

부채널들 간의 상관도가 다중 사용자 MIMO-OFDMA 시스템의 성능에 미치는 영향

강민규^o, 박진배, 고병훈, 김광순

연세대학교 전기전자공학부

Effect of Correlation between Subchannels on Performance of Multiuser MIMO-OFDMA systems

Mingyu Kang^o, Jin-Bae Park, Byung Hoon Ko and Kwang Soon Kim

Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University

134 Sinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

{kangys8, spacey2k, bhko, ks.kim} @yonsei.ac.kr

요 약

본 논문은 다중 사용자 다중 안테나-직교 주파수 분할 다중 접속 방식 (MIMO-OFDMA) 시스템에서 모든 사용자가 모든 부채널들의 채널 상태 정보 (channel quality information, CQI)를 케환하는 모든 CQI 케환 기법 (full CQI, FCQI)과 케환량을 줄이기 위하여 각 사용자가 미리 정해진 값보다 큰 채널 이득을 갖는 부채널들만의 CQI 를 케환하는 선택적 부분 CQI 케환 기법 (selective partial CQI, SPCQI)이 각각 사용될 때, 부채널 간의 상관도가 각 시스템의 성능에 미치는 영향에 대하여 분석한다. 이론적 성능 분석 및 모의 실험을 통하여 FCQI 기법의 경우 부채널 간의 상관도는 시스템의 성능에 영향을 미치지 못함을 보였다. 반대로 SPCQI 기법의 경우에는 부채널 간의 상관도가 증가할수록 시스템의 성능도 함께 향상되는 것을 보였다.

1. 서론

MIMO-OFDMA 시스템은 주파수 및 공간 영역에서 발생하는 채널을 다수의 병렬 부채널로 해석할 수 있게 해줌으로써 적응 변조와 부호화 (AMC) 기술, 적응 전력 할당 기술, 다중 안테나 기술 등 [1]-[4]을 이용하여 높은 주파수 효율을 얻을 수 있어 차세대 광대역 무선 통신 기술로서 각광을 받고 있다. 또한 다수의 사용자가 존재할 경우에는 기지국이 각 부채널들을 채널 이득이 가장 우수한 사용자에게 할당함으로써 다중 사용자 다양성 이득 (multiuser diversity gain)으로부터 얻어지는 시스템 성능 향상을 도모할 수 있다 [5][6].

그러나 다중 사용자 MIMO-OFDMA 시스템에서 최대의 하향 링크 성능을 얻기 위하여 모든 사용자가 모든 부채널들의 CQI 를 케환하는 모든 CQI 케환 기법 (FCQI)은 사용자가 상대적으로 많거나 채널의 시간 및 주파수 선택성이 낮지 않을 경우 과도한 케환량을 요구하여 실제 시스템에서는 사용하기 힘

든 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 [7][8]에서는 각 사용자가 미리 정해진 값 (α)보다 큰 채널 이득을 갖는 부채널들만의 CQI 를 케환하여, FCQI 기법과 비교하여 상당한 양의 케환량을 줄임과 동시에 크게 떨어지지 않는 하향 링크 성능을 나타내는 선택적 부분 CQI 케환 기법 (SPCQI)이 제안되었다.

다중 사용자 MIMO-OFDMA 시스템에서 실제 형성되는 주파수 및 공간 영역에서의 부채널들은 서로 밀접한 상관도를 갖고 발생하게 되며, 이러한 부채널 간의 상관도는 시스템의 성능에 영향을 주게 된다. 특히, SPCQI 기법이 사용되는 시스템에서는 시스템 및 채널 환경에 따라 최적의 성능을 얻기 위한 α 의 값이 정해지므로, 부채널 간의 상관도가 시스템의 성능에 미치는 영향에 대한 분석은 중요하다 할 수 있다. 이에 본 논문에서는 다중 사용자 MIMO-OFDMA 시스템에서 FCQI 기법과 SPCQI 기법이 각각 사용될 때 부채널 간의 상관도가 각 시스템의 성능에 미치는 영향에 대해서 분석한다.

