를 이용하여 다음과 같이 LS 채널추정한다.

$$H_1(k) = \frac{Y_1(k)}{X(k)} \tag{8}$$

이 후 두 번째 LTF수신신호 $Y_2(k)$에 대하여 각각 STA와 TRFI방식을 이용하여 LTF의 두 번째 심볼에 대한 채널추정 값 $H_{2,STA}(k)$, $H_{2,TRFI}(k)$를 구한다. 다음으로 식 (8)에서 구한 $H_1(k)$와 비교하여 각각 오류전력을 구한다.

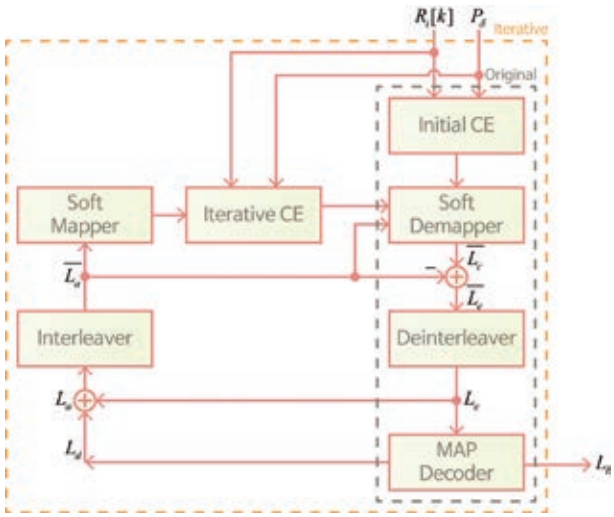
$$Error_{STA} = \sum_{k=1}^{K} |H_1(k) - H_{2,STA}(k)|^2$$

$$Error_{TRFI} = \sum_{k=1}^{K} |H_1(k) - H_{2,TRFI}(k)|^2$$

여기서 오류전력이 낮다는 것은 STA혹은 TRFI를 이용한 채널 추정 값이 비교적 정확함을 의미하므로 우리는 보다 낮은 오류전력을 갖는 기법을 이후 데이터 영역의 신호를 복원하는데 사용하도록 결정할 수 있다. 이러한 과정을 수행한 ACE 채널추정기법의 가장 큰 장점은 기존에 제안된 채널 추정기법에 비해 전체적인 SNR구간에 대해 유연한 성능을 제공하는 장점이 있다. 또한, LTF만을 사용하여 데이터 영역의 채널추정 기법을 결정하기 때문에 수신기의 복잡도가 비교적 낮다. 반면 고속이동에 따른 급격한 시변 채널에서는 오류전력의 정확도가 떨어짐에 따라 선택 오류가 발생할 수 있다.

Ⅳ. Advanced WAVE 채널 추정 기법

본 장에서는 기존의 WAVE채널 추정기법들이 갖는 문제점을 극복하고 고속 이동시에도 높은 데이터 복원 신뢰성을 얻을 수 있는 몇 가지 advanced 채널 추정기법들을 소개한다.



〈그림 3〉 ICED 블록 다이어그램

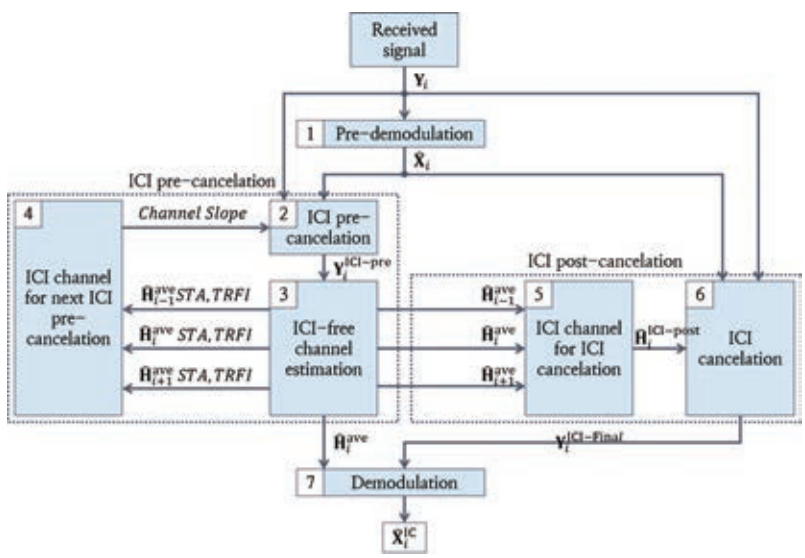
1. 반복적 채널 추정 및 복호 (ICED: Iterative Channel Estimation Decoding) 기법[5]

