

이중 선택적 CP-OFDM의 압축 센싱 기반 채널 추정을 위한 효율적 파일럿 패턴 생성 방법

이혁연*, 김재석^o

Efficient Pilot Pattern Placement for Compressed Sensing-Based Channel Estimation in Doubly-Selective CP-OFDM Systems

Hyukyeon Lee*, Jaeseok Kim^o

요 약

압축 센싱 기반 채널 추정은 희소성을 갖는 이중 선택적 채널에 효과적이나, 파일럿 최적화를 필요로 한다. 제안하는 기법은 전역적 상호 간섭성이라는 지표를 제시하며, 이를 기반으로 기존의 등 간격 파일럿 패턴을 활용하며 압축 채널 추정을 위한 제한된 수의 일부 파일럿 톤을 추가한다. 모의실험 결과, 제안 기법은 약 3%의 파일럿 오버헤드만으로 임의 선택 패턴을 뛰어넘는 성능을 나타낸다.

Key Words : CP-OFDM, Compressed sensing, Pilot placement, Channel estimation, doubly-selectivity

ABSTRACT

Compressed sensing-based channel estimation is effective for doubly-selective and sparse channel, but it requires the optimization of the pilot pattern. The proposed scheme introduces an indicator of overall mutual coherence, and utilizes the existing equi-spaced pattern and adds a limited number of

pilot tones for compressed channel estimation. The simulation results shows that the proposed scheme outperforms the random pilot pattern with only about 3% pilot overhead.

1. 서 론

Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (CP-OFDM) 시스템은 3GPP 이동 통신^[1], IEEE 무선 랜, Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial (ISDB-T) 등과 같은 대부분의 시스템에 적용되고 있다. 5G NR^[1]에서는 CP-OFDM을 표준 액세스 방식으로 채택하였으며, 하향 링크뿐만 아니라 상향 링크에서도 CP-OFDM 전송 방식을 지원한다. 이러한 CP-OFDM 시스템은 무선 채널 통과에 의한 크기와 위상의 감쇄를 겪게 되므로 채널 추정을 통하여 이를 보상해주어야 한다. 또한 최근 여러 연구에서 무선 채널이 희소(sparse) 특성을 가지며, 밀리미터파 대역 및 고속 이동 환경에서는 희소성 및 이중 선택적 특성 (doubly selectivity)을 갖는다는 것이 알려져 있다^[2,3]. 이러한 환경에서 기존의 선형 채널 추정 방식을 적용할 경우 비효율적이며 성능이 크게 열화되게 된다. 이를 극복하기 위하여 압축 센싱 (compressed sensing) 기반 채널 추정 기법^[2-4]이 주목받고 있다. 압축 센싱 이론에 따르면, 신호를 Nyquist rate 이상으로 표본화하지 않더라도 완전하게 신호를 재현할 수 있다. 이를 채널 추정 문제에 적용할 경우 제한된 수의 유의미한 채널 계수를 갖는 희소 무선 채널 환경에서 큰 파일럿 오버헤드가 없이도 채널을 효과적으로 복원해낼 수 있게 된다.

그러나 압축 센싱 기반 채널 추정을 효과적으로 수행하기 위해서는 적절한 파일럿 패턴의 배치가 이루어져야 한다^[2,5]. 이론적으로 restricted isometry property (RIP)를 만족하는 파일럿 패턴이 최적이며, 임의 선택된 위치의 파일럿 톤들이 RIP를 만족할 가능성이 높다는 것이 알려져 있다.^[2,5] 그러나, 임의 선택 과정의 구현이 어렵고 실질적 시스템에서는 높은 전력과 복잡도를 갖는 압축 센싱 기법은 이중 선택적 특성이 나타나는 고속 이동 환경이나 고주파 대역 등

* 본 연구는 삼성전자 시스템 LSI 사업부의 지원을 받아 수행되었습니다.

