

논문 2010-47SC-6-8

채널추정 오차에 강인한 적응형 MIMO 신호처리 기법

(Adaptive MIMO Switching Algorithm Robust for Channel Estimation Error)

최 준 성*, 은 창 수**

(Joon Sung Choi and Changsoo Eun)

요 약

본 논문에서는 다중 안테나 시스템에서의 전송률과 안정성 측면에서의 최적의 성능을 발휘하기 위해 채널 추정오차에 강인한 적응형 다중입출력(MIMO) 스위칭 알고리즘을 제안한다. 제안된 논문은 무선 채널의 추정 오차에 대한 강인성을 확보하기 위하여 가변형 패킷오류 예측 방식에 기반을 두었으며, 기존의 MIMO 스위칭 방식에 비해 스펙트럼 효율이 약 8% 이상 증대됨을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, we propose a new adaptive MIMO switching algorithm that provides the optimal trade-off between throughput and reliability of data in MIMO system. The proposed algorithm is based on the variable packet error predictor which is robust for channel estimation error, and we show that our algorithm has a better spectrum efficiency than the conventional MIMO switching techniques about 8 percent point.

Keywords : MIMO, AMS, Spectrum Efficiency, SNR, Channel Estimation

I. 서 론

무선 통신의 주요 서비스가 음성 중심에서 멀티미디어 데이터 중심으로 변화하면서 네트워크 시스템 및 사용자 측면에서 필요한 데이터 전송 용량의 증대가 요구되고 있다. 이는 상용 서비스에 국한되지 않고 국방 분야에서도 그 필요성이 증대되고 있다. 향후 미래 전장에서 운용될 지상 무인전투체계의 경우 전장 선단에 위치한 다수의 지상 로봇들이 자체 센서를 통해 획득한 영상, 항법, 상태 및 표적탐지 정보 등을 원격지에 위치

한 지휘통제차량으로 실시간 전송하고, 지휘통제차량은 수신된 동영상 정보 등을 기반으로 전장상황을 신속히 인식하고 다수의 지상 로봇에 대한 원격통제 및 임무감시를 수행하는 개념으로 운용될 예정이다. 이를 위해서는 동영상 등의 대용량 전장 정보를 고속/고효율로 전송하기 위한 무선 전송 기술이 필요하다. 최근 활발히 연구되고 있는 다중안테나 신호처리 방식인 MIMO 기술이 이에 대한 좋은 대안이 될 수 있다. 특히 무선통신용 주파수 자원이 점차적으로 부족해지고 있는 상태에서, 단위 주파수 당 전송 효율을 높일 수 있는 MIMO 무선 전송기술의 필요성은 점차 증대되고 있다.

MIMO 무선전송 기술은 크게 공간 다이버시티(Spatial Diversity) 및 공간 다중화(Spatial Multiplexing) 방식으로 분류할 수 있다. 공간 다이버시티 기법은 다중경로 감쇄 채널의 영향에 강한 장점을 갖는 기술로

* 정회원, 국방과학기술연구소

(Agency for Defense Development)

** 평생회원, 충남대학교 전기정보통신공학부

(Dept. of Information Communications Engineering, Chungnam National University)

접수일자: 2010년7월15일, 수정완료일: 2010년11월15일

서, 동일한 데이터를 각각의 안테나를 통해 독립적인 페이딩 채널을 통해 전송하는데 이 때 코딩은 보통 시공간 블록 부호화(Space-Time Block Coding; STBC)라 불리는 기법을 사용해서 코딩이 되며, 수신된 신호에 대한 복호화 과정을 거치면 단일 안테나를 통한 수신 경우보다 수신감도가 증대되는 효과가 발생되어 통신거리 증대 및 안정적인 통신이 가능하게 된다^[1]. 공간 다중화 기법은 고속 데이터 전송을 위해 각 안테나 별로 서로 독립적인 신호를 전송하여 동일한 주파수 및 시간 자원에서 송수신 측에서의 안테나 개수 중 작은 수에 비례하여 한 번에 많은 데이터를 보낼 수 있는 기술이다^[2]. 즉 여러 송신 안테나가 각각 독립적인 SISO(Single Input Single Output) 채널을 형성하는 효과를 얻게 되어 전송 용량을 증대시키는 기법이다. 이처럼 두 기법은 안정성과 전송량 측면에서 각각의 장점이 있으나, 공간 다이버시티 기법은 스펙트럼 효율을 증대 시키는데 제한 사항이 있으며, 공간 다중화 기술은 신호 대 잡음비(SNR)가 적은 경우나 무선 채널의 상호 상관성이 큰 경우 성능이 저하된다는 문제점이 발생한다.

