

# 협대역 재밍환경에서 재밍된 파일럿 제거 방법을 이용한 OFDM시스템의 채널추정에 관한 연구

정회원 한 명수\*, 류탁기\*\*, 준회원 김지형\*, 광경철\*, 한승엽\*, 종신회원 홍대식\*

## OFDM Channel Estimation with Jammed Pilot Excision Method under Narrow-Band Jamming

Myeongsu Han\*, Takki Yu\*\* *Regular Members*, Jihyung Kim\*, Kyungchul Kwak\*,  
Seungyoup Han\* *Associate Members*, Daesik Hong\* *Lifelong Member*

### 요 약

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서 채널추정을 위해 사용되는 파일럿에 발생하는 협대역 재밍은 시스템 성능에 나쁜 영향을 준다. 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위해 재밍된 파일럿을 검출하여 제거할 수 있는 방법을 제안한다. 또한, 한 개의 OFDM 심볼에서 재밍된 파일럿과 제거된 파일럿으로 인해 발생하는 평균 제곱 오류(Mean Squared Error, MSE)를 분석한다. 그리고, 실험을 통해 제안된 알고리즘을 사용한 채널추정 구조의 심볼 오류율(Symbol Error Rate, SER) 성능을 평가한다. 제안된 방법은 재밍 전력이 높은 환경에서 채널추정 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

**Key Words** : Channel Estimation, Least-Squares, Linear Interpolation, Narrow-Band Jamming, OFDM Systems

### ABSTRACT

In Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems, Narrow-Band Jamming (NBJ) over pilot tones used for channel estimation degrades the system performance. In this paper, we propose a new jammed pilot detection and elimination algorithm to overcome this problem. Moreover, the average Mean-Squared Error (MSE) on one OFDM symbol both under jammed and removed pilot subcarrier is analyzed. And then, the Symbol Error Rate (SER) performance of the channel estimation scheme using the proposed algorithm is evaluated by simulation. We can confirm that the channel estimator with the proposed algorithm improves the channel estimation performance at a high jamming power.

### 1. 서 론

채널추정은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서 채널에 의한 신호 왜곡을 상쇄시키는 가장 중요한 과정의 하나로써, 이 분야에서의 다양한 연구들이 활발히 진행되고 있다 [1-3]. 이것은 송수신단에서 모두 알고 있는 파일럿 톤을 채널추정 방법에 따라 전송하고자 하는 심볼

를 상쇄시키는 가장 중요한 과정의 하나로써, 이 분야에서의 다양한 연구들이 활발히 진행되고 있다 [1-3]. 이것은 송수신단에서 모두 알고 있는 파일럿 톤을 채널추정 방법에 따라 전송하고자 하는 심볼

※ 1. 본 과제(결과물)는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실 지원사업의 연구결과임.  
 ※ 2. 이 논문은 2006년도 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 전기전자공학부 TMS사업단의 지원을 받아 연구되었음.  
 \* 연세대학교 전기전자공학과 정보통신 연구실 (hmskdy@itl.yonsei.ac.kr)

\*\* (주) 삼성전자 정보통신총괄 통신연구소

논문번호 : #KICS2006-10-467, 접수일자 : 2006년 10월 31일, 최종논문접수일자 : 2007년 1월 19일

에 시간 또는 주파수 축으로 삽입함으로써 이루어진다. 파일럿 기반의 채널추정 기법에서 이러한 파일럿 톤에 재밍이 있을 경우 그 영향이 보간(interpolation) 과정에서 확산되므로 추정성능을 저하시킨다<sup>4)</sup>.

Patel과 그 외 연구자들은 상용 시스템과 군사통신 분야에서 발생할 수 있는 협대역과 부분대역 재밍 환경에서 OFDM과 MC-CDMA(Multicarrier-Code Division Multiple Access) 시스템에서의 부정확한 채널추정으로 인한 이론적인 비트 오류율(Bit Error Rate, BER)을 연구하였다<sup>4)</sup>. 그리고, 단일 부반송파 파일럿 재밍 환경에서 재밍 정보(jamming side information)가 활용 가능한 상황에서 재밍된 파일럿 제거와 최소 평균제곱 오류(MMSE) 등화기법과 같은 극복 방안들을 제시하였다.

