

논문 2013-50-1-2

고속 시변 채널 OFDM을 위한 저복잡도 양방향 탐색 순차적 간섭 제거

(Low Complexity Bilateral Search Successive Interference Cancellation
for OFDM in Fast Time-Varying Channels)

임 동 민*

(Dongmin Lim)

요 약

본 논문에서는 고속 시변 채널 OFDM을 위한 저복잡도 양방향 탐색 순차적 간섭 제거(Successive Interference Cancellation: SIC) 방식을 제안한다. SIC에서는 오류 전파에 의한 성능 저하 가능성으로 인하여 심볼 블록 내에서의 심볼 검출 순서가 전체적인 성능에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 조건 심볼오류확률(Conditional Symbol Error Probability: CSEP)을 기준으로 최초로 검출되는 심볼을 결정하고, 그 다음 검출될 심볼은 기검출된 심볼군의 경계에서 양방향으로 탐색하여 CSEP를 갱신한 후 결정하는 방식을 이용한다. 컴퓨터 모의실험 결과 제안된 방식은 기존 방식과 비교하여 높은 SNR 영역에서 거의 동일한 계산량으로 보다 우수한 성능을 나타낸다. 제안된 방식은 비트에러율 = 10^{-5} 에서 성능 상한치인 정합필터 한계(Matched Filter Bound: MFB)에 2dB 이내로 접근하는 성능을 가진다.

Abstract

In this paper, we propose a low complexity bilateral search SIC for OFDM in fast time-varying channels. Due to the possibility of error propagation in SIC, symbol detection ordering within the block of symbols has a significant effect on the overall performance. In this paper, the first symbol to be detected is determined based on CSEP values, and then the next symbol to be detected is selected according to the updated CSEP while bilaterally searching from the boundary of the detected symbol group. Through computer simulations, we show that the proposed method has performance improvements with almost the same computation complexity over the conventional methods in the high SNR region. It has a performance approaching the MFB, known as the performance upper bound, within 2dB at the BER of 10^{-5} .

Keywords : detection ordering, successive interference cancellation, fast time-varying channel, OFDM

I. 서 론

높은 반송파 주파수의 이용과 빠른 속도의 이동체 환경을 고려하는 고속 시변 채널 OFDM에서는 부반송파 사이의 간섭 (Inter-Carrier Interference: ICI) 현상으로 인하여 하나의 탭만을 사용하는 기존의 간단한 채널 등

화기의 사용으로는 성능 저하를 피할 수 없게 된다. 고속 시변 채널 OFDM을 위한 신호 검출에는 선형 MMSE(Minimum Mean Square Error) 예측에 기반한 다양한 SIC 방식이 제안되어 있다^{[1]-[4]}. SIC에서는 오류 전파에 의한 성능 저하 가능성으로 인하여 블록내의 심볼 검출 순서가 전체적인 성능에 큰 영향을 미친다^{[4],[5]}. 참고문헌 [1]에서는 시간 영역 윈도우를 도입하여 OFDM 주파수 영역 채널 행렬의 대역폭을 제한하고 계산량이 감소된 선형 MMSE 예측 기반의 SIC를 이용하

* 정회원, 경상대학교 전자공학과
(Gyeongsang National University)
접수일자: 2012년10월15일, 수정완료일: 2013년1월2일

