

LTE OFDM 시스템에서의 기준 심볼 배치

최승국*

Reference Symbol Arrangement in LTE OFDM Systems

Seung-Kuk Choi*

Department of Information and Communications Engineering, Incheon University, Incheon 406-772, Korea

요 약

OFDM 시스템에서는 시변이며 주파수 선택적인 전송 채널을 추정하기 위하여 보통 기준 심볼을 이용한다. 우선 LTE 표준의 기준 심볼 배치를 이용하여 채널을 추정할 때의 LTE OFDM 시스템 비트 오류율 성능을 분석한다. 분석 결과, LTE 표준 기준 심볼 배치 경우에 도플러 시변 페이딩에는 강인하나 주파수 선택적 페이딩에 대하여는 채널 추정 오차가 크게 되어 비트 오류율 성능 열화가 발생된다. 그러므로 본 논문에서 효율적이고 우수한 채널 추정을 위하여 등간격 다이아몬드 격자 모양의 기준 심볼 배치이며 주파수 영역에서 매 4번째 부반송파 간격마다 기준 심볼을 배치하는 개선된 기준 심볼 배치 모양을 새로이 제시한다.

ABSTRACT

For the purpose of estimation of time variant frequency selective transmission channels, reference symbols are usually employed. The bit error performance of LTE OFDM systems is analyzed in the case of LTE standard reference symbol arrangement. Results show that LTE OFDM system with this LTE reference symbol arrangement is robust against Doppler time variant fading. However, the performance of that system is degraded due to channel estimation error in frequency domain. An equidistant arrangement with a diamond shape structure of reference symbols, however having 4 subcarriers distance in frequency domain, is suggested for the optimal channel estimation.

키워드 : LTE, OFDM, 기준 심볼, 비트 오류율

Key word : LTE, OFDM, reference symbol, bit error rate

Received 07 August 2015, Revised 17 August 2015, Accepted 31 August 2015

* **Corresponding author** Seung-Kuk Choi(E-mail: skchoi@incheon.ac.kr, Tel:+82-32-835-8282)

Department of Information and Communications Engineering, Incheon University, Incheon 406-772, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.12.2805>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 방식에서는 송신하려는 데이터를 병렬화한 후에 이를 다수의 직교 부반송파를 사용해서 전송한다. 그러므로 심볼 주기가 짧은 고속 데이터 전송 시 발생하는 심볼간 간섭(ISI: inter symbol interference) 문제를 해결할 수 있다. 그러나 OFDM 방식에서는 심볼의 길이가 길어지므로 단말기가 이동할 때 발생하는 도플러(Doppler) 페이딩에 의한 시변(time variant) 채널에 취약하다[1].

시변 채널을 통하여 OFDM 신호가 전송될 때 OFDM 부반송파 신호들 간에 인접 부반송파 간섭(ICI: inter carrier interference)이 발생된다. 또한 송신 심볼이 주파수 선택적 Rayleigh 다중 경로 채널을 통하여 전송될 때 그 크기 및 위상이 변화된다. 이러한 심볼 신호들을 원래의 정확한 모습으로 복원하기 위한 채널 추정 방식으로 기존 심볼을 이용한 방식이 현재 시스템에 사용되고 있다[2]. 그러나 부가성 백색 가우시 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise) 및 시변 채널로 인한 ICI등으로 인하여 정확한 채널 추정 및 등화가 이루어지지 못하여 수신단에서 원래 데이터를 재생 시 비트 오류율(BER: Bit Error Rate)이 증가된다.

BER 성능에 유리한 기준 심볼 배치 모양에 대한 연구가 [3, 4]등에서 이루어 졌다. 이 연구들에서 등간격 격자 모양의 기준 심볼 배치가 채널 추정 오차에 대해서 최소 평균 전력 오차(MMSE: Minimum Mean Squared Error)를 발생시킨다는 것을 밝혔다. 이러한 연구 결과들에 따라 LTE에서 등간격 다이아몬드 격자 모양의 기준 심볼 배치를 표준으로 정하고 있다[2].

본 논문에서는 기준 심볼 배치 모양을 변화시켜 가면서, 이 변화에 따른 LTE OFDM 전송 시스템의 BER 성능을 분석한다. 이 때 LTE에서 요구하고 있는 최대 속도까지 단말기가 이동하는 시변 및 주파수 선택적 채널에서, 채널 추정 오차로 인한 시스템의 BER 성능 열화를 분석하며 성능이 우수한 기준 심볼 배치 모양을 제시하고자 한다.

