

이중 선택적 채널 OFDM 시스템에서 시간 영역 윈도우와 검출 순서가 순차적 간섭 제거에 미치는 영향

The Effects of Time Domain Windowing and Detection Ordering on Successive Interference Cancellation in OFDM Systems over Doubly Selective Channels

임 동 민

Dongmin Lim

요 약

이중 선택적 채널 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서 시변 채널 특성은 주파수 영역에서 부반송파 사이의 간섭 현상으로 나타난다. 시간 영역 윈도우의 사용은 주파수 영역 채널 행렬의 대역폭을 한정시키는 효과가 있으며, OFDM 시스템을 간략화된 선형 입력력 모델로 근사화시킬 수 있다. OFDM 시스템의 채널 등화에 선형 MMSE(Minimum Mean Square Error) 예측에 기반한 순차적인 간섭 제거 기법을 사용하는 경우, 심볼의 검출 순서가 전체적인 시스템 성능에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 시간 영역 윈도우의 사용으로 인한 잔류 ICI의 감소와 이에 따른 성능 개선 효과를 확인하고, SINR(Signal to Interference and Noise Ratio)과 CSEP(Conditional Symbol Error Probability) 값을 기준으로 하는 심볼 검출 순서가 순차적 간섭 제거 방식의 성능에 미치는 영향을 조사한다.

Abstract

Time-varying channel characteristics in OFDM systems over doubly selective channels cause inter-carrier interferences(ICI) in the frequency domain. Time domain windowing gives rise to restriction on the bandwidth of the frequency domain channel matrix and makes it possible to approximate the OFDM system as a simplified linear input-output model. When successive interference cancellation based on linear MMSE estimation is employed for channel equalization in OFDM systems, symbol detection ordering produces considerable effects on overall system performances. In this paper, we show the reduction of the residual ICI by time domain windowing and the resultant performance improvements, and investigate the effects of SINR- and CSEP-based symbol detection ordering on the performance of successive interference cancellation.

Key words : Time Domain Windowing, Detection Ordering, Successive Interference Cancellation, Doubly Selective Channel, OFDM

I. 서 론

차세대 이동 통신 시스템에서는 주파수 자원 부족과 새로운 통신 서비스 분야에 대처하기 위하여

보다 높은 주파수 대역의 이용과 빠른 속도의 이동체 환경을 고려하고 있으며, 이동 통신에서의 OFDM 시스템도 효율성 증대를 고려하여 OFDM 심볼 길이가 점차 증가하는 추세이다. 이러한 OFDM 블

경상대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Gyeongsang National University)

· 논문 번호 : 20100430-053

· 교신저자 : 임동민(e-mail : dmlim@gsnu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 6월 7일

록 데이터 전송 환경에서 이동 통신 채널은 주파수 선택적일 뿐만 아니라 시간 영역에서도 선택적인, 즉 이중 선택적(doubly selective) 특성을 지니게 된다. 이중 선택적 채널 OFDM에서는 부반송파 사이의 간섭(Inter-Carrier Interference: ICI) 현상으로 인하여 하나의 탭만을 사용하는 기존의 간단한 채널 등화기의 사용으로는 성능 저하를 피할 수 없게 된다.