본 논문에서는 협대역 재밍환경에서 OFDM 시스템의 효율적인 채널추정을 위한 재밍된 파일럿 검출 알고리즘을 제안한다. 한 개의 OFDM 심볼에서 LS 추정 후, 파일럿 부반송파에서의 추정된 채널은 재밍 신호의 존재유무에 따라 각각 다르게 된다<sup>4)</sup>. 이를 이용하여, 재밍된 파일럿 부반송파를 검출하고 제거할 수 있게 된다. 결국, 재밍된 파일럿으로부터 받게 되는 협대역 재밍의 영향이 제거된 선형 보간(linear interpolation)을 가능하게 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장은 협대역 재밍 영향으로 인해 발생하는 한 개의 OFDM 심볼에서의 채널추정에 대해 살펴본다. III장은 제안된 재밍된 파일럿 검출 알고리즘을 소개하고, 재밍된 파일럿이 제거됨으로써 발생하는 한 개의 OFDM 심볼에서의 MSE를 분석한다. IV장에서는 실험결과를 논하고, V장은 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 협대역 재밍환경에서의 채널 추정

본 장에서는 OFDM 시스템에서 협대역 재밍 환경에서의 Comb-type 파일럿 기반의 채널추정 기법을 소개한다<sup>5-6)</sup>. 또한, 한 개의 OFDM 심볼에 대한 선형 보간과정에서 협대역 재밍으로 인해 발생하는 채널추정 오류(MSE)를 분석한다.

### 2.1 채널추정

한 개의 OFDM 심볼내에서 단일 부반송파 간격의 작은 대역폭( $B_j = B_s$ )을 갖는 협대역 재밍(Narrow-Band Jamming, NBJ) 신호를 가정한다. 여기서,  $B_j$ ,  $B_s$ 는 각각 협대역 재밍 신호의 대역폭,

단일 부반송파의 대역폭이다.

그림 1은 제안된 알고리즘을 사용한 채널추정 기법의 블록도를 보여준다. 심볼간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI)과 반송파간 간섭(Inter-Carrier Interference, ICI)이 없다고 가정하면, DFT(Discrete Fourier Transform)후에  $k$ 번째 부반송파 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y(k) = X(k)H(k) + C_k J(k) + W(k), k=0, \dots, K-1 \quad (1)$$

여기서,  $X(k)$ ,  $H(k)$ ,  $J(k)$ ,  $W(k)$ ,  $K$ 는 각각 전송신호, 채널, 분산이  $\sigma_j^2$ 이고 평균이 0인 Gaussian으로 모델링된 협대역 재밍 신호<sup>4)</sup>, 분산이  $\sigma_n^2$ 인 백색 가우시안 부가잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN), 부반송파 수이며,  $C_k$ 는 재밍 존재유무에 따라 0과 1의 값을 갖는 상수이다.

Comb-type 파일럿 기반 채널추정 기법에서,  $P$ 개의 파일럿 부반송파는 그림 2에서 보는 바와 같이 전송신호  $X(k)$ 내에 균일하게 삽입된다. 심볼 표현의 편이성을 위해  $k$ 번째 부반송파의 전송신호는 다음과 같이 정의한다.

$$X(k) = \begin{cases} X_{pL} : \text{pilot,} \\ X_{pL+l} : \text{data, where } l=1, \dots, L-1, \end{cases} \quad (2)$$

여기서,  $L$ 은 보간 길이(interpolation length)이며,  $P \times L = K$ 이다.

따라서, 최소 제곱값(Least Squares, LS) 추정에 의한  $pL$ 번째 파일럿 부반송파에서의 채널추정 값은 다음과 같다.

$$\hat{H}_{pL} = \frac{Y_{pL}}{X_{pL}}, p=0, 1, \dots, P-1, \quad (3)$$

여기서,  $Y_{pL}$ 과  $X_{pL}$ 은 각각  $pL$ 번째 파일럿 부반송파에서의 수신 및 전송신호이다.  $X_{pL} = 1$ 이라고 하면,  $\hat{H}_{pL}$ 은 파일럿 부반송파에 협대역 재밍신호의 존재 유무에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{H}_{pL}^j &= H_{pL} + J_{pL} + W_{pL} && : \text{a jammed pilot,} \\ \hat{H}_{pL} &= H_{pL} + W_{pL} && : \text{a non-jammed pilot,} \end{aligned} \quad (4)$$