II. OFDM 전송 시스템

QAM(Quadrature Amplitude Modulation) OFDM 시스템 구성도가 그림 1에 도시되었다. 입력 데이터는 우선 I(Inphase) 성분 비트열과 Q(Quadrature) 성분 비트열로 나누어진다. 각 I와 Q성분은 함께 복소 심볼 X(k)로 매핑 된다. QAM 매핑된 복소 심볼은 OFDM 변조기로 전송되며 그 복소 심볼은 병렬의 N개 부반송파로 역 푸리에 변환(IFFT : Inverse Fast Fourier Transform)에 의해 변조된다. IFFT 된 후 출력된 n번째 샘플값은 다음 식과 같다.

$$x_q(n) = (1/\sqrt{N}) \sum_{k=0}^{N-1} X_q(k) \exp(j2\pi nk/N) \quad (1)$$

채널 모델은 L 탭의 값을 가지는 유한 임펄스 응답 필터를 가정한다. 그러면 채널의 임펄스 응답은 다음 식과 같다.

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} z(l) \delta(t - \tau_l T_s) \quad (2)$$

이 때 z(l)은 독립적이고 평균이 0인 복소 가우시안 랜덤 변수이고, τ_l 는 샘플링 주기 T_s 에 의해 정규화된 l번째 임펄스의 지연이다. 그러면 이러한 채널을 통하여 전송된 신호는 다음 식 (3)과 같다.

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} z(l)x(n-l) + w(n) \quad (3)$$

이때 w(n)은 샘플링 시간 n때 더해지는 AWGN 잡음에 의한 복소 변수이다. 그러면 수신기에서 N개의 $y_q(n)$ 을 FFT하여 $Y_q(k)$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_q(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} y_q(n) \exp(-j2\pi kn/N) \\ &= \alpha(k) + \beta(k) + W(k) \end{aligned} \quad (4)$$

위 식 (4)에서 $\alpha(k)$ 는 k번째 부반송파에 대한 시간 T_s 동안의 평균 채널 전달함수 $H(k)$ 이고 $\beta(k)$ 는 시변 채널에 의한 ICI 성분이며 W(k)는 w(n)의 FFT이다 [5]. 그러므로 송신 심볼 $X_q(k)$ 가 k번째 부반송파를 통하여 전송되면서 시변 주파수 선택적 페이딩 및 AWGN

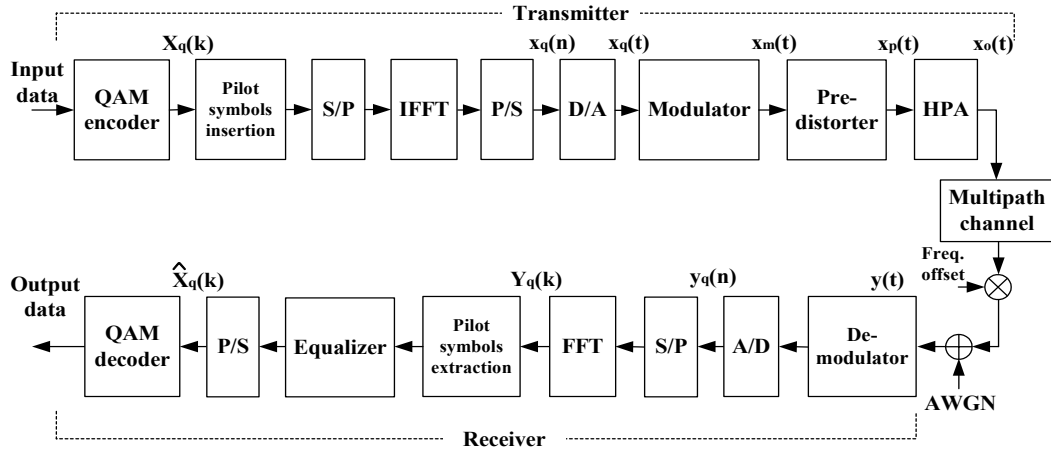


Fig. 1 Block diagram of OFDM transmission system

의 영향을 받아서 그 크기와 위상에 변화가 생긴 $Y_q(k)$ 로 수신단에서 재생된다. 따라서 $Y_q(k)$ 는 각 부반송파의 전달 함수 $H(k)$ 로 추정된 채널 전달 함수 $\hat{H}(k)$ 의 역과 곱해져서 등화 된다.