이에 상기 두 가지 방식의 장점을 결합하여 무선채널의 상태에 따라 두 가지 기법을 적응적으로 선택하는 적응형 MIMO 스위칭(Adaptive MIMO Switching; AMS) 방식이 최근 활발히 연구되고 있다^[3-4]. Heath와 Paulraj 는 2x2 MIMO 시스템에서 고정된 전송 용량에 대해 비트 오류율이 최소가 되도록 수신단에서 심볼 사이의 유클리드 거리를 최소화하는 전송 모드를 선택하는 연구를 진행하였다^[3]. 또한 Choi와 Alamouti는 패킷 오류율을 고정시킨 상태에서 스펙트럼 효율이 최대가 되도록 전송 모드를 결정하는 연구를 진행하였다^[4].

논문 [3]에서는 채널의 상호상관 특성을 나타내는 Demmel condition number 및 다이버시티와 다중화 모드에서의 심볼간 최소 거리를 이용하여 동일 전송효율 조건에서의 최적의 MIMO 방식을 선택하는 방식을 제안하였으나, 채널 및 SNR 조건에 따라 변조도 및 채널 코딩 방식을 적응적으로 적용하여 전송 효율을 최대화시키는 방식으로 적합하지 않는 방식이다.

이에 반하여 논문 [4]에서는 패킷 오류 예측기를 기반으로 다이버시티 및 공간 다중화 모드에서의 채널 용량 및 스펙트럼 효율을 산출하고 스펙트럼 효율이 높은 쪽으로 MIMO 방식을 전환하는 방법을 제안하였다. 이 방식은 이전 방식에 비해 채널 상태가 좋을 경우 전송

용량을 최대화 시킬 수 있는 방법이 되나, 패킷 오류 예측기의 입력 값으로 활용되는 각 MCS 레벨에서의 기준 채널용량을 고정형 상수로 설정함으로써 채널 상태가 변화하거나 채널 추정오차가 존재하는 경우 최적 효율을 확보하기 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 패킷 오류 예측기의 기준 채널용량을 적응적으로 변화시켜 기존 방식 대비 양호한 성능을 보이는 새로운 MIMO 스위칭 알고리즘을 제안하게 되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 II장에서는 다중입출력(MIMO) 알고리즘을 설명하고, III장에서는 전송모드를 최적으로 설정하기 적응형 MIMO 스위칭 방식을 제안한다. IV장에서는 모의실험을 통해서 제안된 전송기법의 성능을 알아보고, 끝으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 다중입출력(MIMO) 알고리즘

무선통신에서 무선 링크의 신뢰성을 높이기 위하여 시간/공간 다이버시티 기법이 널리 사용되고 있다^[5-6]. 다이버시티 기법은 다수 개의 안테나에서 데이터를 송수신하고, 이를 적절하게 처리하여 전송 성능을 향상시키는 페이딩 극복 기법들 중 하나이다. 이러한 고전적인 다이버시티는 무선 채널의 페이딩으로 인한 성능저하를 극복하여 안정적인 서비스 지원을 가능케 하지만, 복잡한 신호처리의 추가가 필요하다는 단점을 갖고 있다. 따라서 간단한 구조로 다이버시티 이득을 얻거나, 추가적으로 주파수 사용효율 증가를 위한 진보된 다중입출력 알고리즘들이 활발하게 연구되고 있다^[7-8].

1. STBC(Space Time Block Code)

STBC는 송수신 단에서 각각 링크 신뢰성을 높일 수 있는 다중입출력 알고리즘 방식이다. 그림 1.은 대표적인 STBC 방식인 2x1 Alamouti 구조를 보인다.

