

논문 2007-44TC-10-2

OFDM 무선 패킷 통신 시스템에서의 비균일 훈련 심볼 이득 할당에 의한 주파수 오프셋 예측 성능 분석

(Frequency Offset Estimation Performance Analysis in OFDM Packet Communication Systems with Unequal Gain Allocation of Training Sequences)

곽 재 민*

(Jae-Min Kwak)

요 약

본 논문에서는 IEEE802.11a나 IEEE802.11p의 물리계층과 같은 패킷기반의 OFDM 통신 시스템에 적용할 수 있는 주파수 오프셋 예측기법을 제안하고 성능을 분석하여 기존기법과 비교하였다. 제안 기법에서는 긴 훈련심볼과 짧은 훈련심볼에 할당되는 이득을 전체적으로 일정하게 유지하면서도 이득 할당비를 조절할 수 있도록 하여 채널 상황에 따라 주파수 오프셋 에러에 대한 MSE 성능을 향상시키기 위한 이득 할당비를 알아낼 수 있다. 본 논문에서 고려한 훈련심볼은 IEEE802.11a와 IEEE802.11p의 표준화 그룹에서 적용된 프리앰블을 적용하였다. 시뮬레이션 결과에 의해, 채널 SNR 상황에 따라 주파수 오프셋 에러를 최소화시키기 위한 긴 훈련심볼 대 짧은 훈련심볼의 전력비가 다르며, 제안한 기법에 의한 주파수 오프셋 에러에 대한 MSE 성능이 기존의 기법보다 우수함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we proposed an frequency offset estimation scheme which can be used for packet based OFDM communication systems such as IEEE802.11a and IEEE802.11p physical layer. Proposed estimation scheme can adjust the gain allocation ratio between long training symbol and short training symbol while maintaining average power of overall training sequence so that we can obtain the reference parameters for MSE performance improvement. The preamble structure considered in this paper is based on the preamble specified in IEEE802.11a and IEEE802.11p standardization group. From the simulation results, it is shown that power ratio between long training symbol and short training symbol must varies for achieving lower frequency offset estimation error as channel SNR condition is changed. Also it is known that proposed scheme can achieve better performance than conventional one.

Keywords : IEEE802.11a, OFDM, 주파수 오프셋, SNR

I. 서 론

최근들어 무선 채널을 통해 고속 전송과 높은 대역효율을 요구하는 멀티미디어 서비스에 대한 요구가 확대되어 감에 따라 차세대 이동통신에 적합한 통신기술로

OFDM이 주목받고 있다^[1]. OFDM은 전체 채널을 다수의 협대역 부채널로 나누어 병렬로 전송함으로써 단일 반송파 방식에 비해 상대적으로 부채널 수만큼 심볼 구간을 확대시키는 효과가 있어 심볼간 간섭(ISI)을 감소시키고 주파수 선택성 페이딩에 대처할 수 있다는 장점이 있다. 이때, 변조된 부반송파는 한 심볼 구간 동안 직교하는 특성을 유지하도록 심볼 구간이 설정되며, 보호구간을 두어 다중경로 채널의 지연확산에도 강하다는 장점이 있다^[2~3]. 그러나 OFDM 신호는 단일 반송파 신

* 정회원, 전자부품연구원 SoC연구센터
(SoC Research Center, Korea Electronics
Technology Institute)
접수일자: 2007년8월27일, 수정완료일: 2007년10월18일

호에 비해 신호의 특성상 부반송파 간의 간격이 매우 좁기 때문에 송신단과 수신단의 반송파 주파수 간의 주파수 오프셋 에러에 의한 성능열화가 가장 큰 문제점 중의 하나로 거론되고 있다^[4].