$$\hat{X}_q(k) = Y_q(k) / \hat{H}(k) \quad (5)$$

최종적으로 $\hat{X}_q(k)$ 가 애초에 송신된 $X_q(k)$ 와 같은 성상도 내에 속하는가의 여부에 따라 데이터 BER이 결정된다. 기준 심볼이 주파수 영역 상에서 채널 전달 함수 $H(k)$ 을 추정하는데 사용된다. 부반송파들에 기준 심볼 $P(k) \in \{-1, 1\}$ 이 전송되어진다. 다음 식 (6)과 같이, 수신단에서 채널 전달 함수는 재생된 기준 심볼 $\hat{P}(k)$ 를 $P(k)$ 로 나눔으로써 추정될 수 있다(LS: Least Squares 채널 추정).

$$\hat{H}_{LS}(k) = \hat{P}(k) / P(k) = H(k) + W(k) / P(k) \quad (6)$$

여기서 LMMSE(Linear Minimum Mean Squared Error) 추정 방식을 이용하면 LS 방식으로 추정된 채널 추정 벡터 \hat{H}_{LS} 로부터 AWGN에 대해 더욱 강한 채널 추정을 할 수 있다. LMMSE 추정 채널 벡터 \hat{H}_{LMMSE} 은 다음과 같은 관계식을 이용하여 구할 수 있다[5].

$$\hat{H}_{LMMSE} = \mathbf{R}_{HH} (\mathbf{R}_{HH} + \sigma_w^2 E\{1/P_k^2\} \mathbf{I})^{-1} \hat{H}_{LS} \quad (7)$$

이 때 $\mathbf{R}_{HH} = E\{\mathbf{H}\mathbf{H}^H\}$ 는 채널 전달 함수의 자기 상관 행렬이고 $(\cdot)^H$ 는 Hermitian 변환을, 그리고 \mathbf{I} 는 단위행렬을 나타낸다. LMMSE 방식으로 추정을 하기 위해서는 식 (7)에서 채널의 \mathbf{R}_{HH} 와 AWGN의 분산 σ_w^2 을 알 수 있어야 하는 문제가 있다. 그런데 충분히 크기가 작은 임의의 σ_w^2 을 선택한 다음 식 (7)을 이용하여 \hat{H}_{LMMSE} 를 구하여도, 실제의 정확한 σ_w^2 값을 사용하는 경우의 채널 추정 값과 그 오차가 크지 않다[5]. 그러므로 $\sigma_w^2 = 10^{-4}$ 의 고정된 값을 선택하고 \mathbf{R}_{HH} 는 기준 심볼을 이용하여 채널을 추정한다.

그러나 기준 심볼들이 모든 부반송파들에 할당되는 것이 아니라 LTE 표준에서도 주파수 간격이 떨어진 소수의 부반송파들에만 배치되므로 \mathbf{R}_{HH} 추정 시 오차가 발생된다. 또한 도플러 시변 채널과 AWGN등에 의해서도 추정 오차가 발생하는 문제가 있다.

III. LTE OFDM 시스템

LTE 표준에 의하면 FFT의 크기는 여러 가지로, 그 중 하나를 선택할 수 있는데, 효율적인 설치를 위하여 2048을 우선 권고하고 있다. 샘플링 주파수는 30.72 MHz 이므로 기본 시간 단위 $T_s = 32.99\text{ns}$ 이며, 부반송파 간격 $\Delta f = 15\text{kHz}$ 이다[2]. 보호 구간은 주로 $4.7\mu\text{s}$

Table. 1 LTE EVA channel model

tap number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
delay μs	0	0.03	0.15	0.31	0.37	0.71	1.09	1.73	2.51
tap position	0	1	5	10	12	22	33	53	77
power	0.241	0.171	0.175	0.105	0.21	0.03	0.048	0.015	0.005

이며 보호 구간을 포함한 한 OFDM 블록의 시간 길이는 71.354 μs 이다. LTE에서는 단말기가 120km/h로 이동할 때까지 높은 성능의 BER 특성을 가지며, 350km/h의 고속으로 이동할 때에도 네트워크 연결에 문제가 없는 성능을 가질 것을 권고하고 있다[6]. 반송파 주파수가 1.8GHz일 때 단말기가 120km/h로 이동하면 최대 도플러 주파수 f_m 은 약 200Hz, 350km/h인 경우 f_m 은 580Hz가 된다. LTE 다중 지연 전송 채널 모델로 [7]에서 최대 지연 시간이 2.51 μs 이고 rms 지연 시간 σ_τ 가 0.357 μs 인 9 탭(tap) 전력 지연 프로파일(power delay profile)을 가지는 EVA(Extended Vehicular A model)을 제시하고 있다 (표 1).