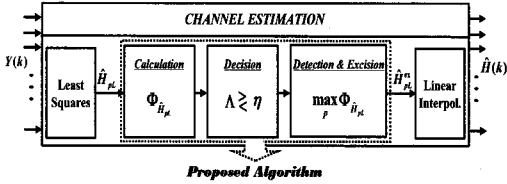


그림 1. OFDM시스템에서 제안된 알고리즘을 사용한 채널추정의 블록도

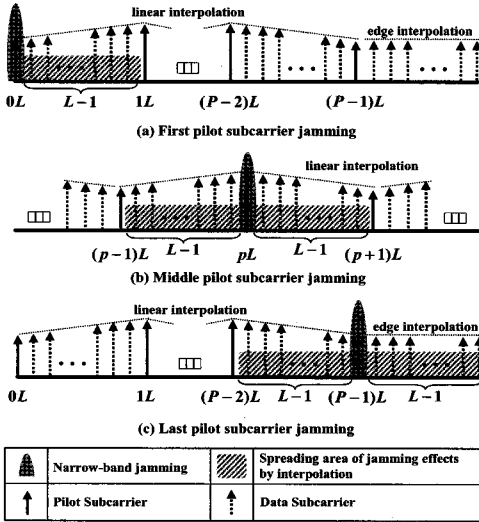


그림 2. 협대역 재밍환경에서 OFDM시스템의 선형 보간법에 의한 채널추정

여기서,  $J_{pL}$ 과  $W_{pL}$ 은 각각  $pL$ 번째 파일럿 부반송파에서 수신된 재밍 및 잡음 심볼이다.

$L \geq 2$ 인 경우, 파일럿 부반송파의 채널 정보를 이용하여 데이터 부반송파의 채널을 추정하기 위해서는 보간(interpolation)이 필요하다. 선형 보간법을 사용한  $pL+l$ 번째 부반송파에서의 추정된 채널은 다음과 같다 [3].

$$\hat{H}_{pL+l} = \frac{L-l}{L} \hat{H}_{pL} + \frac{l}{L} \hat{H}_{(p+1)L}. \quad (5)$$

$(P-1)L$ 번째 파일럿 부반송파의 우측에 존재하는 데이터 부반송파에서의 채널 정보는 모서리 보간법(edge interpolation),  $\hat{H}_{(P-1)L+l} = \hat{H}_{(P-1)L}$ 에 의해 결정된다.

### 2.2 협대역 재밍신호의 영향분석

그림 2에서 보는 바와 같이, 한 OFDM 심볼에서

파일럿 부반송파에 미치는 협대역 재밍 영향은 세 가지 경우로 구분할 수 있다. 채널추정에서 채널정보를 추정하기 위해 파일럿 부반송파만을 사용하므로 데이터 부반송파에 미치는 재밍 신호는 무시할 수 있다[3]. 따라서, Case (a)에서의 협대역 재밍에 의한 평균 MSE를 구하면 다음과 같다.

$$\bar{\varepsilon}_{\text{1st}} = \frac{1}{K} [e_P^j + (L-1)e_L^j + \underbrace{(P-1)\varepsilon_P + [K-P-2(L-1)]\varepsilon_L + (L-1)\varepsilon_E}_{\text{Inherent Errors}}], \quad (6)$$

여기서,  $\varepsilon_P, \varepsilon_L, \varepsilon_E, e_P^j, e_L^j$ 은 각각 비재밍(non-jammed) 파일럿 부반송파, 선형 보간, 모서리 보간, 재밍 파일럿 부반송파, 재밍 영향의 확산 범위내의 선형 보간에 의한 채널 추정의 MSE 값을 의미한다. 이와 동일하게, Case (b)와 (c)에서의 평균 MSE는 다음과 같다.

$$\bar{\varepsilon}_{\text{mid}} = \frac{1}{K} [e_P^j + 2(L-1)e_L^j + \underbrace{(P-1)\varepsilon_P + [K-P-3(L-1)]\varepsilon_L + (L-1)\varepsilon_E}_{\text{Inherent Errors}}],$$

$$\bar{\varepsilon}_{\text{last}} = \frac{1}{K} [e_P^j + (L-1)e_L^j + (L-1)e_E^j + \underbrace{(P-1)\varepsilon_P + [K-P-2(L-1)]\varepsilon_L}_{\text{Inherent Errors}}], \quad (7)$$

여기서,  $e_E^j$ 는 재밍 영향의 확산 범위내의 모서리 보간에 의한 채널 추정의 MSE 값을 나타낸다. 채널 추정과정에서 발생하는 오류(inherent errors) 값 들인  $\varepsilon_P, \varepsilon_L, \varepsilon_E$ 는 [5, 6]에서 구할 수 있으며, 나머지 MSE 값들은 다음과 같다.

$$e_P^j = E\{\|\hat{H}_{pL}^j - H_{pL}\|^2\} = \sigma_j^2 + \varepsilon_P,$$

$$e_L^j = \frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^{L-1} E\{\|\hat{H}_{pL+l}^j - H_{pL+l}\|^2\} = \frac{2L-1}{6L} \sigma_j^2 + \varepsilon_L,$$

$$e_E^j = \frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^{L-1} E\{\|\hat{H}_{(p-1)L+l}^j - H_{(p-1)L+l}\|^2\} = \sigma_j^2 + \varepsilon_E,$$