송수신단에서 부호화한 2종류의 데이터를 위 그림과 같이 시간 및 공간(분리된 안테나)을 통하여 송신하면 수신단에서는 식 (1)과 같은 신호를 수신하게 되고

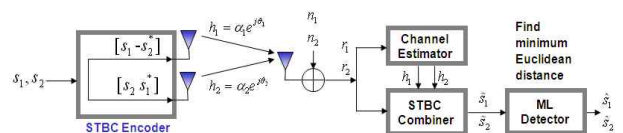


그림 1. STBC 부호화/복호화
Fig. 1. STBC Encoder/Decoder.

$$\begin{aligned} r_1 &= h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \\ r_2 &= -h_1^* s_2 + h_2^* s_1 + n_2 \end{aligned} \quad (1)$$

상기 식을 채널 추정기와 STBC 결합기를 통과한 후 복호화 하면 식 (2)와 같이 원래 전송 신호인 s_1 과 s_2 를 복원할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \hat{s}_1 &= h_1^* r_1 + h_2 r_2^* = (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) s_1 + n' \\ \hat{s}_2 &= h_2^* r_1^* - h_1 r_2^* = (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) s_2 + n'' \end{aligned} \quad (2)$$

STBC 방식은 부호화 및 복호화시 적은 구현 복잡도를 가지며 전송 신호의 신뢰성을 높일 수 있는 장점이 있으나, 안테나 구성에 의해 알고리즘 제한성이 존재하며 스펙트럼 효율 증대에 한계가 있는 방식이다.

2. SM(Spatial Multiplexing)

SM은 링크의 신뢰성 향상보다는 데이터 전송율을 높이기 위한 방식으로서 그림 2와 같은 구조를 보인다.

송신단에서 전송 데이터들을 Demultiplex 하여 M_T 개의 개별 심벌들의 집합으로 분리한 후에, 이를 M_T 개의 안테나를 통하여 동시 전송하게 된다. 다수 개의 송신 안테나를 통하여 전송된 데이터는 무선 채널

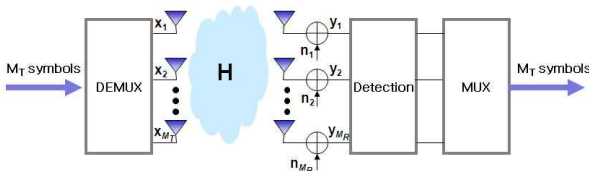


그림 2. SM 부호화/복호화
Fig. 2. SM Encoder/Decoder.

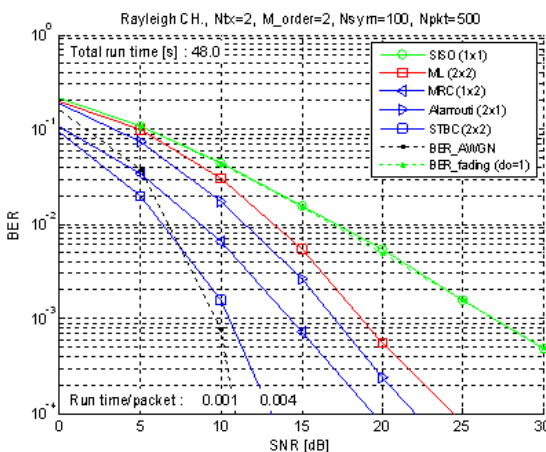


그림 3. STBC와 SM 특성 비교
Fig. 3. Performance comparison between STBC and SM.

H를 지나 M_R 개의 안테나를 통하여 수신하게 된다. 수신된 데이터는 SM 복호화를 통하여 전송 데이터의 심벌을 추정하고, 이를 다시 Multiplexing하여 최종적으로 송신 데이터를 복원하게 된다. 이러한 방식으로 SM은 다수개의 안테나를 통하여 다수개의 개별 데이터를 동시 전송하고, 수신단에서는 채널의 특성을 파악하여 전송 데이터를 분리하여 데이터를 검출하는 과정에서 동일 주파수 대역을 사용하므로 주파수 사용 효율을 향상시키게 된다. SM의 복호화 방식은 선형화 방식인 ZF(Zero Forcing) 및 MMSE(Minimum Mean Square Estimation) 방식, 그리고 V-BLAST 방식, 최적 방식인 Maximum Likelihood 방식 및 준최적 방식인 QRD-M, Sphere Decoder 방식 등이 존재한다.

그림 3.은 동일 변조 및 채널코딩 조건에서의 STBC와 SM 방식에 대한 성능을 모의실험으로 비교한 내용이다. 동일 SNR에서의 BER 특성이 SM(ML) 방식에 비해 STBC 방식이 유리함을 알 수 있다. 그러나 STBC는 앞서 언급하였듯이 스펙트럼 효율이 SM 방식에 비해 불리하므로 동일한 스펙트럼 효율 조건에서의 BER 특성은 채널 상태나 SNR 등에 의해 SM 방식이 유리해 질수도 있게 되며, AMS 방식을 통해 이러한 조건을 최대한 활용하게 된다.

