

상관 MIMO 페이딩 채널에서 Multi-Carrier CDMA 시스템의 용량 평가

Capacity Evaluation of Multi-Carrier CDMA System in Correlated MIMO Fading Channel

노재성*, 조성준**, 김춘길**

Jae Sung Roh*, Sung Joon Cho** and Choon Gil Kim***

요 약

일반적으로 다중경로는 무선통신에서 불필요한 특징을 나타낸다. 따라서 이러한 영향을 극복하기 위하여 다이버시티 수신이나 적응 어레이 기법이 제안되었다. 최근에는 스펙트럼 효율과 링크 신뢰도를 증가시키기 위해 MIMO 기법이 산란 무선 채널에서 다중경로를 이용하기 위해 고안되었다. 본 논문에서는 경로 상관 페이딩 채널에서 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량을 평가한다. 그리고 MIMO 시스템의 채널 용량을 SISO 시스템의 채널 용량과 비교한다. 결과로부터 경로 상관을 갖는 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템은 SISO 시스템의 채널 용량에 비하여 우수함을 알 수 있다.

ABSTRACT

Generally, multi-path is viewed as an undesirable feature of wireless communications. Therefore, diversity reception and adaptive array schemes are proposed to mitigate its effects. Recently, to increase the spectrum efficiency and the link reliability, multiple-input multiple-output (MIMO) scheme is devised to exploit multi-path in a scattering wireless channel. In this paper, we have evaluated the channel capacity of MIMO Multi-Carrier CDMA system in path correlation fading channel. And, the channel capacity of MIMO system is compared with single-input single-output (SISO) system. From the results, the MIMO multi-carrier CDMA system with path correlation yields better performance with respect to channel capacity than a SISO system.

Key words : MIMO multi-carrier CDMA, SISO, capacity.

1. 서 론

인터넷과 멀티미디어 서비스의 폭발적인 증가에 따라 고속 무선 데이터 서비스는 차세대 시스템의

주요한 부분으로 부각되고 있다. 고속의 무선 데이터 전송을 요하는 차세대 이동통신 시스템에서는 현재의 시스템이 제공하는 것보다 현저하게 높은 주파수 효율 즉, 채널 용량을 필요로 한다. 과거에 이를 가능하게 하는 방법으로는 사용자 단말기에 다중 수

* 서일대학 정보통신시스템 (Dept. of Inform. & Comm. Eng., Seoil College)

** 한국항공대학교 전자·정보통신·컴퓨터 공학부(School of Electronics, Telecommunication and Computer Eng., Hankuk Aviation Univ.)

*** 한국과학기술원 기초과학과정(Basics Science, KAIST)

· 논문번호 : 2003-1-7

· 접수일자 : 2003년 4월 18일

신 안테나를 사용하여 신호 전력 대 잡음 전력비를 증가시키고 간섭을 제거함으로써 전력측면에서 효율적인 무선 데이터 전송을 하는 것이었다. 그러나 현재는 이러한 수신 다이버시티 방법외에 송신단에서도 다중 안테나를 사용하여 시스템 용량의 개선을 도모하는 방법이 최근 활발히 연구되고 있다. 결과적으로 이 시스템은 송·수신단 모두에 다중 안테나를 갖는 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템으로 구성될 수 있다[1]~[4].

그림 1은 MIMO 시스템의 간단한 예를 나타내고 있다. 송신 안테나의 수는 N_T 이고 수신 안테나의 수는 N_R 인 경우를 나타내고 있다. 이러한 MIMO 시스템은 송신 다이버시티 시스템과는 달리 각 송신 안테나마다 서로 다른 신호를 송신하게 된다. 이렇게 송신 안테나마다 서로 다른 신호를 송신하게 됨으로써 기존의 시스템보다 송신 안테나의 수 N_T 만큼 많은 데이터를 무선공간으로 송신하게 된다. 다수개의 안테나를 통해 송신된 신호는 무선 채널을 거쳐서 수신되며 원하는 신호와 다수개의 간섭 신호가 중첩된 형태로 나타나게 된다.