이중 선택적 채널 환경에서 블록 데이터 전송을 위한 신호 검출에는 선형 MMSE 예측에 기반한 다양한 순차적 간섭 제거(Successive Interference Cancellation: SIC) 방식이 제안되어 있다^{[1]-[4]}. 순차적 간섭 제거 방식에서는 오류 전파(error propagation)에 의한 성능 저하 가능성으로 인하여 블록내의 심볼 검출 순서가 전체적인 성능에 큰 영향을 미친다^{[1],[5]}. 참고 문헌 [1]에서는 선형 MMSE 예측에 기반한 순차적 간섭 제거 방식에 SINR을 기준으로 하는 심볼 검출 순서를 적용하였으나, 알고리즘 구현에 요구되는 계산량이 OFDM 심볼 길이 N 의 네 제곱에 비례하는 문제점을 노출하고 있다. 참고문헌 [2]에서는 부반송파 사이의 간섭이 인접 심볼에만 제한적으로 발생한다는 점에 착안하여 고정된 검출 순서에 따라 순차적으로 역행렬을 구하는 방법을 도입하여 알고리즘의 계산량을 N 의 제곱에 비례하는 수준으로 감소시키고 있다. 참고문헌 [3]에서는 시간 영역 윈도우를 도입하여 주파수 영역 채널 행렬의 대역폭을 제한하여 계산량이 감소된 선형 MMSE 예측 방식을 이용하고 있다. 이 방식은 고정된 검출 순서에 따라 순차적 간섭 제거를 반복적으로 수행하며, 알고리즘의 계산량은 N 에 비례하게 된다. 참고문헌 [4]에서는 이중 선택적 OFDM 채널 예측을 위해 도입한 파일럿 심볼의 위치 정보를 부수적으로 순차적 간섭 제거 방식의 심볼 검출 순서를 결정하는 과정에 이용하여 높은 SNR 영역에서 우수한 성능 개선 효과를 얻고 있다.

본 논문에서는 이중 선택적 채널 OFDM 시스템에서 시간 영역 윈도우의 사용이 주파수 영역 채널 특성과 채널 등화 성능에 미치는 영향을 분석하며, SINR과 CSEP 기준에 의한 심볼 검출 순서가 순차적 간섭 제거 방식의 채널 등화 성능에 미치는 영향을 조사한다. 서론에 이어 제2절에서는 이중 선택적 채널 OFDM 시스템에 대한 모델링과 선형 MMSE

예측에 기반한 순차적 간섭 제거 방식에 대하여 기술한다. 제3절에서는 시간 영역 윈도우가 주파수 영역 채널 행렬의 특성과 채널 등화 성능에 미치는 영향을 분석한다. 제4절에서는 OFDM 심볼 내에서 검출 순서가 순차적 간섭 제거 방식의 성능에 미치는 영향을 조사하고, 제5절에 결론을 도출한다.

II. 시스템 모델

논문에서 사용되는 기호를 정의하면 다음과 같다. 행렬은 굵은 대문자로 열벡터는 굵은 소문자로 표시하며 $(\cdot)^*$, $(\cdot)^T$, $(\cdot)^H$ 는 각각 공액복소(complex conjugate), 전치(transpose), 공액복소 전치(complex conjugate transpose: Hermitian) 연산을 나타낸다. 행렬 \mathbf{A} 의 m 번째 행 n 번째 열의 원소를 $\mathbf{A}(m,n)$ 으로, $m_1 \sim m_2$ 번째 행, $n_1 \sim n_2$ 번째 열의 원소로 구성되는 부분 행렬을 $\mathbf{A}(m_1:m_2, n_1:n_2)$ 로, 벡터 \mathbf{a} 의 m 번째 원소를 $\mathbf{a}(m)$ 으로, $m_1 \sim m_2$ 번째 원소로 구성된 부분 벡터를 $\mathbf{a}(m_1:m_2)$ 로 나타내고, 행렬 및 벡터의 인덱스는 0에서 시작하며 mod- N 연산을 따른다. $\mathbf{0}_N$ 은 N 개의 원소가 모두 0인 열벡터를, $\mathbf{1}_N$ 은 N 개의 원소가 모두 1인 열벡터를, \mathbf{I}_N 은 $N \times N$ 단위 행렬을, \mathbf{F} 는 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform)을 나타내는 $N \times N$ 유니타리(unitary) 행렬을 표시한다. 벡터 \mathbf{a} 로 구성되는 대각(diagonal) 행렬은 $\text{diag}\{\mathbf{a}\}$ 로 나타내고, 행렬의 Hadamard(elementwise) product는 \circ 로 나타낸다^{[6],[7]}.