고 있다. 이 방식은 고정된 검출 순서에 따라 SIC를 반복적으로 수행할 수 있으며 알고리즘의 계산량은 OFDM 심볼의 길이 N 에 비례한다. 참고문헌 [2]에서는 간섭 제거를 위하여 결정 귀환(decision feedback) 등화기에서 순방향과 역방향으로 각각 SIC를 수행한다. 순방향과 역방향 SIC 심볼 판정 결과가 서로 다른 경우에는 판정된 심볼을 이용하여 각각의 수신 신호를 복구한 후 실제 수신 신호와의 거리를 기준으로 심볼 판정을 조정하는 방식을 이용하여 오류 전파의 가능성을 낮추고 있다. 참고문헌 [3]에서는 고속 시변 OFDM 채널 예측을 위해 도입한 파일럿 심볼의 위치 정보를 SIC의 심볼 검출 순서를 결정하는 과정에 부수적으로 이용하여 높은 SNR 영역에서 우수한 성능 개선 효과를 얻고 있다. 참고문헌 [4]에서는 SIC에서 오류 전파의 가능성을 줄이기 위하여 신뢰도가 가장 높은 심볼을 제일 먼저 검출하는 방식을 이용하고 있으며 심볼의 신뢰도는 CSEP를 기준으로 결정하고 있다. 그러나 알고리즘의 복잡도 증가로 인하여 그 다음부터는 고정된 순서에 따라 심볼을 검출하는 방식을 이용하고 있다. 본 논문에서는 CSEP를 기준으로 최초로 검출되는 심볼을 결정하고, 기검출된 심볼군의 경계에 인접한 두 심볼만을 대상으로 CSEP를 갱신하여 그 다음 검출될 심볼을 결정하는 저복잡도 양방향 탐색 SIC 방식을 제안한다. 서론에 이어 제 II장에서는 고속 시변 채널 OFDM에 대한 모델링과 선형 MMSE 예측에 기반한 일반적인 SIC에 대하여 기술한다. 제 III장에서는 고속 시변 채널 OFDM을 위한 저복잡도 양방향 탐색 SIC 방식을 제안하고 컴퓨터 모의실험을 통하여 기존 방식과 성능을 비교한다. 제 IV장에 결론을 정리한다.

II. 시스템 모델 및 SIC^{[4],[7]}

논문에서 사용되는 기호를 다음과 같이 간단히 정의한다. 행렬은 굵은 대문자, 열벡터는 굵은 소문자로 각각 표시하며, $(\)^*$, $(\)^T$, $(\)^H$ 는 각각 공액복소(complex conjugate), 전치(transpose), 공액복소 전치(complex conjugate transpose: Hermitian) 연산을 나타낸다. 벡터 \mathbf{a} 의 m 번째 원소를 $\mathbf{a}(m)$ 으로, $m_1 \sim m_2$ 번째 원소로 구성되는 부분 벡터를 $\mathbf{a}(m_1 : m_2)$ 로, 행렬 \mathbf{A} 의 m 번째 행, n 번째 열의 원소는 $\mathbf{A}(m, n)$ 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 나타내고, 벡터 및 행렬의 인덱스는 0에서 시작하며 mod- N 연산을 따른다. $\mathbf{0}_N$ 은 N 개의 원소가 모두 0인 열벡터, $\mathbf{1}_N$ 은 N 개의 원소가 모두 1인 열벡터, \mathbf{I}_N 은 $N \times N$ 단위 행렬, \mathbf{F} 는 이산 푸리에 변환을 나타내는 $N \times N$ 유니터리(unitary) 행렬을 표시한다. 벡터 \mathbf{a} 로 구성되는 대각(diagonal) 행렬은 $\text{diag}(\mathbf{a})$ 로 나타내고 행렬의 Hadamard (elementwise) product는 \circ 로 나타낸다.

고속 시변 채널의 특성은 시점 $n-l$ 에서의 임펄스 입력에 대한 시점 n 에서의 채널 응답인 이산 임펄스 응답 $h(n, l)$ 로 나타낼 수 있다. 시점 n 에서의 응답 $h(n, l)$ 이 $l = 0, 1, \dots, L-1$ 에 대해서만 0이 아닌 응답을 가진다고 가정하면 이러한 채널은 시간 지연이 다른 L 개의 경로를 가지는 주파수 선택적 특성을 가진다. 하나의 OFDM 심볼 구간의 길이를 T , 최대 도플러 주파수를 f_d 로 표시하면 OFDM 부반송파 간격에 정규화된 도플러 주파수 $f_d T$ 는 채널의 시변 특성을 나타내는 변수가 된다. 본 논문에서는 완벽한 채널 예측이 가능하다고 가정하며, 고속 시변 OFDM 채널의 예측은 참고문헌 [6~7]을 참고할 수 있다.