지금까지의 논문에서는 다중 안테나를 사용한 MIMO 채널에서의 용량 증대에 대한 연구결과가 많이 발표되었다[1]~[4]. 기존 연구를 통해서 무선 채널에서 채널 용량을 증가시키기 위해서는 신호 사이의 상관관계가 없어야 된다는 사실을 알 수 있었다. 그러나 MIMO 시스템에서는 다중경로 성분 때문에 매우 심한 산란 채널을 형성하게 된다. 따라서 상호 연관된 신호에 의하여 신호 경로 사이가 상관관계를 이루면서 채널 용량은 상당히 감소하게 된다.

단일 송신 및 수신 안테나를 사용한 통신시스템

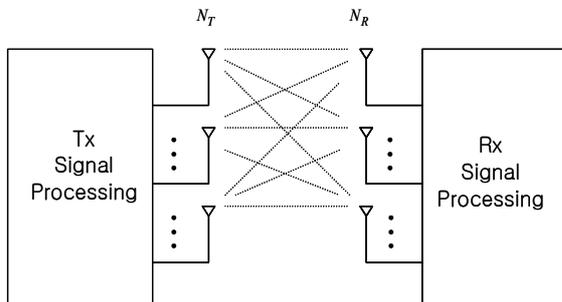


그림 1. MIMO 채널 및 시스템 모델

에서의 채널 용량은 Shannon Hartley의 정리에 의하여 bit/sec/Hz의 단위로 잘 알려져 있다. 또한 단일 송신 안테나와 다중 수신 안테나를 사용한 통신 시스템의 채널 용량에 대한 연구가 여러 가지 통신 파라미터에 따라서 진행되고 있다[5]~[7]. 따라서 본 연구에서는 다수개의 반송파를 이용하여 무선 데이터를 고속으로 전송할 수 있는 Multi-Carrier CDMA 시스템의 주요 전송 파라미터와 무선 상관 채널의 특성 파라미터를 중심으로 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량을 분석하고 SISO (Single-Input Single-Output) 시스템과 비교하고자 한다.

II. Multi-Carrier CDMA 시스템 모델

2-1 Multi-Carrier CDMA 시스템의 등가 SNR 분석

그림 2는 일반적인 Multi-Carrier CDMA 시스템의 송신기 구조를 나타낸다. m 번째 사용자의 k 번째 정보 심볼은 M_c 번 복사되고 각각의 PN 부호 ($C_m(M_c - 1)$)와 곱해진 후 변조된다. 모든 Multi-Carrier 변조된 신호는 합쳐진 후 증폭기를 거쳐서 안테나로 전달되며 무선 공간으로 방사된다.

그림 2의 Multi-Carrier CDMA 시스템의 송신기 구조에서 $a_m[k]$ 는 송신단에 입력되는 데이터 열을,

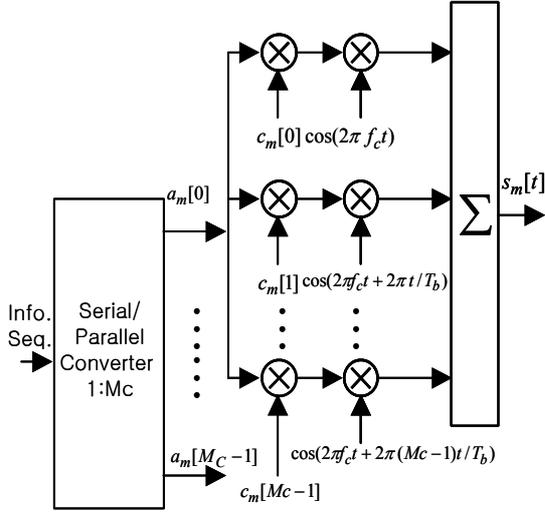


그림 2. Multi-Carrier CDMA 시스템의 송신기 구조
 m 은 사용자를, k 는 입력 데이터 심볼의 순서를 나타내며 전송되는 m 번째 사용자의 k 번째 Multi-Carrier CDMA 신호는 다음과 같다.

$$S_m(t) = \sum_{k=0}^{M_c-1} a_m(k) C_m(k) e^{j2\pi(f_0 + k/T_b)t}$$

(1)

여기서 f_0 는 반송파 주파수를 나타내며 시스템의 최대 용량에 해당되는 M_c 명의 사용자가 동시에 사용할 경우 전송되는 Multi-Carrier CDMA 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(t) = \sum_{m=0}^{M_c-1} s_m(t) = \sum_{m=0}^{M_c-1} \sum_{k=0}^{M_c-1} a_m[k] C_m(k) e^{j2\pi(f_0 + k/T_b)t}$$

