

무선 OFDM 시스템에서 MUSIC을 기반으로 하는 효율적인 주파수 오프셋 추정 °

A Novel Scheme based on MUSIC for Efficient Frequency-Offset Estimation in Wireless OFDM Systems °

김종록*, 장석진**
JongRok Kim and Sekchin Chang

Abstract - As OFDM-based systems exhibits robustness over wireless channel, it is possible to consider them the next generation of the wireless communications including the mobile communications. However, there is a critical point that OFDM-based systems can receive the distorted signal due to the frequency-offset. Therefore, it is necessary to accurately estimate the frequency-offset for OFDM-based systems to be adopted as the next wireless communication systems. In this paper, the efficient frequency-offset estimation scheme based on MUSIC is presented in 802.11a WLAN systems. As shown in the simulation result, this scheme can improve and optimize the estimation performance.

Key Words : OFDM, WLAN, Frequency-offset, MUSIC

1. 서론

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식을 사용하는 WLAN 시스템에서 주파수 오프셋 (frequency-offset)이 시스템 성능에 미치는 영향은 매우 크다. 따라서 802.11a WLAN에서는 프리엠블 (preamble)에서 주파수 오프셋을 추정한다. 현재까지 매우 다양한 주파수 오프셋 추정 방법이 제시되었다.

본 논문에서는 MUSIC (Multiple Signal Characterization) 방식을 프리엠블을 이용하는 주파수 오프셋 추정 방식에 적용하여 이전보다 효율적인 주파수 오프셋 추정 방법을 제시한다. 또한 다양한 채널 환경에서의 시뮬레이션을 통하여 현재 사용되는 방법보다 성능이 훨씬 우수함을 보여준다.

2. OFDM

OFDM 방식은 여러 개의 반송파를 사용하는 다수반송파 전송의 일종이며, 이러한 반송파 사이에 직교성을 갖는 특징이 있다.

시간 $t = t_s$ 에서 시작하는 하나의 OFDM 심벌 $s(t)$ 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$s(t) = \begin{cases} \sum_{i=N_g/2}^{N_g/2-1} d_i + N_g/2 e^{j2\pi \frac{i}{T}(t-t_s)} & t_s \leq t \leq t_s + T \\ 0 & t < t_s, \text{ and } t > t_s + T \end{cases} \quad (1)$$

d_i 는 변조된 복소수 심벌, N_g 를 부반송파의 수, T 는 심벌 구간 그리고 f_c 는 반송파 주파수이다. 이때, 각 부반송파는 구간 T 에서 정확히 정수개의 사이클을 가지며, 부반송파 사이에 직교성 (orthogonality)이 성립한다. 하지만 주파수 오프셋을 효율적으로 제거하지 못하면 직교성이 성립하지 않아 OFDM 시스템에 치명적인 영향을 줄 수 있다.

3. 802.11a Wireless LAN

OFDM기반의 802.11a WLAN은 모든 프레임마다 프리엠블 필드를 갖는다. 이는 10개의 동일한 SS (Short training Symbol) 와 2개의 동일한 LS (Long training Symbol)로 구성되어 있다.

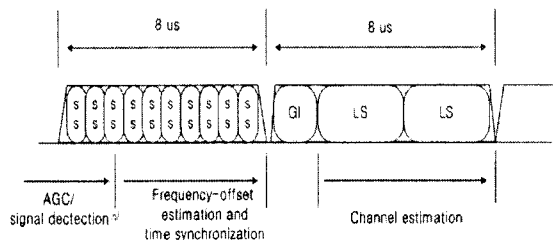


그림 1. IEEE 802.11a 프리엠블의 구조

저자 소개

* 김종록 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사과정

** 장석진 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 조교수

° 이 연구는 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 이루어짐

그림 1처럼 AGC (Automatic Gain Control) 및 신호 검출

(detection)이 끝나면 나머지 SS를 이용하여 주파수 옵셋을 추정한다.

4. 주파수 옵셋 추정

4.1 기존 주파수 옵셋 추정 방식

802.11a WLAN의 수신단에서 받은 신호는 식 (2)가 된다.

$$r(n) = \sum_{l=0}^{N_h-1} h_l s(n-l) e^{j2\pi\epsilon n/N} + \eta(n) \quad (2)$$

h_l 과 $s(n)$ 은 각각 이산 시간의 복조 채널 임펄스 응답 (complex channel impulse response)과 전송된 신호를 의미한다. N_h 는 채널의 길이, N 은 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)의 길이, ϵ 는 부반송과 간격으로 정규화된 주파수 옵셋, 그리고 $\eta(n)$ 은 백색잡음(addictive white Gaussian noise)을 뜻한다.