III. 적응형 MIMO 신호처리

무선채널 상태를 기반으로 한 링크 적응형 MIMO 스위칭은 그림 4와 같이 미리 정해진 규칙에 의해 수신기에서 MCS 레벨과 MIMO 모드를 결정한 후 이것을 송신기에 피드백 시켜 해당 방식으로 패킷을 전송시키는 방식이다.

링크 적응형 AMS 절차를 살펴보면 다음과 같다. 수신기에서는 채널 상태 정보가 주어지면 모든 가용한 MCS 레벨의 PER을 예측할 수 있고, 그 중 가장 높은

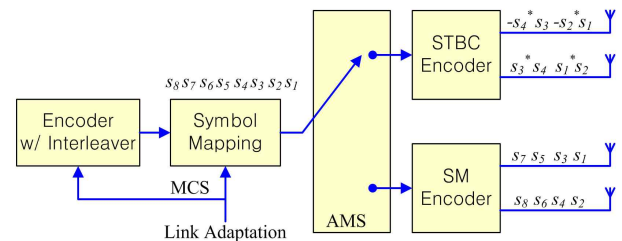


그림 4. 링크 적응형 MIMO 스위칭
Fig. 4. Link adaptive MIMO Switching.

표 1. MCS 레벨에서의 스펙트럼 효율
Table 1. Spectrum efficiency in MCS level.

MCS Level (k)	변조방식	부호화율	c_k (bps/Hz)
1	QPSK	1/2	1.0
2	QPSK	3/4	1.5
3	16QAM	1/2	2.0
4	16QAM	3/4	3.0
5	64QAM	2/3	4.0
6	64QAM	3/4	4.5

스펙트럼 효율을 보장하는 MCS 레벨을 선택한다. STBC 모드에서 k 번째 MCS 레벨의 PER 목표치 만족 여부는 다음과 같이 표현된다.

$$f_{STBC,k}(\mathbf{H}, SNR) = \begin{cases} 0 & \text{meet target PER} \\ 1 & \text{do not meet target PER} \end{cases} \quad (3)$$

k 번째 MCS 레벨은 다음과 같이 가용한 스펙트럼 효율을 최대화시키는 방향으로 선택된다.

$$SE_{STBC} = \max_k (1 - f_{STBC,k}) c_k \quad (4)$$

여기서 c_k 는 k 번째 MCS 레벨에서의 스펙트럼 효율로서 표 1과 같은 값을 가지며, SE_{STBC} 는 STBC 모드에서의 추정 스펙트럼 효율(Spectrum Efficiency; SE)이다.

유사한 방식으로 SM 모드에서 추정 스펙트럼 효율을 최대화 시키는 MCS 레벨을 구해보면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$SE_{SM} = N \max_k (1 - f_{SM,k}) c_k \quad (5)$$

여기서 N 은 송신 안테나의 개수이다. 상기와 같이 각 모드에서의 스펙트럼 효율을 구한 후 $SE_{STBC} < SE_{SM}$ 인 경우에 MIMO 모드로서 SM을 선택하고, 반대의 경우는 STBC를 선택한다.

링크 적응과 AMS의 목적은 PER을 감소시키고 순시 스펙트럼 효율(채널 용량)을 증대시키는 최적의 전송 구조를 선택하는 것이다.

MIMO 채널에서의 순시 채널 용량은 주어진 채널 조건에서의 최대 가용 상호 정보로서 다음과 같이 표현될 수 있다^[9].

$$C = \max I(\mathbf{d}; \mathbf{y} | \mathbf{H} = \mathbf{H}) = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{SNR}{N} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \quad (6)$$

여기서 \mathbf{d} 는 전송 데이터 벡터, \mathbf{y} 는 수신 벡터, \mathbf{I} 는 단위 행렬, N 은 전송 안테나의 개수이다. 만약 전송 프레임이 상기 용량에 비해 작은 스펙트럼 효율을 가지게 되면 임의의 큰 코드워드(이상적인 코딩)를 이용시 PER은 임의의 작은 값이 된다.