반복적 채널 추정 및 복호 (이하 ICED)기법은 상대속도가 수백 Km/h에 이르는 고속 환경에서 높은 신뢰성을 얻기 위해 제안된 채널 추정 기법이다. 반복적 채널 추정 기법은 〈그림 3〉에서 보는 바와 같이 초기 채널 추정을 통하여 데이터를 복원하는 것에 그치지 않고 비트단위로 복원된 디코더 출력정보를 다시 활용하여 반복적으로 채널추정에 활용하는 수신단 알고리즘이다. 알고리즘 구현을 위한 각 블록의 역할은 다음과 같다.

① 초기 채널 추정 (Initial CE): 기존에 WAVE 환경에서 제안된 LS, STA, TRFI 등 채널 추정방식을 통하여 초기 채널을 추정한다. 사실 ICED의 성능은 초기 채널 추정 방식에 크게 의존하는 경향을 보이기 때문에 채널 상황에 따라 적절한 초기 채널 추정 방식을 선택하는 것이 매우 중요하다.

② 연판정 디매퍼 (Soft Demapper): 연판정 디매퍼에서는 초기 채널 추정 단계에서 구해진 채널 추정값을 이용하여 수신 신호 $R_i(k)$를 등화하여 비트 단위의 LLR (Log Likelihood Ratio)값을 얻는다. 얻어진 LLR값은 이후 디인터리버(deinterleaver)를 통과하여 원래 송신 부호비트열 순으로 복원 된 후 디코더에 입력된다.

③ 맵 디코더 (MAP Decoder): ICED 기법은 반복적 채널 추정을 위하여 기존의 Viterbi디코더 대신 디매퍼로부터 받은 부호비트에 대한 LLR 값을 사용하여 update 된 부호비트 LLR값을 출력할 수 있는 MAP 디코더를 사용한다. MAP 디코더에서 출력된 부호비트 LLR값은 이 후 인터리버를 통해 다시 비트단위로 뒤 섞인 후 성좌점 신호로 매핑되어 파일럿 신호로 활용된다. MAP 디코더가 반복 단계에 속해 있다면 부호화 비트에 대한 LLR 값이 사전 LLR 값의 기여도를 제거 한 후 인터리버를 통과하게 되



〈그림 4〉 Dual ICIC 기법 블록다이어그램

고 반복이 끝나게 되면 출력 값으로 정보 비트에 대한 LLR 값을 이용하여 경판정을 수행 후 최종 수신 비트를 결정한다.

④ 연판정 매퍼 (Soft Mapper): 인터리버를 통과한 MAP 디코더 출력 LLR 값은 연판정 매퍼에서 성좌점에 해당 하는 심볼 값으로 매핑이 된다. 이 경우 각 LLR값이 가진 비트 단위의 확률 값을 이용하여 성좌점의 평균치로 매핑이 가능하다. 이러한 매핑방식을 연판정 매퍼라고 한다. 이렇게 구해진 심볼값들은 반복적 채널 추정 단계에서 파일럿 데이터 심볼로 사용된다.

⑤ 반복적 채널추정 (Iterative CE): 반복적 채널 추정 단계에서는 연판정 매핑 단계에서 복원된 데이터 심볼을 기존 파일럿 신호와 함께 채널 추정에 활용된다. 반복적 채널 추정 단계에서 사용되는 채널 추정 방법은 모든 부 반송파가 파일럿으로 채워져 있는 점을 이용하여 초기채널추정 기법보다 더욱 성능이 좋은 MMSE, MLE등의 기법을 사용 하여 반복적 채널 추정을 수행한다.