기존의 논문들 중 [5][6]에서는 프리앰블의 전체 정보를 이용하는 주파수 오프셋 예측 및 보상방법이 제시되었고, [7][8]에서는 IEEE802.11a 물리계층 표준의 프리앰블을 수정하고 프리앰블의 부분 정보를 활용하는 주파수 오프셋 예측 기법이 제안되었다. 본 논문에서는 짧은 프리앰블의 부분정보와 긴 프리앰블의 전체정보를 이용하면서 긴 훈련심볼과 짧은 훈련심볼의 전력비 (LSPR : Long training symbol to Short training symbol Power Ratio)를 제어하여 동일 SNR 조건에서도 주파수 오프셋 예측 에러에 대한 MSE(Mean Square Error) 성능을 향상시킬 수 있는 기법을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 SNR 조건에 따라 기존의 주파수 오프셋 예측 기법보다 우수한 MSE 성능을 달성하기 위한 LSPR 파라미터 이 존재함을 확인한다.

II. 프리앰블 구조 검토와 제안 주파수 오프셋 예측 기법

1. 프리앰블 구조

IEEE802.11a와 IEEE802.11p 표준화 그룹에서 제시한 프리앰블 구조는 그림 1과 같으며, 함축적으로 OFDM 신호의 시간, 주파수 동기화 및 채널예측에 효율적으로 이용될 수 있도록 프리앰블이 구성되어 있다^[9-10].

그림 1의 프리앰블 구조에서, t_1 부터 t_{10} 은 각각 16개의 샘플길이를 갖는 동일한 10개의 짧은 훈련심볼들을 나타내고, T_1 과 T_2 는 각각 64개의 샘플길이를 갖는 동일한 2개의 긴 훈련심볼을 나타낸다. 짧은 훈련심볼과 긴 훈련심볼 사이에 삽입된 GI2는 32개의 샘플들로 구성된 T_1 또는 T_2 의 Cyclic Prefix이다.

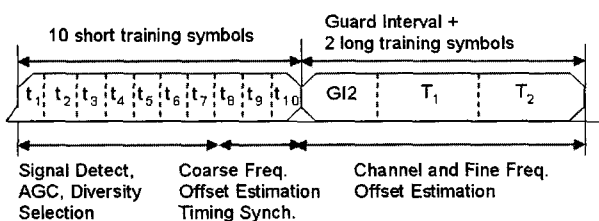


그림 1. IEEE802.11a/p 표준 물리계층에 제시된 프리앰블 구조

Fig. 1. Preamble structure suggested in the IEEE802.11a/p physical layer standard.

2. 제안 주파수 오프셋 예측 기법

본 절에서는 앞의 절에서 설명된 IEEE802.11a 또는 IEEE802.11p의 프리앰블을 수정없이 사용하여, 긴 훈련심볼의 이득과 짧은 훈련심볼의 이득을 조절하여 주파수 오프셋 성능을 개선하는 기법에 대해 소개한다.

짧은 훈련심볼과 긴 훈련심볼을 포함하는 프리앰블 신호에 대해서 아래와 같은 수식으로 표현한다.

$$x(n) = \begin{cases} x_S(n), & n = 1, 2, \dots, 160 \\ x_L(n), & n = 161, 162, \dots, 320 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $x_S(n)$ 은 송신부에서의 짧은 훈련심볼에 대한 시간영역 이산신호 표현이고, $x_L(n)$ 은 GI2와 긴 훈련심볼에 대한 시간영역 이산신호 표현을 나타내고 있다. 제안하는 기법에서는 LSPR 파라미터 ρ 를 긴 훈련심볼대 짧은 훈련심볼의 전력 비로 정의하고 이를 적용하여 프리앰블의 평균전력을 정규화시키고 긴 훈련심볼과 짧은 훈련심볼의 전력을 제어 가능하도록 한다. 기존의 전력을 동일하게 할당하는 경우는 제안하는 기법의 특별한 조건($\rho = 1$)으로 간주할 수 있다. 제안 기법을 적용하는 전력 정규화된 송신 프리앰블 신호의 이산신호 표현은 다음과 같다.

$$s(n) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{P_0}} x_S(n), & n = 1, 2, \dots, 160 \\ \sqrt{\frac{\rho}{P_0}} x_L(n), & n = 161, 162, \dots, 320 \end{cases} \quad (2)$$

