

ZFBF 기반 다중 사용자 MIMO 시스템을 위한 효과적인 채널 피드백 기법

정희원 오 태 열*, 안 성 수**, 종신회원 최 승 원***°

An Efficient Channel Feedback Method for Zeroforcing Beamforming Based Multi-User Multiple-Input Multiple-Output System

Tae-youl Oh*, Sung-soo Ahn** *Regular Members*, Seungwon Choi***° *Lifelong Member*

요 약

본 논문은 다중 사용자 MIMO(Multi-User Multiple-Input Multiple-Output) 하향링크 채널 환경에서 시스템 용량을 향상시키기 위한 피드백 방법에 대해 연구하였다. 기존의 피드백 방법인 CVQ (Channel Vector Quantization)는 채널 용량을 증가시키기 위하여 피드백 부하를 증가 시킬 뿐만 아니라 양자화 비트 수도 증가 시킨다. CVQ는 각각의 사용자가 채널을 미리 정의된 N개의 코드북 벡터 중에서 하나로 양자화하여 그 벡터의 인덱스 값을 피드백한다. 본 논문에서는 피드백 부하의 증가없이 채널 상태 정보를 피드백 해줌으로써 시스템 용량을 향상시키는 새로운 피드백 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기존 방법인 CVQ와 성능을 분석하였다. 송신 안테나 수가 두 개인 경우, 제안 방법은 3비트 피드백으로 기존 CVQ 방법 6비트와 동일한 시스템 용량을 얻는 것을 확인 할 수 있었다.

Key Words : MU-MIMO, Zero-forcing, Feedback, CVQ

ABSTRACT

This paper presents a feedback method for improving the system capacity of MU-MIMO system for downlink channel environments. In a typical conventional feedback method, CVQ, in order to enhance the channel capacity, not only the feedback load is increased but also the quantization of the channel vector is increased, because the channel parameter of each user has to be fed back after quantizing one of the pre-defined N-codebook vectors. In this paper, a novel feedback method is proposed which provides an improved system capacity by transferring the channel state information without increasing the feedback load. Performance of the proposed method is compared to the conventional CVQ method through computer simulations. The simulation results show that the proposed method with 3-bit feedback provides a system capacity comparable to the CVQ method of 6-bit feedback when the number of transmit antennas is 2.

1. 서 론

이동 통신 시스템은 통화 품질이나 다양한 멀티

미디어 서비스를 원하는 사용자들의 요구에 따라 시스템 용량을 꾸준히 증대시켜 왔다. 초기에는 SISO (Single Input Single Output) 시스템에서 송/

* 본 연구는 LG전자(LG electronics)의 지원으로 수행되었습니다.

* 한양대학교 전자통신공학과(tyoh@dsplab.hanyang.ac.kr) ** 명지전문대학 정보통신과(ssan@mail.mjc.ac.kr)

*** 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과(choi@ieee.org) (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2009-05-197, 접수일자 : 2009년 5월 17일, 최종논문접수일자 : 2009년 9월 7일

수신 단에 여러 개의 안테나를 사용하는 SU-MIMO (Single User-Multiple Input Multiple Output) 시스템을 사용하여 시스템 용량을 증대시켰다. SU-MIMO 시스템은 다수의 안테나에서 서로 다른 데이터를 동시에 전송하여 주파수 스펙트럼을 추가 없이 시스템 용량을 증대시킬 수 있다. 최근에는 MU-MIMO (Multi User Multiple Input Multiple Output) 시스템을 사용하여 시스템 용량을 높이는 연구가 활발히 진행하고 있다. SU-MIMO는 하나의 공간 자원을 한 명의 사용자만 사용하여 시스템 용량을 증대시키는 기술이고, MU-MIMO는 공간 자원을 여러 사용자와 함께 공유할 수 있도록 스케줄링하여 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻음으로써 시스템 용량을 증대시키는 기술이다.

