

# 주파수 선택적 채널에서의 shifted TR 기반의 선택적 MMSE 기법 응용

\*조재웅 \*\*윤미선 \*\*\*이범수 \*\*\*\*이충용

연세대학교

\*jwcho@csp.yonsei.ac.kr

## Application of selective MMSE scheme to the shifted TR for frequency selective channel

\*Cho, Jaewoong \*\*Yoon, Misun \*\*\*Lee, Bumsu \*\*\*\*Lee, Chungyong

Yonsei University

### 요약

본 논문에서는 송신단에서의 shifted TR 기법과, 이 것에 수신단에서의 선택적 MMSE 등화기를 추가한 통신시스템을 주파수 선택적 채널에서 실험해보고 이것이 shifted TR 기법만 사용했을 때와 비교하여 수신단의 선택적 MMSE 등화기가 성능에 어떤 영향을 끼치는지 관찰하였다. 이를 보호 구간 별로 실험 결과를 비교하였으며 수신단에 선택적 MMSE 등화기를 추가시켰을 경우, shifted TR 기법만을 사용했을 경우보다 비트 오차율 측면에서 성능의 이득이 있음을 확인하였다.

### 1. 서론

주파수 선택적 페이딩 현상을 가지는 실내 통신 환경 및 이동통신 환경에서는 채널이 가지는 주파수 선택적 페이딩 특성 때문에 송신 신호의 지연확산현상이 일어나게 된다. 또한 이 때문에 심각한 심볼간 간섭 현상이 발생하며, 이로 인해 통신 시스템의 성능이 열화된다.

이러한 심볼간 간섭을 줄이기 위한 방법의 하나로 time-reversal (시역전, TR) 기법이 소개되었다[1,2]. TR 기법은 송신기에서 채널의 정보를 알고 있을 때, 채널 정보를 이용하여 수신신호의 신호 대 간섭비를 최대화 시키는 전처리기를 설계하는 기술이다. 특히, 산란이 많은 통신 환경에서 목표로 하는 수신기에게 전송하고자 하는 신호를 공간 및 시간 축에서 집중시킬 수 있는 이점을 가지고 있다. 공간 축에서 신호의 에너지를 집중시키는 특성으로 인해 다중 사용자 환경에서의 사용자 간 간섭을 줄일 수 있으며, 시간 축에서 신호의 에너지를 집중시키는 특성으로 인해 채널의 심볼간 간섭에 의한 성능 열화를 완화시킬 수 있다.

이러한 TR 기법을 응용하여 전처리기에서의 circular shift를 이용한 shifted TR 기법이 제안되었다[5]. 이 기법은 2명의 사용자가 서로에게 미치는 간섭을 최소화시킬 수 있었으나, 자기 자신의 심볼간 간섭에 의한 성능열화를 완화시키지 못했다.

TR 기법을 사용하고도 남은 잔여 심볼간 간섭을 처리하기 위해 수신기에서 minimum mean square error (MMSE) 등화기를 사용하는 기법도 연구되었다[3]. 이 기법은 shifted TR 기법

에서의 잔여 심볼간 간섭을 줄여주어 이로 인한 성능 열화를 완화시켜줄 수 있다.

본 논문에서는 이 두 기법의 장점을 결합한 송,수신기법을 주파수 선택적 채널을 가지는 통신환경에 적용하고 실험을 통해 BER 성능을 관찰하였다. 2절에서는 본 논문에서 사용하는 시스템 모델과 TR 전처리기와 선택적 MMSE 등화기에 대한 설명을 기술할 것이며 3절에서는 본 논문에서 사용된 통신시스템의 BER 성능을 살펴볼 것이다. 또한 4절에서는 이 논문의 결론을 기술할 것이다.

본 논문에서 사용된  $(\cdot)^*$ ,  $\otimes$  와 같은 기호들은 각각 complex conjugation, convolution을 뜻한다.