부채널 수가 N , CP(Cyclic Prefix)의 길이가 $L-1$ 인 OFDM에서 전송된 OFDM 심볼 \mathbf{u} 와 채널을 통해 수신된 신호 \mathbf{y} 와의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{F} \text{diag}(\mathbf{w}) [\mathbf{H}^{(t)} \mathbf{F}^H \mathbf{u} + \mathbf{n}] \\ &= \underbrace{[\mathbf{F} \text{diag}(\mathbf{w}) \mathbf{H}^{(t)} \mathbf{F}^H]}_{=\mathbf{H}^{(f)}} \mathbf{u} + \underbrace{\mathbf{F} \text{diag}(\mathbf{w}) \mathbf{n}}_{=\boldsymbol{\nu}}. \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 $\mathbf{w} = [w_0, w_1, \dots, w_{N-1}]^T$ 는 채널의 대역폭을 한정하기 위한 시간 영역 윈도우^[4], $\mathbf{H}^{(t)}$ 는 시간 영역 채널 행렬, \mathbf{n} 은 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 복소정규잡음(complex Gaussian noise), $\mathbf{H}^{(f)}$ 와 $\boldsymbol{\nu}$ 는 각각 주파수 영역에서 바라본 채널 행렬과 잡음을 나타낸다. 채널의 l 번째 경로에 대한 채널 응답을 $\mathbf{h}_l^{(t)}$ 로 표시하면 $\mathbf{H}^{(t)}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다

$$\mathbf{H}^{(t)} = \sum_{l=0}^{L-1} \text{diag}(\underbrace{[h(0, l), h(1, l), \dots, h(N-1, l)]^T}_{=\mathbf{h}_l^{(t)}}) \mathbf{Z}_l. \quad (2)$$

위 식에서 \mathbf{Z}_l 은 행렬 \mathbf{A} 에 대한 연산으로 \mathbf{AZ}_l 은 행렬

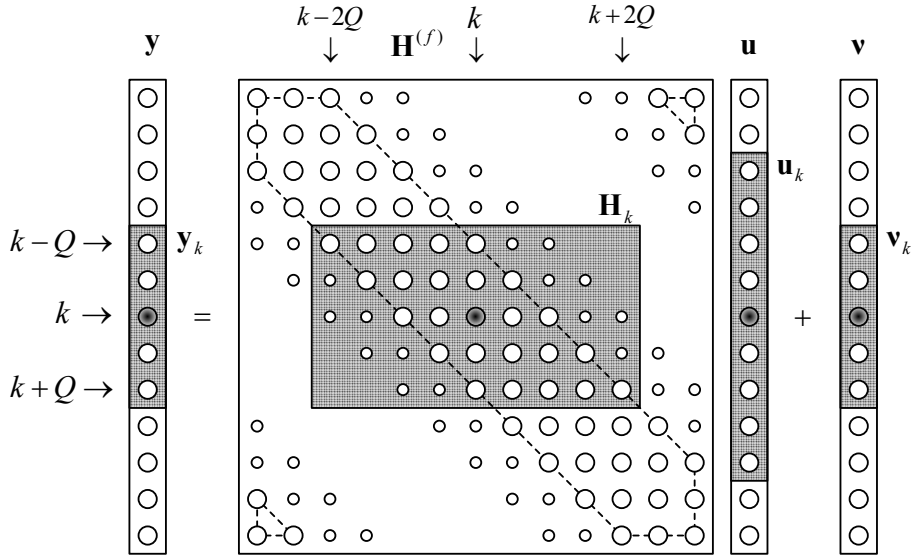


그림 1. 행렬식으로 나타낸 OFDM 시스템 모델 ($Q=2$)
Fig. 1. OFDM system model represented by matrix equation ($Q=2$).