다중 사용자 MIMO 하향링크 채널 환경에서 기지국의 안테나 개수가 (M)개이고 (K)명의 사용자가 셀 내에 존재하는 경우, 각각의 사용자가 하나의 안테나를 가지고 있더라도 SDMA (Space Division Multiple Access) 방법을 사용하여 멀티 플렉싱 이득 (M)을 완전하게 얻을 수 있다. 또한, 사용자의 수가 기지국 안테나 수에 비해 무수히 많아지는 경우에는 ($K \gg M$) 다중 사용자 다이버시티 이득으로 인해 전체 시스템 용량이 (M)와 같이 증가하게 된다. 이러한 이득을 얻기 위해서 기지국은 각각의 사용자에게 대한 정확한 채널 상태 정보 (Channel State Information)을 알아야 한다. 실질적으로 기지국이 모든 사용자에게 대한 채널 정보를 알기 위해서는 각각의 사용자는 정확한 자신의 채널 상태 정보를 기지국에 피드백 해 주어야 한다. 그러나 모든 사용자가 정확한 채널 상태 정보를 기지국에 피드백 하는 것은 불가능하다^{[1],[2]}.

사용자가 자신의 채널 상태 정보를 기지국에 피드백 해주는 일반적인 방법이 CVQ(Channel Vector Quantization)이다. CVQ는 각각의 사용자가 자신의 채널 벡터를 미리 정의된 $N(=2^B)$ 개의 코드북 벡터 중에서 하나를 양자화하여 그 벡터의 인덱스 값을 피드백 해주는 방법이다. 여기서 B 는 피드백 데이터의 비트 수이다. 사용자들은 자신의 채널 벡터를 양자화 하기 전에 먼저 채널 벡터를 채널의 크기로 정규화한다. 이것은 양자화된 채널 벡터가 오직 실제 채널의 방향성분에 대한 정보만을 고려하게 하기 위한 것이다. 기지국은 모든 사용자로부터 피드백 된 정보들을 수신하여, 시스템 용량이 최대가 되는 사용자를 선택한 후, 각 사용자들의 송신 데이터에 양자화된 채널 벡터의 역행렬을 곱하여 송신한다.

기존 CVQ 방법은 시스템 용량을 증대시키기 위해 피드백 할 데이터 비트 수를 크게 해야 하기 때문에 피드백 부하가 많이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 DFT 코드북을 2단계로 사용하여 피드백 정보를 최소화하는 기법을 제안하였다.

섹션 2에서는 본 논문에서 사용하는 시스템 모델과 기존 CVQ 방법에 대해서 설명하였고, 섹션 3에서는 본 논문에서 제안하고 있는 피드백 방법에 대해 설명하였다. 섹션 4에서는 시뮬레이션을 통하여 제안 방법의 성능을 검증한 후, 결론을 내렸다.

II. 시스템 모델링

2.1 시스템 모델링

기지국은 M 개의 안테나로 구성되어 있으며, K 명의 사용자가 각각 하나의 안테나를 가지고 있는 하향링크 다중 사용자 MIMO 시스템 모델을 고려해 보자. 그림 1은 다중 사용자 MIMO 시스템의 블록 다이어그램이다.

그림 1에서 보는 바와 같이 k 번째 사용자의 수신 신호(y_k)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_k = h_k x + n_k \tag{1}$$

$h_k \in C^{1 \times M}$ 는 k 번째 사용자의 채널 벡터이고, $x \in C^{M \times 1}$ 는 M 개의 송신 안테나를 통해 전송될 송신 신호 벡터를 나타낸다. n_k 은 백색 가우시안 잡음을 나타낸다.

또한, 송신 신호 벡터 x 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x = W s \tag{2}$$

$$W = \hat{H}^H (\hat{H} \hat{H}^H)^{-1}, \hat{H} = [\hat{h}_1^T, \dots, \hat{h}_M^T]^T \tag{3}$$