STBC 모드에서 Alamouti 부호화를 가정하면, 복호화 후의 채널 용량은 다음과 같이 표현된다.

$$C_{STBC} = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{SNR}{N} \text{Tr} \{ \mathbf{H} \mathbf{H}^H \} \right) \quad (7)$$

k 번째 MCS 레벨에서의 패킷 오류 예측기는 다음과 같고,

$$f_{STBC,k}(\mathbf{H}, SNR) = \begin{cases} 0 & \text{if } C_{STBC} \geq c_k \\ 1 & \text{if } C_{STBC} < c_k \end{cases} \quad (8)$$

비이상적 코딩, 구현손실(캐리어 위상 오차, 심볼 판별시간 오차, AD 양자화 오차) 및 채널 추정 오차 등으로 인한 효과 때문에 임계치 (\mathcal{E}_k)는 측정 혹은 모의실험을 통해 다음과 같이 조정 적용된다.

$$f_{STBC,k}(\mathbf{H}, SNR) = \begin{cases} 0 & \text{if } C_{STBC} \geq \mathcal{E}_k \\ 1 & \text{if } C_{STBC} < \mathcal{E}_k \end{cases} \quad (9)$$

SM 모드에서 MMSE 수신기의 경우 j 번째 복호 스트림($j=1,2,\dots,M_T$)에서의 MMSE 등화기의 SINR은 다음 식과 같다.

$$SINR(j) = \frac{1}{\left[\left(\mathbf{I} + \frac{SNR}{N} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right)^{-1} \right]_{jj}} - 1 \quad (10)$$

여기서 $[\cdot]_{jj}$ 는 행렬의 (j, j) 번째 성분이며, 상기 식은 채널 품질계수(CQI; Channel Quality Indicator)를 계산하는데 사용된다. 링크 적응의 정확도를 높이는데 있어서 흥미로운 특성은 코드워드가 적은 수의 상이한 채널을 통과할 때, PER 특성은 주로 최소 채널 품질에 영향을 받는다는 것이다. 이러한 관찰 결과를 적용하여 다음과 같은 CQI를 정의하여 적용한다.

$$C_{SM,min} = \min_j \log_2 (1 + SINR(j)) \quad (11)$$

최소 SINR은 PER 예측에 있어서 가장 큰 영향을 끼치는 요소이다. 그러므로 SM 모드에서 패킷 오류 예측

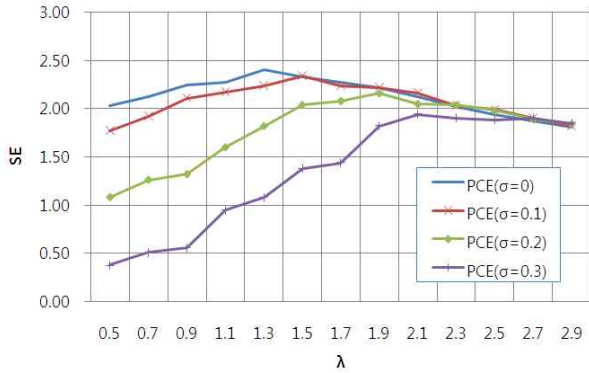


그림 5. 임계치에 따른 스펙트럼 효율 특성
Fig. 5. Spectrum Efficiency depends on threshold value.

기는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_{SM,k}(\mathbf{H}, SNR) = \begin{cases} 0 & \text{if } C_{SM,min} \geq \mathcal{E}_k \\ 1 & \text{if } C_{SM,min} < \mathcal{E}_k \end{cases} \quad (12)$$

모의실험을 통해 상기의 임계치 \mathcal{E}_k 가 스펙트럼 효율을 결정하는데 있어서 중요한 파라미터임을 확인하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 임계치에 따라 상이한 스펙트럼 효율을 보임을 확인할 수 있었다.

그림 5에서 λ 는 c_k 에 대한 \mathcal{E}_k 의 임계치 비례 계수로서 식 (13)과 같이 표현되며, σ 는 채널 추정오차의 편차를 나타낸다.

$$\mathcal{E}_k = \lambda * c_k \quad (13)$$

논문 [4]에서는 상기의 임계치 λ 를 실험 혹은 시뮬레이션 결과에 의한 고정값으로 적용하였다. 하지만 최적의 스펙트럼 효율을 제공하는 λ 값은 주어진 채널 상태 혹은 채널 추정 오차의 크기에 따라 가변적인 값을 갖는다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 채널 추정 오차가 커질수록 최대 SE를 갖게 하는 λ 값은 증가하게 된다.