2. 시스템 모형

본 논문에서는 기지국과 K 명의 사용자가 동일한 개수 (N_a)의 안테나를 가지고 있고, N_s 개의 부반송파로 이루어진 다중 사용자 MIMO-OFDMA 시스템을 고려하였다. 한 부대역은 N_c 개의 부반송파로 이루어져 있으며, 이 때 한 MIMO-OFDM 심볼은 N_b 개의 부대역과 $N_a N_b (=N)$ 개의 부채널로 이루어진다. k 번째 사용자의 n 번째 부반송파에서의 수신 신호 벡터 $\mathbf{y}_{k,n} \in \mathbb{C}^{N_a \times 1}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y}_{k,n} = \mathbf{H}_{k,n} \mathbf{x}_n + \mathbf{n}_{k,n}. \quad (1)$$

$\mathbf{x}_n \in \mathbb{C}^{N_a \times 1}$ 는 n 번째 부반송파에서의 송신 신호 벡터이며, $\mathbf{n}_{k,n} \in \mathbb{C}^{N_a \times 1}$ 는 서로 독립이며 평균이 0 이고 분산이 N_o 인 복소 가우시안 랜덤 변수로 구성되는 잡음 벡터이다. MIMO 채널 행렬 $\mathbf{H}_{k,n} \in \mathbb{C}^{N_a \times N_a}$ 은 서로 독립이며 평균이 0 이고 분산이 1 인 복소 가우시안 랜덤 변수들을 원소로 갖는다. 한 부대역에 존재하는 N_c 개의 부반송파들은 서로 동일한 채널을 갖으며, 서로 다른 사용자 간의 채널은 독립이라 가정한다. 또한 m 번째 부채널과 n 번째 부채널 사이의 상관 계수는 δ^{m-n} 라고 가정한다.

3. 부채널들이 서로 독립적일 때의 FCQI 기법과 SPCQI 기법의 성능 분석

$\delta=0$ 이고, 모든 반송파에 동일한 전력 (E_s)이 할당되며, 모든 사용자가 ZF (zero-forcing) 수신기를 사용할 경우 각 부채널의 SNR ($X_{k,n}$)의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 주어진다 [9].

$$f_{X_{k,n}}(x) = \frac{1}{\rho} e^{-x/\rho}, \quad \rho = \frac{E_s}{N_o N_a}. \quad (2)$$

식 (2)와 같은 분포를 갖는 N 개의 CQI (X)를 오름차순으로 정렬할 때 n 번째 CQI ($Y_{N,n}$)의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 주어진다 [10].

$$f_{Y_{N,n}}(y) = \frac{N!}{(n-1)!(N-n)!} \frac{1}{\rho} \sum_{m=0}^{n-1} \binom{n-1}{m} (-1)^m e^{-(N-n+m)y/\rho}. \quad (3)$$

A. 모든 CQI 귀환 기법(FCQI)

FCQI 기법의 평균 채널 용량은 다음과 같이 주어진다 [10].

$$C_{FCQI} = \frac{N_a K}{\log(2)} \sum_{m=0}^{K-1} \frac{(-1)^m}{m+1} \binom{K-1}{m} e^{(m+1)/\rho} E_1((m+1)/\rho). \quad (4)$$

식 (4)에서 $E_1(x)$ 는 아래와 같다 [11].

$$E_1(x) = \int_x^\infty e^{-t} t^{-1} dt. \quad (5)$$

N_g 가 하나의 CQI 를 양자화하기 위한 비트수를 나

타낼 때, FCQI 기법의 경우 필요한 귀환량은 다음과 같다.

$$F_{FCQI} = N K N_g \text{ [bits]}. \quad (6)$$

B. 선택적 부분 CQI 귀환 기법(SPCQI)

SPCQI 기법 [7][8]의 경우 어떤 사용자에게도 CQI 를 귀환받지 못하는 부채널, 즉 빈 부채널 (empty subchannel)이 발생하여 심각한 성능 악화를 가져올 수 있으므로, 본 논문에서는 이러한 빈 부채널에 대비하기 위하여 각 사용자가 자신의 최소값의 CQI 를 추가적으로 귀환한다고 가정한다. 그러면 기지국은 빈 부채널이 아닌 각 부채널들은 CQI 가 가장 높은 사용자에게 할당하고, 모든 빈 부채널들은 가장 높은 최소값의 CQI 를 귀환한 사용자에게 할당한다.

