

## CSI 핑거프린팅 실내 측위 성능 향상을 위한 최적 채널 추정 기법 분석

박정훈, 박경민, 이병호, 김성철

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소

{hoon0337, rudals319, bhlee, sckim}@maxwell.snu.ac.kr

## Optimal Channel Estimator on CSI-Based Fingerprinting Indoor localization

Jeong-Hoon Park, Kyoung-Min Park, Byeong-ho Lee, Seong-Cheol Kim

Dept. of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ.

## 요약

본 논문은 채널 추정기에 따라 핑거프린팅 실내 측위의 성능을 비교하였다. 레이트레이싱 툴을 통해 전파 환경을 구축하였고, AP(Access Point)로부터 받은 파일럿 신호를 이용해 추정된 채널 상태 정보를 통해 핑거프린팅 기반으로 위치를 추정하였다. LS(Least Square), MMSE(Minimum Mean Square Error), LMS(Least Mean Square), RLS(Recursive Least Square) 총 4가지 채널 추정기를 사용하였고, 확률적인 모델을 기반으로 하는 핑거프린팅 기법인 FIFS(Fine-Grained Indoor Fingerprinting System) 기법을 이용하여 추정된 위치 추정하였다. 이를 바탕으로 비트 에너지 대 잡음비( $E_b/N_0$ )에 따른 실내 측위 성능 평가를 진행하여 기존 LS 채널 추정기 외에 다른 채널 추정기를 측위에 이용하는 것이 유의미함을 확인하였다.

## I. 서론

최근 개인 스마트 기기의 보급과 함께 위치기반서비스 시장이 확대되면서 실내 측위 연구 수요가 급증하고 있다. 실외 측위와는 달리, 실내 측위는 다중경로에 의한 효과로 GPS(Global Positioning System)접목에 어려움이 있어 이를 극복하기 위해 실내 측위에 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1]. 여러 실내 측위 기법 중, 본 논문은 몇몇 지점에 대해 미리 측정해 놓은 채널 상태 정보(CSI, Channel State Information) 값들을 바탕으로 측위를 하는 핑거프린팅 기법에 기반한다. 이를 위해서는 AP로부터 보낸 파일럿 신호를 통해 수신단에서 채널 추정을 할 필요가 있다. 기존의 연구에서는 LS(Least Square) 채널 추정기를 이용해서 측위 성능을 평가한 바 있는데 [2], 본 논문에서는 추가로 MMSE(Minimum Mean Square Error), LMS(Least Mean Square), RLS(Recursive Least Square) 채널 추정기를 이용하였다. 이를 바탕으로 채널 상태 정보 기반 핑거프린팅 측위 성능 개선 방법을 제안한다.

## II. 본론

## 2.1 시스템 모델

본 논문에서는 실내 측위의 성능을 검증하기 위해 IEEE 802.11 표준에서 주로 사용하는 2.4 GHz 주파수 대역을 채택하였다. 20 MHz의 대역폭을 가지는 64개의 부반송자를 사용하는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템을 가정하였으며 16QAM으로 랜덤하게 생성한 64개의 부반송자를 파일럿 신호로 선택하는 블락 구조의 파일럿 배치 방식을 이용하였다. 또한, 본 논문에서는 인접 심볼간 간섭(Inter Symbol Interference)의 효과를 배제하여 사전에 레이트레이싱(Ray-tracing) 툴로부터 얻은 채널 상태 정보가 시간 영역에서 최대 16 탭의 딜레이를 가지도록 필터링하였다. 부반송자 별 직교성이 깨지지 않도록 시간영역에서 16개의 CP가 추가된 파일럿 신호는 레이트레이싱을 통해 생성된 채널을 통과하고 가우시안 잡음이 추가되어 수신단에 도착한다. 이렇게 도착한 파일럿 신호로부터 채널 상태 정보를 추정한다.

## 2.2 수신단에서의 채널 추정 알고리즘

본 논문에서는 주파수 영역에서 채널을 추정하는 LS, MMSE 채널 추정 기법, 시간 영역에서 적응 알고리즘을 이용해 채널을 추정하는 LMS, RLS 채널 추정기를 이용하였다.  $X$ 를 주파수 영역에서의 파일럿 신호 벡터,  $Y$ 를 수신 신호 벡터라고 했을 때 식(1), 식(2)와 같이 주파수 영역에서 채널을 추정할 수 있다 [3].

$$\hat{H}_{LS} = X^{-1}Y \quad (1)$$

$$\hat{H}_{MMSE} = R_{HH}^{-1}(R_{HH} + I/(\text{SNR}))^{-1}\hat{H}_{LS} \quad (2)$$