그림 1과 같이 처음 두개의 SS는 AGC 및 신호 검출에 사용된다. 이때 나머지 각각 동일한 길이를 갖는 두 그룹으로 나눌 수 있는데, 두 그룹 사이의 상관관계 (correlation)기법으로 주파수 옵셋을 얻을 수 있다.

$$\hat{\epsilon}_f = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{\sum_{n=0}^{N/2-1} \text{Im}[r^*(n)r(n+N/2)]}{\sum_{n=0}^{N/2-1} \text{Re}[r^*(n)r(n+N/2)]} \right\} \quad (3)$$

$\hat{\epsilon}_f$ 는 추정된 주파수 옵셋을 뜻한다.

4.2 제안된 MUSIC을 기반으로 하는 주파수 옵셋 추정 방식

채널의 길이 N_h 가 AGC 및 신호 검출을 수행하기 위해 사용된 SS의 길이보다 작으면, 처음 두개의 SS는 남은 SS의 cyclic prefix로 간주된다. 따라서 처음 두개의 SS를 제거하면 식 (2)는 $r_h(n)$ 으로 표현된다.

$$r_h(n) = \begin{cases} s(n) \otimes h(n) \\ s_h(n) \end{cases} e^{j2\pi n/N} + \eta(n) \quad (4)$$

\otimes 는 circular convolution 연산자를 의미한다. h_l 이 주파수 옵셋 추정동안에 변하지 않는다면, $s_h(n)$ 이 매 16 샘플마다 동일한 값으로 반복된다. 따라서 위의 식 (4)는 다시 식 (5)로 표현된다.

$$r_h(n) = s_h(n \bmod 16) e^{j2\pi n/N} + \eta(n) \quad (5)$$

위의 mod는 모듈로 (modulo)연산자를 의미한다. 식 (5)를 제안된 주파수 옵셋 추정을 위해 다시 식 (6)으로 정의한다.

$$Y(p) \triangleq \begin{bmatrix} Y_0(p) \\ Y_1(p) \\ Y_2(p) \\ \vdots \\ Y_{m-1}(p) \end{bmatrix} = A(p) \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j2\pi 16\epsilon/N} \\ e^{j2\pi 16 \cdot 2\epsilon/N} \\ \vdots \\ e^{j2\pi 16 \cdot (m-1)\epsilon/N} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_0(p) \\ \eta_1(p) \\ \eta_2(p) \\ \vdots \\ \eta_{m-1}(p) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$p = 0, 1, 2, \dots, 15$ 이고 m 은 그림 1에서 주파수 옵셋 추정을 위해 남아있는 SS의 수를 표시한다. 식 (6)에서 사용된 $A(p)$, $\eta_i(p)$ 그리고 $Y_i(p)$ 는 각각 식 (7), (8) 그리고 (9)에서 주어진다.

$$A(p) = \begin{cases} s_h[(16l+p+q) \bmod 16] \\ s_h(p+q) \end{cases} e^{j2\pi(p+q)k/N} \quad (7)$$

$$\eta_i(p) = n(16l+p+q) \quad (8)$$

$$Y_i(p) = A(p) e^{j2\pi 16i\epsilon/N} + \eta_i(p) \quad (9)$$

$l = 0, 1, 2, \dots, m-1$ 이고 $p = 0, 1, 2, \dots, 15$ 이다. q 는 주파수 옵셋 추정이 시작하는 부분을 나타내는데, WLAN 수신단이 m 과 q 에 대한 정보를 미리 알고 있다고 가정하면 [1], 식 (5)와 (7)부터 (9)를 이용하여 식(10)을 얻을 수 있다.

$$Y_i(p) = r_h(n) \quad (10)$$

이때 $n = 16l + p + q$ 이다. 식(6)에서 $Y(p)$ 의 공분산 행렬 (covariance matrix)은 식 (11)과 식 (12)로 주어진다.

$$R_Y = E[Y(p)Y^H(p)] = X(\epsilon)R_A X^H(\epsilon) + \sigma^2 I \quad (11)$$

$$X(\epsilon) = [1 \ e^{j2\pi 16\epsilon/N} \ e^{j2\pi 16 \cdot 2\epsilon/N} \ \dots \ e^{j2\pi 16 \cdot (m-1)\epsilon/N}]^T \quad (12)$$

$E[\cdot]$ 와 H 는 각각 기대값과 헤르미트(Hermitian) 연산자를 의미하고 R_A 와 σ^2 는 각각 $A(p)$ 와 $\eta_i(p)$ 의 분산을 뜻한다. 그리고 T 는 이항(Transpose) 연산자이다. 식(11)의 R_Y 를 eigen-decomposition 수행한 후의 값으로 정리하면 식 (13)이 된다.

$$R_Y = \sum_{i=1}^m \lambda_i e_i e_i^H \quad (13)$$

이때, λ_i 는 i 번째 고유값을 뜻하고, e_i 는 그에 해당하는 고유 벡터이다. 고유값 λ_i 는 식 (14)의 관계로 구성되며 이를 통해 $m-1$ 개의 고유벡터 e_2, e_3, \dots, e_m 는 잡음 부공간 (noise subspace)을 이룬다. 따라서 잡음 부공간에 관한 행렬은 식 (15)로 정의된다.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 = \lambda_3 = \dots = \lambda_m = \sigma^2 \quad (14)$$

$$E_{noise} = [e_2 \ e_3 \ \dots \ e_m] \quad (15)$$

신호 부공간 (signal subspace)과 잡음 부공간 사이는 직교성이 존재함에 따라, MUSIC알고리즘과 유사한 유사 스펙트럼 (pseudo-spectrum)을 아래와 같이 정의한다.