먼저 빈 부채널이 아닌 경우를 고려한다. X'_k 가 α 보다 큰 CQI 를 의미할 때, X'_k 의 누적 분포 함수와 확률 밀도 함수는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$F_{X'_k}(y) = \frac{\Pr(\alpha \leq X_k \leq y)}{\Pr(X_k \geq \alpha)} \quad f_{X'_k}(y) = \frac{1}{\rho} e^{\alpha/\rho} e^{-y/\rho}. \quad (7)$$

$$= 1 - e^{\alpha/\rho} e^{-y/\rho},$$

임의의 부채널에서 X'_k 가 r 개 귀환되었을 때 그 중 가장 큰 CQI ($Y'_{r,r}$)의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$f_{Y'_{r,r}}(y) = r F_{X'_k}^{r-1}(y) f_{X'_k}(y) \quad (8)$$

$$= \frac{r}{\rho} \sum_{m=0}^{r-1} \binom{r-1}{m} (-1)^m e^{(m+1)\alpha/\rho} e^{-(m+1)y/\rho}.$$

이 때

$$\int_\alpha^\infty \log_2(1+y) e^{-cy} dy \quad (9)$$

$$= \frac{1}{c \log(2)} \left(e^{-c\alpha} \log(1+\alpha) + e^c E_1(c(1+\alpha)) \right)$$

이므로, $Y'_{r,r}$ 를 CQI 로 하는 부채널의 평균 채널 용량 ($C_S(r; r, \alpha)$)은 다음과 같이 주어진다.

$$C_S(r; r, \alpha) = \int_\alpha^\infty \log_2(1+y) f_{Y'_{r,r}}(y) dy$$

$$= \frac{r}{\rho} \sum_{m=0}^{r-1} \binom{r-1}{m} (-1)^m e^{\frac{(m+1)\alpha}{\rho}} \int_\alpha^\infty \log_2(1+y) e^{-\frac{(m+1)y}{\rho}} dy$$

$$= \frac{r}{\log(2)} \sum_{m=0}^{r-1} \binom{r-1}{m} \frac{(-1)^m e^{(m+1)\alpha/\rho}}{m+1}$$

$$\cdot \left(e^{\frac{(m+1)\alpha}{\rho}} \log(1+\alpha) + e^{\frac{(m+1)\alpha}{\rho}} E_1\left(\frac{(m+1)(1+\alpha)}{\rho}\right) \right). \quad (10)$$

빈 부채널에 의한 성능을 분석하기 위하여 V 를 다음과 같이 정의한다.

$$V = \max_k \left(\min_n X_{k,n} \right). \quad (11)$$

V 의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} f_V(y) &= KN F_{Y_{N,1}}^{K-1}(y) f_{Y_{N,1}}(y) \\ &= \frac{KN}{\rho} \sum_{m=0}^{K-1} \binom{K-1}{m} (-1)^m e^{-N(m+1)y/\rho}. \end{aligned} \quad (12)$$

이 때 V 를 CQI로 하는 부채널의 평균 채널 용량 ($C_K^{\min}(K)$)은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} C_K^{\min}(K) &= \int_0^\infty \log_2(1+y) f_V(y) dy \\ &= \frac{KN}{\rho} \sum_{m=0}^{K-1} \binom{K-1}{m} (-1)^m \int_0^\infty \log_2(1+y) e^{-N(m+1)y/\rho} dy \\ &= \frac{K}{\log(2)} \sum_{m=0}^{K-1} \binom{K-1}{m} \frac{(-1)^m e^{N(m+1)/\rho}}{m+1} E_1 \left(\frac{N(m+1)}{\rho} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