### 2. 시스템 모델

본 절에서는 송신단에서 다중 안테나를 사용하고 수신단에서 단일 안테나를 사용하는 multi input single output (MISO) 통신시스템을 가정하였다. 2대의 송신기가 각각 자신이 지원하는 사용자에게 신호를 송신하게 되고 자신이 지원하지 않는 사용자에게는 간섭 신호를 주게 된다.

#### 가. TR 전처리기

TR 기법은 송신단과 수신단 사이의 채널 정보를 알고 있을 때, 채널의 임펄스 응답 (CIR)이 시역전된 신호에 complex conjugate를 취한 후 송신단에서 전처리기로 사용하는 것이다 [1]. 따라서 TR 전처리기는 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{h}(t) = h(t) \otimes g(t), g(t) = h^*(-t) \quad (1)$$

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0025659).

여기서  $h(t)$ 는 채널의 임펄스 응답이며,  $g(t)$ 는 전처리기이다. 또한  $h^*(-t)$ 는 시역전된 CIR의 complex conjugate이다.  $\tilde{h}(t)$ 는 전처리기와 채널을 합쳐 하나의 채널로 보았을 때인 유효 채널의 임펄스 응답이다. 송신 파워를 유지할 수 있도록 다음과 같이  $g(t)$ 에 대한 정규화가 필요하다.

$$\tilde{g}(t) = \frac{h^*(-t)}{\sqrt{\int |h(t)|^2 dx}} \quad (2)$$

따라서  $\tilde{h}(t) = h(t) \otimes \tilde{g}(t)$ 로 표현할 수 있으며, 위의 수식들을 정리하면 다음과 같다.

$$\tilde{h}(t) = h(t) \otimes \frac{h^*(-t)}{\sqrt{\int |h(t)|^2 dx}} \quad (3)$$

이산시스템을 가정할 때 위의 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tilde{h}[k] = h[k] \otimes \frac{h^*[L-k]}{\sqrt{\sum_{k=1}^L |h[k]|^2}} \quad (4)$$

여기서  $L$ 은  $h[k]$ 의 길이, 즉 채널 탭의 개수이다. 그리고 수신신호  $y$ 는 다음과 같다.

$$y_q[k] = s_q[k] \otimes \tilde{h}_{q,q}[k] + \sqrt{\beta_{p,q}} s_p[k] \otimes \tilde{h}_{p,q}[k] + n_q[k]; \quad p \neq q \quad (5)$$

여기서  $s_q[k]$ 는 송신기  $q$ 가 수신기  $q$ 에게 전송하는 심볼이고  $\tilde{h}_{q,q}$ 는 송신기  $q$ 에서 수신기  $q$ 사이의 채널이다. 또한  $\tilde{h}_{p,q}$ 는 송신기  $p$ 와 수신기  $q$ 사이의 채널이며  $\beta_{p,q}$ 는 송신기  $p$ 와 수신기  $q$ 사이의 large scale attenuation을 말한다.  $n_q$ 는 noise이다.

Shifted TR기법은 송신기  $p, q$ 에서 수신기  $p, q$ 로 전송하는 신호가 동시에  $\tilde{h}$ 의 peak점을 수신하도록 TR 전처리기를 만들어서 송신한다면 서로간의 간섭 역시 peak점끼리 끼치게 되므로 이러한 사용자간 간섭을 줄이고자 두 사용자의 채널 중 한 채널을 다른 쪽 채널의 심볼간 보호 구간 사이에 peak점이 들어가도록 송신기의 TR 전처리기에서 circular shift를 시켜주어 전송하는 기법이다[5]. 본 논문에서는 shifted TR기법을 송신기에서 사용하는 동시에 수신단에서는 다음의 선택적 MMSE 등화기를 사용한 통신 시스템의 BER 성능을 살펴보도록 한다.