A의 각 열을 l 번 왼쪽으로 순환 이동시킨 행렬이 된다.

OFDM 채널 등화에 SIC 방식을 이용하는 경우 k 번째 심볼 $\mathbf{u}(k)$ 를 예측하기 위한 선형 입출력 모델은 다음과 같이 정리할 수 있다^[1]

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}^{(f)}(k-Q:k+Q, 0:N-1)\mathbf{u} + \mathbf{v}_k \quad (3)$$

$$= \mathbf{H}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{r}_k + \mathbf{v}_k$$

위 식에서

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{y}(k-Q:k+Q)$$

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{H}^{(f)}(k-Q:k+Q, k-2Q:k+2Q) \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{u}(k-2Q:k+2Q)$$

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{v}(k-Q:k+Q)$$

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. 이해를 돕기 위해 $Q=2$ 로 설정한 경우 주파수 영역 채널 행렬 $\mathbf{H}^{(f)}$ 와 부분 행렬 \mathbf{H}_k 등 식 (1)~(4)에 포함된 항을 그림 1에 도시하였다. 시간 영역 윈도우의 사용으로 잔류 ICI의 영향을 무시할 수 있는 경우 입출력 모델은 $\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k$ 로 근사화되며, 선형 MMSE 예측에 기반한 일반적인 SIC 알고리즘을 그림 2에 도시하였다^{[1],[4]}. 그림에서 σ_s^2 은 변조방식에 따라 결정되는 심볼의 평균 에너지를, $\{i_1, i_2, \dots, i_N\}$ 은 심볼의 검출 순서를 나타낸다.

III. 저복잡도 양방향 탐색 SIC

오류 전파로 인하여 일반적인 SIC에서 검출 순서는 시스템의 전체적인 성능에 큰 영향을 미친다^[5]. OFDM의 SIC에서 특정 기준에 따라 최적의 검출 순서를 결정하는 방식은 복잡도를 크게 증대시키는 결과를 가져온다^[4]. 본 논문에서는 CSEP를 기준으로 최초로 검출되는 심볼을 결정한 후, 기검출된 심볼군의 경계에 인접한 두 심볼만을 대상으로 CSEP를 갱신하여 그 다음 검출될 심볼을 결정하는 저복잡도 양방향 탐색 SIC 방식을 제안한다.

우선 검출 순서를 결정하기 위한 기준이 되는 CSEP와 관련하여 변조방식에 대하여 다음과 같이 가정한다. 심볼 $\mathbf{u}(k)$ 는 변조방식의 알파벳 $\{s_0, s_1, \dots, s_{M-1}\}$ 에서 동일한 확률로 선택되며 이 심볼에 대한 선형 MMSE 예측 결과를 $\hat{\mathbf{u}}(k)$, 이 값을 ML(Maximum Likelihood) 기준에 의해 판정한 결과를 $\bar{\mathbf{u}}(k)$ 로 나타낸다. k 번째 심볼의 CSEP는 다음과 같이 정의된다

$$\text{CSEP}_k = P\{\mathbf{u}(k) \neq \bar{\mathbf{u}}(k) | \hat{\mathbf{u}}(k)\}. \quad (5)$$

위 식의 계산을 위하여 랜덤 변수 $\hat{\mathbf{u}}(k)$ 의 조건 확률밀도함수 $f_{\hat{\mathbf{u}}(k)}(\mathbf{u} | \mathbf{u}(k) = s_m)$ 이 복소 가우시언 분포를 가진다고 가정하면 평균 $\mu_k(s_m)$ 과 분산 $\sigma_k^2(s_m)$ 은 다음과 같이 주어진다^[1, 4].

```

m ← 0N
v ← σs21N
C ← σn2Fdiag(w ∘ w*)FH
for k ← {i1, i2, ..., iN}
  m(k) ← 0
  v(k) ← σs2
  mk ← m(k - 2Q : k + 2Q)
  vk ← v(k - 2Q : k + 2Q)
  yk ← y(k - Q : k + Q)
  hk ← H(f)(k - Q : k + Q, k)
  Hk ← H(f)(k - Q : k + Q, k - 2Q : k + 2Q)
  Ck ← C(k - Q : k + Q, k - Q : k + Q)
  gk ← σs2 [Ck + Hkdiag(vk)HkH]-1hk
  u∧(k) ← gkH(yk - Hkmk)
  m(k) ← decision of u∧(k)
  v(k) ← 0
end