ICED기법은 채널 추정과 데이터 디코딩을 반복적으로 수행함으로써 디코더의 오류정정 이득을 다시 채널추정 이득으로 활용하여 성능을 향상시키는 기법이다. 시뮬레이션 결과를 통하여 다시 소개하겠지만 ICED기법은 다른 WAVE채널 추정 기법대비 매우 우수한 성능을 얻을 수 있다. 하지만, 전체 패킷에 대하여 디코딩을 여러 번 반복적으로 수행하여야하기 때문에 수신 지연이 발생할 수 있는 문제점이 남아있어 수신단 복호기의 신뢰성을 유지하면서도 복잡도를 낮추는 연구가 추가적으로 필요하다

2. Dual ICI Cancellation (Dual ICIC) 기법

ICED를 포함한 기존의 모든 WAVE 채널 추정 기법들은 최소한 하나의 OFDM심볼 내에서는 채널이 변하지 않는다고 가정한다. 하지만, 차량 간 통신환경에서는 상대속도가 200km/h정도만 되어도 한 OFDM심볼 내에서 극심한 채널 변화를 겪기 때문에 부 반송파 간 직교성을 보장받지 못한다. 이는 곧 부 반송파 간의 간섭으로 이어지며 WAVE시스템의 성능 열화의 주된 원인이 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 기존에 개발된 다양한 ICI 제거 기법 중 dual ICI 제거 기법[6]을 WAVE시스템의 패킷 구조에 적합하도록 개량하여 적용 수 있다.

i번째 OFDM심볼의 k번째 부 반송파에서 ICI를 고려한 수신 심볼을 수식적으로 표현하면 일반적으로 다음과 같다. ICI제거 기법의 주요 목적은 이 수식에서 간섭으로 작용하는 두 번째 항 $H_i^{ICI}(k)X_i(k)$를 제거하는 것이다.

$$Y_i(k) = H_i^{ave}(k)X_i(k) + H_i^{ICI}(k)X_i(k) + N_i(k)$$

Dual ICIC 기법은 〈그림 4〉와 같이 먼저 수신 심볼 $Y_i(k)$에서 ICI성분이 일 부 제거된 $Y_i^{ICI-pre}(k)$값을 구하고 기존 WAVE환경에서 제안된 채널 추정 기법을 적용하여 채널 추정치를 알아내는 pre-ICIC단계와 인접 OFDM 심볼들의 채널 추정치의 기울기 정보를 이용하여 ICI를 다시 제거해 주는 post-ICIC 단계로 나뉜다.

① Pre-ICIC: 모든 i와 k에 대하여 Pre-ICIC이후 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Y_i^{ICI-pre}(k) = Y_i(k) - C\hat{A}_{i-1}(k)\hat{X}_i(k)$$

여기서 C는 시간영역에서의 샘플 인덱스 정보를 나타낸다 (자세한 내용은 [6]을 참조). $Y_i(k)$는 i번째 OFDM심볼의 k번째 부 반송파에서 수신된 수신신호를 나타내고, $\hat{X}_i(k)$는 이전 채널 추정 값을 이용하여 복원한 현재 데이터 추정 값이며, $\hat{A}_{i-1}(k)$는 다음과 같이 정의되는 이전 OFDM 심볼들의 채널의 기울기를 나타낸다.

$$\hat{A}_{i-1}(k) = \frac{\hat{H}_{i-1}^{ave}(k) - \hat{H}_{i-2}^{ave}(k)}{N_{tot}}$$

여기서 N_{tot}은 한 OFDM심볼 내 총 샘플 수를 의미한다. 이와 같이 Pre-ICIC과정을 통하여 수신신호에서 ICI값을 일부 제거해 줄 수 있다.