그림 1의 OFDM 전송 시스템 구성도와 같이 입력 데이터는 Gray 코드를 이용하여 16-QAM 심볼로 매핑 된다. 매핑된 이 심볼들은 각각 여러 개의 부반송파들로 OFDM 변조된 후, 표 1과 같은 주파수 선택적 Rayleigh 다중 경로 채널을 통하여 전송된다. 할당된 주파수 선택적 채널을 쪼개어 주파수 대역폭이 작은 여러 개의 주파수 비선택적인 채널을 통하여 각각의 부반송파들을 전송하므로, ICI 영향등이 없는 이상적인 16-QAM OFDM 시스템의 BER 성능은 아래 식과 같은 16-QAM 시스템의 BER 성능 $P_b(\gamma_b)$ 과 일치한다[2].

$$P_b(\gamma_b) = \int_0^\infty P_q(x) p_{\gamma_b}(x) dx \quad (8)$$

이 때

$$p_{\gamma_b} = \frac{1}{\gamma_b} e^{-\frac{x}{\gamma_b}} \quad (9)$$

$$P_q(\gamma_b) = \frac{3}{4} Q\left(\sqrt{\frac{4}{5}\gamma_b}\right) \quad (10)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (11)$$

위 식들에서 $\gamma_b = E_b/N_0$ 이며 E_b 는 한 비트 당 신호의 평균 에너지이고 N_0 는 AWGN의 전력 스펙트럼 밀도이다. 식 (9)는 전송 채널에서 불규칙하게 변화하는 γ_b 에 대한 Rayleigh pdf(probability density function)이며 $\bar{\gamma}_b$ 는 그 평균값이다.

시변이며 주파수 선택적인 채널 응답 $h(n, j)$ 는 시간과 주파수 영역에서 페이딩을 겪는다. 그러므로 채널 추정기(estimator)에서는 각 OFDM 블록 시간마다 모든 부반송파들에 대한 채널 전달함수를 추정한다. LTE 시스템에서는 그림 2와 같이 배치된 기준 심볼들을 이용하여 이러한 2차원적인 채널 추정을 수행한다[2]. LTE에서는 12개 연속적으로 인접한 부반송파들을 7 OFDM 블록 시간 동안 전송 심볼에 할당한다. 이 84개의 부반송파들로 한 개의 RB(Resource Block)으로 구성되며 두 개의 RB가 최소 전송 단위이다. 그러므로 LTE에서는 그림 2와 같은 전송 블록(2 RB) 모양의 단위로 심볼이 주파수/시간 영역에 할당되어 전송된다[1, 2].

IV. 기준 심볼 배치와 BER 성능

그림 2와 같은 LTE 표준 기준 심볼 (RS: reference symbol) 배치를 이용하여 주파수/시간 영역의 2차원적인 채널 추정을 수행한다. 그림 2에서 첫 번째 OFDM 블록 시간 때 주파수 영역에서 6번째 부반송파들에 기준 심볼들이 전송된다. 그러면 수신기에서 먼저 각 6번째 부반송파 전달함수들이 식 (7)의 LMMSE 방법으로 추정된다. 나머지 5개 부반송파 전달 함수들은 선형 보간법(linear interpolation)으로 매 6번째 마다 LMMSE 추정된 부반송파 전달 함수들로부터 모두 구해진다. 그 다음 3~4 번째 OFDM 블록 시간 때에만 기준 심볼들이 전송되며, 기준 심볼들이 존재하는 이러한 OFDM 블록 시간 때에는 주파수 영역에서 위와 같은 방법으로 그 OFDM 블록 시간 때의 부반송파 전달 함수가 역시 모두

구해진다. 그 사이 시간에 존재하는 2~3개 OFDM 블록 시간에 대한 부반송파 전달함수들은 구해진 양쪽 한 쌍의 부반송파 전달함수들을 이용하여 시간 영역에서 선형 보간에 의한 방법으로 모두 구해진다.