본 논문에서는 N 개의 부반송파와 길이 L 의 cyclic prefix(CP)를 이용하는 OFDM 시스템^[8]을 고려한다. 이중 선택적 채널의 이산 임펄스 응답 $h(n,l)$ 은 WSSUS(Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering) 채널 모델을 가정하면 다음과 같은 특성을 갖는다^[9].

$$E\{h(n,l)h^*(n-m,l-k)\} = \begin{cases} \sigma_l^2 R_h(m), & k=0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 자기상관함수 $R_h(m)$ 은 정규화되어 있으며, 따라서 σ_l^2 은 채널의 l 번째 경로의 평균 전력을 나타낸다. 각 채널의 경로가 일반적인 Jakes의 전

력 밀도 함수 특성을 가진다고 가정하는 경우, 자기 상관함수 $R_h(m) = J_0(2\pi f_d Tm/N)$ 이 된다. $J_0(\cdot)$ 는 0차 제 1종 베셀 함수(0-th order Bessel function of the first kind), f_d 는 최대 도플러 주파수, T 는 하나의 OFDM 심볼 구간을 나타낸다. 본 논문에서는 완벽한 채널 예측이 가능하다고 가정하며, 이중 선택적 채널 OFDM 시스템에서의 채널 예측은 참고문헌 [8]을 참고할 수 있다.

OFDM 심볼은 역푸리에 변환을 거친 후 CP가 블록의 앞 부분에 첨부되어 전송된다. 수신부에서는 우선 CP에 해당하는 부분을 제거한 후 윈도우를 씌워 푸리에 변환을 수행한다. OFDM 시스템에서 시간 영역 윈도우를 사용하는 경우 주파수 영역 채널 행렬의 대역폭을 한정하여 채널 등화 알고리즘의 계산량을 감소시키는 효과를 얻을 수 있다^[3]. OFDM 심볼을 \mathbf{u} , 수신된 신호를 \mathbf{y} 로 표시하면 이러한 OFDM 전송 과정은 다음과 같은 행렬식으로 표시할 수 있다^[8].

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{F} \text{diag}\{\mathbf{w}\} [\mathbf{H}^{(f)} \mathbf{F}^H \mathbf{u} + \mathbf{n}] \\ &= \mathbf{H}^{(f)} \mathbf{u} + \mathbf{v} \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서 $\mathbf{w} = [w_0, w_1, \dots, w_{N-1}]^T$ 는 시간 영역 윈도우를, $\mathbf{H}^{(f)}$ 는 시간 영역 채널 행렬^[8]을, \mathbf{n} 은 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 부가백색정규잡음(AWGN)을 나타낸다. 식 (2)에서 주파수 영역에서의 채널 행렬 $\mathbf{H}^{(f)}$ 와 잡음 \mathbf{v} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^{(f)} &= \mathbf{F} \text{diag}\{\mathbf{w}\} \mathbf{H}^{(t)} \mathbf{F}^H \\ \mathbf{v} &= \mathbf{F} \text{diag}\{\mathbf{w}\} \mathbf{n} \end{aligned} \quad (3)$$

OFDM 채널 등화에 순차적 간섭 제거 방식을 이용하는 경우 k 번째 심볼 $\mathbf{u}(k)$ 를 예측하기 위한 선형 입출력 모델은 다음과 같이 정리할 수 있다^[3].

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_k &= \mathbf{H}^{(f)}(k-Q:k+Q, 0:N-1) \mathbf{u} + \mathbf{v}_k \\ &= \mathbf{H}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{r}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_k &= \mathbf{y}(k-Q:k+Q) \\ \mathbf{H}_k &= \mathbf{H}^{(f)}(k-Q:k+Q, k-2Q:k+2Q) \\ \mathbf{u}_k &= \mathbf{u}(k-2Q:k+2Q) \\ \mathbf{v}_k &= \mathbf{v}(k-Q:k+Q) \end{aligned} \quad (5)$$

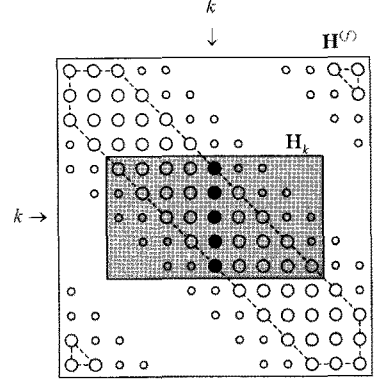


그림 1. $Q=2$ 로 설정한 주파수 영역 채널 행렬 $\mathbf{H}^{(f)}$
Fig. 1. Frequency domain channel matrix $\mathbf{H}^{(f)}$ with $Q=2$.