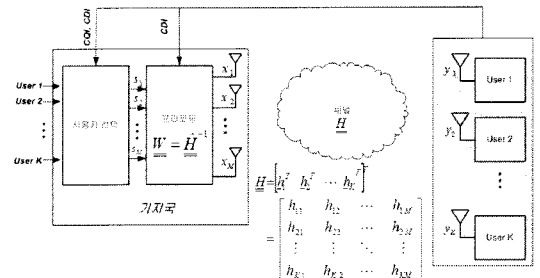


그림 1. 다중 사용자 MIMO 시스템 블록 다이어그램

\underline{W} 는 프리코딩 행렬이다. 본 논문에서 사용하는 프리코딩 행렬 \underline{W} 는 각 사용자가 피드백한 양자화된 채널 벡터의 역행렬을 프리코딩 행렬로 사용한다^[3]. $\underline{s} = [s_1, \dots, s_M]^T$ 는 사용자 데이터 신호 벡터로 사용자 선택을 통해 선택된 사용자들의 데이터 심볼을 나타낸다.

2.2 CVQ(Channel Vector Quantization)

본 섹션에서는 CVQ 방식에 대해서 자세히 설명한다. k 번째 사용자의 정규화된 채널 벡터(\tilde{h}_k)는 다음과 같이 나타낸다^[4].

$$\tilde{h}_k = \underline{h}_k / \|\underline{h}_k\| \quad (4)$$

\underline{h}_k 는 k 번째 사용자의 채널 벡터를 나타낸다. k 번째 사용자의 양자화된 채널 벡터 \hat{h}_k 는 정규화된 채널 벡터(\tilde{h}_k)와 코드북(\underline{C}) 내의 코드 벡터들 간의 유클리디안 거리를 최소화하는 코드를 선택된다.

$$\hat{h}_k = \underline{c}_n, n = \arg \max |\tilde{h}_k \underline{c}_i^*|, i = 1, \dots, N \quad (5)$$

코드북 \underline{C} 는 기지국과 사용자 모두 미리 정의된 행렬을 사용하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\underline{C} = [\underline{c}_1, \dots, \underline{c}_N] \quad (6)$$

k 번째 사용자는 기지국에 코드북 인덱스를 피드백 해주게 된다. 여기서, 피드백 해주는 정보는 단지 채널의 방향성분에 대한 정보만을 전해주고 있기 때문에 이를 CDI (Channel Direction Information)이라고 부르기도 한다.

III. 제안 방법

기존 CVQ 방식은 피드백 데이터가 많을수록, 즉 채널 벡터의 양자화 비트 수를 많이 할수록 시스템 용량이 증가하게 된다. 그러나, 한정된 자원에서 사용자의 피드백할 양자화 비트 수를 무한정 증가시킬 수 없다. 자원의 효율적인 사용을 위해서 적은 피드백 데이터로 최대의 시스템 용량을 얻을 수 있어야 한다. 본 논문에서는 피드백 부하의 양을 크게 증가시키지 않으면서 시스템 용량을 향상시킬 수 있는 효과적인 피드백 방법을 제안한다.

먼저, 본 논문에서 사용하고 있는 DFT(Discrete

Fourier Transform) 코드북에 대해서 설명한다. 코드북은 코드 벡터들의 집합이다. 본 논문에서는 2개의 DFT 코드북을 정의하였다. 하나의 코드북을 제1 코드북, 또 다른 하나의 코드북을 제2 코드북이라 부르면, 제1 코드북(\underline{C})은 다음과 같이 생성한다.

$$\underline{C} = [\underline{c}_1, \dots, \underline{c}_N] \quad (7)$$

$$\underline{c}_n = \frac{1}{\sqrt{M}} [1 e^{-j\frac{2\pi(n-1)}{N}} \dots e^{-j\frac{2\pi(n-1)(M-1)}{N}}]^T \quad (8)$$

$N=2^B$ 이고, B 는 피드백 데이터 비트 수이다. M 은 기지국 송신 안테나 수이다.

제2 코드북을 생성하기 전에 수식 (9)와 같이 행렬 \underline{D} 를 정의한다.

$$\underline{D} = [\underline{d}_1, \dots, \underline{d}_Q] \quad (9)$$

$$\underline{d}_n = \frac{1}{\sqrt{M}} [1 e^{-j\frac{2\pi(n-1)}{Q}} \dots e^{-j\frac{2\pi(n-1)(M-1)}{Q}}]^T \quad (10)$$

$Q=2^{2B}$ 이고, B 는 피드백 데이터 비트 수이다.