여기서  $\hat{H}_{LS}$ ,  $\hat{H}_{MMSE}$ 는 각각 LS, MMSE 채널 추정기로 추정된 주파수 영역에서의 채널 상태 정보를 의미한다.  $\vec{x}_n$ 을 채널 탭 위에 있는 시간 영역에서의  $n$ 번째 파일럿 신호 벡터,  $y_n$ 을  $n$ 번째 수신 신호 값이라고 할 때, 시간 영역에서 LMS 채널 추정기는 식(3)의 업데이트 과정을 통해 채널 상태 정보를 추정한다 [4].  $\mu$ 는 업데이트 계수로, 0.055를 사용하였다.  $h_n$ 은  $n$ 번째 업데이트된 시간 영역에서의 채널 응답을 의미한다.

$$h_{n+1} = h_n + \mu(y_n - h_n^T \vec{x}_n) \vec{x}_n \quad (3)$$

RLS 채널 추정기는 식(4)의 과정을 통해 채널 상태 정보를 업데이트한다 [4].  $\lambda$ 는 업데이트 계수로 0.95를 사용하였다.

$$h_{n+1}^* = h_n^* + k_n (y_n - h_n^{H*} \vec{x}_n) \vec{x}_n \quad (4)$$

$$\left( \text{단, } k_n = \frac{\phi_{n-1}^* \vec{x}_n}{\lambda/1 - \lambda + \vec{x}_n^H \phi_{n-1}^* \vec{x}_n}, \phi_n = \phi_{n-1}/\lambda - k_n \vec{x}_n \vec{x}_n^H \phi_{n-1}/\lambda, \right)$$

## 2.3 핑거프린팅 기반 실내 측위 알고리즘

핑거프린팅 기반 실내 측위 기법으로는 FIFS(Fine-Grained Indoor Fingerprinting System) 기법을 이용하였다 [2]. FIFS 기법은 확률적인 모델에 기반하는데, 수신단과 핑거프린팅의 채널 상태 정보를 비교하여 수신단의 위치가 각 핑거프린팅의 위치로 추정할 확률( $P(l_j|H_e)$ )을 계산하고 이를 가중치로 하여 식(5)와 같이 수신단의 위치를 추정한다.

$$\hat{l} = \sum_{j=1}^J P(l_j|H_e) l_j \quad (5)$$

여기서,  $\hat{l}_j$ 는 수신단의 추정 위치,  $H_e$ 는 선택한 AP 별로 수신단에서 측정 한 유효 채널 상태 정보(64개 채널 상태 정보의 2-norm)를 모아놓은 벡터,  $l_j$ 는  $j$ 번째 핑거프린팅의 공간적인 위치를 의미한다. 유효 채널 상태 정보의 값이 큰  $K(=5)$ 개의 AP를 선택하였고,  $P(l_j|H_e)$  값이 큰  $J(=6)$ 개의 핑거프린팅을 선택하여 위치를 추정하였다.  $P(l_j|H_e)$ 는 베이즈안률에 의해 다음과 같이 표현할 수 있고, 각 AP와 핑거프린팅 간에는 독립이라는 가정하에 식(6)-(8)을 통해 계산할 수 있다.

$$P(l_j|H_e) = \frac{P(l_j)P(H_e|l_j)}{P(H_e)} \quad (6)$$

$$P(l_j) = \left( \prod_{k=1}^K \text{Corr}(H^k, H^k(l_j)) \right) / \left( \sum_{j=1}^J P(l_j) \right) \quad (7)$$

$$P(H_e|l_j) = \prod_{k=1}^K \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{j,k}^2}} \exp \left( -\frac{(H_{e,k} - m_{j,k})^2}{2\sigma_{j,k}^2} \right) \quad (8)$$

여기서  $\text{Corr}(X, Y)$ 는  $X$ 와  $Y$ 의 상관관계를 의미하고,  $H^k$ 와  $H^k(l_j)$ 는 각각  $k$ 번째 AP에서 수집한 수신단,  $j$ 번째 핑거프린팅 위치에서의 채널 상태 정보 벡터(단위: dB)를 의미한다. 또한,  $H_{e,k}$ 는  $k$ 번째 AP에서 수집한 수신단의 유효 채널 상태 정보를 의미하고  $m_{j,k}$ 와  $\sigma_{j,k}^2$ 는  $j$ 번째 핑거프린팅 위치에서  $k$ 번째 AP에 대해서 수집한 유효 채널 상태 정보의 평균과 분산을 나타낸다. 또한,  $P(H_e)$ 는 표준화를 위해 식(9)와 같이 계산하였다.