여기서 P_0 는 식 LSPR 적용시의 전체 프리앰블에 대한 평균 전력으로 다음과 같이 주어진다.

$$P_0 = \left(\sum_{n=1}^{320} |x(n)|^2 \right) / 320 = \left(\sum_{n=1}^{160} |x_S(n)|^2 + \rho \sum_{n=161}^{320} |x_L(n)|^2 \right) / 320 \quad (3)$$

본 논문에서는 그림 1의 프리앰블 구조에 근거하여 신호 검출 및 AGC는 8번째 짧은 훈련심볼의 시작점 이전에 완료되었다고 가정하고, 마지막 세 개의 짧은 훈련심볼(t_8, t_9, t_{10})과 두개의 긴 훈련심볼을 송신단과 수신단 사이의 반송파 주파수 오프셋 예측에 이용할 수 있다고 설정한다. 이후로 위에 제시된 바와 같이 LSPR 파라미터를 도입하고 가용한 프리앰블 들을 사용하여 일반적인 주파수 오프셋 예측기법을 적용할 것이다.

주파수 오프셋이 존재하는 조건에서 다중경로 페이

당을 거쳐 AWGN에 의해 영향을 받고, AGC와 신호검출과정을 거친 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(n) = \sum_{l=1}^{N_h} h_l s(n-l) e^{\frac{j2\pi\epsilon n}{N}} + v(n) \quad (4)$$

여기서 h_l 과 N_h 는 각각 다중경로 채널의 임펄스 응답과 채널의 길이를 나타내고, $v(n)$ 은 AWGN, N 은 IFFT/FFT 포인트 수, ϵ 은 반송파 주파수 간격에 정규화된 주파수 오프셋 에러이다.

그림 1의 프리앰블 구조에서 2단계의 주파수 오프셋 예측 과정을 거친다. 즉, 짧은 훈련심볼을 이용하여 개략적인 주파수 오프셋을 예측하고, 이 예측 값을 긴 훈련심볼을 이용하여 미세한 주파수 오프셋 예측기법으로 보다 세밀하게 보정하여 예측하는 과정을 거치게 된다^[2].

짧은 훈련심볼 (t_8, t_9, t_{10})을 이용한 정규화된 주파수 오프셋 예측은 다음과 같이 수행된다.

$$\hat{\epsilon}_{sh} = \frac{N}{2\pi \times 16} \left[\arg \left(\sum_{n=113}^{128} r^*(n) r(n+16) \right) + \arg \left(\sum_{n=129}^{144} r^*(n) r(n+16) \right) \right] \quad (5)$$

유사한 방식으로 짧은 훈련심볼에 의한 예측치를 수신신호에 적용한 후, 긴 훈련심볼(T_1, T_2)에 의한 정규화된 주파수 오프셋 예측은 다음 수식과 같이 표현된다.

$$\hat{\epsilon}_{lo} = \frac{1}{2\pi} \left[\arg \left(\sum_{n=193}^{256} r^*(n) r(n+64) \right) \right] \quad (6)$$

최종적으로 전체적인 정규화된 주파수 오프셋 예측치는 $\hat{\epsilon} = \hat{\epsilon}_{sh} + \hat{\epsilon}_{lo}$ 로 주어진다.

주파수 오프셋에 의한 회전량을 계산하기 위한 아크탄젠트 연산은 $[-\pi, \pi]$ 구간으로 제한되어 있으므로, 주파수 오프셋 예측 범위는 다음과 같이 제한된다.

$$-\pi < \frac{2\pi\epsilon N_D}{N} < \pi \quad (7)$$

여기서, N_D 는 짧은 훈련심볼에 의한 주파수 오프셋에 대해서는 16이고 긴 훈련심볼에 의한 주파수 오프셋에 대해서는 64로 주어진다. 따라서 위의 수식 (5),(6)에 대응되는 주파수 오프셋 예측 범위는 각각 $|\epsilon| < 2$ 와 $|\epsilon| < 0.5$ 로 주어진다. 짧은 훈련심볼에 의해 예측되어야 하는 정규화된 주파수 오프셋 예측의 정밀도는