※ 본 연구는 또한 2019년 연세대학교 대학원 연구경쟁력 강화사업에 의한 연구 장학금 지원에 의하여 수행되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-8114-1336)Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, hyukyeon@yonsei.ac.kr, 학생(박사), 정회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-2533-9292)Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, jaekim@yonsei.ac.kr, 정교수, 정회원

논문번호 : 202001-001-A-LU, Received January 2, 2020; Revised January 17, 2020; Accepted January 17, 2020

표 1. 제안하는 압축 센싱 기반 채널 추정을 위한 파일럿 패턴 생성 알고리즘
 Table 1. Proposed pilot pattern placement algorithm for compressed sensing-based channel estimation

Step	Description
Input signals	Current system pilot pattern \mathbf{P} , Number of pilots to be added P_{CS} , Maximum numbers of inner iterations $N_{\max 1}, N_{\max 2}$
1	Calculate $\nu(\boldsymbol{\Theta})$ for current system pilot pattern \mathbf{P}
2	for $i = 1 : N_{\max 1}$ (line 2~7 : 1 st search)
3	Generate random $N_B \times P_{CS}$ pilot patterns $\mathbf{P}_{CS,i}$
4	Calculate $\nu(\boldsymbol{\Theta}_{CS,i})$ for given pattern $[\mathbf{P}_{CS,i}, \hat{\mathbf{P}}]$
5	if $\nu(\boldsymbol{\Theta}_{CS,i}) < \nu(\boldsymbol{\Theta}_{CS,i-1})$
6	$\hat{\mathbf{P}}_{CS} = \mathbf{P}_{CS,i}$
7	endif and endfor
8	Randomly change $N_{\max 2}$ tones of a pattern $\hat{\mathbf{P}}_{CS}$, recalculate $\nu(\boldsymbol{\Theta})$ and pilot tone search (line 8 : 2 nd search)

에서 선택적으로 적용되어야 한다. 따라서 일반적인 채널 상황에서, 압축 센싱 기반 채널 추정을 위하여 다중 사용자 및 안테나와 채널 특성 등 다양한 시스템 파라미터를 고려한 파일럿 패턴을 항상 새롭게 구성하는 것은 복잡도가 매우 높으며 비효율적이다.

본 논문에서는 CP-OFDM 시스템에서의 압축 센싱 기반 이중 선택적 채널 추정을 위한 효율적인 파일럿 패턴 생성 알고리즘을 제안한다. 먼저 이중 선택적 채널 환경을 위한 전역적 상호 간섭성 (overall mutual coherence)라는 지표를 새롭게 제안한다. 이를 기반으로, 기존 등 간격 파일럿 패턴에서 전역적 상호 간섭성을 극대화할 수 있는 일부 파일럿 톤을 시스템 파라미터를 고려하여 적응적으로 추가함으로써 낮은 복잡도로도 높은 성능을 얻을 수 있도록 하였다. 모의실험 결과, 제안하는 기법은 약 3%의 파일럿 오버헤드 만으로도 임의의 선택 파일럿 패턴을 뛰어넘는 높은 성능을 얻어내는 것을 확인하였다.

II. 제안하는 파일럿 패턴 생성 기법

2.1 시스템 모델 및 파일럿 패턴 생성 문제

본 논문에서는 N_K 개의 부반송파 및 N_p 개의 파일럿을 가지는 CP-OFDM 시스템을 가정한다. 최대 L 채널 지연을 갖는 이중 선택적 페이딩 하에서 N_B 개의

OFDM 심볼이 전송된다. 또한, 각 심볼에 대한 파일럿 위치는 $\mathbf{P}^b = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_p}] \in N^{1 \times N_p}$ 와 같이 나타낼 수 있으며, N_B 개의 전체 심볼에 대한 파일럿 패턴은 $\mathbf{P} = [\mathbf{P}^1, \mathbf{P}^2, \dots, \mathbf{P}^{N_B}] \in N^{N_p \times N_B}$ 와 같이 나타낼 수 있다. 현재 대부분의 무선 통신 표준은 최적의 선형 채널 추정 성능을 고려하여 주파수 사이의 간격으로 등 간격(N_K/N_p)을 사용한다.

이어서, 이중 확산적 채널 모델의 임펄스 응답은

$$h(t, \tau) = \sum_{l=1}^{L_p} a_l \delta(\tau - \tau_l) e^{-2j\pi v_l t}$$

이다. 여기서 각각 l 번째 경로에 대하여 a_l 은 감쇄, τ_l 은 지연, v_l 은 도플러 이동, L_p 는 총 전파 경로의 수를 나타낸다. 이를 기저 확장 모델 및 최소 확장 계수를 활용하여 시간-주파수 2차원 영역으로 표현한 후, 이중 선택적 채널 추정 문제를 압축 센싱 문제로 $\mathbf{h}_p = \boldsymbol{\Theta} \mathbf{x} + \mathbf{z}$ 와 같이 변환할 수 있다. 이 때, \mathbf{h}_p 는 파일럿 톤에서의 채널 계수를 의미하며, $\boldsymbol{\Theta}$ 는 이차원 이산 푸리에 변환 행렬로부터 생성된 측정 행렬을 나타낸다. 또한 \mathbf{z} 는 잡음 벡터를 나타낸다.