여기서,  $\hat{H}_{pL}^j$ 은 (4)에서 재밍된 파일럿에서의 추정된 채널 값,  $E\{\cdot\}$ 는 기대 값,  $\hat{H}_{pL+l}^j$ 은 (5)에서 재밍 오류의 확산에 의해 발생하는  $pL+l$ 번째 부반송파에서 추정된 채널 값, 그리고  $R_f\{\cdot\}$ 는 [2]에서 설명한 바와 같이 주파수 영역의 상관함수이다.

(6)-(8)을 종합하면, 각 경우에서의 평균 MSE는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{1st} &= \alpha + \beta + \left\{ \frac{1}{K} + \frac{(L-1)(2L-1)}{6KL} \right\} \sigma_j^2, \\ \bar{\varepsilon}_{mid} &= \alpha + \beta + \left\{ \frac{1}{K} + 2 \frac{(L-1)(2L-1)}{6KL} \right\} \sigma_j^2, \\ \bar{\varepsilon}_{last} &= \alpha + \beta + \left\{ \frac{1}{K} + \frac{(L-1)(2L-1)}{6KL} + \frac{L-1}{K} \right\} \sigma_j^2, \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 보간 오류(interpolation error)와 가우시안 잡음이다<sup>[8]</sup>. 세 번째 부분은 재밍된 파일럿 부반송파에 의해 발생한 협대역 재밍 오류이다.

따라서, (9)를 이용하여 협대역 재밍환경에서 임의의 재밍된 파일럿 부반송파로 인해 발생하는 한 개의 Comb-type OFDM 심볼에서의 평균 MSE는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{P} \bar{\varepsilon}_{1st} + \frac{P-2}{P} \bar{\varepsilon}_{mid} + \frac{1}{P} \bar{\varepsilon}_{last} \quad (10)$$

(10)의 분석결과와 실험의 비교는 IV장에서 다룬다.

### III. 재밍된 파일럿 검출기법을 이용한 채널추정

[4]에서 설명한 바와 같이, 재밍된 파일럿이 검출된다면, 그림 1과 같이 재밍된 파일럿 제거방법을 적용할 수 있다. 따라서, 본 장에서는 협대역 재밍 신호의 영향을 제거하기 위한 재밍된 파일럿 검출 알고리즘을 제안하고, 재밍된 파일럿 제거로 인해 발생하는 채널추정 오류를 분석한다.

#### 3.1 재밍된 파일럿 검출 알고리즘

두 개의 OFDM 심볼 시간동안 채널 상태가 변하지 않는다고 가정하면, (4)와 같은 두 개의 연속된 OFDM 심볼의 파일럿 부반송파에서 추정된 채널 값의 차,  $D_{pL}^j$ 과  $D_{pL}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} D_{pL}^j &= \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \hat{H}_{pL}^j(m+1) - \hat{H}_{pL}^j(m) \} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \{ J_{pL}(m+1) - J_{pL}(m) \} \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{2}} \{ W_{pL}(m+1) - W_{pL}(m) \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{pL} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \hat{H}_{pL}(m+1) - \hat{H}_{pL}(m) \} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \{ W_{pL}(m+1) - W_{pL}(m) \} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $m$ 은 OFDM 심볼 지수이다. 가우시안으로 모델링된 재밍 신호와 AWGN 모두의 차이 값 또한 가우시안 변수이다<sup>[9]</sup>. 그러므로, 일정한 OFDM 심볼 구간 동안 이 값들의 평균을 취하면 협대역 재밍신호가 존재하는 파일럿 부반송파에서의 분산은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}[D_{pL}^j] &= E \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \{ J_{pL}(m+1) - J_{pL}(m) \} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} \{ W_{pL}(m+1) - W_{pL}(m) \} \right)^2 \right] \\ &= E \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \{ J_{pL}(m+1) - J_{pL}(m) \} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} \{ W_{pL}(m+1) - W_{pL}(m) \} \right)^2 \right] \\ &= \sigma_j^2 + \sigma_w^2 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,  $\sigma_j^2$ 는 재밍 신호의 전력,  $\sigma_w^2$ 는 잡음 신호의 전력을 나타낸다. 따라서, 재밍 신호가 존재하지 않는 파일럿 부반송파의 분산,  $\text{Var}[D_{pL}]$ 은 위와 동일한 과정으로 구할 수 있으며, 각 파일럿 부반송파들의 분산,  $\Phi_{\hat{H}_{pL}}$ 은 다음과 같다.