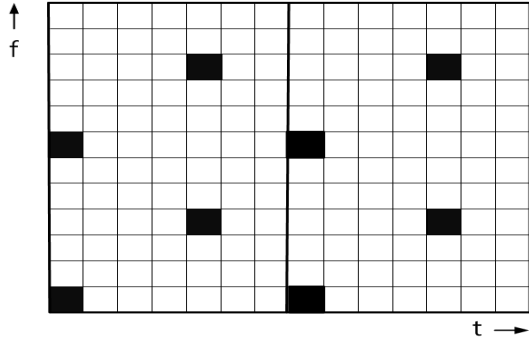


Fig. 2 LTE transmission unit 2 RB (■ : RS)

도플러 시변, 주파수 선택적 채널에서 채널은 WSS 복소 가우시안 랜덤 프로세스(wide sense stationary complex Gaussian process)로 모델링될 수 있다[8]. 그러면 시간 간격 Δk 와 주파수 간격 Δp 에 대한 채널 전달함수 $H(k)$ 의 상관함수(correlation function) $R_H(\Delta k, \Delta p)$ 는 다음 식 (12)와 같다[8].

$$R_H(\Delta k, \Delta p) = R_f(\Delta k) R_t(\Delta p) \quad (12)$$

이때 k 와 p 는 주파수 영역에서 부반송파 순서 및 시간 영역에서 OFDM 블록 시간 순서이며, $R_f(\Delta k)$ 와 $R_t(\Delta p)$ 는 각각 주파수 및 시간 영역에서의 채널 상관함수이다. 식 (12)에서와 같이 시간 영역의 상관함수와 주파수 영역의 상관함수는 서로 독립적이다. $R_f(\Delta k)$ 는 다중 경로 채널 지연에 의하여 결정되고 $R_t(\Delta p)$ 는 도플러 페이딩에 의하여 결정된다. $R_f(\Delta k)$ 의 특성에서, 주파수 영역 상 채널의 90% coherence bandwidth $B_{c,90\%}$ 와 채널 전력 지연 프로파일의 rms 지연 시간 σ_τ 의 관계는 $B_{c,90\%} \approx 1/50 \sigma_\tau$ 이다[2]. LTE EVA 채널 모델의 경우 $B_{c,90\%} \approx 55.5kHz$ 가 되어 부반송파 주파수 간격 $\Delta f = 15kHz$ 의 4배 정도가 된다. 한편 도플러 시변 채널에서의 상관함수 $R_t(\Delta p)$ 는 다음 식 (13)과 같다[8].

$$R_t(\Delta p) = J_0(2\pi f_m p T_s) \quad (13)$$

이때 $J_0(x)$ 는 0차 1종 Bessel 함수이다. 그러므로 시간영역에서 $R_t(\Delta p) = 1/2$ 되는 채널의 coherence time t_{coh} 은 $f_m = 200$ Hz인 경우 $400 \mu s$ 가 되며, OFDM 블록 시간간격 $71 \mu s$ 보다 6 배 정도의 크기를 갖는다. 따라서 LTE EVA 채널 경우에는 그림 2의 기준 심볼 배치에서 주파수 간격 K 는 4 보다 작게, 시간 간격 P 는 6 보다 작게 선정되어야 성능이 우수한 채널 추정을 할 수 있을 것이다.

본 논문에서 우선 그림 2의 LTE 표준 기준 심볼 배치 경우의 LTE OFDM 시스템의 BER 성능을 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법으로 분석한다. 그림 1의 OFDM 시스템에 대한 각 블록별 입출력 변환 과정이 표시된 식 (1) - (7)을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과가 그림 3에 도시되었다. 그림 3에서와 같이 단말기가 이동하지 않는 경우($f_m = 0Hz$)에도 큰 크기의 γ_b 에서 BER 성능이 열화 되어 error floor가 발생 된다. 그러므로 기준 심볼 배치 모양 변화에 따른 BER 성능 변화를 분석하여, 기준 심볼의 수 증가를 최소화 하면서 BER 성능을 향상시킬 수 있는 배치 모양을 제시하고자 한다. 먼저 주파수 영역 채널 추정 에러를 최소화하기 위하여 그림 4와 같이 모든 부반송파들에게 기준 심볼을 배치하며, 시변 채널 추정 에러의 크기를 최소화하기 위하여 OFDM 블록 시간마다 교대로 기준 심볼을 배치하는 경우의 BER 성능을 분석한다(그림 5).