위와 같은 압축 센싱 기반 채널 추정에서 최적의 파일럿 패턴은 RIP를 만족하는 파일럿 톤을 선택하여 구성할 수 있다. 그러나 RIP의 만족 여부를 판단하는 것은 복잡도가 매우 높으며, 대신 임의의 선택된 위치의 파일럿이 만족 가능성이 높다는 것이 알려져 있다. 또한 RIP의 충분 조건인 상호 간섭성^[2]을 활용하는 방법이 알려져 있다. $1 \leq s, t \leq L$ 이며, $s \neq t$ 인 i, j 에 대하여 상호 간섭성은 $\mu(\boldsymbol{\Theta}^b) = \max_{s,t} |\theta_{s,i}^b \theta_{t,i}^b| / \|\boldsymbol{\theta}_s^b\|_2 \cdot \|\boldsymbol{\theta}_t^b\|_2$ 와 같이 정의될 수 있다. 그러나 상호 간섭성을 활용하는 기법의 경우, $N_K C_{N_p}$ 개의 가능한 총 파일럿 조합 중 최적의 값을 찾아내는 것을 고려해야 하며, 다중 안테나 및 다중 사용자 환경에서는 복잡도가 크게 증가하게 된다. 이로 인해 채널 상황 및 파일럿 오버헤드와 수신 성능의 트레이드-오프를 고려한 유연하고 적응적인 파일럿 패턴 생성이 어렵다. 또한 단일 심볼의 파일럿 패턴만을 고려하여 이중 선택적 페이딩 환경에서의 성능 손실이 발생할 수 있다.

2.2 제안하는 파일럿 패턴 생성 기법

우리는 이중 선택적 채널 추정을 위한 전역적 상호 간섭성(overall mutual coherence)라는 지표를 새롭게 제안한다. 제안하는 시스템 모델에서는 2.1에서 언급된 상호 간섭성 $\mu(\boldsymbol{\Theta})$ 를 단순화한 푸리에 행렬을 이

용하여 $1 \leq m \neq n \leq N_K$ 에 대하여

$$\mu(\Theta) = \max \frac{\left| \sum_{i=1}^{N_P} |p(\lambda_i)|^2 e^{-j2\pi\lambda_i(m-n)/N} \right|}{\left| \sum_{i=1}^{N_P} |p(\lambda_i)|^2 \right|} \text{로 나타}$$

낼 수 있다. 여기에서 각 파일럿 송신 전력 $|p(\lambda_i)|^2 = 1$ 로 동일하다고 가정하고 서로 다른 OFDM 심볼의 파일럿 패턴을 함께 고려하여 제안하는 전역적 상호 간섭성 지표는

$$\nu(\Theta) = \sum_{b=1}^{N_B} \max \sum_{l=1}^{N_P+N_{CS}} e^{-j2\pi(P_l-1)(t-s)/N_K} \text{와 같이 정}$$

의한다. 2.1에서 언급된 상호 간섭성 $\mu(\Theta)$ 는 단일 OFDM 심볼 내에서의 최적화만을 수행하여 이중 선택적 환경에서 성능 하락이 나타날 수 있다. 이와 달리, 제안하는 전역적 상호 간섭성 지표는 시간 영역에서 N_B 개의 OFDM 심볼을 함께 고려하여 상호 간섭성 지표를 함께 더해 이중 선택적 채널 추정에도 효율적인 파일럿 톤을 생성할 수 있도록 하였다. 제안하는 전역적 상호 간섭성을 활용하여 새롭게 생성하는 $N_B \times P_{CS}$ 개의 파일럿 톤을 $N_B \times N_K$ 개의 부반송파 위치를 모두 고려하여 유연하게 배치 및 최적화할 수 있게 된다.