$$\Phi_{\hat{H}_{pL}} = \begin{cases} \text{var}[D_{pL}^j] = \sigma_j^2 + \sigma_w^2 & : \text{a jammed pilot,} \\ \text{var}[D_{pL}] = \sigma_w^2 & : \text{a non-jammed pilot.} \end{cases} \quad (13)$$

$\sigma_j^2 \gg \sigma_w^2$ 라고 가정하면<sup>[4-7]</sup>, 최대 분산을 갖는 한 개의 파일럿 부반송파는 재밍된 파일럿으로, 최소 분산을 갖는 부반송파는 비재밍된 파일럿으로 선택된다. 이러한 특성으로 인해, 결정 변수(decision variable,  $\Lambda$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Lambda &= \max_p \Phi_{\hat{H}_{pL}} - \min_p \Phi_{\hat{H}_{pL}} \\ &\equiv \begin{cases} \sigma_j^2 & : \text{When NBJ exists,} \\ 0 & : \text{When NBJ does not exist.} \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

이 변수는 수신된 OFDM 심볼에 협대역 재밍 신호의 존재 여부를 결정하는 임계치(threshold,  $\eta$ )와 비교하게 된다. 임계치는 0과  $\sigma_j^2$ 사이에서 선택할 수 있으나, 간단한 결정 형태를 얻기 위해 다음과 같은

각 파일럿들의 분산 값의 평균치로 고정한다.

$$\eta = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} \Phi_{\hat{H}_{p,L}} \quad (15)$$

따라서,  $\Lambda > \eta$  일 때는 수신된 OFDM 심볼 중 최대 분산 값을 갖는 파일럿 부반송파를 제거하고,  $\Lambda \leq \eta$  일 경우에는 협대역 재밍 신호가 존재하지 않는 것으로 판단한다.

그림 1에 설명된 제안된 알고리즘의 전체 과정을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 정해진 심볼 수까지 두 개의 연속된 OFDM 심볼의 차를 평균하여 각 파일럿 부반송파의 분산을 계산한다.
- 2) 최대, 최소 분산 값의 차를 통해 결정 변수를 얻고, 그것을 임계치와 비교한다.
- 3) 검출 및 제거
  - $\Lambda > \eta$  일 때, 최대 분산 값을 갖는 파일럿 부반송파를 선택하고, 제거한다.
  - $\Lambda \leq \eta$  일 때, 재밍된 파일럿 부반송파가 없는 것으로 판단한다.

### 3.2 제안된 알고리즘을 사용한 채널추정에서의 평균 MSE

앞에서 언급한 바와 같이, 제안된 알고리즘을 통해 재밍된 파일럿 부반송파가 정확히 검출된다면 (9)에서 재밍으로 인한 영향은 제거될 수 있다. 그러나, 그림 2에서 보는 바와 같이 수신된 OFDM 심볼에서 파일럿 부반송파가 제거되면 보간 길이 또는 방법이 변하게 되므로 보간 오류(interpolation error,  $\alpha$ )가 달라질 것이다. Case (a)에서는, 첫 번째 파일럿 부반송파가 재밍된 것으로 결정되고 제거된다. 따라서, 이 부분은 두 번째 파일럿 부반송파를 이용한 모서리 보간방법으로 바뀌게 된다. Case (b)와 (c)에서는 각각 중간과 마지막 파일럿 부반송파가 제거됨으로써 보간 길이가 두 배가 된다.

그러므로, 제안된 알고리즘을 사용했을 때, (9)는 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\bar{\varepsilon}_{\text{1st}}^{\text{ex}} = \alpha + \beta + \left\{ \frac{L}{K} \varepsilon_{E-1}^{\text{ex}} - \frac{L-1}{K} \varepsilon_L - \frac{1}{K} \sigma_w^2 \right\},$$

$$\bar{\varepsilon}_{\text{mid}}^{\text{ex}} = \alpha + \beta + \left\{ \frac{2L-1}{K} \varepsilon_L^{\text{ex}} - \frac{2(L-1)}{K} \varepsilon_L - \frac{1}{K} \sigma_w^2 \right\},$$

$$\bar{\varepsilon}_{\text{last}}^{\text{ex}} = \alpha + \beta + \left[ \frac{L}{K} \varepsilon_{E-2}^{\text{ex}} + \frac{(L-1)}{K} (\gamma - \epsilon) - \frac{L-1}{K} \varepsilon_L - \frac{1}{K} \sigma_w^2 \right], \quad (16)$$