한편 채널 추정오차는 SNR 값에 반비례하므로 SNR 크기에 반비례하여 λ 를 적용시 SE가 증대됨을 예측할 수 있다. SNR은 통상적으로 프리엠블 송수신을 통해 계산되는데, 수신단에서 신호의 샘플링 및 신호처리 과정에서 오차가 발생할 수 있으며, 또한 SNR이 전적으로 채널 추정오차에 영향을 미치는 요소가 아니므로 본 논문에서는 SNR과 더불어 채널 추정오차에 영향을 미치는 요소로서 PER을 적용하였다.

본 논문에서 제안한 최적 SE 도출을 위한 가변 임계치 기반의 적응형 MIMO 스위칭 방식을 설명하면 다음

과 같다. 먼저 STBC의 예를 들면 다음과 같은 절차를 수행한다.

- 1) 수신단에서 PER 값($P_{e,STBC}$)을 측정한다.

$$P_{e,STBC} = N_{err_pkt_STBC} / N_{tx_pkt_STBC} \quad (14)$$

이 때 PER 측정은 송/수신단에서 미리 알고 있는 파일럿 신호를 이용한다. 여기서 $N_{tx_pkt_STBC}$ 는 전체 수신 패킷의 수이고, $N_{err_pkt_STBC}$ 는 에러 패킷의 수이다. $N_{tx_pkt_STBC}$ 의 정확한 값을 알기 위해서는 각 패킷의 순서 번호를 이용한다.

- 2) 측정 PER ($P_{e,STBC}$)과 목표 PER($P_{e,ref}$)의 차이를 구한다. 이 두 값의 차이를 δ 라 정의한다.

$$\delta_{STBC} = P_{e,STBC} - P_{e,ref} \quad (15)$$

- 3) δ 및 SNR 값을 이용하여 λ 값을 계산한다.

$$\lambda_{STBC} = 1 + \gamma \delta_{STBC} + (1 - SNR_{dB} / SNR_{max}) \\ = 2 + \gamma \delta_{STBC} - SNR_{dB} / SNR_{max} \quad (16)$$

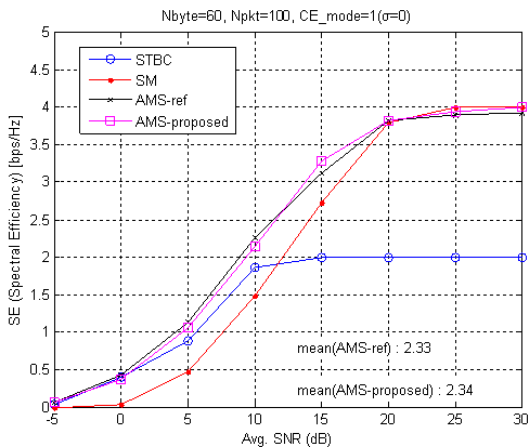
- 4) 계산된 λ 값을 이용하여 가변 임계치를 결정한다.

$$\mathcal{E}_{k,STBC} = \lambda_{STBC} * c_k \quad (17)$$

상기 (17)식은 SNR값이 증가됨에 따라 λ 값을 감소시키며, 목표 PER과 측정 PER의 차이가 클수록 λ 값을 증가시키는 방식으로 무선 채널의 환경 변화를 적응적으로 반영하여 최대의 스펙트럼 효율을 증대할 수 있는 방법이 된다. SM 모드도 상기의 STBC와 동일한 방식으로 임계치를 결정한다.

IV. 모의실험 및 성능고찰

본 모의 실험에서는 2x2 MIMO 시스템에서의 스위칭을 위한 변복조/코딩 형태를 QPSK 1/2 FEC, QPSK 3/4 FEC 그리고 16QAM 1/2 FEC 등 총 3개의 MCS 레벨을 고려하였다. 채널코딩(FEC)은 길쌈 부호화(Convolutional coding)를 적용하였고 패킷 크기는 60 Bytes이며 채널 환경은 레일리(Rayleigh) 분포를 적용하였다. 무선 채널은 한 개의 전송 패킷 내에서 특성 변화가 없는 준정적 페이딩(Quasi-static fading) 조건으로 가정하였다.