로 정의되며 Q 는 주파수 영역 채널 행렬의 대역폭을, \mathbf{r}_k 는 k 번째 심볼에서 거리가 $2Q+1$ 이상 떨어진 심볼에 의한 잔류 ICI를 나타낸다. 그림 1에 $Q=2$ 로 설정한 주파수 영역 채널 행렬 $\mathbf{H}^{(f)}$ 와 부분 행렬 \mathbf{H}_k 를 도시하였다. 잔류 ICI의 영향을 무시할 수 있는 경우, 선형 입출력 모델은 $\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k$ 로 근사화되며, 선형 MMSE 예측에 기반한 순차적 간섭 제거 알고리즘을 그림 2에 도시하였다^{[3],[4]}. 그림에서 σ_s^2

$$\begin{aligned} \mathbf{m} &\leftarrow \mathbf{0}_N^T \\ \mathbf{v} &\leftarrow \sigma_s^2 \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{C} &\leftarrow \sigma_n^2 \mathbf{F} \text{diag}\{\mathbf{w} \circ \mathbf{w}^*\} \mathbf{F}^H \\ \text{for } k &\leftarrow \{i_1, i_2, \dots, i_N\} \\ \mathbf{m}(k) &\leftarrow 0 \\ \mathbf{v}(k) &\leftarrow \sigma_s^2 \\ \mathbf{C}_k &\leftarrow \mathbf{C}(k-Q:k+Q, k-Q:k+Q) \\ \mathbf{h}_k &\leftarrow \mathbf{H}^{(f)}(k-Q:k+Q, k) \\ \mathbf{m}_k &\leftarrow \mathbf{m}(k-2Q:k+2Q) \\ \mathbf{v}_k &\leftarrow \mathbf{v}(k-2Q:k+2Q) \\ \mathbf{g}_k &\leftarrow \sigma_s^2 [\mathbf{C}_k + \mathbf{H}_k \text{diag}\{\mathbf{v}_k\} \mathbf{H}_k^H]^{-1} \mathbf{h}_k \\ \hat{\mathbf{u}}(k) &\leftarrow \mathbf{g}_k^H (\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{m}_k) \\ \mathbf{m}(k) &\leftarrow \text{decision of } \hat{\mathbf{u}}(k) \\ \mathbf{v}(k) &\leftarrow 0 \end{aligned}$$

end

그림 2. 선형 MMSE 예측에 기반한 순차적 간섭 제거 알고리즘
Fig. 2. SIC algorithm based on linear MMSE estimation.

은 변조 방식에 따라 결정되는 데이터 심볼의 평균 에너지를, $\{i_1, i_2, \dots, i_N\}$ 은 심볼의 검출 순서를 나타낸다.

III. 시간 영역 윈도우의 효과

시간 영역 채널 행렬과 주파수 영역 채널 행렬과의 관계는 식 (3)으로 표시된다. 시변 채널 특성은 정규화된 도플러 주파수 $f_d T$ 에 의해 결정되며, 또한 주파수 영역 채널 행렬의 대역폭에 영향을 미친다. 시간 영역 윈도우의 사용은 주파수 영역 채널 행렬의 대역폭을 한정시키는 효과가 있다. 윈도우 설계 시 대역폭을 Q 로 설정하면 주파수 영역 채널 행렬에서 대부분의 ICI는 그림 1에서 점선으로 표시된 $2Q+1$ 개의 중앙 대각선, 오른쪽 상단의 $Q \times Q$ 위삼각 행렬, 왼쪽 하단의 $Q \times Q$ 아래삼각 행렬 부분에 집중되는 효과를 가져온다^[3]. 그림 3에 설계 대역폭 $Q=2$ 이고 $f_d T$ 가 0.01과 0.5인 경우 윈도우의 사용이 ICI에 미치는 영향을 도시하였다. 그림에서 d 는 해당 부반송파 사이의 거리를 나타낸다. 윈도우