② Post-ICIC: 이전 Pre-ICIC 단계에서 구해진 인접 심볼들 간의 채널 기울기를 이용하여 다시 Post-ICIC를 수행할 수 있다. 예를 들어 i번째 OFDM심볼의 k번째 부반송파에 해당하는 채널 값을 다음과 같이 다시 계산할 수 있다.

$$H_i^{ICI-post}(k) = C_{pre}\frac{\hat{H}_i^{ave}(k) - \hat{H}_{i-1}^{ave}(k)}{N_{tot}} + C_{post}\frac{\hat{H}_{i+1}^{ave}(k) - \hat{H}_i^{ave}(k)}{N_{tot}}$$

여기서 $H_i^{ICI-post}(k)$는 수신 심볼 $Y_i(k)$에 작용하는 ICI의 채널성분이 되며 다음과 같이 ICI성분을 제거하여 $Y_i^{ICI-Final}(k)$을 구한다.

$$Y_i^{ICI-Final}(k) = Y_i(k) - H_i^{ICI-post}(k)X_i(k)$$

마지막으로 ICI가 제거된 수신신호 $Y_i^{ICI-Final}(k)$를 $H_i^{ave}(k)$로 등화한 후 추정 심볼 $\hat{X}_i(k)$값을 최종 도출한다.

3. MRC(Maximal-ratio combining) 수신 다이버시티를 이용한 채널추정 기법

기존 WAVE 규격은 단일 안테나를 기반으로 개발되었기 때문에 대부분의 연구는 단일 안테나 환경에서 수행되었다. 하지만 최근 고속이동에 대한 신뢰성 향상 및 전송률 증가에 대한 요구사항이 증가함에 따라 다중안테나를 사용하여 성능을 향상시키는 노력이 많이 시도되고 있다. 본 절에서는 수신단에서 다중 안테나를 사용할 경우 기존 WAVE 채널 추정의 성능을 비약적으로 향상시킬 수 있음을 보인다.

수신단에서 다중안테나를 사용하여 다이버시티 이득을 얻는 대표적인 기법으로 MRC가 있다. WAVE채널 추정 시 초기 채널 추정 이후 신호를 복원할 경우 다이버시티 이득에 의하여 복원된 신호의 신뢰성이 향상될 수 있다. 이러한 다이버시티 이득은 STA 등 data aided 채널 추정 방식을 사용할 경우 채널 추정 이득으로 활용될 수 있기 때문에 이러한 과정을 반복할 경우 ICED와 같이 상당한 신뢰성 향상을 꾀할 수 있다.

〈표 2〉 Crossing N-LOS

	Power	Delay	Doppler	Profile
Tap1	0 dB	0 ns	0 Hz	Static
Tap2	-3 dB	267 ns	295 Hz	halfBT
Tap3	-5 dB	400 ns	-98 Hz	halfBT
Tap4	-10 dB	533 ns	591 Hz	halfBT

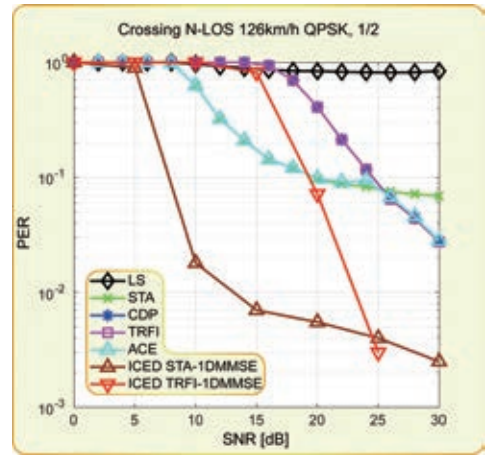
〈표 3〉 252km/h Highway N-LOS

	Power	Delay	Doppler	Profile
Tap1	0 dB	0 ns	0 Hz	Static
Tap2	-2 dB	200 ns	689 Hz	halfBT
Tap3	-5 dB	433 ns	-492 Hz	halfBT
Tap4	-7 dB	700 ns	886 Hz	halfBT