주어진 α 에 대하여 임의의 부채널에 r 개의 CQI가 케환될 확률($p_s(r; \alpha)$)은 다음과 같이 주어진다.

$$p_s(r; \alpha) = \binom{K}{r} e^{-\alpha r/\rho} (1 - e^{-\alpha/\rho})^{K-r}. \quad (14)$$

따라서 SPCQI 기법의 평균 채널 용량 ($C_{SPCQI}(\alpha)$)은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} C_{SPCQI}(\alpha) &= N_a \sum_{r=1}^K p_s(r; \alpha) \int_\alpha^\infty \log_2(1+y) f_{Y_{r,r}}(y) dy \\ &\quad + N_a p_s(0; \alpha) \int_0^\infty \log_2(1+y) f_V(y) dy \\ &= N_a \left(\sum_{r=1}^K p_s(r; \alpha) C_s(r; r, \alpha) + (1 - e^{-\alpha/\rho})^K C_K^{\min}(K) \right). \end{aligned} \quad (15)$$

SPCQI의 경우 필요한 평균 케환량은 다음과 같다.

$$F_{SPCQI}(\alpha) = \left[\left(N_q + \lceil \log_2(N) \rceil \right) N e^{-\alpha/\rho} + N_q \right] K \text{ [bits]}. \quad (16)$$

여기서 $\lceil \log_2(N) \rceil$ 는 하나의 부채널의 인덱스를 나타내기 위한 비트수를 나타낸다.

3. 부채널들 간의 상관도가 존재할 때의 FCQI 기법과 SPCQI 기법의 성능 분석

이번 장에서는 다중 사용자 MIMO-OFDMA 시스템에서 FCQI 기법과 SPCQI 기법이 각각 사용될 경우에 부채널들 간의 상관도가 시스템의 성능에 미치는 영향에 대해 분석한다. 먼저 FCQI 기법이 사용될 경우 각 부채널은 모든 사용자로부터 서로 독립적이고 같은 확률 분포를 갖는 CQI를 케환받고, 기지국은 각 부채널을 가장 큰 CQI를 갖는 사용자에게 할당하기 때문에 임의의 사용자의 부채널 간의 상

관도는 시스템 성능에 영향을 주지 않는다. 하지만 SPCQI 기법의 경우에는 부채널 간의 상관도에 따라 시스템의 성능이 달라진다. 부채널 간의 상관도가 증가할수록 ($\delta \rightarrow 1$) $f_{Y_{N,n}}(y)$ 는 $f_{Y_{1,1}}(y) (= f_X(y))$, 즉 오름차순으로 정렬하기 전의 확률 변수의 확률 밀도 함수에 가까워지게 된다. 따라서 $\delta=0$ 일 때 $E[Y_{1,1}]$ 보다 낮은 값을 갖는 $E[Y_{N,n}]$ 은 δ 와 함께 그 값이 상승하게 되며, 반대로 $\delta=0$ 일 때 $E[Y_{1,1}]$ 보다 높은 값을 갖는 $E[Y_{N,n}]$ 은 δ 가 증가함에 따라서 그 값이 떨어지게 된다. 이러한 이유로 각 사용자들이 추가적으로 케환하는 최소한의 CQI의 평균값은 δ 와 함께 증가하기 때문에, $C_K^{\min}(K)$ 는 부채널의 상관도와 함께 증가하게 된다. 하지만 $C_s(r; r, \alpha)$ 는 δ 와 관련없이 α 이상의 채널 이득을 갖는 r 개의 부채널들의 CQI들에 의해 그 값이 정해지기 때문에 부채널 간의 상관도의 영향을 받지 않는다.