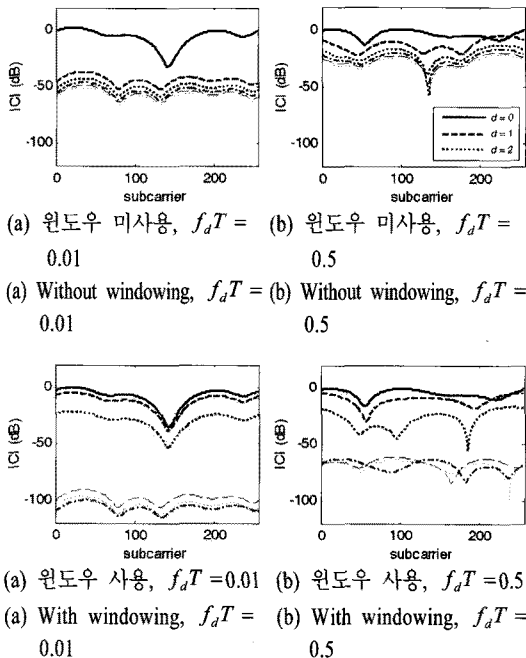


그림 3. 대역폭 $Q=2$ 로 설계된 시간 영역 윈도우의 사용이 ICI에 미치는 영향

Fig. 3. The effects of time domain windowing on ICI with bandwidth $Q=2$.

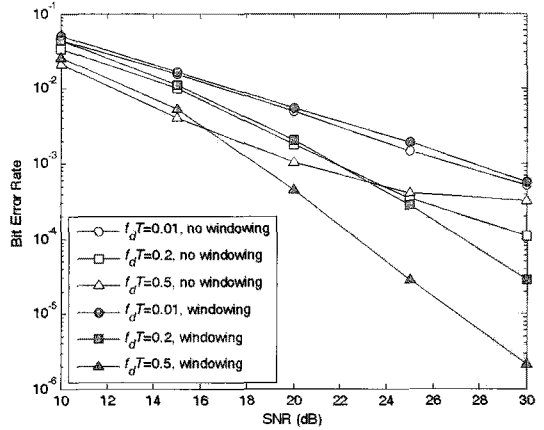


그림 4. 시간 영역 윈도우 사용이 정합 필터 한계에 의한 BER 성능에 미치는 영향

Fig. 4. The effects of time domain windowing on the BER performance by MFB.

를 사용하지 않은 (a)와 (b)의 경우 $f_d T$ 가 0.01에서 0.5로 증가함에 따라 ICI가 급격히 증가하고 있다. 대역폭 $Q=2$ 로 설계된 윈도우를 사용한 (c)와 (d)의 경우 ICI는 대부분 $d \leq 2$ 인 영역에 집중되어 있음을 알 수 있다.

윈도우의 사용은 식 (4)에서 잔류 ICI r_k 가 성능에 크게 영향을 미치는 경우에 효과적이다. 잔류 ICI는 $f_d T$ 값에 비례하여 증가하며, 높은 SNR 영역에서는 성능을 좌우하는 요소가 된다. 식 (4)의 선형 입출력 모델에서 $d \leq 2Q$ 인 ICI를 완벽하게 제거할 수 있다고 가정하는 경우 얻어지는 성능 상한치를 정합 필터 한계(Matched Filter Bound: MFB)라고 부른다^[3]. 그림 4에 $Q=2$ 로 설계된 윈도우가 MFB에 의한 BER(Bit Error Rate) 성능에 미치는 영향을 도시하였다. OFDM 심볼의 길이 $N=256$ 이며 QPSK 변조 방식을 이용하였다. 이중 선택적 채널의 임펄스 응답의 길이 $L=4$ 이며, 식 (1)의 특성을 따르는 WSSUS 채널 모델을 이용하였다. 그림 2에 제시된 순차적 간섭 제거 방식을 채널 등화에 이용하였으며, 검출 순서는 따로 고려하지 않았다. $f_d T=0.01$ 로 채널의 변화 속도가 낮은 경우에는 잔류 ICI가 거의 발생하지 않아 그림에서 알 수 있듯이 윈도우의 사용으로 인한 성능 개선 효과는 발생하지 않는다. 그림에서 이 경우 오히려 약간의 성능 저하를 나타내는데, 이

