

# 무선랜 시스템에서 피드백 오버헤드 저감을 위한 불균등 피드백 기법

이광재, 최완

서울대학교 전기정보공학부, 뉴미디어통신공동연구소

kwangjae@snu.ac.kr, wanchoi@snu.ac.kr

## Unequal Feedback for Feedback Overhead Reduction in WLAN Systems

Kwangjae Lee, Wan Choi

Department of Electrical and Computer Engineering and Institute of New Media Communications, Seoul National University

요약

무선랜 시스템은 기브스 회전 기반의 스칼라 양자화를 통한 채널 상태 정보 피드백 방법을 고수하고 있다. 하지만, 무선랜 시스템이 8세대에 걸쳐 발전하면서 피드백해야 하는 스칼라 파라미터 양이 매우 증가하고 있다. 본 논문은 무선랜에서 피드백 오버헤드 저감을 위한 불균등 피드백 기법을 제안한다. 먼저, 단일 사용자 MIMO 시스템에서 무선랜 표준에 채택된 SVD 기반 송신 빔포밍과 기브스 회전 기반 스칼라 피드백 과정을 설명한다. 무선랜 표준에 정의된 빔포밍과 피드백을 바탕으로, 특이 벡터마다 서로 다른 피드백 비트를 할당하는 불균등 피드백 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안하는 불균등 피드백 기법이 패킷 오류율 성능을 보장하면서 피드백 오버헤드를 크게 줄이고 처리량 성능을 높임을 확인한다.

### I. 서론

무선랜 시스템에서 액세스 포인트(AP)는 특이값 분해(SVD) 기반의 송신 빔포밍을 통해 스테이션(STA)을 서비스한다 [1]. SVD 빔포밍을 위해서는 AP에서 채널 상태 정보(CSI)가 필요하다. 무선랜 시스템에서 AP는 시분할 송수신 방식을 이용하지만, 채널 상호성을 활용하지 않고 STA에게 SVD 빔포밍 행렬에 대해 기브스(Givens) 회전 기반의 스칼라 양자화를 통한 압축된 피드백을 받아서 SVD 빔포밍을 수행한다.

현재 IEEE 802.11 Working Group에서 표준화 진행 중인 8세대 무선랜 시스템에서는 다중 AP 도입, AP에서 최대 16개의 안테나 운용, 동작 대역폭 증가 등 여러 이유로 STA의 피드백 오버헤드가 매우 커지고 있다 [2]. 피드백 오버헤드의 증가는 패킷 오류율(PER)과 처리량(Tput) 등 무선랜 시스템의 주요 성능 지표를 악화시키기 때문에 피드백 오버헤드 저감 기법이 필요하다. 본 논문에서는 SVD 빔포밍 행렬을 양자화할 때, 각 특이 벡터에 대한 기브스 파라미터에 서로 다른 피드백 비트를 할당하는 불균등 피드백 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안하는 기법이 PER을 적절히 유지하면서 피드백 오버헤드를 줄이고 Tput 성능을 높이는 결과를 보인다.

### II. 시스템 모델

본 논문에서는  $M$ 개의 송신 안테나를 가진 단일 AP와  $N$ 개의 수신 안테나를 가진 단일 STA가 있는 단일 사용자 다중 입력 다중 출력(SU-MIMO) 상황을 고려한다. AP와 STA 사이의 채널 행렬을  $H$ 라고 했을 때,  $H$ 를 SVD하면  $H = USV^*$ 이다. 여기서,  $U$ 와  $V$ 는 유니터리(unitary) 행렬이고,  $S$ 는 특이값들로 구성된 대각 행렬이다.  $V^*$ 는  $V$ 의 에르미트(Hermitian) 행렬이다. 만약 AP와 STA가 모두 완벽한 CSI를 가지고 있다고 가정하면, SVD 송수신기는 송신 빔포밍 행렬  $V$ 와 수신 빔포밍 행렬  $U^*$ 로 구성된다. SVD 송수신기를 활용하고, AP가 STA에게 데이터  $X$ 를 전송하였을 때, STA가 받는 수신신호  $U^*Y$ 는 다음과 같이 표현된다 [1].

$$U^*Y = \sqrt{\rho/M} U^*USV^*VX + U^*Z = \sqrt{\rho/M} SX + U^*Z \quad (3)$$

위 식에서  $\rho$ 는 신호 대 잡음 비(SNR)이고,  $Z$ 는 가산성 백색 가우스 잡음(AWGN)이다.

하지만, 실제 환경에서는 AP가 완벽한 CSI를 얻기 어렵다. 본 논문에서는 STA가 채널을 완벽히 추정하고 SVD 후 AP에게  $S$ 는 완벽히 피드백하지만,  $V$ 는 현재 무선랜 표준에 기반하여 기브스 회전을 통해 파라미터화하고 해당 파라미터들을 스칼라 양자화해서 AP에게 피드백한다고 가정한다 [1]. 다음 장에서 기브스 회전 기반 스칼라 피드백 및 본 논문에서 제안하는 불균등 피드백 기법을 설명한다.