(2)

무선 채널을 통하여 수신된 Multi-Carrier CDMA 신호는 잡음 $N(t)$ 와 다중접속 간섭 $i^{(1,k)}$ 의 영향을 받게된다. 심볼 구간 (T_s)동안에 수신기에서 복조된 신호 $R(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t) = S^{(1)} + \sum_{k=2}^U I^{(1,k)} + \int_0^{T_s} \sum_{n=1}^{M_c} N(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt$$

(3)

여기서 $I^{(1,k)}$ 는 간섭신호의 성분, U 는 다중접속 사용자의 수, M_c 는 Multi-Carrier의 수, $S^{(1)}$ 는 원하는 신호의 성분으로 다음과 같다.

$$S^{(1)} = a_0^{(1)} T_s \sqrt{\frac{M_c P}{2}}$$

(4)

여기서 $a_0^{(1)}$ 는 정보 데이터 열이고 P 는 송신 신호의 전력이다.

식 (3)에서 잡음 성분의 분산은 $M_c N_o T_s / 4$ 이고, $M_c = 1$ 인 경우는 단일 반송파 전송에서 잡음 성분의 분산과 동일하다. 그리고 k 번째 사용자의 다중 사용자 간섭의 전력은 다음과 같다 [8]~[10].

$$I^{(1,k)} = \sqrt{\frac{2P}{M_c}} \{ \cos \phi_k [a_{-1}^{(k)} R_{u1, uk}(\tau_k) + a_0^{(k)} R_{u1, uk}(\tau_k)] - \sin \phi_k [a_{-1}^{(k)} R_{u1, uk}(\tau_k) + a_0^{(k)} R_{u1, uk}(\tau_k)] \}$$

(5)

여기서

$$R_{x, y}(\tau) = \int_0^{\tau} x(t)y(t-\tau) dt$$

$$R_{x, y}(\tau) = \int_{\tau}^{T_s} x(t)y(t-\tau) dt$$

(6)

위 식 (5)와 식 (6)을 정리하면 $I^{(1,k)}$ 는 다음과 같다.

$$I^{(1,k)} = \sqrt{\frac{2P}{N}} \sum_{n=0}^{M_c} = N \left\{ A_n \sin \frac{2\pi n \tau_k}{T_s} + B_n \cos \frac{2\pi n \tau_k}{T_s} \right\}$$

(7)

여기서

$$A_n = \frac{c_n^{(k)} c_n^{(1)} \sin \psi_k \{ a_{-1}^{(k)} \tau_k + a_0^{(k)} [T_s - \tau_k] \}}{2} + \frac{T_s \cos \psi_k [a_{-1}^{(k)} - a_0^{(k)}]}{2\pi} \left\{ \sum_{i=1, i \neq n}^{M_c} \frac{n [c_n^{(k)} c_i^{(1)} + c_n^{(k)} c_n^{(1)}]}{n^2 - i^2} + \frac{c_n^{(k)} c_n^{(1)}}{2n} \right\}$$

(8)

그리고

$$B_n = \frac{c_n^{(k)} c_n^{(1)} \cos \psi_k}{2} \{ a_{-1}^{(k)} \tau_k + a_0^{(k)} [T_s - \tau_k] \} \\ + \frac{T_s \sin \psi_k}{2\pi} \left\{ [a_{-1}^{(k)} - a_0^{(k)}] \sum_{i=1, i \neq n}^{M_c} \frac{nc_n^{(k)} c_i^{(1)} + ic_n^{(1)} c_i^{(k)}}{i^2 - n^2} - \frac{c_n^{(k)} c_n^{(1)} a_0^{(k)}}{2n} \right\} \quad (9)$$

본 논문에서는 CDMA 다중 사용자 간섭을 가우시안 잡음으로 간략화하고 랜덤한 신호열을 고려한다면 Multi-Carrier CDMA 시스템에서 다중 사용자 간섭의 분산 평균치 $E[Var\{I^{(1,k)}\}]$ 는 다음과 같다.

$$E[Var\{I^{(1,k)}\}] = \frac{PT_s^2}{4\pi^2 M_c} \left\{ \left[\sum_{n=1}^{M_c} \sum_{i=1, i \neq n}^{M_c} \frac{3n^2 + i^2}{(n^2 - i^2)^2} \right] + \frac{2\pi^2}{3} \right\} \quad (10)$$