것은 윈도우의 사용으로 인하여 잡음 성분에 자기상관도가 발생하기 때문이다. 윈도우를 사용하지 않은 경우 $f_d T = 0.2$ 가 되면 잔류 ICI로 인하여 높은 SNR 영역에서 성능 저하가 발생하기 시작하며, 윈도우의 사용으로 성능이 개선되는 효과를 확인할 수 있다. $f_d T = 0.5$ 로 채널의 변화 속도가 더욱 증가하면 잔류 ICI가 크게 발생하며, 윈도우의 사용으로 인한 잔류 ICI의 감소로 성능 개선 효과가 더욱 증가함을 알 수 있다. 따라서 윈도우를 사용하여 잔류 ICI를 감소시키고 인접 심볼에 의해 발생하는 ICI를 적절히 제거하는 경우, 채널의 변화 속도가 증가함에 따라 시간 다이버시티 효과에 의한 성능 향상을 기대할 수 있다.

IV. 심볼 검출 순서의 영향

일반적인 순차적 간섭 제거 방식에서 검출 순서는 시스템의 전체적인 성능에 큰 영향을 미친다^[5]. OFDM의 순차적 간섭 제거에서 특정 기준에 따라 최적의 검출 순서를 결정하는 방식은 계산량을 크게 증대시키는 결과를 가져온다^[1]. 본 논문에서는 첫 번째로 검출하는 심볼만을 최대 SINR^[1] 또는 최소 CSEP^[10] 기준에 따라 결정하고, 그 후에는 검출 순서를 따로 결정하지 않고 바로 그 다음 심볼부터 차례로 검출하는 방식을 제안한다. 이러한 방식은 첫 단계에서 블록 내의 각 심볼을 대상으로 SINR 또는 CSEP 값을 계산하여 검출 순서를 결정하고, 두 번째 단계에서는 결정된 순서에 따라 순차적 간섭 제거를 수행한다. 검출 순서를 고려하지 않는 경우와 비교하여 계산량은 약 2배로 증가하나 성능 개선의 효과를 기대할 수 있다.

그림 2에 제시된 순차적 간섭 제거 방식을 사용하는 경우 k 번째 심볼의 SINR 값은 다음과 같이 구할 수 있다^[1].

$$\text{SINR}_k = \frac{\sigma_s^2 \mathbf{g}_k^H \mathbf{h}_k}{\sigma_s^2 \sum_{m=k-2Q, m \neq k}^{m=k+2Q} \mathbf{g}_m^H \mathbf{h}_m + \mathbf{g}_k^H \mathbf{C}_k \mathbf{g}_k} \quad (6)$$

그림 2의 순차적 간섭 제거 방식을 사용하는 경우 k 번째 심볼의 CSEP 값을 구하기 위하여 변조 방식과 관련하여 다음과 같이 가정한다. k 번째 전송되

는 심볼 $\mathbf{u}(k)$ 는 변조 방식에 따라 알파벳 $\{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ 에서 동일한 확률로 선택되며, 이 심볼에 대한 선형 MMSE 예측값을 $\hat{\mathbf{u}}(k)$, $\hat{\mathbf{u}}(k)$ 를 ML(Maximum Likelihood) 기준에 의해 판정한 결과를 $\bar{\mathbf{u}}(k)$ 로 나타낸다. k 번째 심볼의 CSEP 값은 다음과 같이 정의되며

$$\begin{aligned} \text{CSEP}_k &= P\{\mathbf{u}(k) \neq \bar{\mathbf{u}}(k) | \hat{\mathbf{u}}(k) = \mathbf{u}\} \\ &= 1 - P\{\mathbf{u}(k) = \bar{\mathbf{u}}(k) | \hat{\mathbf{u}}(k) = \mathbf{u}\}, \\ &= 1 - \frac{f_{\hat{\mathbf{u}}(k)}(\mathbf{u} | \mathbf{u}(k) = \bar{\mathbf{u}}(k))}{\sum_{m=1}^M f_{\hat{\mathbf{u}}(k)}(\mathbf{u} | \mathbf{u}(k) = s_m)} \end{aligned} \quad (7)$$