### III. 기브스 회전 기반 스칼라 피드백 및 불균등 피드백 기법

기브스 회전 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$G_b(\psi) = \begin{pmatrix} I_{i-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi_{li}) & 0 & \sin(\psi_{li}) & 0 \\ 0 & 0 & I_{-i-1} & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\psi_{li}) & 0 & \cos(\psi_{li}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{M-l} \end{pmatrix} \quad (4)$$

기브스 회전을 통해  $i$ 와  $l$ 번째 행을 다음과 같이 평면 회전할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$x_1$ 과  $x_2$ 가 모두 실수일 때, 위 문제의 해답은 다음과 같다.

$$\psi = \arccos\left(\frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}}\right) = \arcsin\left(\frac{x_2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}}\right), \quad y = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \quad (6)$$

위와 같은 기브스 회전의 반복을 통해, 빔포밍 행렬  $V$ 를 극좌표계의 각도 값들로 변환할 수 있다. 하지만, 빔포밍 행렬  $V$ 는 일반적으로 복소 행렬이기 때문에, 복소 원소들을 실수화하는 전처리 과정이 필요하다. 전처리 과정에 활용되는 대각 행렬  $D_i$ 와  $\tilde{D}$ 는 아래 식 (7)과 같다. 식 (7)에서  $\phi_{li} = \angle(V_{li})$ 로 설정한 후  $D_i^*$ 을  $V$ 의 왼쪽에 곱하면  $V$ 의  $i$ 번째 열의 마지막 행을 제외한 원소들은 모두 음수가 아닌 실수가 된다. 또한,

$$D_i = \begin{pmatrix} I_{i-1} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & e^{j\theta_{i,i}} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & e^{j\theta_{M-1,i}} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tilde{D} = \begin{pmatrix} e^{j\theta_1} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & e^{j\theta_2} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & e^{j\theta_{N-1}} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & e^{j\theta_N} \end{pmatrix} \quad (7)$$

복소 값으로 남아있는 마지막 행의 원소들은  $\theta_i = \angle(V_{Mi})$ 로 설정한 후  $\tilde{D}^*$ 을  $V$ 의 오른쪽에 곱하면 모두 음수가 아닌 실수가 된다. 따라서,  $M \times N$  차원 빔포밍 행렬  $V$ 는  $\tilde{D}$ ,  $D_i$ ,  $G_i(\psi_{l,i})$  행렬들의 연속적인 곱으로 아래와 같이 분해된다 [1].

$$V = \left( \prod_{i=1}^{\min(N,M-1)} D_i \prod_{l=i+1}^M G_l^T(\psi_{l,i}) \right) \tilde{I}_{M \times N} \tilde{D} \quad (8)$$

위 식에서  $G_l^T(\psi_{l,i})$ 는  $G_l(\psi_{l,i})$ 의 전치행렬이고,  $\tilde{I}_{M \times N}$ 은  $M \times N$  차원에 맞게 0을 적절히 채운 단위행렬이다. STA가  $\theta$ 를 피드백하지 않아도 수신단에서 성능이 동일하기 때문에 본 논문에서 STA는  $\phi$ 와  $\psi$ 만을 AP에게 피드백한다 [1]. 결과적으로, 빔포밍 행렬 당 양자화할 각도의 총 개수는  $N(2M-N-1)$ 이며, STA는  $\phi$ 를 0에서  $2\pi$  사이에서,  $\psi$ 를 0에서  $\pi/2$  사이에서 양자화해서 AP에게 피드백한다. 이때, 양자화하는 각도 범위가 다르기 때문에  $\psi$ 에 비해  $\phi$ 에 2비트를 더 할당한다.

본 논문에서는, 채널 행렬을 SVD를 했을 때 특이값들이 내림차순으로 정렬되고,  $V$  행렬의 열벡터인 특이 벡터들도 내림차순으로 정렬된 특이값들에 맞게 정렬된 경우를 상정한다.  $V_i$ 를  $V$  행렬의  $i$ 번째 열벡터라고 했을 때,  $V$  행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V = [V_1 V_2 \cdots V_{\min(M,N)}] \quad (9)$$

이 때 본 논문에서는 2가지 불균등 피드백 기법을 제안한다. 첫 번째 기법은  $V_1$ 부터  $V_{\min(M,N)}$ 에 대해 내림차순으로 피드백 비트를 할당하는 기법이고, 두 번째 기법은 오름차순으로 피드백 비트를 할당하는 기법이다. 다음 장에서 모의실험을 통해 이러한 불균등 피드백 기법의 성능을 보인다.