```

그림 2. 선형 MMSE 예측에 기반한 SIC

Fig. 2. SIC based on linear MMSE estimation.

$$\begin{aligned} \mu_k(s_m) &= \mathbf{g}_k^H \mathbf{h}_k s_m \\ \sigma_k^2(s_m) &= \mathbf{g}_k^H \mathbf{h}_k (1 - \mathbf{h}_k \mathbf{g}_k^H) |s_m|^2. \end{aligned} \quad (6)$$

최소 CSEP 기준은 다음과 같이 정리할 수 있다^[4,8]

$$\begin{aligned} \hat{k} &= \arg \min_k \{ \text{CSEP}_k \} \\ &\approx \arg \max_k \left\{ \min_{s_m \neq \bar{\mathbf{u}}(k)} \left\{ \frac{d(\hat{\mathbf{u}}(k), \bar{\mathbf{u}}(k), \mu_k(s_m))}{\sigma_k^2(s_m)} \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

위 식에서 $d(u_1, u_2, u_3) = |u_1 - u_3|^2 - |u_1 - u_2|^2$ 이며 복소평면에서 u_2 와 u_3 사이의 거리와 u_1 에서 선분 $\overline{u_2 u_3}$ 의 수직이등분선 사이의 거리의 곱에 비례한다. 각 심볼 s_m 이 동일한 에너지를 가지는 MPSK와 같은 변조 방식을 사용하는 경우 최소 CSEP 기준은 변조방식의 성상도 위에서 예측값 $\hat{\mathbf{u}}(k)$ 로부터 가장 가까운 심볼 판정선까지의 거리를 메트릭(metric)으로 정하고 메트릭 값이 최대가 되는 심볼을 선택하는 기준과 동일해진다. 따라서 QPSK와 8PSK의 경우 최소 CSEP 기준은 다음과 같이 표시된다 (s_0 는 각각 $e^{j\pi/4}$ 와 $e^{j\pi/8}$ 로 가정)

$$\hat{k} = \begin{cases} \arg \max_k \left\{ \frac{\min\{|r_k|, |i_k|\}}{1 - \mathbf{g}_k^H \mathbf{h}_k} \right\}, & \text{QPSK} \\ \arg \max_k \left\{ \frac{\min\{|r_k|, |i_k|, ||r_k| - |i_k||/\sqrt{2}\}}{1 - \mathbf{g}_k^H \mathbf{h}_k} \right\}, & \text{8PSK} \end{cases} \quad (8)$$

위 식에서 $r_k = \text{Re}\{\hat{\mathbf{u}}(k)\}$, $i_k = \text{Im}\{\hat{\mathbf{u}}(k)\}$ 이다.

SIC의 첫 번째 단계에서는 각 심볼에 대한 CSEP를 구한다. 이 경우 각 심볼 검출은 초기 상태에서 수행되므로 결과는 검출 순서와는 무관하다. CSEP의 계산에는 심볼 예측값 $\hat{\mathbf{u}}(k)$ 가 요구된다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서의 결과에 최소 CSEP 기준을 적용하여 처음으로 검출할 심볼을 선정한다. 새로 검출된 심볼의 인덱스를 k 라 하면 그림 1에서 알 수 있듯이 심볼의 인덱스 사이의 거리가 $2Q$ 이하인 인접 심볼의 검출시 영향을 미치며 이러한 간섭 범위 $[k - 2Q, k + 2Q]$ 를 그 심볼의 ICI 윈도우로 표현한다. 다음에 검출될 심볼을 선정하기 위하여 바로 전에 검출된 심볼의 ICI 윈도우 범위 내에 있는 심볼의 CSEP는 갱신되어야 한다. 본 논문에서는 CSEP 갱신 횟수를 줄이기 위해 기검출된 심볼군에 바로 인접해 있는 좌우 두 심볼의 CSEP만을 갱신 대상으로 하여 최소 CSEP를 적용하는 방식을 이용한다. 이러한 방식은 첫 번째 검출되는 심볼은 최소 CSEP 기준에 따라 선정되고 그 후에는 검출된 심