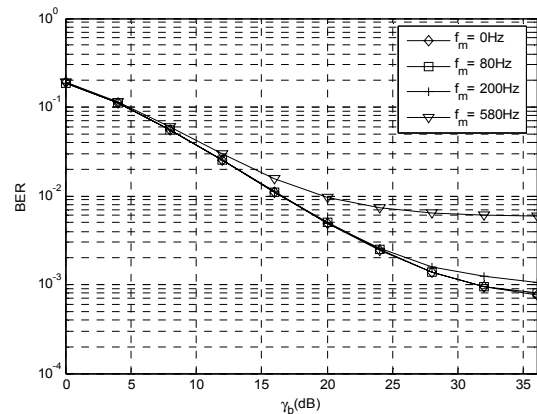


Fig. 3 BER in the case of LTE RS arrangement

그림 5에서 theory 곡선은 시분변 채널 경우($f_m = 0\text{Hz}$) 16-QAM OFDM 시스템의 BER 성능을 나타내는 이론식 (8)을 도시한 것이다. 이 이론식 경우는 완벽한 채널 추정 경우에 해당된다. 그림 5에서 시분레이션 결과 $f_m = 0\text{Hz}$ 의 성능 곡선과 이론식 (8)에 의한 곡선은 거의 일치하므로, 그림 4와 같은 밀집한 기준 심볼 배치 경우에 완벽한 채널 추정이 가능한 것을 확인할 수 있다. LTE 표준 기준 심볼 배치에 따른 BER 특성 그림 3과 완벽한 기준 심볼 배치 경우 결과인 그림 5를 비교하여 보면, 도플러 페이딩이 가장 큰 $f_m = 580\text{Hz}$ 경우에도 BER 성능에 차이가 없다. 그러나 저속 페이딩 시 ($f_m = 0\text{Hz}, 80\text{Hz}$) LTE 표준 경우에 BER 성능 열화가 발생 된다. 그러므로 LTE 표준 배치는 시간 영역에서는 문제가 없으나 주파수 영역에서 그 배치 간격을 더 작게 선정해야 함을 알 수 있다.

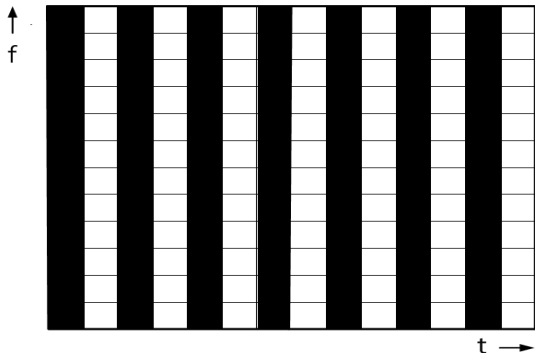


Fig. 4 The most dense RS arrangement (■ : RS)

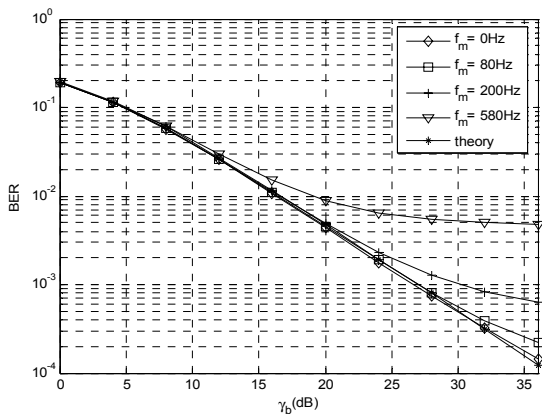


Fig. 5 BER in the case of most dense RS arrangement

따라서 주파수 영역에서 배치 간격을 LTE 표준 보다 작게 매 4 번째 부반송파 간격으로 배치한다. 이러한 그림 6(a-c)의 기준 심볼 배치에 대하여 BER 성능이 분석 되어 그림 7(a-c)에 도시 되었다. BER 성능 그림 7(c)는 매 RB 내에서 7 번째 OFDM 블록 시간마다 드물게 기준 심볼을 배치한 경우(그림 6(c))이므로 고속으로 단말기가 이동하는 $f_m = 580\text{Hz}$ 도플러 페이딩 환경에서 $3 \cdot 10^{-2}$ 큰 크기의 error floor 성능 열화가 발생되는 문제가 있다. 반면에 저속 페이딩 환경 하에서는 가장 밀집한 기준 심볼 배치 경우 BER 성능인 그림 5와 비교해도 그 성능에 차이가 작아서 문제가 없다.