#### IV. 모의실험 결과

본 논문에서는 모의실험을 위해 4개의 공간 스트림을 지원하는  $4 \times 4$  SU-MIMO 시나리오를 고려한다. 모의실험은 매트랩에서 지원하는 무선랜 툴박스의 802.11ax 압축 빔포밍 PER 모의실험 예제를 활용하였으며 기존 기법은  $\phi$ 에 6비트,  $\psi$ 에 4비트를 할당한 802.11ax로 설정하였다 [2].

[표 1]에서 각 기법과 시나리오에 따른 피드백 비트 수를 확인할 수 있다. PER 모의실험의 경우 채널 모델 D, 20MHz 대역폭, 페이로드 길이 1000바이트, MCS 3으로 설정하였다. Tput 모의실험의 경우 피드백 오버헤드를 반영하여 다음 식을 통해 Tput을 계산하였다 [2].

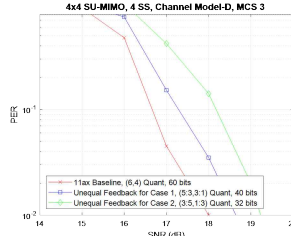
$$T_{put} = \frac{L_{data}(1-P)}{T_{sounding}(1-P) + T_{data} + T_{ACK}(1-P)} \quad (10)$$

위 식에서  $L_{data}$ 는 페이로드 데이터 길이이고,  $P$ 는 PER이고,  $T_{sounding}$ 은 피드백 오버헤드가 포함된 채널 사운드링 시간이고,  $T_{data}$ 는 패킷 전송 시간이고,  $T_{ACK}$ 는 확인 응답 시간이다. Tput 모의실험에서는 링크 적응을 위해 각 기법과 SNR별로 최대 Tput 값이 나오는 MCS를 찾은 후 해당 MCS에 맞춰 모의실험을 진행하였다.

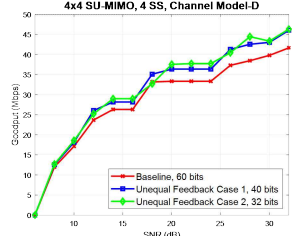
[그림 1]과 [그림 2]는 SNR에 따른 PER과 Tput 성능을 각각 확인한 결과이다. [그림 1]에 따르면, 우리가 고려하는 시나리오의 경우 ill-conditioned 채널 환경이기 때문에 특이값의 편차가 커서 불균등 피드백 비트 할당 방식이 정반대인 제안 기법 1과 2의 성능 차이가 뚜렷함을 알 수 있다. [그림 1]과 [표 1]을 보면, 제안하는 기법은 기존 기법과 비교

단위: 비트		4x4 SU-MIMO				
		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	총
제안 기법 1	$\phi$	5	4	3	0	40
	$\psi$	3	2	1		
제안 기법 2	$\phi$	3	4	5		32
	$\psi$	1	2	3		
기존 기법	$\phi$	6			60	
	$\psi$	4				

[표 1] 각 기법과 시나리오에 따른 피드백 비트 수



[그림 1] SNR에 따른 PER 성능 비교



[그림 2] SNR에 따른 Tput 성능 비교

하여 PER 성능이 어느 정도 열화되지만, 피드백 오버헤드는 약 35% 정도 감소시킨 경우에 해당된다. 한편, 식 (10)에 피드백 오버헤드가 반영되어 있기 때문에, [그림 3]을 보면 제안 기법이 기존 기법보다 높은 Tput 성능을 보임을 확인할 수 있다. 또한, 링크 적응을 통해 이미 작은 PER을 달성할 수 있는 MCS가 선택되어 있기 때문에 특정 SNR에서 피드백 오버헤드가 더 작은 기법 2의 성능이 기법 1보다 조금 더 높은 Tput을 달성하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 그 차이가 크지 않고, PER 관점에서는 기법 1의 성능이 더욱 우수하기 때문에 본 논문에서 제안하는 불균등 피드백 기법 1이 PER을 보장하면서 피드백 오버헤드를 줄이는 효과적인 기법임을 유추할 수 있다.

#### V. 결론

본 논문은 무선랜 시스템에서 피드백 오버헤드를 저감하는 불균등 피드백 기법을 제안하였다. SU-MIMO 시스템에서 무선랜 표준에 따른 SVD 송신 빔포밍과 기븐스 회전을 이용한 스칼라 피드백을 기반으로, 특이 벡터별로 서로 다른 피드백 비트를 할당하는 불균등 피드백 기법을 제안하였다. 모의실험을 통해 높은 특이값에 해당하는 특이 벡터에 많은 피드백 비트를 할당하는 불균등 피드백 기법 1이 PER을 보장하면서 피드백 오버헤드를 줄이고 Tput 성능을 높임을 보였다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00220985).

#### 참고 문헌

- [1] E. Perahia and R. Stacey, Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac, Cambridge Univ. Press, 2013.
- [2] Z. Lin et al. (InterDigital Inc.), "Discussions on CSI Feedback Reduction in UHR," IEEE 802.11-23/0473r1, Apr. 2023.