표 1. 제안된 방식의 복잡도

Table 1. Computational complexity of the proposed method.

detection sequence		required number of \mathbf{g}_k evaluation	remarks
1st round	1 ~ N	N	detected symbol values and metrics are saved
2nd round	1	0	data saved in the 1st round are used
	2	2	both candidates are within the ICI window boundary
	...	2 for each	
	$2Q+1$	2	
	$2Q+2$	1	one of the candidates is now out of the ICI window boundary
	...	1 for each	
	$N-2Q$	1	
	$N-2Q+1$	2	both candidates are within the ICI window boundary
	...	2 for each	
$N-1$	2		
N	1	last symbol	
total		$2N+4Q-2$	

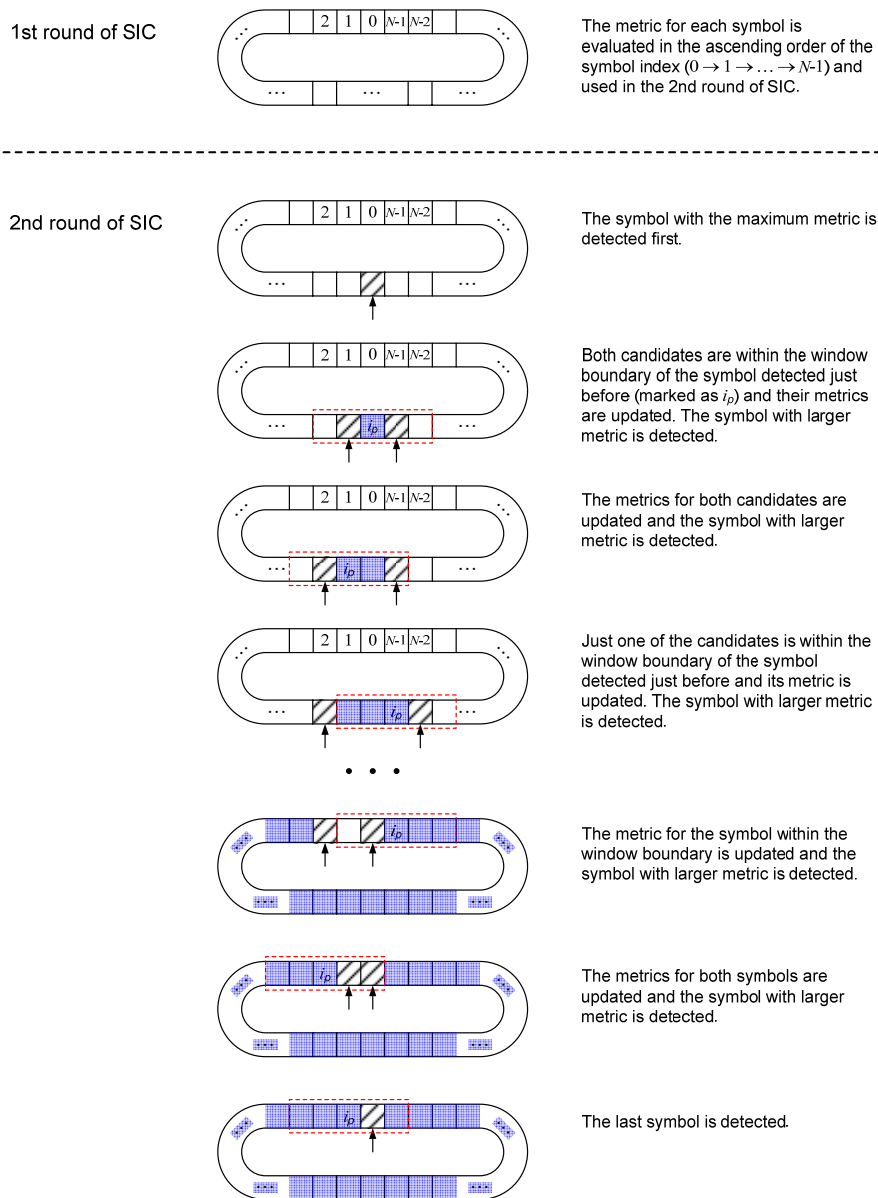


그림 3. 제안된 방식의 동작 과정 ($Q=1$)
Fig. 3. The operation procedure of the proposed method ($Q=1$).

볼균을 중심으로 양방향으로 최적 심볼을 탐색하는 방식으로 SIC의 문제점인 오류 전파의 가능성을 크게 감소시킬 수 있다. 가장 간단한 $Q=1$ 인 경우 제안된 방식의 전체 동작 과정을 그림 3에 도시하였다.