± 0.5 이내로만 달성이 되면 추후의 주파수 오프셋 에러에 대한 MSE 예측성능은 긴 훈련심볼에 의해 결정되므로, SNR이 높은 상황에서는 긴 훈련심볼에 할당되는 전력을 짧은 훈련심볼에 비하여 높게 하면 MSE 성능을 향상시킬 수 있음을 예상할 수 있다. 반대로 SNR이 낮은 조건에서는 긴 훈련심볼에 비해 짧은 훈련심볼에 전력을 보다 높게 할당해야 MSE 성능이 향상될 것으로 추정할 수 있다. 이러한 직관적인 성능 향상 예측은 다음 장에 설명하는 시뮬레이션을 통해 증명한다.

III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 LSPR 파라미터 ρ 를 도입하여 주파수 오프셋 예측을 수행하는 경우의 MSE 성능을 기존의 예측기법을 채용하는 경우와 비교하기 위해 다중경로 페이딩 환경 및 AWGN을 고려하여 시뮬레이션을 통해 MSE 성능을 구해내었다. 시뮬레이션에서 AGC와 패킷 검출, 타이밍 동기는 완벽하다고 가정하였으며, 다중경로 페이딩의 임펄스 응답 h_l 은 3경로를 고려하여 $h_1 = e^{j1.38}$, $h_2 = e^{j0.30}$, $h_3 = e^{-j2.02}$ 로 설정되었다^[8].

IEEE802.11a 표준은 송신기와 수신기의 허용 가능한 최대 오실레이터 주파수 에러를 20ppm으로 규정하였으므로, 반송파 주파수를 5.805GHz로 가정하고 송신 주파수와 수신주파수의 주파수 오프셋 에러의 최대치를 고려하여 정규화 주파수 오프셋 에러 ϵ 을 0.74로 설정하

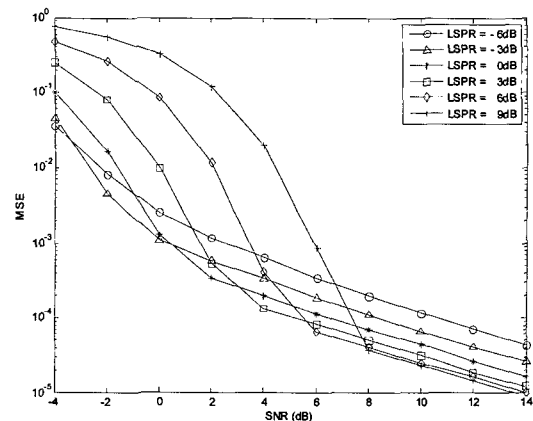


그림 2. 제안한 주파수 오프셋 예측 기법과 기존의 주파수 오프셋 예측기법에 대한 성능비교 1 ($\epsilon=0.74$)

Fig. 2. Performance comparison of the proposed Frequency offset estimation scheme and conventional one 1 ($\epsilon=0.74$).

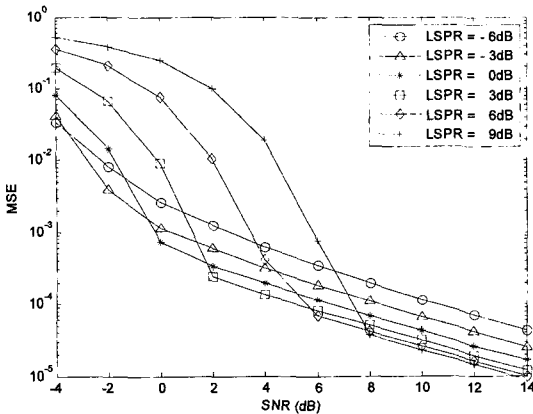


그림 3. 제안한 주파수 오프셋 예측 기법과 기존의 주파수 오프셋 예측기법에 대한 성능비교 2 ($\epsilon=0.246$)

Fig. 3. Performance comparison of the proposed Frequency offset estimation scheme and conventional one 2 ($\epsilon=0.246$).