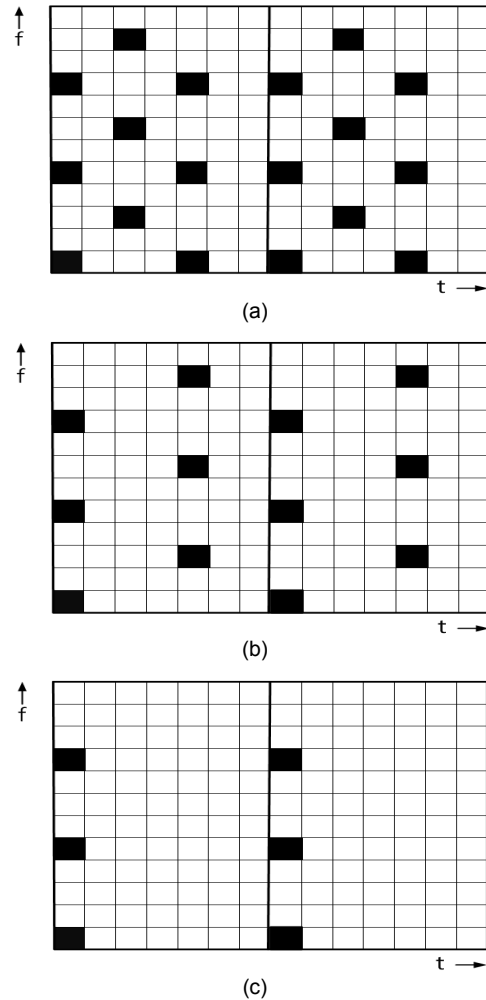
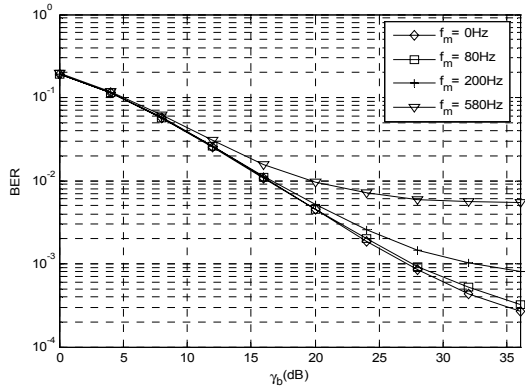
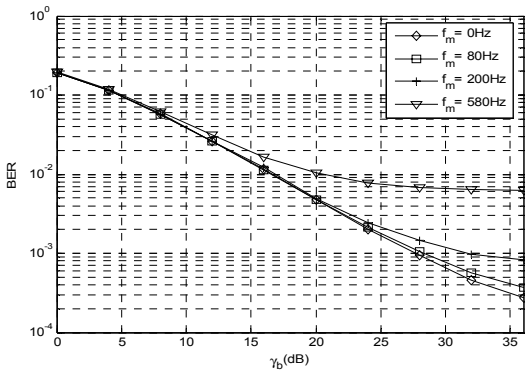


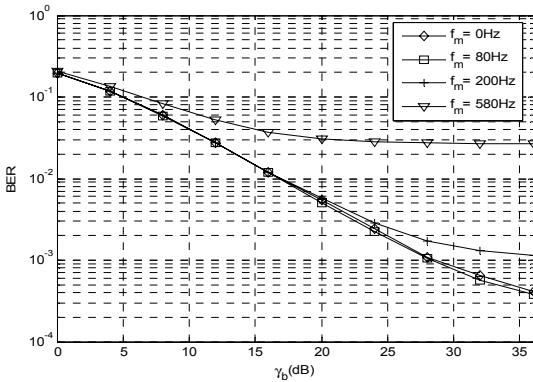
Fig. 6 Various arrangement of reference symbols



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 BER in the case of RS arrangement fig. 6(a-c)

고속 도플러 페이딩 시의 성능 열화를 작게 하기 위하여 기준 심볼 배치를 시간 영역에서 LTE 표준과 동일하게 그림 6(b)와 같이 배치하면, 가장 밀집하게 배치했을 때의 고속 도플러 BER 특성(그림 5, $f_m = 580\text{Hz}$)과

그 BER 특성에 차이가 작다.