일반적인 SIC에서 하나의 심볼에 대한 계산 과정은 그림 2에서 알 수 있듯이 여러 행렬로부터 \mathbf{g}_k 값을 계산하고 이를 바탕으로 심볼 예측값 $\hat{\mathbf{u}}(k)$, 심볼 관정값 $\bar{\mathbf{u}}(k)$ 를 계산하는 과정과 식 (8)을 이용한 메트릭 계산 과정으로 구성되어 있다. 이 과정에서 복잡도의 대부분은 $(2Q+1) \times (2Q+1)$ 행렬의 역행렬을 구하는 과정

이 포함된 \mathbf{g}_k 값의 계산에 소요되며 이 과정의 복잡도는 $O((2Q+1)^3)$ 이다. 따라서 본 논문에서 SIC 방식의 복잡도 비교에 \mathbf{g}_k 값의 계산 횟수를 이용한다. 참고 문헌 [1]의 경우 SIC를 여러 회 반복 수행하는 것이 가능하며 N_i 번 수행하는 경우 복잡도는 $N_i N$ 이 된다. 참고 문헌 [2]와 [4]에서는 2회 반복하므로 복잡도는 $2N$ 이다. 제안된 방식의 복잡도는 $2N+4Q-2$ 가 되며 복잡도 산출 과정을 표 1에 기술하였다.

컴퓨터 모의실험을 통하여 제안된 방식과 기존 방식의 성능을 비교하여 BER 성능 결과를 그림 4에 나타내

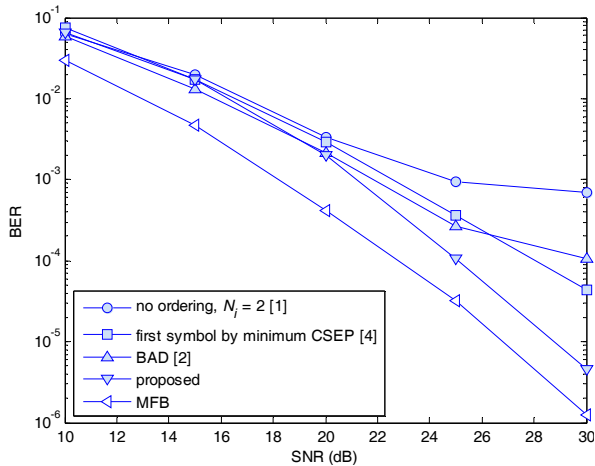


그림 4. 심볼 검출 순서가 SIC의 BER 성능에 미치는 영향

Fig. 4. The effect of symbol detection ordering on the BER performance of SIC.