여기서,  $\varepsilon_{E-1}^{\text{ex}}$ 는 첫 번째 재밍된 파일럿 제거로 인해 발생하는 모서리 보간 방법에 의한 MSE,  $\varepsilon_L^{\text{ex}}$ 는 가운데 재밍된 파일럿 제거로 인한 선형 보간 방법에 의한 MSE,  $\varepsilon_{E-2}^{\text{ex}}$ 는 마지막 재밍된 파일럿 제거로 인한 모서리 보간 방법에 의한 MSE를 나타낸다. (8)을 이용하여,  $\varepsilon_{E-1}^{\text{ex}}$ ,  $\varepsilon_{E-2}^{\text{ex}}$ , 그리고  $\varepsilon_L^{\text{ex}}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{E-1}^{\text{ex}} = 2R_f(0) + \sigma_w^2 - \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \{R_f(l) + R_f(-l)\},$$

$$\varepsilon_L^{\text{ex}} = \frac{10L-1}{6L} 2R_f(0) + \frac{4L-1}{6L} \sigma_w^2 + \frac{2L+1}{12L} \{R_f(2L) + R_f(-2L)\} - \delta, \quad (17)$$

$$\varepsilon_{E-2}^{\text{ex}} = 2R_f(0) + \sigma_w^2 - \epsilon,$$

여기서,

$$\gamma = \frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^{L-1} \{R_f(l) + R_f(-l)\},$$

$$\delta = \frac{1}{2L-1} \sum_{l=1}^{2L-1} \left[ \frac{2L-1}{2L} \{R_f(l) + R_f(-l)\} + \frac{l}{2L} \{R_f(2L-l) + R_f(l-2L)\} \right],$$

$$\epsilon = \frac{1}{2L-1} \sum_{l=1}^{2L-1} \{R_f(l) + R_f(-l)\}.$$

따라서, 제안된 알고리즘을 사용한 한 개의 Comb-type OFDM 심볼에서의 평균 MSE는 다음과 같다.

$$\bar{\varepsilon}^{\text{ex}} = \frac{1}{P} \varepsilon_{\text{1st}}^{\text{ex}} + \frac{P-2}{P} \varepsilon_{\text{mid}}^{\text{ex}} + \frac{1}{P} \varepsilon_{\text{last}}^{\text{ex}} \quad (18)$$

(16)의 세 번째 부분은 재밍된 파일럿 부반송파의 제거로 인해 발생하는 오류이다. (10)의 협대역 재밍오류와 (18)의 재밍 파일럿 제거로 인한 오류의 비교는 다음 장에서 수행된다.

## IV. 실험 결과

본 장에서는, 주파수 대역이 2.0GHz이고, 전체 부반송파 수가 256개, 파일럿 수가 32개, 대역폭

2.5 MHz를 갖는 OFDM 시스템에서 협대역 재밍 환경에서 제안된 알고리즘을 사용한 채널추정 성능을 분석한다. 샘플 시간은 400 nsec으로, 심볼간 간섭 (Inter-Symbol Interference, ISI)을 피하기 위한 보호 구간은 12.8 μsec으로 정했다. 채널 모델은 ITU-R 채널을 적용하였다<sup>10)</sup>. 신호대 잡음전력 비 (Signal-to-Noise Ratio,  $E_b/N_0$ )는 20dB로 고정하고, 신호대 재밍 전력비(Signal-to-Jamming Ratio,  $E_b/J_0$ )는 0에서 20dB까지로 정했다<sup>14)</sup> 7).

그림 3은  $E_b/J_0=0, 10, 20$ dB에서 각 파일럿 부분송파들의 분산, (13)을 구하기 위해 사용되는 OFDM 심볼 수에 따른 채널추정시의 MSE 성능변화를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 재밍 전력에 따른 각 경우의 MSE 성능은 8개의 OFDM 심볼 지점에서 수렴하고, 높은 재밍 전력을 갖는 환경에서 재밍된 파일럿 부분송파를 정확히 검출하기 위해서는 더 많은 심볼이 필요함을 알 수 있다. 이것은 높은 전력의 협대역 재밍 환경에서 불충분한 신호 샘플 때문에 발생하는 오류에 의한 영향이 채널 추정 성능에 민감함을 보여준다. 따라서, 제안된 알고리즘에서 각 파일럿 부분송파의 정확한 분산을 구하기 위해 8개의 OFDM 심볼 동안의 샘플을 통해 각 파일럿 부분송파의 분산을 구하고, 협대역 재밍 신호의 주파수는 최소한 0.92 msec (8개 OFDM 심볼)동안 변하지 않는다고 가정하였다.