제안하는 전역적 상호 간섭성을 기반으로 하는 파일럿 패턴 생성 기법은 표 2와 같다. 제안 기법은 모든 패턴에 대한 파일럿 톤을 새롭게 생성하지 않고도 낮은 복잡도 및 낮은 파일럿 오버헤드로도 높은 성능을 얻어낼 수 있도록 하였다. 제안 기법의 1차 탐색 단계에서는 임의로 생성된 $N_{\max1}$ 개의 패턴 중, 기존 등 간격 파일럿 패턴인 P 와 결합하여 가장 낮은 $\nu(\Theta)$ 를 갖는 패턴을 찾게 된다. 먼저 기존 패턴에 대한 $\nu(\Theta)$ 를 계산한 후, 내부 반복에서는 새로 생성되는 파일럿 패턴에 대해서만 $\nu(\Theta)$ 를 계산해 추가한다. 새로 생성된 패턴의 $\nu(\Theta_{CS_i})$ 값이 이전 반복까지의 최소 $\nu(\Theta_{CS_{i-1}})$ 값보다 작을 경우, 값을 업데이트하고 파일럿 패턴을 변경한다. 이어지는 2차 탐색 단계에서는 1차 탐색에서 선택된 패턴의 각 P_{CS} 개의 톤에 대하여 \hat{P}_{CS} 와 겹치지 않는 임의의 $N_{\max2}$ 개의 셋이 생성된다. 각각의 셋에 대하여 $\nu(\Theta)$ 를 비교하여 더 낮은 경우 파일럿 톤의 교체 및 $\nu(\Theta)$ 값의 업데이트를 수행한다. 제안 기법에서는 추가할 파일럿 톤의 수 N_{CS} 및 최대 반복 횟수를 적응적으로 선택하여 시스템 성능 및 복잡도를 고려할 수 있도록 하였다.

표 2. 모의 실험을 위한 CP-OFDM 시스템 파라미터
Table 2. Parameters for the simulated CP-OFDM systems

Item	Value
Carrier frequency	3.5 GHz
Bandwidth	7.68 MHz
Number of subcarriers per OFDM symbol	$N_K = 512$
Number of symbols per channel estimation slots	$N_B = 3$
Length of cyclic prefix	$N_{CP} = 60$
Subcarrier spacing	15 KHz
Number of pilot tones per symbol	$N_P = 64$

III. 모의실험 및 복잡도 비교

성능 평가를 위해 표 2의 파라미터를 기반으로 모의 실험을 수행하였다. 제시된 파라미터는 5G numerology 중 mini-slot 시나리오를 일부 고려하여 설정되었다. 채널 모델은 표 2를 기반으로 설정한 Geometry-Statistic 기반의 IImnProp 이중 선택적 채널 모델⁶⁾이 사용되었다. 제안 알고리즘의 반복 연산 수는 $N_{\max1} = 10^4, N_{\max2} = 10^2$ 로 설정하였다.

그림 1은 MSE (mean squared error) 및 BER (bit error rate) 성능 평가를 나타낸다. 우선, 등 간격 파일럿 패턴에서는 기존의 선형 추정 기법 (LS : least square) 및 입축 센싱 기법 (OMP : orthogonal matching pursuit) 모두 성능이 크게 열화된다. 또한 등 간격 톤 16개를 더 추가해도 큰 개선을 확인할 수 없다. 반면, RIP를 충족한다고 알려진 임의의 선택 배치에 OMP를 적용하였을 경우 높은 성능을 나타낸다. 제안 알고리즘은 $P_{CS} = 12$ 에서 크게 향상된 성능을 나타내며, 전체 N_K 대비 약 3%의 오버헤드를 갖는 $P_{CS} = 16$ 에서는 임의의 패턴의 성능을 뛰어넘는 것을 볼 수 있다. 그림 2는 $E_b/N_0 = 30$ dB에서 P_{CS} 의 값에 따른 제안 알고리즘의 MSE 성능 향상 변화를 나타낸다. 낮은 P_{CS} 에서는 성능 향상이 크지 않으나 $P_{CS} = 4$ 에서 이미 등 간격 톤 16개를 추가한 패턴의 성능을 뛰어넘는 것을 확인할 수 있다. 또한 $P_{CS} = 13$ 부근에서 임의의 패턴과 동등한 성능을 얻으며, P_{CS} 의 값이 증가할수록 성능이 꾸준히 향상되는 것을 볼 수 있다. 파일럿 수의 증가는 압축 센싱 이론에서 더 많은 측정값을 가져오는 것과 동등하며, 제안 알고리즘을 통해 더 많은 수의 파일럿을 추