$$P(H_e) = \sum_{j=1}^J P(l_j)P(H_e|l_j) \quad (9)$$

## 2.4 실험방법

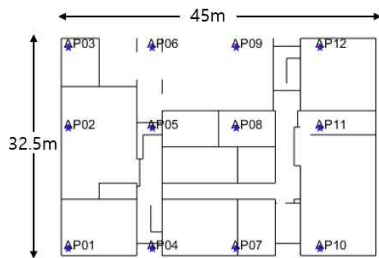


그림 1 레이트레이싱 툴 입력 지도

먼저 그림 1의 지도 정보를 기반으로 레이트레이싱 툴을 이용하여 채널을 생성하였다. 총 AP의 개수는 12개로 위치는 그림 1에 표시하였다. x축, y축에 0.65m 간격으로 총 3381개의 위치에 대해서, 각 AP 별로 64개의 채널 상태 정보를 레이트레이싱 툴을 통해 생성하였다. 이중 1.3m 간격으로 총 875개의 위치를 핑거프린팅에 이용하고, 나머지 2506개의 위치를 테스트 셋으로 하여 측위 성능을 평가하였다. 핑거프린팅을 하는 위치와 테스트할 위치에 대해서는 같은 채널 추정기를 이용하였고, 2.1의 시스템 모델에 기반하여 얻은 채널 상태 정보를 바탕으로 FIFS 기법을 이용해 수신단의 위치를 추정하였다.

## 2.5 실험 결과

각각 LS, MMSE, LMS, RLS 채널 추정기에 대해 비트 에너지 대 잡음 비( $E_b/N_0$ )에 따른 추정위치와 실제위치의 평균 제곱근 편차(RMSE) 값을 그림2에 나타내었다. Ideal은 가우시안 잡음이 섞이지 않은 채널 상태 정보로부터 추정 한 값을 나타낸다.

첫 번째로,  $E_b/N_0$  값이 작을수록 측위 성능이 감소한다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, 잡음이 섞이지 않은 채널 상태 정보로부터 추정 한 위치 정확도가 가장 좋은 성능을 보였는데, 이로부터 잡음이 커지게 되면 통신 성능뿐만 아니라 측위 정확도도 함께 감소한다는 것을 확인할 수 있다.

두 번째로, 기존에 사용하는 LS 채널 추정기에 비해 시간영역에서 채널을 추정하는 LMS, RLS 채널 추정기에서 측위 정확도가 향상됨을 확인할 수 있었다. RLS 채널 추정기가 LMS 채널 추정기에 비해 연산량은 많지만 채널 추정 성능이 더 좋게 나타난다는 기존의 연구결과[4]와도 부합하게 RLS 채널 추정기의 위치 추정 성능이 LMS에 비해 좋게 나타났다.

마지막으로 낮은  $E_b/N_0$ 에서는 MMSE채널 추정기가 시간영역에서 채널 추정 기법에 비해 높은 성능을 나타내는 반면, 높은  $E_b/N_0$ 에서는 시간영역에서의 채널 추정기가 더 높은 성능을 보였다. 이는 채널 특성으로부터 근사를 통해 MMSE 알고리즘을 구현했기 때문에  $E_b/N_0$ 가 큰 상황에서 MMSE 채널 추정기의 성능이 떨어지기 때문이라고 해석할 수 있다.

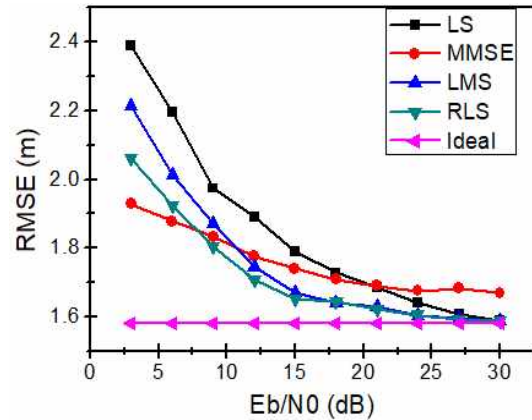


그림 2  $E_b/N_0$ 에 따른 RMSE값

## III. 결론

본 논문에서는 총 4가지 종류의 채널 추정기(LS, MMSE, LMS, RLS)를 이용해 채널 추정기에 따라 핑거프린팅 실내 측위의 성능을 비교하였다. 그 결과, 기존 채널 정보를 얻는데 사용하는 LS 채널 추정기에 비해 향상된 측위 정확도를 얻을 수 있었다. 비록 시간 영역에서의 채널 추정기는 LS 채널 추정기에 비해 많은 연산량을 필요로 하지만, 잡음이 큰 상황에서 LS 채널 추정기에 비해 최소 10%에서 최대 20%까지 측위 정확도가 증가하는 것을 시뮬레이션을 통하여 검증함으로써 향후 통신 시스템에 시간 영역에서의 LMS 혹은 RLS 채널 추정기가 정확한 측위 성능을 위해 사용될만한 가능성이 있다는 것을 제시하였다.

## ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 두뇌한국21플러스사업에 의하여 지원되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, Nov. 2007.
- [2] Xiao, Jiang, et al. "FIFS: Fine-grained indoor fingerprinting system." 2012 21st international conference on computer communications and networks (ICCCN). IEEE, 2012.
- [3] Cho, Yong Soo, et al. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. John Wiley & Sons, 2010.
- [4] Rana, Md Masud. "Performance comparison of LMS and RLS channel estimation algorithms for 4G MIMO OFDM systems." 14th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT 2011). IEEE, 2011.