그림 2는 제1 코드북과 제2 코드북과의 관계를 설명한다. 그림에서 보는 것처럼, 제1 코드북에 속한 모든 코드들은 각 코드마다 서로 다른 제2 코드북을 가지고 있다. 제2 코드북은 2단계를 거쳐 생성이 된다. 제2 코드북을 생성하는 방법은 제1 코드북 중에서 코드 벡터 \underline{c}_n 의 제2 코드북을 생성하는 것을 예를 들어 설명을 하겠다.

단계 1 : 코드 벡터 \underline{c}_n 과 \underline{d}_i 의 상관값을 구한다.

$$\underline{v} = [v_1 \dots v_Q] \quad (11)$$

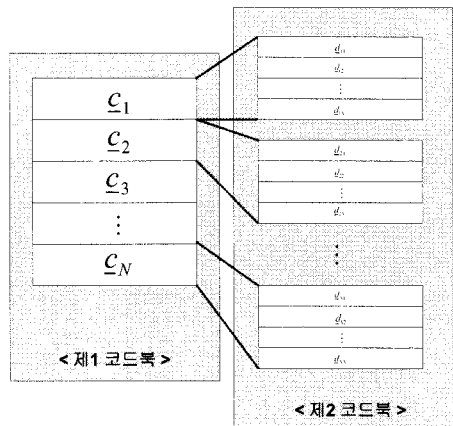


그림 2. 제1 코드북과 제2 코드북과의 관계

$$v_i = |c_n^H \cdot d_i|, \quad i = 1, 2, \dots, Q \quad (12)$$

단계 2 : 길이 Q 를 가지는 벡터 v 를 내림차순으로 정렬한 후, 상위 N 개를 취하면 코드 벡터 c_n 의 제2 코드북이 된다.

그림 3은 본 논문에서 제안하는 피드백 방법에 대한 순서도이다.

그림 3에서 보는 것처럼, 본 논문에서 제안하는 피드백 방법은 우선 k 번째 사용자는 파일럿 신호를 수신하여 자신의 채널 벡터를 추정하고 정규화한다. 정규화된 채널 벡터는 수식 (5)를 이용하여 제1 코드북내에서 피드백 할 코드 벡터 인덱스 n 을 결정한다. 다음으로, 현재 프레임의 코드 벡터 인덱스와 이전 프레임에서 구한 코드 벡터 인덱스를 비교한다. 만약 코드 벡터 인덱스가 서로 다르다면 현재 프레임의 코드 벡터 인덱스 n 을 기지국에 피드백 해 준다. 기지국에 피드백 데이터에는 현재의 코드 벡터 인덱스가 바뀌었다는 것을 기지국에 알려주기 위해 추가적으로 리셋 비트를 추가해 줄 수 있다. 코드 벡터 인덱스가 바뀌었으면 리셋 비트를 0으로 설정을 하고, 바뀌지 않았으면 리셋 비트를 1로 설정을 한다. 만약 코드 벡터 인덱스가 이전 프레임과