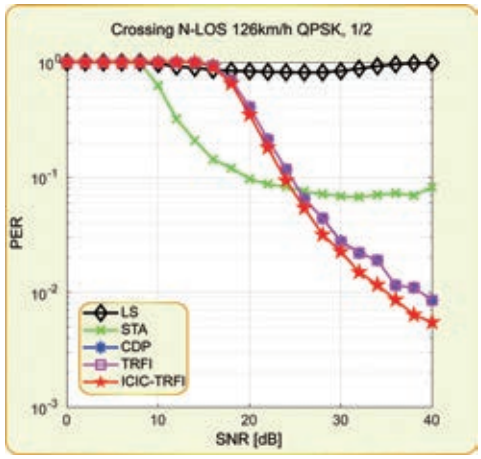
Ⅴ. 모의실험 결과 및 분석

본 장에서는 Cohda Wireless[7]사에서 제시한 차량 간 채널 환경의 실측 파라메터를 사용하여 다양한 채널 추정 방식의 성능을 모의실험 한 결과를 소개한다. 본 고에서는 간략화를 위하여 여러 채널 환경 중에서도 실제적으로 의미가 있는 NLOS환경을 고려하였고 상대속도 126km/h의 도심 교차로 환경과 상대속도 252km/h의 고속도로 환경을 가정하였다. 변조방식과 코드율은 각각 QPSK와 1/2로 고정하여 사용하였으며 데이터필드의 OFDM심볼은 총 100개 즉 패킷 당 600 data bytes를 가정하였다.

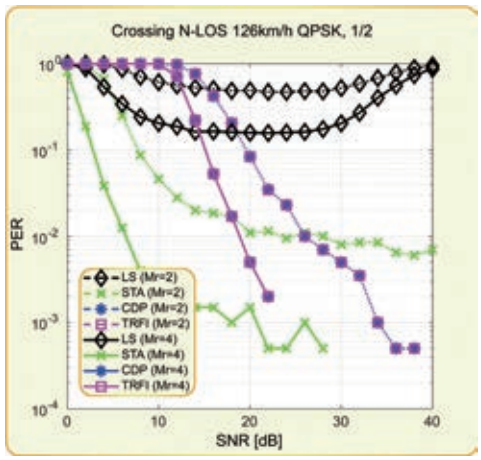
먼저 〈그림 5-7〉은 126km/h 교차로 환경에서 다양한 채널추정 방식의 PER성능을 보여준다. 모든 경우에 있어서 LS기법을 포함한 기존 WAVE채널 추정방식에 비하여 ICED, ICIC, MRC 등 advanced 채널 추정 방식의 성능이 월등히 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 또한 ACE기법의 경우 LTF만으로도 상황에 맞는 채널추정 방식을 적절히 선택해 낼 수 있는 것을 확인하였다.