#### 나. 선택적 MMSE 등화기

수신단에서도 채널의 정보를 알고 있으며 이 채널의 정보를

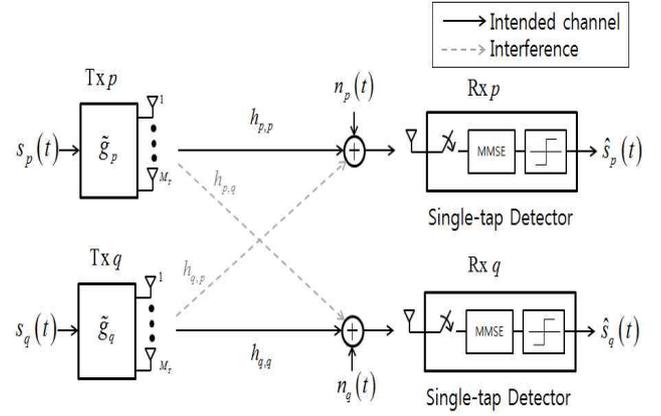


그림 1 시스템 모델의 블록도

가지고 선택적 MMSE 등화기를 사용하여 잔여 심볼간 간섭을 줄일 수 있다. 수신단에서의 복잡도를 줄이기 위해 채널 정보를 모두 사용하는 것이 아니라 TR CIR  $\tilde{h}(t)$ 의 peak점에 인접한 몇 개의 채널 탭의 정보만을 사용한다. 이렇게 선택된 시역전 채널의 임펄스 응답을  $\tilde{h}_s[k]$ 라 하고, 이를 이용하여 Toeplitz matrix를 구성하면 다음과 같다.

$$\mathbb{H}_s = \begin{bmatrix} \tilde{h}_s[0] & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \\ \tilde{h}_s[L_s-1] & \ddots & & \vdots \\ 0 & & & 0 \\ & \ddots & & \tilde{h}_s[0] \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \tilde{h}_s[L_s-1] \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서  $L_s$ 는  $\tilde{h}_s[k]$ 의 채널 탭의 개수이다. 이렇게 만든 channel Toeplitz matrix를 가지고 다음과 같이 선택적 MMSE 등화기를 설계한다.

$$\underline{x} = (\mathbb{H}_s^* \mathbb{H}_s + \frac{1}{SNR_{RX}} \mathbb{I})^{-1} \mathbb{H}_s^* \underline{y} \quad (7)$$

여기서  $\underline{x}$ 는 선택적 MMSE 등화기의 output이다.

#### 다. 주파수 선택적 채널 모델

본 논문에서 사용된 채널 모델은 [4]에서 사용된 exponential decay 모델이다. 이 모델은 다음과 같은 power delay profile을 가진다.

$$\sigma_l^2 = \exp\left(-\frac{(l-1)\Delta\tau}{\sigma_\tau}\right) \quad (8)$$

여기서  $l$ 은 채널 탭의 번호이고  $\Delta\tau$ 는 채널 탭 간격,  $\sigma_\tau$ 는 RMS delay spread이다.  $l$ 번째 채널 탭의 계수는 평균이 0이고

분산이  $\frac{1}{2}\sigma_l^2$ 인 가우시안 분포를 가지는 complex 값으로 모델링한다.

### 3. 실험 결과

#### 가. 실험 변수

실험에 사용된 변수들은 다음 표와 같다.

표 1. 실험 변수

실험 변수	값
채널의 길이	32
선택된 지역전 채널의 길이	11
블록 당 심볼 개수	100
목표로 하지 않는 수신기에 대한 large scale attenuation	0.5
송신 안테나 개수	4
채널 탭 간격	5ns
RMS delay spread	10ns