모든 사용자로부터의 간섭을 독립적이라고 가정하면, 전체의 다중사용자 간섭전력은 식 (10)에서 제시한 각각의 $Var\{I^{(1,k)}\}$ 의 합이 된다. 따라서 식 (10)을 모든 사용자에게 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$E[Var\{I\}] = \frac{(U-1)PT_s^2}{4\pi^2 M_c} \left\{ \left[\sum_{n=1}^{M_c} \sum_{i=1, i \neq n}^{M_c} \frac{3n^2 + i^2}{(n^2 - i^2)^2} \right] + \frac{2\pi^2}{3} \right\} \quad (11)$$

따라서 모든 사용자로부터의 간섭과 잡음을 고려한 Multi-Carrier CDMA 시스템의 등가 신호 전력 대 전체 잡음 전력비 γ_{eq} 는 다음과 같다.

$$\gamma_{eq} = \frac{M_c PT_s^2 / 2}{\frac{(U-1)PT_s^2}{4\pi^2 M_c} \left\{ \left[\sum_{n=1}^{M_c} \sum_{i=1, i \neq n}^{M_c} \frac{3n^2 + i^2}{(n^2 - i^2)^2} \right] + \frac{2\pi^2}{3} \right\} + \frac{M_c N_0 T_s}{4}} \\ = \left(\frac{U-1}{2M_c \pi^2} \left\{ \left[\sum_{n=1}^{M_c} \sum_{i=1, i \neq n}^{M_c} \frac{3n^2 + i^2}{(n^2 - i^2)^2} \right] + \frac{2\pi^2}{3} \right\} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-1} \quad (12)$$

여기서 E_b 는 하나의 심볼 구간 T_s 동안에 전송되는 신호의 에너지이고, U 는 다중 사용자의 수, M_c 는 Multi-Carrier의 수이다.

2-2 나카가미 페이딩 채널의 특성

나카가미 분포는 다양한 도심 통신 환경에서 유용한 페이딩 모델로서 M. Nakagami에 의해 제안된 분포이다. 이 분포는 이론적으로 수신된 신호가 임의의 계수와 임의의 위상을 가진 벡터들의 합이라는 가정 하에서 유도되었다. 나카가미 분포는 자체적으로 레일리 분포를 포함하고 있으며 반 가우시안 (Half-Gaussian) 분포에서 AWGN 채널에 이르는 다양한 페이딩 환경을 갖는 전송 채널을 다룰 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 파라미터의 조건에 따라서 라이시안 페이딩 전송 채널을 나타낼 수 있다. 나카가미 페이딩 분포의 근사식을 활용하여 거의 모든 주파수 대역에서 측정된 페이딩 데이터와 유사한 특성을 나타낼 수 있다. γ , m_f , γ_{eq} 를 파라미터로 하는 나카가미 분포는 다음과 같다[5]~[7].

$$p(\gamma, m_f, \gamma_{eq}) = \frac{m_f^{m_f} \cdot \gamma^{m_f}}{\Gamma(m_f) \cdot \gamma_{eq}^{m_f}} \exp\left(-\frac{m_f \cdot \gamma}{\gamma_{eq}}\right) \quad (13)$$

여기서, γ 는 수신단에서의 순시 신호 전력 대 잡음 전력비, m_f 는 페이딩의 심한 정도를 나타내는 나카가미 페이딩의 지수, $\Gamma(\cdot)$ 는 감마 함수 (Gamma function), γ_{eq} 는 수신단에서의 평균 신호 전력 대 잡음 전력비를 나타낸다. 나카가미 분포의 페이딩 채널에서 $m_f=0.5$ 이면 반 가우시안, $m_f=1$ 이면 레일리 페이딩 채널이 되며 $m_f=\infty$ 일 때는 AWGN 채널이 된다. 즉, m_f 이 작아지면 이 전송 채널은 심각한 페이딩 채널을 나타내며 m_f 이 커짐에 따라 페이딩 현상이 줄어들고 있는 전송 채널을 의미한다.