주파수 영역에서 같은 간격으로 기준 심볼을 배치하면서 시간 영역에서 배치 간격을 변화시킨 경우의 BER 특성인 그림 7 (a-c)를 비교하여 보면, f_m 이 작은 저속에서는 비슷한 특성을 f_m 이 큰 시변 채널에서는 서로 다른 특성을 보인다. 그러므로 수식 (12)에서의 의미와 같이 시변 채널에서의 추정 오차는 시간 영역에서의 기준 심볼 배치 간격 크기에 따라서, 그리고 다중 경로 주파수 선택적 채널 추정 오차는 주파수 영역에서의 배치 간격 크기에 따라 서로 독립적으로 결정되는 것을 확인할 수 있다.

가장 밀집한 기준 심볼 배치 경우 BER 특성인 그림 5와 그림 7(b)를 비교하여 보면 그 특성 차이가 크지 않다. 따라서 LTE 표준과 비교하여 시간 영역에서 같은 배치 간격이며 주파수 영역에서는 배치 간격이 더 작은 그림 6(b)의 배치가 소요 기준 심볼 수가 작아서 효율적이며 아울러 채널 추정 성능도 우수한 기준 심볼 배치 모양인 것을 알 수 있다.

V. 결론

LTE OFDM 시스템에서 기준 심볼 배치에 따라 결정되는 BER 성능을 분석하였다. 이러한 성능을 평가하기 위해서 우선 데이터가 OFDM 변조, 주파수 선택적 Rayleigh 도플러 시변 페이딩 채널, OFDM 복조, 채널 추정, 등화 되는 모든 과정에 대하여 각 시스템 블록마다 그 입·출력 신호 변환 과정을 이산 복소 포락선 함수들로 표현 하였다. 이 수식들을 이용하고 LTE가 정한 표준안에 따라 파라미터를 정하고 기준 심볼 배치 모양을 변화시키면서 컴퓨터 모의실험에 의하여 시스템의 BER 성능을 분석하였다.

분석 결과, 현 LTE 표준의 기준 심볼 배치 경우에 도플러 시변 페이딩에는 강인하나 다중 경로 주파수 선택적 페이딩에 대하여는 채널 추정 오차가 크게 되어 BER 성능 열화가 발생하는 문제가 있다. LTE 표준에서와 같이 채널 추정에 유리한 등간격 다이아몬드 격자 모양의 기준 심볼 배치 모양으로, 그러나 주파수 영역에서 매 4 번째 부반송파 간격으로 기준 심볼을 배치하면 효율적이고 우수한 채널 추정을 할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Incheon National University Research Grant in 2015.

REFERENCES

- [1] S. Srikanth and A. Murugesu Pandian, "Orthogonal frequency division multiple access in WiMAX and LTE: a comparison," *IEEE Commun. Mag.* vol.50, no.9, pp.153-161, Sept. 2012.
- [2] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker, "*LTE-The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*," Wiley, 2nd ed., 2011.
- [3] R. Negi and J. Cioffi, "Pilot tone selection for channel estimation in a mobile OFDM systems in mobile wireless channels", *IEEE Trans. Consumer Electro.*, vol. 44, pp.1121-1128, Aug. 1998.
- [4] I. Barhumi, G. Leus and M. Moonen, "Optimal training design for MIMO OFDM systems in mobile wireless channels", *IEEE Trans. Signal Proce.*, vol. 51, pp.1615-1624, June 2003.
- [5] O. Edfors, M. Sandell, J.J. van de Beek, S. K. Wilson and P. O. Boerjesson, "OFDM channel estimation by singular value decomposition", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 7, pp.931-938, Jul. 1998.
- [6] 3GPP Technical Report 25.913, "Requirements for Evolved UTRA(E-UTRA) and Evolved UTRAN(E-UTRAN)(Release 9, 2014)", www.3gpp.org.
- [7] 3GPP Technical Specification 36.101, "User Equipment(UE) Radio Transmission and Reception(2014)", www.3gpp.org.
- [8] M. Paetzold, "*Mobile Fading Channels*", Wiley, 2002.



최승국(Seung-Kuk Choi)

1988.12 Braunschweig Univ. 공학박사
1989.3 - 현재 인천대학교 정보통신공학과 교수
※관심분야 : 통신 시스템, 이동통신, 동기