CSEP 값이 최소가 되는 k 는 다음과 같이 식을 바꾸어도 동일한 결과를 얻을 수 있다.

$$\text{CSEP}_k = \frac{\sum_{m=1}^M f_{\hat{\mathbf{u}}(k)}(\mathbf{u} | \mathbf{u}(k) = s_m)}{f_{\hat{\mathbf{u}}(k)}(\mathbf{u} | \mathbf{u}(k) = \bar{\mathbf{u}}(k))} \quad (8)$$

식 (7), (8)에서 $f_{\hat{\mathbf{u}}(k)}(\cdot)$ 는 랜덤 변수 $\hat{\mathbf{u}}(k)$ 의 조건 확률 밀도 함수를 나타낸다. $\mathbf{u}(k) = s_m$ 의 조건에서 $\hat{\mathbf{u}}(k)$ 의 확률 밀도 함수를 복소 가우시언 분포(complex Gaussian distribution)로 가정하면 $\hat{\mathbf{u}}(k)$ 의 평균 $\mu_k(s_m)$ 과 분산 $\sigma_k^2(s_m)$ 은 다음과 같이 주어진다^[3].

$$\begin{aligned} \mu_k(s_m) &= \mathbf{g}_k^H \mathbf{h}_k s_m \\ \sigma_k^2(s_m) &= \mathbf{g}_k^H \mathbf{h}_k (1 - \mathbf{h}_k^H \mathbf{g}_k) |s_m|^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$\hat{\mathbf{u}}(k)$ 가 복소 가우시언 분포를 따르고, 각 심볼 s_m 이 동일한 에너지를 가지는 변조 방식을 고려하면 식 (8)은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \text{CSEP}_k &= \sum_{m=1}^M \exp \left[-\frac{|\hat{\mathbf{u}}(k) - \mu_k(s_m)|^2 - |\hat{\mathbf{u}}(k) - \mu_k(\bar{\mathbf{u}}(k))|^2}{\sigma_k^2(s_m)} \right] \\ &\approx 1 + \exp \left[-\min_{s_m \neq \bar{\mathbf{u}}(k)} \left\{ \frac{|\hat{\mathbf{u}}(k) - \mu_k(s_m)|^2 - |\hat{\mathbf{u}}(k) - \mu_k(\bar{\mathbf{u}}(k))|^2}{\sigma_k^2(s_m)} \right\} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

QPSK 변조 방식의 경우, 식 (10)은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{CSEP}_k = \frac{\min\{|\text{Re}\{\hat{\mathbf{u}}(k)\}|\}, |\text{Im}\{\hat{\mathbf{u}}(k)\}|\}}{1 - \mathbf{g}_k^H \mathbf{h}_k} \quad (11)$$

이중 선택적 채널 OFDM 시스템에서 첫 번째로

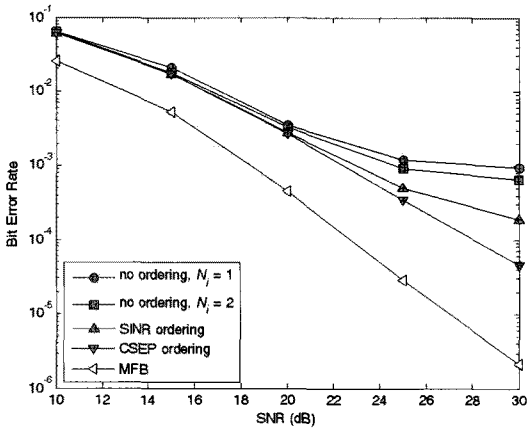


그림 5. 심볼 검출 순서가 순차적 간섭 제거 방식의 BER 성능에 미치는 영향
 Fig. 5. The effects of symbol detection ordering on the BER performance of SIC.