먼저, II장과 III장에서 분석한 수식 결과를 실험을 통해 증명하고, 제안된 알고리즘을 사용한 채널 추정 기법의 성능을 평가한다. 그림 4는  $E_b/N_0=20$ dB에서 제안된 알고리즘의  $E_b/J_0$ 에 따른 MSE 성능을 보여준다. 실선은 (10)과 (18)의 수식 결과이며, 기호로 표시된 것은 실험결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 분석된 수식과 실험결과가 정확히 일치함을 알 수 있다. 또한,  $E_b/J_0$ 가 낮은 협대역 재밍환경에서 제안된 알고리즘은 채널추정 성능을 향상시킨다. 이것은 제안된 알고리즘이  $E_b/J_0$ 가 낮은 환경에서 효율적으로 적용될 수 있음을 의미한다. 이 결과를 통해 주목해야 할 또 다른 점은 재밍 전력보다 잡음 전력이 더 큰 환경에서는 재밍의 영향이 매우 작다는 것이다. 이것은 [4, 7, 8]에서 언급한 바와 같이 재밍 환경에서 발생하는 일반적인 결과임을 확인할 수 있다. 그러므로, 재밍 환경에서 시스템의 성능을 평가하기 위해서는  $E_b/J_0$ 가 낮고,  $E_b/N_0$ 가 높은 환경에서의 성능 변화에 초점을 맞춰야 한다.

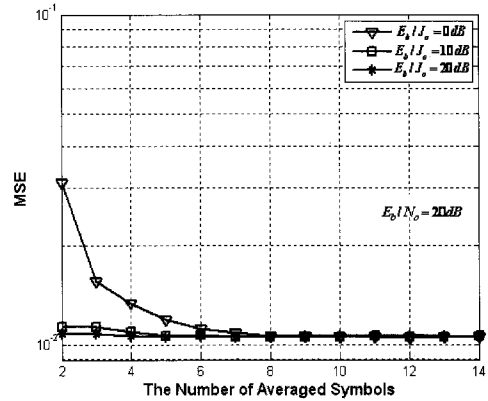


그림 3.  $E_b/J_0=0, 10, 20$ dB의 협대역 재밍에서 각 파일럿 부분송파들의 분산, (13)을 구하기 위해 사용되는 OFDM 심볼 수에 따른 채널추정시의 MSE 성능변화

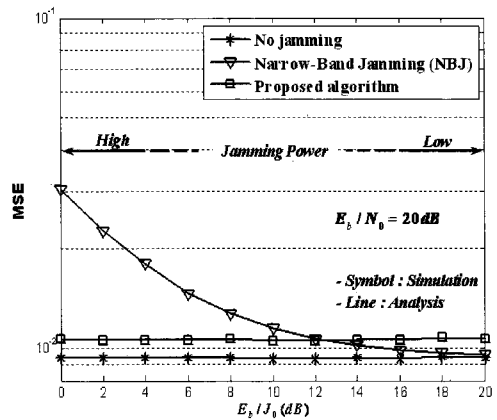


그림 4.  $E_b/N_0=20$ dB에서 제안된 알고리즘의  $E_b/J_0$ 에 따른 MSE 성능변화

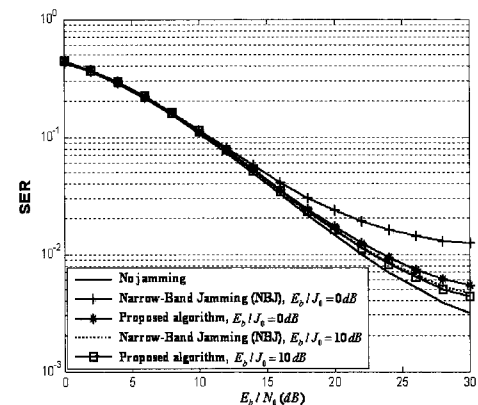


그림 5.  $E_b/J_0=0, 10$ dB에서 제안된 알고리즘의  $E_b/N_0$ 에 따른 채널추정에 의한 심볼 오류율(SER) 성능변화

그림 5는  $E_b/J_0=0, 10\text{dB}$ 에서 제안된 알고리즘의  $E_b/N_0$ 에 따른 채널추정에 의한 심볼 오류율(SER) 성능을 보여준다. 변조 방식은 QPSK를 사용했다. 그림에서 보는 바와 같이, 낮은  $E_b/N_0$ 에서의 협대역 재밍에 의한 성능과 제안된 알고리즘의 성능이 재밍의 존재 유무와 관계없이 거의 동일함을 알 수 있다. 반면에, 제안된 알고리즘은  $E_b/J_0$ 가 낮고  $E_b/N_0$ 가 높은 상황에서 SER 성능을 향상시킨다.