4. 모의 실험 결과

그림 1은 다중 사용자 MIMO-OFDMA 시스템에서 δ 를 0에서 1까지 변화시켜가며 r 이 각각 1과 3일 때의 $C_s(r; r, \alpha)$ 과 $C_K^{\min}(K)$ 의 성능을 모의 실험을 통해 관찰한 것이다. 모의 실험을 위하여 $K=10$, $\rho=10\text{dB}$, $N_s=1024$, $N_a=2$, $N_b=8$, 그리고 $N_c=128$ 로 가정하였다. 그리고 임의의 사용자가 특정 부채널에 CQI를 케환할 확률 ($e^{-\alpha/\rho}$)을 0.125로 하기 위하여 $\alpha=20.7944$ 로 가정하였다. 먼저 이론적 성능 분석에서 예상했던 것과 같이 $C_s(r; r, \alpha)$ 은 δ 의 값과 상관없이 일정한 값을 갖는 것을 관찰할 수 있다. 반대로 $C_K^{\min}(K)$ 의 경우에는 δ 가 증가함에 따라서 각 사용자가 추가적으로 케환하는 최소값의 CQI의 평균값이 상승하여 그 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

그림 2는 FCQI 기법과 SPCQI 기법이 각각 사용되는 다중 사용자 MIMO-OFDMA 시스템에서 사용자의 수가 각각 10명과 20명일 때 FCQI 기법 대비 상대적인 케환량 비율에 따른 시스템의 평균 채널 용량을 관찰한 것이다. 모의 실험을 위하여 $\rho=10\text{dB}$, $N_s=1024$, $N_a=2$, $N_b=8$, 그리고 $N_c=128$ 로 가정하였다. 또한 δ 가 각각 0과 0.9일 때의 시스템 성능을 관찰하였다. 먼저 $\delta=0$ 일 때 이론적 분석을 통해 얻은 성능과 모의 실험을 통해 얻은 성능이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 같은 환경에서 사용자의 수가 증가할수록 더 높은 다중 사용자 다양성 이득을 얻어 시스템 성능이 향상되는 것을 관찰할 수 있다. 또한 FCQI 기법의 경우에는 시스템의 성능이 δ 와 상관없이 일정하게