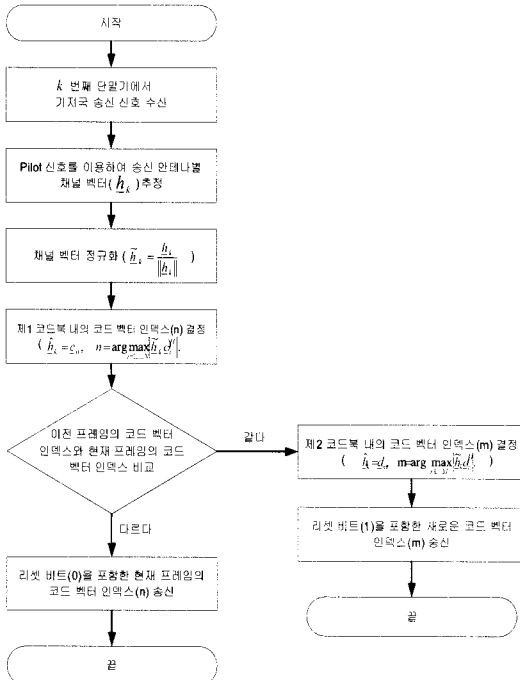


그림 3. 제안하는 피드백 방법의 순서도

같다면, 정규화된 채널 벡터와 현재 프레임의 코드 벡터 n 에 속한 제2 코드북에서 수식 (5)를 이용하여 코드 벡터 인덱스 m 을 결정한다. 사용자는 코드 벡터 인덱스 m 를 기지국에 피드백 해 준다. 추가적으로 리셋 비트를 1로 설정을 하여 피드백 할 수도 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 섹션에서는 다중 사용자 MIMO 시스템에서 제안 피드백 방법과 기존 방법의 성능을 Sum Rate 관점에서 비교하였다. 본 논문에서는 기존 방법과 제안 방법의 성능을 비교하기 위하여 피드백 채널의 데이터 지연과 에러는 발생하지 않는다고 가정하였다. 또한, 본 논문의 피드백 제안 방법의 성능을 검증하기 위하여 사용자 선택은 사용하지 않았다. 본 논문에서 사용자 선택을 사용하지 않아 기지국 송신 안테나와 사용자 수가 같은 경우만 시뮬레이션 하였다.

본 논문에서 제안한 피드백 방법과 기존의 CVQ 방법의 시스템 성능을 비교하기 위한 시뮬레이션 파라미터는 표1과 같다.

그림 4는 $M=2$ 일 때, 본 논문에서 제안한 방법과 기존 CVQ 방법의 SNR(Signal to Noise Ratio)에 따른 Sum Rate 성능 그래프를 나타낸다. 본 논문에서의 Sum Rate(R)는 다음과 같이 계산하였다^{[5],[6]}.

$$R = E(\log_2(1 + |h \hat{h}|^2)) \quad (13)$$

$E(\cdot)$ 는 \cdot 의 평균을 나타낸다. 그림 4에서 보는 것처럼 기존 방법인 CVQ는 피드백 데이터 비트 수가 증가할수록 Sum Rate가 증가하지만 피드백 부하가 많다는 것을 확인 할 수 있다. 그림에서 Perfect_CSIT는 기지국이 사용자가 겪은 채널을 알고 있을 때 구한 Sum Rate를 나타낸다. 그림에서 제안 방법은 기존 CVQ 방식의 6비트와 동일한 성능을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 따라서, 제안 방법은 기존 방법에 비해 적은 피드백 데이터 비트로

표 1. 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
기지국 송신 안테나 수	2, 4
사용자 수	2, 4
각 사용자당 수신 안테나 수	1
코드북	DFT-코드북

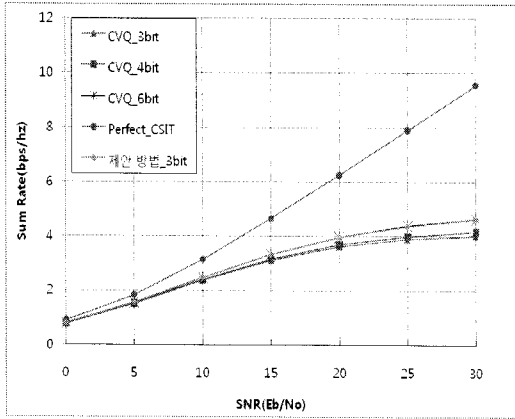


그림 4. 제안 방법과 기존 CVQ 방법의 SNR에 따른 Sum Rate 성능 그래프($M=2$)