(a) 채널추정오차 없는 경우

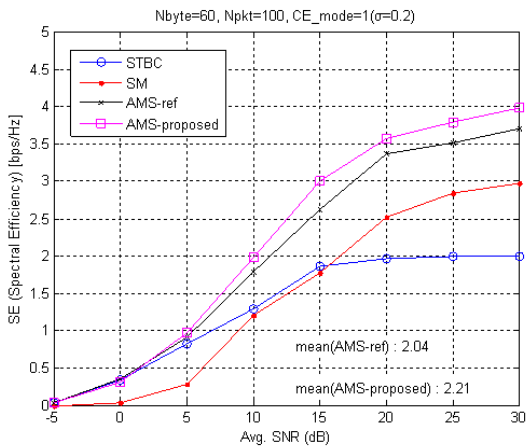
(b) 채널추정오차 있는 경우 ($\sigma=0.2$)

그림 6. 채널추정 오차에 따른 스펙트럼 효율 특성

Fig. 6. Spectrum Efficiency depends on channel estimation error.

제안된 방식과 기존의 참고 논문^[4] 방식을 비교한 모의 실험 결과는 그림 6과 같다. 그림 6-(a)는 채널 추정 오차가 없을 경우 SNR별 스펙트럼 효율 특성인데, 기존 방식의 평균 스펙트럼 효율이 2.33 bps/Hz, 제안 방식이 2.34 bps/Hz로서 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

그러나 그림 6-(b)의 경우처럼 채널 추정 오차가 존재할 경우(표준편차, $\sigma=0.2$ 조건) 기존 방식의 스펙트럼 효율이 2.04 bps/Hz인데 비해 제안 방식은 2.21 bps/Hz로서 약 8% 정도의 효율이 증대됨을 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 다중안테나를 이용한 최적 MIMO 모드 스위칭 방식에 대한 설계 내용을 다루었다. 설계된

방식은 기존의 고정형 임계치를 사용하는 방식에 비해 채널 추정 오차가 존재하는 경우에도 양호한 스펙트럼 효율 특성을 보였으며, 향후 지상 무인전투체계 등 군용 및 민수용의 다양한 무선통신에 사용될 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 44, no. 2, pp. 744-765, Jul. 1999.
- [2] M. Jankiraman, "Space-Time Codes and MIMO Systems", Artech House, 2004.
- [3] R. W. Heath and A. J. Paulraj, "Switching Between Diversity and Multiplexing in MIMO Systems", *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 53, no. 6, pp. 922-968, June 2005.
- [4] Y. S. Choi and S. M. Alamouti, "Pragmatic PHY Abstraction Technique for Link Adaptation and MIMO Switching", *IEEE J. Selected Areas in Comm.*, vol. 26, no. 6, pp. 960-971, Aug. 2008.
- [5] A. Ramachandran and S. Jagannathan, "Spatial Diversity in Signal Strength based WLAN Location Determination Systems", *IEEE Conference on Local Computer Networks*, pp.10-17, 2007
- [6] Y. Kondo and T. Tanaka, "Adaptive time diversity for TDMA/TDD personal communication systems", *Fourth IEEE International Conference on Universal Personal Communications*, pp. 973-976, 1995
- [7] Yue Shang and Xiang-Gen Xia, "Space Time Block Codes Achieving Full Diversity With Linear Receivers", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.54, pp.4528-4547, 2008
- [8] G. Wetzker, "Definition of spatial multiplexing gain", *Electronics Letters*, Vol.41, pp.656-657, 2005
- [9] A. Paulraj, E. Nabar, and D. Gore, "Introduction to Space-Time Wireless Communications", Cambridge University Press, 2003

— 저 자 소 개 —



최 준 성(정회원)
 1990년 성균관대학교 전자공학과
 학사 졸업
 1992년 성균관대학교 전자공학과
 석사 졸업
 2005년 충남대학교 정보통신
 공학과 박사 수료

1992년~현재 국방과학연구소 선임연구원
 <주관심분야 : Mobile Ad-hoc 네트워크, MIMO,
 통신신호처리>



은 창 수(평생회원)
 1985년 서울대학교 전자공학과
 학사 졸업
 1987년 서울대학교 전자공학과
 석사 졸업
 1995년 The University of Texas
 at Austin 박사 졸업

1997년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부
 교수
 <주관심분야 : RF 및 마이크로파 회로, 통신신호
 처리>