#### 나. BER 성능

앞 절의 실험 변수들을 적용하여 BER 성능 실험을 해 본 결과, BER 성능은 그림 2와 같이 나왔다. 보호 구간이 1인 경우 error flooring이 있음을 볼 수 있는데, 이 것은 수신단에서 완벽한 채널 정보를 이용하여 선택적 MMSE 등화기를 만든 것이 아니고 수신기의 복잡도를 낮추기 위해 peak점을 중심으로 앞뒤로 5개의 채널 탭의 정보만을 선택하여 11개의 채널 탭으로 만들어져서 심볼간 간섭이 완벽히 제거되지 않았기 때문이다. 또한 수신단의 채널 정보는 자신이 받을 데이터를 전송하는 송신기와 채널 정보만을 가지고 있으므로 다른 송신기가 미치는 간섭을 고려하지 않았기 때문에 높은 SNR임에도 불구하고 error flooring이 생긴 것이다. 그러나 선택적 MMSE 등화기를 사용했을 때가 사용하지 않았을 때 보다 항상 좋은 BER 성능을 보여주고 있다. 이는 수신단의 선택적 MMSE 등화기가 심볼간 간섭을 효과적으로 줄여주고 있기 때문이다.

### 4. 결론

본 논문에서는 shifted TR기법에 수신단의 선택적 MMSE 등화기를 추가시켜 이로 인한 BER 성능 향상이 있는지를 관찰하

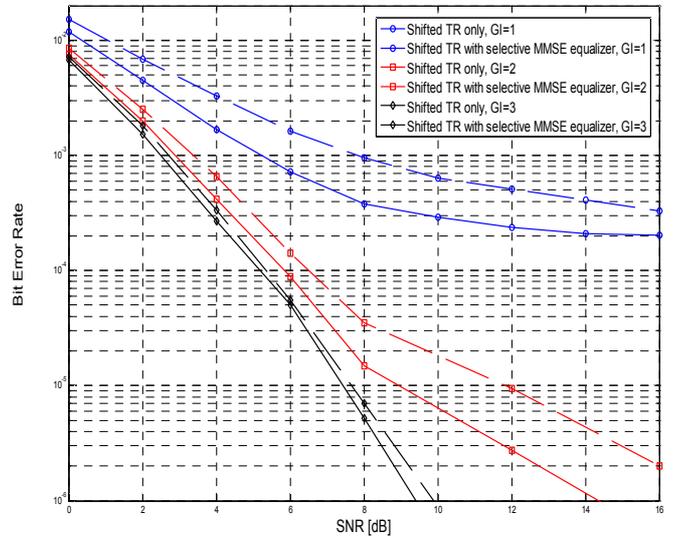


그림 2. Shifted TR만 사용했을 때와 shifted TR에 선택적 MMSE 등화기를 추가로 사용했을 때의 BER 성능 비교

였다. 주파수 선택적 페이딩을 가지는 채널에서 이 기법은 shifted TR기법의 약점인 심볼간 간섭에 의한 성능 열화를 보완해 주었으며 그 결과 BER 성능의 향상이 있음을 보여 주었다.

### 5. 참고논문

- [1] Mathias Fink, "Time Reversal of Ultrasonic Fields - Part I : Basic Principles", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 39, no. 5, Sep. 1992.
- [2] 씨깃, 최승규, 이충용 "두명의 사용자를 위한 무선 통신에서 유동적인 전송률 Back-off를 이용하는 지연 Time Reversal 기술", 전자공학회, TC편 48권 5호 (5월호), 2011년.
- [3] Thomas Strohmer, Majid Emami, Jan Hansen, George Papanicolaou, and Arogyaswami J. Paulraj, "Application of Time-Reversal with MMSE Equalizer to UWB Communications", IEEE Globecom, 2004.
- [4] R. Vaughan and J. B. Andersen, *Channels Propagation and Antennas for Mobile Communications* (Iee Electromagnetic Waves Series, 50), London, UK: Institute of Electrical Engineers, 2003.
- [5] Hung Tuan Nguyen, Persefoni Kyritsi and Patrick C.F. Eggers, "Time reversal technique for multi-user wireless communication with single tap receiver", Mobile and Wireless Communications Summit, 16th IST, 2007.