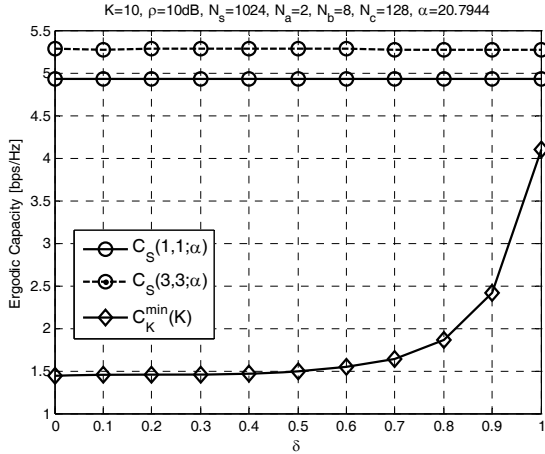


그림 1. δ 따른 $C_S(r;r,\alpha)$ 과 $C_K^{\min}(K)$

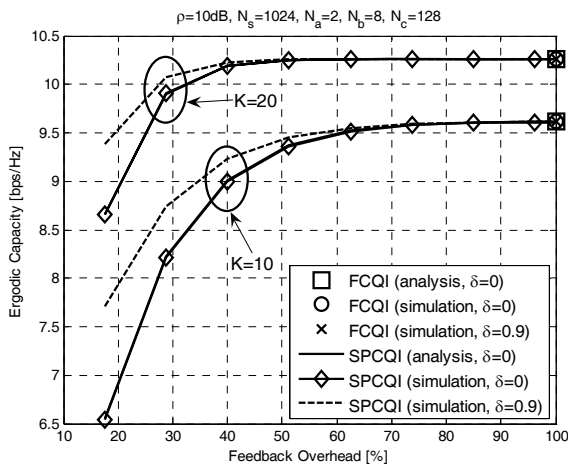


그림 2. 케환량에 따른 FCQI 기법과 SPCQI 기법의 평균 채널 용량

나타나는 것을 확인할 수 있다. 반대로 SPCQI 기법의 경우에는 δ 와 함께 향상되는 $C_K^{\min}(K)$ 의 영향으로 δ 가 증가할수록 시스템의 성능이 향상되는 것을 관찰할 수 있으며, 특히 케환량이 상대적으로 작을수록 δ 에 의한 성능 향상이 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 케환량이 상대적으로 작을수록 빈 부채널이 발생하는 확률이 증가하여 $C_K^{\min}(K)$ 가 시스템의 성능에 큰 영향을 미치게 되며, 반대로 케환량이 상대적으로 증가할수록 빈 부채널이 발생할 확률이 감소하여 δ 에 영향을 받지 않는 $C_S(r;r,\alpha)$ 가 시스템의 성능에 더 큰 영향을 미치게 되기 때문이다.

5. 결론

본 논문에서는 MIMO-OFDMA 시스템에서 FCQI 기법과 SPCQI 기법이 각각 사용될 때, 부채널 간의 상관도가 각 시스템의 성능에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 이론적 성능 분석 및 모의 실험을 통하여 FCQI 기법의 경우 부채널 간의 상관도는 시스

템의 성능에 영향을 미치지 못함을 보였다. 반대로 SPCQI 기법의 경우에는 부채널 간의 상관도가 증가할수록 빈 부채널에 대비하기 위하여 각 사용자가 추가적으로 케환하는 최소값의 CQI의 평균값이 상승하여 시스템의 성능도 함께 향상되는 것을 보였으며, 특히 케환량이 작을수록 성능 향상 정도가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

6. 감사의 글

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (IITA-2007-(C1090-0701-0003))

7. 참고 문헌

- [1] T. Keller and L. Hanzo, "Adaptive multicarrier modulation: a convenient framework for time-frequency processing in wireless communications," in *Proc. IEEE*, vol.88, no.5, pp.611-640, May 2000.
- [2] K. S. Kim, "Adaptive modulation and power allocation technique for LDPC-coded MIMO-OFDMA cellular systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E88-B, pp.4410-4412, November 2005.
- [3] A. Paulraj and T. Kailath, "Increasing capacity in wireless broadcast systems using distributed transmission / directional reception," *US Patent*, 5 345 599, 1994.
- [4] I. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *European Trans. Telecomm.*, vol.10, no.6, pp.585-595, November/December 1999.
- [5] R. Knopp and P. Humblet, "Information capacity and power control in single cell multiuser communications," in *Proc. IEEE Inter. Commun. Confer. (ICC)*, Seattle, WA, June 1995.
- [6] P. Viswanath, D.N.C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.48, no.6, pp.1277-1294, June 2002.
- [7] L. Yang, M.-S. Alouini, and D. Gesbert, "Further results on selective multiuser diversity," in *Proc. 7th ACM/IEEE Int. Symp. Model. Anal. Simulation Wireless Mobile Syst.*, pp. 25-30, Venice, Italy, October 2004.
- [8] W. Zhang and K. B. Letaief, "MIMO Broadcast Scheduling with Limited Feedback," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 7, pp. 1457-1467, September 2007.
- [9] D. Gore, R. W. H. Jr., and A. Paulraj, "On performance of the zero forcing receiver in presence of transmit correlation," in *Proc. IEEE Inter. Symp. Inform. Theory (ISIT)*, p.159, Lausanne, Switzerland, June/July 2002.
- [10] M. Kang, D. Rhee, H.G. Hwang, and K.S. Kim, "Opportunistic scheduling with partial CQRI feedback in OFSDMA systems," in *Proc. IEEE Mil. Commun. Confer. (MILCOM)*, Orlando, FL, October 2007.
- [11] I. S. Gradshten and I. M. Ryhik, eds., *Table of Integrals, Series, and Products*, 1994.