2-3 MIMO 시스템의 채널 용량

2-3-1 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 채널

MIMO 채널을 대상으로 Foschini와 Gans가 제시한 채널 용량의 lower bound는 다음과 같다[1]~[3].

$$C_{N_T N_R} > \sum_{k=N_T+1}^{N_R} \log_2 \left(1 + \frac{\gamma}{N_T} \cdot \chi_{2k}^2 \right) \quad N_T \geq N_R \quad (14)$$

여기서 χ_{2k}^2 는 $2k$ 의 자유도를 가지는 chi-square 변수, γ 는 수신단에서의 신호전력 대 잡음 전력비, 그리고 N_T 와 N_R 는 각각 송신 안테나와 수신 안테나의 수이다. 위 식에서 $N_T = N_R$ 이고 N_T 나 N_R 이 큰 경우에는 채널 용량의 lower bound는 다음과 같이 근사화되며 신호 전력 대 잡음 전력비와 안테나의 수가 증가함에 따라서 채널 용량 또한 증가함을 알 수 있다.

$$C_{N_T N_T} = C_{N_R N_R} > N_T \left[\left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \log_2(1 + \gamma) - \log_2 e \right] = N_R \left[\left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \log_2(1 + \gamma) - \log_2 e \right] \quad (15)$$

여기서 e 는 자연대수를 의미한다. 또한 송·수신 안테나의 수가 $N_T = N_R = N$ 인 병렬전송이고 채널의 전달함수 $H = I_N$ ($N_T \times N_R$ Identity Matrix)인 경우의 채널 용량은 위 식 (14)을 변형하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$C_{NN} = N \log_2 \left(1 + \frac{\gamma}{N} \right) \quad (16)$$

그리고 $N_T = N_R = N$ 이고 2개의 수신된 채널 사이에 상관 ρ 가 존재하게 된다면 채널 용량의 수식은 다음과 같이 얻어진다.

$$C_{NN(\rho)} = N \log_2 \left(1 + \frac{\gamma}{N} (1 - \rho) \right) + N \log_2 \left(1 + \frac{\gamma N \rho}{N + \gamma (1 - \rho)} \right) \quad (17)$$

2-3-2 SISO (Single-Input Single-Output) 채널

MIMO-AWGN 채널에서 $N_T = N_R = 1$ 인 경우는 Shannon의 채널 용량식으로 잘 알려져 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{N_T=1 N_R=1} = \log_2(1 + \gamma |H|^2) \sim \log_2(\gamma |H|^2) \quad \gamma \rightarrow \infty \quad (18)$$

여기서 H 는 채널의 전달함수이고 Shannon의 채널 용량식은 bit/sec/Hz의 단위로 표시된다. 식 (18)에서 신호 전력 대 잡음 전력비 γ 가 큰 경우, γ 가 3 [dB] 증가함에 따라서 채널 용량은 1 bit/sec/Hz씩 증가하게 된다.

식 (18)에서 $x = \gamma |H|^2$ 으로 변수를 변경할 수 있으며 다양한 페이딩에 의한 랜덤변수로 사용될 수 있다. 만약 무선 채널이 레일리 페이딩 환경이라면 평균 채널 용량은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\overline{C}_{N_T=1 N_R=1} = \int_0^\infty \log_2(1 + x) \cdot \exp(-x/\gamma_{av}) / \gamma_{av} dx \quad (19)$$

여기서 γ_{av} 는 평균 신호 전력 대 잡음 전력비이다.

2-3-3 SIMO (Single-Input Multiple-Output) 채널

SIMO 채널은 $N_T = 1$ 이고 N_R 가 다수개인 경우이고 다이버시티 수신과 동일한 경우를 나타낸다. 이 경우의 채널 용량은 다음과 같다.

$$C_{1N_R} = \log_2 \left(1 + \gamma \sum_{m=1}^{N_R} |H_m|^2 \right) \quad (20)$$

여기서 $\sum_{m=1}^{N_R} |H_m|^2$ 은 순시 가지 신호 전력 대 잡음 전력비에서의 합을 나타내며 최대비 합성 출력과 동일하다. 또한 순시 가지 신호 전력 대 잡음 전력비 중에서 최대치를 선택하는 선택 합성 출력의 경우의 채널 용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{1N_R} = \log_2(1 + \gamma \max_m |H_m|^2) \quad (21)$$