여 시뮬레이션을 수행하였고, 정규화 주파수 오프셋 에러가 상대적으로 작은 경우로 $\epsilon=0.246$ 인 경우에 대해서도 비교하였다. 정규화 주파수 오프셋 예측에 대해 10000회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 SNR에 따른 MSE 성능을 구하였다.

그림 2와 그림 3은 각각 $\epsilon=0.74$ 인 경우와 $\epsilon=0.246$ 인 경우에 대해서, 기존의 주파수 오프셋 예측기법을 포함하여 제안한 주파수 오프셋 예측 기법을 적용하였을 때의 SNR에 따른 MSE 성능을 그래프를 나타낸다. 앞에서 언급하였듯이 LSPR이 0dB인 경우는 기존의 주파수 오프셋 예측기법을 채용한 경우와 동일한 조건을 나타낸다. 그림 2의 그래프에서는 SNR이 약 0.4dB에서 3.1dB 사이의 값이 구간에서는 기존의 예측기법이 가장 우수한 MSE성능을 나타내으며, 그림 3의 그래프에서는 SNR이 약 -0.4dB에서 1.8dB 사이의 값이 구간에서는 기존의 예측기법이 가장 우수한 MSE성능을 나타내었다. 그러나 그 이외의 SNR 영역에서는 제안한 기법을 적용하여 적절한 LSPR 값을 채용하는 경우 주파수 오프셋 예측 성능을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

표 1에 LSPR 파라미터 값의 step을 3dB 단위로 구분하여 각각의 경우에 대하여 가장 우수한 주파수 오프셋 예측 성능을 달성할 수 있는 SNR 구간을 정리하여 제시하였다.

그림 4는 $\epsilon=0.74$ 인 경우와 $\epsilon=0.246$ 인 경우의 주파수 오프셋 예측에러에 대한 MSE 성능을 LSPR 파라미터에 따라 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션 결과로부

표 1. SNR 구간조건과 대응되는 최적 LSPR 파라미터 관계 ($\epsilon=0.74, 0.246$)

Table 1. Relation of SNR region condition and corresponding optimized LSPR parameter ($\epsilon=0.74, 0.246$).

	SNR region ($\epsilon=0.74$)	SNR region ($\epsilon=0.246$)
LSPR = -6dB	-3.3dB 이하	-3.5dB 이하
LSPR = -3dB	-3.3dB ~ +0.4dB	-3.5dB ~ -0.4dB
LSPR = 0dB	+0.4dB ~ +3.1dB	-0.4dB ~ +1.8dB
LSPR = +3dB	+3.1dB ~ +5.7dB	+1.8dB ~ +5.7dB
LSPR = +6dB	+5.7dB ~ +7.9dB	+5.7dB ~ +7.9dB
LSPR = +9dB	+7.9dB 이상	+7.9dB 이상

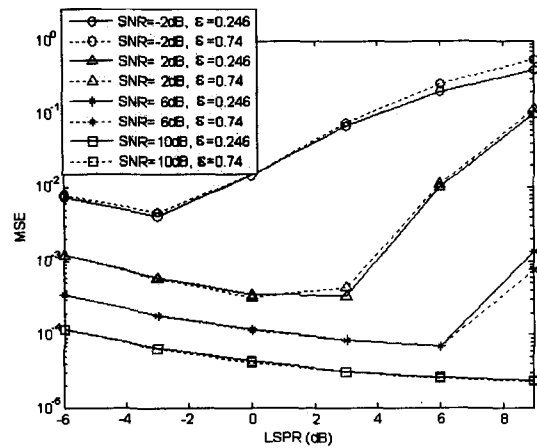


그림 4. LSPR 파라미터에 따른 제안 주파수 오프셋 예측기법의 MSE 성능

Fig. 4. MSE performance of the proposed frequency offset estimation scheme according to LSPR parameter.