### V. 결론

본 논문에서는 OFDM 시스템에서 파일럿 부반송파에 발생하는 협대역 재밍의 영향을 제거할 수 있는 재밍된 파일럿 검출 알고리즘을 사용한 채널추정 구조를 제안하였다. 또한, 협대역 재밍 신호와 재밍된 파일럿이 제거된 경우에서의 평균 MSE를 분석하고, 실험을 통해 검증하였다. 재밍전력 변화에 따른 채널추정 성능변화를 관찰한 결과, 제안된 알고리즘은  $E_b/J_0$ 가 낮을수록 채널추정 성능을 향상시킬 수 있고,  $E_b/J_0$ 가 큰 상황에서는 채널추정에 미치는 재밍의 영향이 매우 작음을 확인하였다. 따라서, 제안된 알고리즘은 협대역 재밍 신호가 존재하는 환경에서 OFDM 시스템의 채널추정 기법에 효과적으로 적용될 수 있다.

### 참고 문헌

[1] O. Edfors, M. Sandell, J.-J. van de Beek, S. K. Wilson, and P. O. Borjesson, "OFDM Channel Estimation by Singular Value Decomposition," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 46, pp. -939, July, 1998.

[2] Y. Li, L. J. Cimini Jr., and N. R. Sollenberger, "Robust Channel Estimation for OFDM Systems with Rapid Dispersive Fading Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, pp. 902-915, July, 1998.

[3] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, and A. Bahai, "Channel Estimation Techniques based on Pilot Arrangement in OFDM Systems," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 48, pp. 223-229, September, 2002.

[4] Chirag S. Patel, Gordon L. Stuber, and Thomas G. Pratt, "Analysis of OFDM/MC-CDMA un-

der Imperfect Channel Estimation and Jamming," *IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, 2004, vol. 2, pp. 954-958, March, 2004.

[5] Jihyung Kim, Jeongho Park, and Daesik Hong, "Performance Analysis of Channel Estimation in OFDM Systems," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 12, pp. 60-62, January, 2005.

[6] Jeongho Park, Jihyung Kim, Myounghee Park, Kyunbyoung Ko, Changeon Kang, and Daesik Hong, "Performance Analysis of Channel Estimation for OFDM Systems with Residual Timing Offset," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 5, pp. 1622-1625, July, 2006.

[7] Jun Tan and Gordon L. Stuber, "Multicarrier Spread Spectrum System with Constant Envelope: Antijamming, Jamming Estimation, Multiuser Access," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 4, pp. 1527-1538, July, 2005.

[8] Gang Huo and Mohamed-Slim Alouini, "Another Look at the BER Performance of FFH/BFSK with Product Combining Over Partial-Band Jammed Rayleigh-Fading Channels," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 50, pp. 1203-1215, September, 2001.

[9] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 3rd. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

[10] ITU-R, M. 1225, *Test Environments and Deployment Models-ANNEX 2*.

한 명 수 (Myeongsu Han)

정회원



1994년 3월 : 해군사관학교 기계공학과 졸업  
 2003년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사  
 2005년 3월~현재 : 연세대학교 전자공학과 박사과정  
 <관심분야> 통신신호처리,

Ad-hoc, MMR

류 탁 기 (Takki Yu)

정회원



한국통신학회 논문지 제 26권,  
제 3호(2001) 참조

한 승 업 (Seungyoup Han)

준회원



한국통신학회 논문지 제 31권,  
제 1C호(2006) 참조

김 지 형 (Jihyung Kim)

준회원



한국통신학회 논문지 제 29권,  
제 4A호(2004) 참조

홍 대 식 (Daesik Hong)

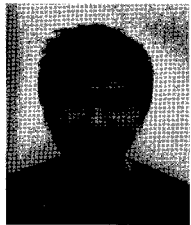
중신회원



한국통신학회 논문지 제 21권,  
제 8호(1996) 참조

곽 경 철 (Kyungchul Kwak)

준회원



2003년 2월 : 연세대학교 기계전  
자공학부 졸업  
2005년 2월 : 연세대학교 전자공  
학과 석사  
2005년 3월~현재 : 연세대학교  
전자공학과 박사과정  
<관심분야> 통신신호처리,

MIMO, OFDM, Relay