III. 상관 MIMO 페이딩 채널에서 Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량 분석

나카가미 페이딩 채널에서 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량은 다음과 같이 AWGN 채널에서의 채널 용량식과 나카가미 페이딩 채널의 확률밀도함수를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{C_{N_T, N_R}(\rho)} &= \int_0^\infty C_{N_T, N_R}(\rho) \cdot p(\gamma, m_f, \gamma_{eq}) d\gamma \\ &= \int_0^\infty \left[N_T \log_2 \left(1 + \frac{\gamma}{N_T} (1-\rho) \right) \right. \\ &\quad \left. + N_T \log_2 \left(1 + \frac{\gamma N_T \rho}{N_T + \gamma (1-\rho)} \right) \right] \\ &\quad \cdot \frac{m_f^{m_f} \cdot \gamma^{m_f}}{\Gamma(m_f) \cdot \gamma_{eq}^{m_f}} \exp\left(-\frac{m_f \cdot \gamma}{\gamma_{eq}} \right) d\gamma \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, ρ 는 2개의 수신된 채널 사이에 상관계수를 나타낸다. 식 (22)를 이용하여 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량을 그림 3~5에 나타내었다.

그림 3은 페이딩의 심도 m_f 와 신호전력 대 잡음 전력비 E_b/N_o 에 따른 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량을 나타낸다. Tx와 Rx부에서의 안테나수 $N_T = N_R = 2$ 이고 다중 반송파의 수는 31 그리고 경로사이의 상관 계수는 0.4인 경우이다. 결과 그림을 통해서 알 수 있듯이 m_f 와 E_b/N_o 가 증가함에 따라서 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량이 증가함을 볼 수 있다. 하지만 m_f 가 3이상인 경우에는 채널 용량의 증가분이 적어지고 있음을 알 수 있다. 그리고 $E_b/N_o > 25$ [dB]인 경우부터는 각각의 m_f 에 따라서 채널 용량에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

그림 4는 Tx와 Rx부에서의 안테나 수와 신호 전력 대 잡음 전력비 E_b/N_o 에 따른 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량을 나타낸다. Multi-Carrier CDMA 시스템의 Tx와 Rx부 사이의 채널은 레일리 페이딩($m_f=1$)상태이고 다중 반송파의 수는 31 그리고 경로사이의 상관 계수는 0.4인 경우이다. 결과 그림을 통해서 알 수 있듯이 Tx와 Rx부에서의 안테나 수와 E_b/N_o 가 증가함에 따라서 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량이 증가함을 볼 수 있다. 그리고

$E_b/N_o > 10$ [dB]이고 Tx와 Rx부에서의 안테나 수가 30과 50인 경우에는 채널 용량에 큰 차이가 없음을 볼 수 있다.

그림 5는 Tx와 Rx부에서의 안테나 수와 경로사이의 상관 계수 ρ 에 따른 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량을 나타낸다. 무선채널은 레일리 페이딩($m_f=1$)상태이고 다중 반송파의 수는 31 그리고 $E_b/N_o = 20$ [dB]인 경우이다. MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량 결과 그래프를 통해서 알 수 있듯이 경로사이의 상관 계수 ρ 가 0.6에서 0.3으로 적어짐에 따라서 평균 채널 용량은 약 9.8 bps/Hz에서 약 12 bps/Hz로 증가함을 확인할 수 있다. 즉, 경로사이의 상관 계수 ρ 가 적어짐에 따라서 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량이 커짐을 확인할 수 있다.