$$\hat{P}(\epsilon) = \frac{1}{X^H(\epsilon)E_{noise}E_{noise}^H X(\epsilon)} \quad (16)$$

식(16)에서 주파수 옵셋 추정값 $\hat{\epsilon}$ 는 식(17)을 이용하여 얻는다.

$$\hat{\epsilon} = \arg \max_{\epsilon} [\hat{P}(\epsilon)] \quad (17)$$

식 (11)의 공분산 R_Y 는 식(18)을 이용하여 구한다.

$$R_Y = \frac{1}{16} \sum_{p=0}^{15} [Y(p)Y^H(p)] \quad (18)$$

5. 모의실험 결과

주파수 옵셋 추정의 모의실험은 앞에서 언급했듯이 OFDM 기반의 802.11a WLAN 시스템을 사용하였다. 전송율은 36Mbps로 이에 따라 16QAM 변조 방식을 사용하였다. 모의실험을 위한 채널로서 각 채널 경로가 독립적인 레일리 (Rayleigh) 페이딩을 겪는 다중 경로 (multi-path) 채널 모델을 사용한다. 그리고 다중경로를 위한 PDP (Power-Delay Profile)는 [6]의 A, B, 그리고 C 타입을 사용하였다. 또한, 식 (17)에서 탐색되는 ϵ 사이인 Δ 로 10^{-4} 를 이용하였다.

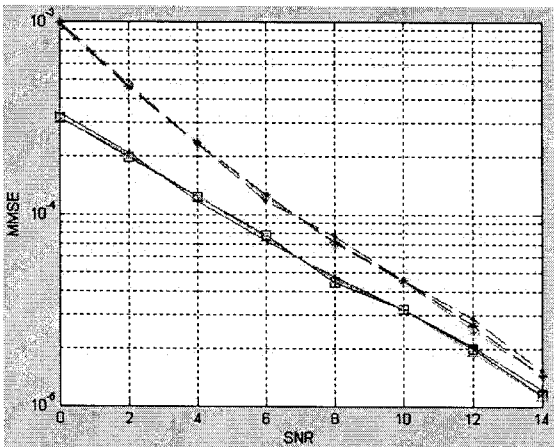


그림2. 채널 환경에 따른 주파수 옵셋의 MMSE

그림 2는 주파수 옵셋 ϵ 와 추정된 주파수 옵셋 $\hat{\epsilon}$ 의 MMSE (Minimum Mean Square Error)를 SNR (Signal-to-Noise Ratio)에 따라 구한 것이다. 위 그림에서 실험 결과는 모의실험에서 사용했던 채널 종류에는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 하지만 본 논문에서 제시한 방법이 현재 사용되는 방법보다 평균 2 dB이상 성능이 우수함을 알 수 있다. SNR이 높아질수록 성능의 차이가 줄어들어는 것은, 식 (17)에서 $\hat{\epsilon}$ 를 구할 때 필요한 Δ 를 10^{-4} 로 주었기 때문에 MMSE의 값이 10^{-5} 을 넘지 못하기 때문이다.

5. 결론

OFDM을 기반으로 하는 시스템은 대용량의 무선 데이터 통신을 하는데 매우 효율적이지만 주파수 옵셋에 영향을 많이 받는 단점이 있다. 현재까지 다양한 주파수 옵셋 추정 방법이 제시되었다. 하지만 본 논문에서 제시한 MUSIC 알고리즘을 이용한 주파수 옵셋 추정 방법이 기존의 추정 방식보다 훨씬 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. Schang and E. J. Powers, "An efficient frequency-offset estimation in OFDM-based WALNS systems", Electronics Letters, vol. 39, no. 21, pp. 1554-1555, 2003.
- [2] H. K. Song, Y. H. You, J. H. Paik and Y. S. Cho, "Frequency-offset synchronization and channel estimation for OFDM-based transmission", IEEE Comm. Letters, vol. 4, no.3, pp. 95-97, March 2000.
- [3] IEEE std 802.11a: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: high-speed physical layer in the 5 GHz band, Dec. 1999
- [4] C. W. Therrien, "Discrete random signals and statistical signal processing", Prentice-Hall, 1992.
- [5] P. Stoica and A. Nehorai, "MUSIC, maximum likelihood and Cramer-Rao bound", IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 37, no. 5, pp. 720-741, 1989.
- [6] J. Melbo and P.Schramm, "Channel models for HIPERLAN/2 in different indoor scenarios", 3ER1085B, HIPERLAN/2 ETSI/BRAN contribution