IV. 결론

본 논문에서는 이중 선택적 CP-OFDM 시스템의 압축 센싱 채널 추정을 위한 파일럿 패턴 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘은 전역적 상호 간섭성을 기반으로 기존의 등 간격 파일럿 패턴을 활용하여 적응적으로 파일럿 패턴을 추가한다. 모의실험 결과 제안 기법은 약 3%의 파일럿 오버헤드로도 임의 패턴을 뛰어넘는 높은 성능을 얻어내는 것을 확인하였다.

References

- [1] A. F. Demir, et al., "Waveform design for 5G and beyond," *5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management*, 2017.
- [2] S. Xiao, Z. Jin, Y. Chen, Y. Li, and Y. Su, "Joint mutual coherence and total coherence pilot design for OFDM channel estimation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 144536-144547, 2019.
- [3] K. Kim and M. Jang, "Compressed channel sensing by low-complexity punctured kernel-based OMP in OFDM systems," *J. KICS*, vol. 43, no. 2, pp. 230-232, Feb. 2018.
- [4] Y. Zhang, R. Venkatesan, O. A. Dobre, and C. Li, "Novel compressed sensing-based channel estimation algorithm and near-optimal pilot placement scheme," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 4, pp. 2590-2603, Apr. 2016.
- [5] M. Khosravi and S. Mashhadi, "Joint pilot power & pattern design for compressive OFDM channel estimation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 1, pp. 50-53, Jan. 2015.
- [6] G. Del Galdo, "Geometry-based channel modeling for multi-user MIMO systems and applications," Ph.D. Thesis, Technische Universität Ilmenau, Feb. 2007.

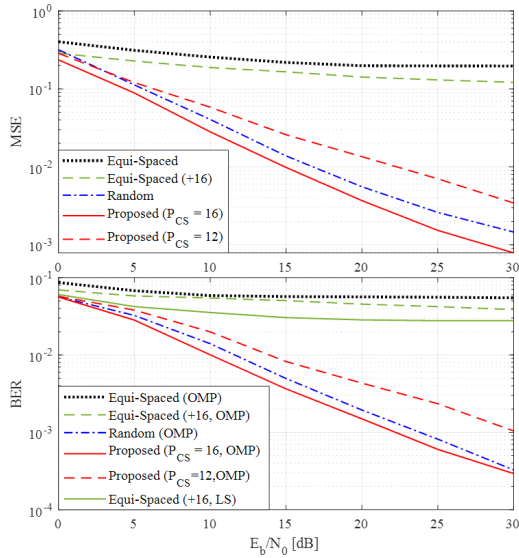


그림 1. MSE 및 BER 성능 비교
Fig. 1. Comparison of MSE and BER performance

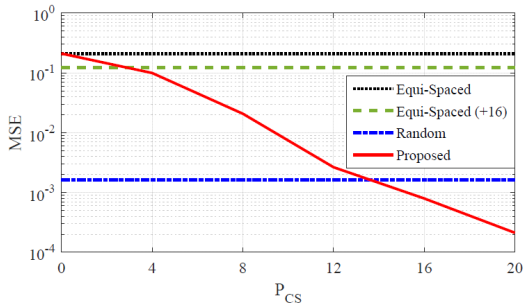


그림 2. $E_b/N_0 = 30$ dB에서의 제안 알고리즘의 P_{CS} 에 따른 MSE 성능 향상
Fig. 2. MSE performance improvement of the proposed algorithm according to P_{CS} at $E_b/N_0 = 30$ dB

가할수록 성능이 향상될 것임을 예측할 수 있다. 결과적으로, 제안 알고리즘은 시스템 파라미터를 고려하여 압축 센싱 채널 추정을 위한 파일럿 톤을 적응적으로 생성할 수 있으며, 높은 성능 및 낮은 복잡도로도 상당한 성능 향상을 얻어낼 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한 파일럿 오버헤드와 수신 정확도의 트레이드-오프에서 P_{CS} 값의 조정을 통해 원하는 환경을 구축할 수 있다.