터, 제안한 기법을 적용한 경우 주파수 오프셋 예측에러에 대한 MSE 성능은 정규화 주파수 오프셋 에러의 크기값에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 SNR 조건에 따라서 주파수 오프셋 예측 성능을 최적화하기 위해 적용해야 하는 LSPR 파라미터 값을 그래프로부터 도출해낼 수 있다.

만일 채널환경이 패킷 길이에 비해 훨씬 느리게 변화하고 수신된 SNR의 예측을 통해 송신단에 전달되면, 제안한 기법을 적용하여 모든 SNR 상황에서 최적의 주파수 오프셋 예측 성능을 달성할 수 있는 LSPR 파라미터를 적용할 수 있다. 그림 2와 그림 3에서 나타난 그래프를 통해 달성할 수 있는 최적의 MSE 곡선은 각각의 SNR 구간에 대하여 가장 아래쪽으로 그려지는 곡선들을 조합하여 근사화될 수 있다. 따라서 제안한 기법을 통하여 기존의 연구결과에 제시된 SNR 예측기법과 함

게 활용되어 기존의 방식보다 우수한 성능을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다.

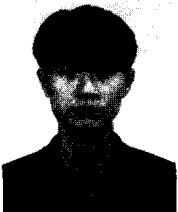
IV. 결 론

본 논문에서는 IEEE802.11p나 IEEE802.11a의 물리계층 뿐만 아니라 다른 OFDM기반의 패킷 통신시스템에도 유용하게 적용할 수 있는 주파수 오프셋 예측 기법을 제안하였다. 제안 기법에서는 긴 혼련심볼과 짧은 혼련심볼의 전력 비를 조절할 수 있는 LSPR 파라미터 ρ 를 도입하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안하는 주파수 오프셋 예측 기법을 적용한 경우 특정 SNR영역 구간을 제외하고 기존의 예측기법에 비해 모두 MSE 성능을 우수하게 할 수 있는 LSPR파라미터 값이 존재하였다. 따라서 OFDM기반의 패킷 통신시스템에서 제안하는 주파수 오프셋 예측 기법을 SNR 예측 기법과 함께 적용하여 모든 SNR영역에서 기존의 기법보다 주파수 오프셋 에러에 대한 MSE 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] W. Y. Zou, and Y. Y. Wu, "COFDM : an overview," *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 41 no. 1, pp. 1-8, Mar. 1995.
- [2] John Terry and Juha Heiskala, *OFDM Wireless LANs : A Theoretical and Practical Guide*, SAMS, 2002.
- [3] R. Prasad, *Universal Wireless Personal Communications, Boston · London* : Artech, 1998.
- [4] T. Pollet, M. Van Bladel, and M. Moeneclaey, "BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Weiner phase noise," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, part 1, pp. 191-193, Feb.-Apr. 1995.
- [5] P. H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no. 10, pp. 2908-2914, 1994.
- [6] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 12, pp.1613-1621, 1997.
- [7] S. Chang and E. J. Powers, "Efficient frequency-offset estimation in OFDM-based WLAN systems", *Electronics Letters*, vol. 39, no. 21, Oct. 2003.
- [8] J. Li, G. Liu, and G. B. Giannakis, "Carrier frequency offset estimation for OFDM-based WLANs," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 80-82, March 2001.
- [9] IEEE Std 802.11a : *Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: high-speed physical layer in the 5GHz band*, December 1999.
- [10] IEEE 802.11p draft amendment to standard for information technology, *Wireless Access in Vehicular Environments(WAVE)*, Jan. 2005.

저 자 소 개



곽 재 민(정회원)

1998년 2월 한국항공대학교 통신정보공학과 졸업
 1999년 8월 한국항공대학교 통신정보공학과 석사 졸업
 2002년 8월 한국항공대학교 통신정보공학과 박사 졸업
 2002년 7월~2003년 7월 한국전자통신연구원 네트워크 연구소 (Post-doc.)
 2003년 7월~현재 전자부품연구원 SoC연구센터 책임연구원
 <주관심분야 : 유무선 통신시스템, 임베디드 시스템, 통신신호처리>