검출하는 심볼을 최대 SINR 또는 최소 CSEP 기준에 따라 결정하고, 그 심볼부터 차례로 순차적 간섭 제거를 수행한 BER 성능 결과를 그림 5에 도시하였다. 시스템 관련 파라미터 $N = 256$, $L = 4$, $f_d T = 0.5$, $Q = 2$ 로 설정하였다. 검출 순서를 고려하지 않은 경우와 비교하여 검출 순서를 고려한 경우에는 오류 전파 가능성이 감소하여, ICI가 성능을 좌우하는 높은 SNR 영역에서 두드러진 성능 개선 효과가 나타나고 있다. 참고문헌 [3]에서는 검출 순서는 고려하지 않고 순차적 간섭 제거를 여러 번 반복적으로 수행하여 성능을 개선하는 방식을 제시하고 있다. 제안된 방식을 순차적 간섭 제거를 2회 반복적으로 수행하는 경우(no ordering, $N_i = 2$)와 비교하면 거의 동일한 계산량 조건에서도 우수한 성능 개선 효과를 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 이중 선택적 채널 OFDM 시스템에서 시간 영역 윈도우와 심볼 검출 순서가 채널 등화를 위한 순차적 간섭 제거 기법의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이중 선택적 채널 OFDM 시스템의 BER 성능을 정합 필터 한계로 분석하였으며, 시간 영역 윈도우의 사용은 잔류 ICI를 감소시켜 인접 심볼에 의해 발생하는 ICI를 적절히 제거하는 경우, 시변 채널의 다이버시티 효과에 의한 성능 향상을 기대할 수 있다. OFDM 채널 등화를 위한 순차적 간

섭 제거 기법에 첫 번째로 검출하는 심볼만을 최대 SINR 또는 최소 CSEP 기준에 따라 결정하고, 그 후에는 검출 순서를 따로 결정하지 않고 바로 그 다음 심볼부터 차례로 검출하는 방식을 제안하였으며, 순차적 간섭 제거를 반복적으로 수행하는 기존의 방식과 비교하여 거의 동일한 계산량 조건에서 우수한 성능 개선 효과를 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Y. -S. Choi, P. Voltz, and F. Cassara, "On channel estimation and detection for multicarrier signals in fast and selective Rayleigh fading channels", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, pp. 1375-1387, Aug. 2001.
- [2] X. Cai, G. Giannakis, "Bounding performance and suppressing intercarrier interference in wireless mobile OFDM", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, pp. 2047-2056, Dec. 2003.
- [3] P. Schniter, "Low-complexity equalization of OFDM in doubly selective channels", *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 52, pp. 1002-1011, Apr. 2004.
- [4] D. Lim, J. Koh, "Simple detection ordering in successive interference cancellation for OFDM systems in doubly selective channels", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E91-B, pp. 2744-2747, Aug. 2008.
- [5] S. Verdú, *Multuser Detection*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998.
- [6] G. Golub, C. Van Loan, *Matrix Computations*, Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1996.
- [7] J. Schott, *Matrix Analysis for Statistics*, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1997.
- [8] 임동민, "주파수 선택적 시변 채널 OFDM 시스템에서의 파일럿 심볼을 이용한 채널 예측 및 등화", 한국전자과학회논문지, 18(12), pp. 1408-1418, 2007년 12월.
- [9] G. Stüber, *Principles of Mobile Communication*, Boston, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [10] S. W. Kim, "Log-likelihood-ratio-based detection ordering in V-BLAST", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 54, pp. 302-307, Feb. 2006.

임 동 민



1986년 2월: 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)

1988년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1992년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1998년 1월~1999년 1월: 영국 Southampton 대학 전자 및 컴퓨터과학과 방문연구원

1992년 9월~현재: 경상대학교 전자공학과 교수, 경상대학교 부속 공학연구원 연구원

[주 관심분야] 통신 신호 처리, RF & DSP 시스템 설계, 이동 통신