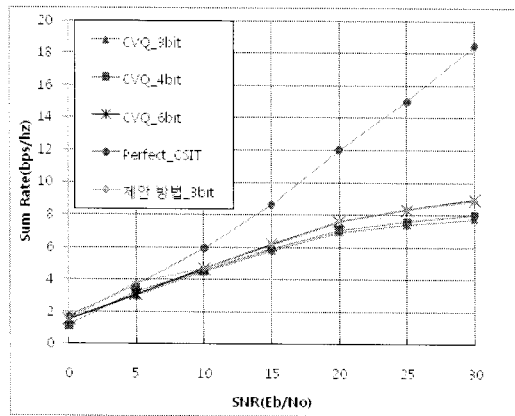


그림 5. 제안 방법과 기존 CVQ 방법의 SNR에 따른 Sum Rate 성능 그래프($M=4$)

기존 방법에 비해 높은 용량을 획득하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 $M=4$ 일때, 본 논문에서 제안한 방법과 기존 CVQ 방법의 SNR(Signal to Noise Ratio)에 따른 Sum Rate 성능 그래프를 나타낸다. 그림 4에서 처럼 기존 CVQ 6비트와 제안 방법 3비트와 동일한 성능을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 다중 사용자 MIMO 시스템에서 기존 CVQ 피드백 기법에서 좀더 효율적으로 피드백 방법을 제시함으로써 피드백 부하를 크게 증가시키지 않으면서 시스템 용량을 향상시키는 방법에 대하여 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 기존의 CVQ방법의 경우 양자화 비트가 증가할수록 시스템 용량이 증

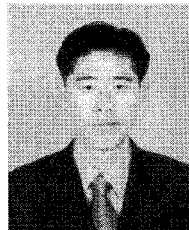
가한다는 것을 확인할 수 있었으며, 본 논문에서 제안한 방법을 통해 피드백 비트를 3비트 사용하여 기존의 CVQ 방법 6비트와 동일한 시스템 용량을 얻는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] A. Goldsmith et al., "Capacity Limits of MIMO Channels," IEEE JSAC, Vol. 21, pp. 684-702, Jun. 2003.
- [2] N. Jindal, "MIMO broadcast channels with finite rate feedback," in Proc. IEEE Globecom, pp. 1520-1524, Nov. 2005.
- [3] Q. H. Spencer, C. B. Peel, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "An introduction to the multi-user MIMO downlink," IEEE Comm. Magazine, Vol. 42, No. 10, pp. 60-67, Oct. 2004.
- [4] Philips, "Comparison between MU-MIMO codebook-based channel reporting techniques for LTE downlink," 3GPP TSG RAN WG1, R1-062483, Oct. 2006.
- [5] T. Yoo, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Finite-rate feedback MIMO broadcast channels with a large number of users," in Proc. IEEE int. Symp. info. Th.(ISIT). seattle, WA USA, pp. 1214-1218, Jul. 2006.
- [6] T. Yoo, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Multi-Antenna Downlink Channels with Limited Feedback and User Selection," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on Volume 25, Issue 7, pp. 1278-1491, Sep. 2007.

오 태 열 (Tae-youl Oh)

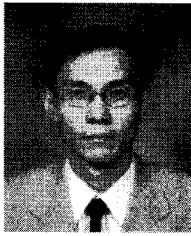
정회원



2001년 2월 대구대학교 전자통신공학과 학사
 2006년 2월 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사
 2006년 3월~현재 한양대학교 전자통신공학과 박사과정
 <관심분야> LTE, WiBro, MIMO

안 성 수 (Sung-soo Ahn)

정회원



1987년 2월 한양대학교 전자공
학과 학사

1990년 2월 한양대학교 전자전
자공학과 석사

2001년 3월 한양대학교 전자공
학과 박사

1990년~1997년 국방과학연구소
연구원

2002년~현재 명지전문대학 정보통신과 부교수
<관심분야> 스마트 안테나, DSP 신호처리, 이동통신

최 승 원 (Seungwon Choi)

종신회원



1980년 2월 한양대학교 전자공
학과 학사

1982년 2월 서울대학교 전자통
신공학과 석사

1985년 12월 미국 Syracuse
Univ. 공과대학 석사

1989년 12월 미국 Syracuse
Univ. 공과대학 박사

1992년 9월~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학
과 교수

2002년 7월~현재 HY-SDR 연구센터 센터장

<관심분야> SDR, 스마트 안테나, 신호처리, 이동통신