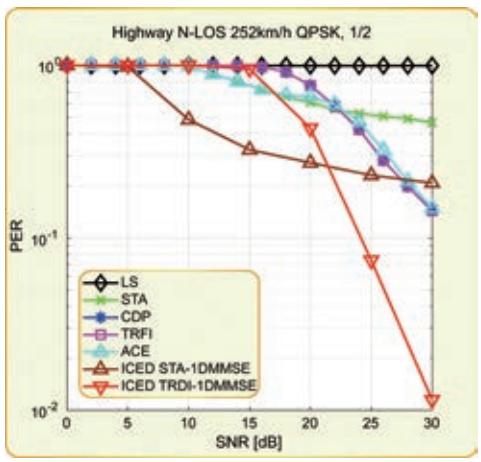
〈그림 5〉 기존 WAVE 채널추정 vs. ICED



〈그림 6〉 기존 WAVE 채널추정 vs. ICIC

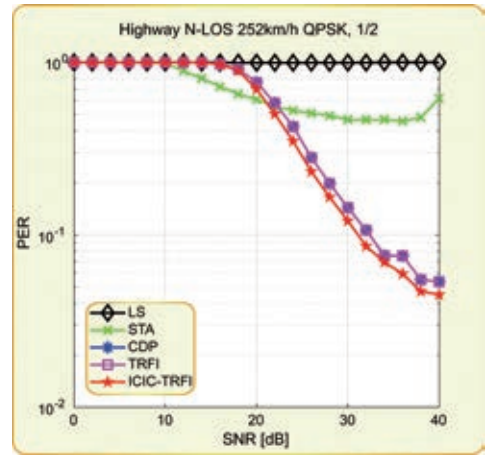


〈그림 7〉 MRC 채널 추정기법의 PER 성능

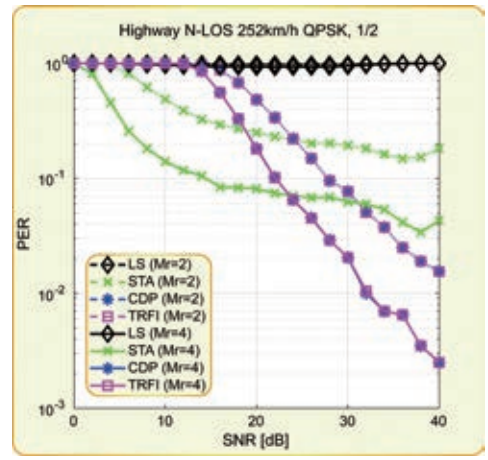


〈그림 8〉 기존 WAVE 채널추정 vs. ICED

〈그림 5〉는 기존 채널 추정 방식과 ICED방식의 성능을 비교한 그림이다. 여기서 우리는 ICED기법의 초기 채널추정은 STA와 TRFI를 그리고 반복단계 채널추정으로 1-dimensional minimum mean squared error (1DMMSE) 방식을 사용하였다. 재미있게도 ICED기법의 전체적인 성능은 향상되지만 초기 채널 추정기법의 경향을 그대로 따르는 것을 확인할 수 있다. 기존의 TRFI 채널 추정 방식은 원하는 성능을 얻기 위해 매우 높은 SNR을 요구하지만 TRFI기반의 ICED기법의 경우 전체적인 성능 향상에 따라 실용적인 SNR영역에서도 좋은 성능을 기대할 수 있게 되었다. 하지만 MAP 디코더의 사용으로 수신단의 높은 복잡성을 요구하기 때문에 복잡성을 낮추고 채널 추정의 오류를 최소화하는 채널 추정기법이 추가적으로 연구될 필요가 있다.



〈그림 9〉 기존 WAVE 채널추정 vs. ICIC



〈그림 10〉 MRC 채널 추정기법의 PER 성능

〈그림 6〉은 기존 채널 추정 기법과 TRFI에 기반한

ICIC기법의 성능을 주로 비교한다. 그림에서 확인할 수 있듯이 기존 TRFI 기법에 비하여 ICI를 제거한 후 채널을 추정할 경우 최대 3~5dB가량의 성능 이득을 얻을 수 있다. 비록 이 그래프에서는 보이지 않았지만 ICIC기법과 ICED기법을 결합하였을 경우 더욱 뛰어난 시너지 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

〈그림 7〉은 수신단에서 다중 안테나 다이버시티 기법을 사용하였을 경우 기존 채널 추정기법 대비 얻을 수 있는 이득을 보여준다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 LS방식은 다중안테나 사용으로 얻을 수 있는 이득이 제한적인 반면 STA와 TRFI기법의 경우 수신단에서 다중안테나를 이용한 다이버시티를 활용할 경우 의미있는 성능 이득을 얻을 수 있다. 특히 실용적인 SNR에서 STA기법의 경우 0.01%에 가까운 PER성능을 얻을 수 있으며, ICED기법과 결합할 경우 더욱 큰 폭의 SNR이득을 얻어낼 수 있을 것이다.

〈그림 8-10〉은 252km/h 고속도로 NLOS환경에서 성능그래프를 보여준다. 전체적으로 도심 교차로 환경에 비하여 도플러효과로 인한 성능열화를 확인할 수 있다. ACE기법의 경우도 에러 전력의 부정확성으로 인해 선택오류가 일부 발생할 수 있음을 보여준다. 주목할 만한 부분은 기존 실내 환경의 LS채널 추정방식은 고속도로 NLOS환경에서 오류확률이 1로 수렴하기 때문에 사용이 불가능한 것으로 확인된다. 반면 TRFI를 기반으로 한 ICED, ICIC, MRC 채널추정 기법들의 경우 고속도로 NLOS환경에서도 상당한 수준의 데이터 신뢰성을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