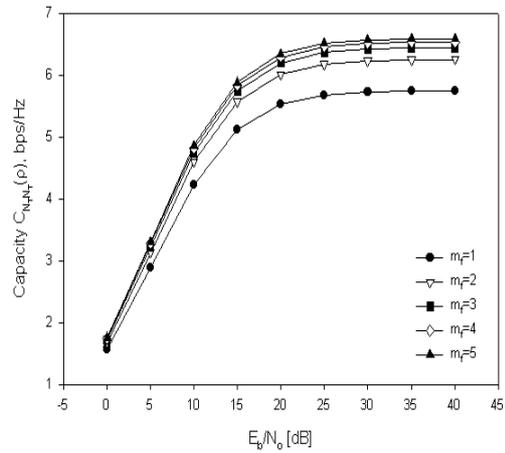


그림 3. $m_f, E_b/N_o$ 에 따른 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량

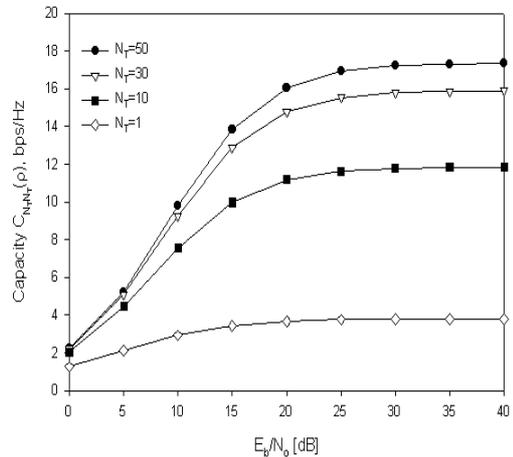


그림 4. $N_T(=N_R)$, E_b/N_o 에 따른 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량

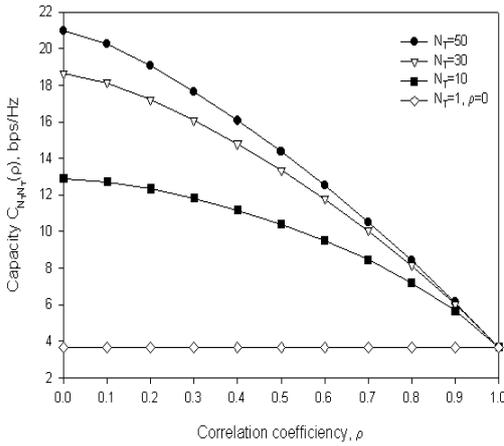


그림 5. $N_T(=N_R)$, ρ 에 따른 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량

IV. 결 론

본 논문에서는 나카가미 페이딩 채널에서 상관 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량을 구하고 MIMO 시스템과 SISO 시스템의 채널 용량을 비교하였다. 결과로부터 경로 상관을 갖는 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템은 m_f 가 3이상인 경우에는 채널 용량의 증가분이 적어지고 있음을 알 수 있었고 특히, $E_b/N_o > 25 [dB]$ 인 경우에는 m_f 에 따라서 채널 용량에는 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. 그리고 경로사이의 상관 계수 ρ 가 MIMO Multi-Carrier CDMA 시스템의 채널 용량 변화에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41-59, Autumn, 1996.

[2] S. Alamouti, "A simple transmitter diversity technique for wireless communications," *IEEE Journal on SAC*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Aug. 1990.

[3] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Commun., WPC (6)*, pp. 311-335, 1998.

[4] W. C. Y. Lee, "Estimate of channel capacity in Rayleigh fading environment," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 39, no. 3, Aug. 1990.

[5] S. Sampei, *Applications of Digital Wireless Technologies to Global Wireless Communications*, Prentice Hall PTR, 1997.

[6] M. K. Simon and M. Alouini, "A unified performance analysis of digital communication with dual selective combining diversity over correlated Rayleigh and Nakagami-m fading channels," *IEEE Trans. Comm.*, vol. COM-47, pp. 33-43, Jan. 1999.

[7] J. G. Proakis, *Digital communications*, New York, McGraw-Hill, 1995.

[8] E. A. Sourour and M. Nakagawa, "Performance of orthogonal multicarrier CDMA in a multipath fading channel," *IEEE Trans. on Comm.* vol. COM-44, pp. 356-367, Mar. 1996.

[9] K. Fazel and G. P. Fettweis, *Multi-Carrier Spread-Spectrum*, Kluwer Academic Publishers, 1997.

[10] T. F. Ho, "Performance evaluation for multi-carrier CDMA system," *Proc. IEEE VTC '96*, pp. 1101-1105, 1996.

노재성 (盧在成)



2000년 8월 : 한국항공대학교 대학원
항공통신정보공학과 (공학박사)
2000년 9월~현재 : 서일대학 정보
통신시스템전공 전임강사
관심분야 : 모바일 통신 네트워크
성능 분석, 무선 인터넷, Mobile IP

김춘길 (金春吉)



1984년 3월~현재 : 한국과학기술원
자연과학부 기초과학과정 교수
관심분야 : 통신 정보처리시스템,
무선통신

조성준 (趙成俊)



1981년 3월 : 오사카대학 대학원
통신공학과 (공학박사)
1972년 8월~현재 : 한국항공대학교
대학원 전자·정보통신·컴퓨터
공학부 교수
관심분야 : 무선통신, 이동통신, 환경
전자공학