었다. 일반적인 Jakes 스펙트럼 채널 환경에서 QPSK 변조방식을 사용하였으며 시스템 파라미터는 $N = 256$, $L = 5$ 로 설정하였다. 채널의 시변 정도를 나타내는 정규화된 도플러 주파수 $f_d T = 0.5$ 로 설정하였으며 이 값은 비교적 빠른 속도의 채널 변화에 해당한다^[4]. 채널 행렬의 대역폭 $Q = \lceil f_d T \rceil + 1 = 2$ 로 설정하였다^[1]. 이 경우 시간 영역 윈도우의 사용으로 인한 잔류 ICI의 감소 효과가 나타나며 ICI 윈도우 내의 심볼에 의한 간섭이 성능 저하의 주원인으로 작용한다^[4]. 제안된 방식은 기존 방식과 비교하여 오류 전파의 가능성이 감소하여 ICI가 성능 저하의 주원인이 되는 높은 SNR 영역에서 우수한 성능을 보여준다. 제안된 방식은 비트에러율 = 10^{-5} 에서 성능 상한치인 정합필터 한계^[1]에 2dB 이내로 접근하는 성능을 가진다. 주어진 모의실험 환경에서 복잡도의 증가는 $(4Q - 2)/(2N)$ 로 1.2%에 해당한다.

IV. 결 론

고속 시변 채널 OFDM을 위한 SIC에서는 오류 전파에 의한 성능 저하 가능성으로 인하여 심볼 블록 내에서의 심볼 검출 순서가 전체적인 성능에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 최소 CSEP 기준으로 최초로 검출되는 심볼을 결정한다. 그 다음 검출될 심볼은 기검출된 심볼군의 경계에서 양방향으로 탐색하여 CSEP를 갱신한 후 결정하는 방식을 이용한다. 컴퓨터 모의실험 결과 제안된 방식은 기존 방식과 비교하여 오류 전파의

가능성 감소로 ICI가 성능 저하의 주원인이 되는 높은 SNR 영역에서 보다 우수한 성능을 나타낸다. 주어진 모의실험 환경에서 제안된 방식은 1.2%의 복잡도 증가로 비트에러율 = 10^{-5} 에서 성능 상한치인 정합필터 한계에 2dB 이내로 접근하는 성능을 가진다.

참 고 문 헌

- [1] P. Schniter, "Low-complexity equalization of OFDM in doubly selective channels," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 52, pp. 1002-1011, Apr. 2004.
- [2] J. K. Nelson, A. C. Singer, U. Madhow, and C. S. McGahey, "BAD: bidirectional arbitrated decision-feedback equalization," IEEE Trans. Commun., vol. 53, No. 2, pp. 214-218, Feb. 2005.
- [3] D. Lim and 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.
- [4] 임동민, "이중 선택적 채널 OFDM 시스템에서 시간 영역 윈도우와 검출 순서가 순차적 간섭 제거에 미치는 영향," 한국전자과학회논문지, 제 21권, 제 6호, pp. 635-641, 2010년 6월.
- [5] S. Verdu, Multiuser Detection, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998.
- [6] 임동민, "고속 시변 채널 OFDM을 위한 파일럿 심볼을 이용한 저복잡도 LS 채널 예측," 전자공학회 논문지, 제 48권 TC편, 제 11호, pp. 17-21, 2011년 11월.
- [7] 임동민, "고속 시변 채널 OFDM을 위한 저복잡도 LS 채널 예측의 성능 개선," 전자공학회논문지, 제 49권 TC편, 제 8호, pp. 25-32, 2012년 8월.
- [8] S. W. Kim, "Log-likelihood-ratio-based detection ordering in V-BLAST," IEEE Trans. Commun., vol. 54, pp. 302-307, Feb. 2006.

저 자 소 개



임 동 민(정회원)

1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
1992년~현재 경상대학교 전자공학과 교수, 공학연구원 연구원

<주관심분야 : 통신신호처리, 이동통신>