Ⅵ. 결 론

본 논문은 차량 통신 시스템이 요구하는 두 가지 조건 중 주로 신뢰성 향상에 중점을 두고, 그 동안 연구되어온 다양한 WAVE 채널 추정 기법들에 대하여 살펴보았다. 먼저 고속이동하는 차량 간 통신환경에서 발생할 수 있는 기존 WAVE 채널 추정방식들의 문제점을 분석하고, 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 제안된 advanced WAVE채널 추정기법들에 대하여 소개하였다. 또한 실측 채널을 바탕으로 한 모의실험 결과를 통해 성능이득과 복잡도의 상관관계 등을 분석하였고 advanced WAVE채널 추정기법들의 실현 가능성을 제시하였다. 향 후 WAVE 시스템에서는 신뢰성 뿐 아니라 지연시간을 줄이는 것이 또 하나의 핵심 이슈가 될 것으로 예상된다. 이러한 두 가지 요구조건을 모두 만족시키기 위해서는 물리계층뿐 아니라 여러 계층으로 이루어져 있는 통신 기술을 단순화시키고 각 계층에서의 오류를 최소화 하는 등의 통합적 기술 혁신이 필요할 것이다.

Ⅶ. Acknowledgement

본 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 신진연구자지원사업 (과제번호: 2015R1C1A1A02036927, 다중 사용자 무선 채널에서 물리계층보안을 위한 격자보안부호 개발 연구)의 지원과 정보통신기술진흥센터 (과제번호: B0722-16-0006, 암호와 물리계층보안을 결합한 IoT 네트워크 보안 기술 개발)의 지원 및 2017년도 한국교통대학교의 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] J. A. Fernandez, K. Borries, L. Cheng, B. V. K. Vijaya Kumar, D. D. Stancil, and F. Bai, "Performance of the 802.11p Physical layer in vehicle-to-vehicle environments," IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 61, no. 1, pp. 3-14, Jan. 2012.

[2] Z. Zhao, X. Cheng, M. Wen, C.-X. Wang, and B. Jiao, "Channel estimation schemes for IEEE 802.11p standard," IEEE Intell. Transp. Syst. Mag., vol. 5, no. 4, pp. 38-49, 2013.

[3] Y.K. Kim, J.M. Oh, Y.H. Shin, C. Mun, "Time and Frequency Domain Channel Estimation Scheme for IEEE 802.11p," proceeding of 2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC), pp. 1085-1090, Oct. 8-11, 2014. Qingdao, China.

[4] 최주영, "IEEE 802.11p 물리 계층과 매체 접근 제어 계층에 대한 연구", 학위논문(석사) 한국교통대학교 일반대학원, 2016.

[5] 임성묵, 송창익 "IEEE 802.11p 기반 차량 간 통신 시스템에서

패킷 에러율 향상을 위한 반복적 채널 추정 기법," 한국정보기술학회 논문지, vol. 14, no. 12, pp. 79–88, Dec., 2016.

[6] Kwak Kyungchul, Lee Sungeun, Min Hyunkee, Choi Sooyong, Hong Daesik, "New OFDM channel estimation with dual-ICI cancellation in highly mobile channel", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 10, pp. 3155–3165, 2010.

[7] Malik Kahn, "IEEE 802.11 Regulatory SC DSRC Coexistence Tiger Team – V2V Radio Channel Models," Feb. 2014.

백승환

• 2012년 3월~현재 한국교통대학교 정보통신공학과 학사과정

〈관심분야〉
무선통신, V2X, 채널추정, MIMO

한승호

• 2013년 3월~현재 한국교통대학교 정보통신공학과 학사과정

〈관심분야〉
무선통신, V2X, 채널추정, MIMO

송창익

• 2001년 3월~2007년 8월 고려대학교 전자전기전파공학부 학사
• 2007년 9월~2012년 8월 고려대학교 전자전기공학과 박사
• 2012년 9월~2013년 4월 고려대학교 정보통신기술연구소 연구교수
• 2013년 5월~2014년 8월 Imperial College London 박사후과정
• 2014년 9월~현재 한국교통대학교 정보통신로봇공학전공 조교수

〈관심분야〉
5G이동통신, 무선전력전송, C-ITS, 물리계층보안