

페이딩 채널에서 직접 대역확산 부호분할 다중접속 통신을 위한 일반화된 혼합 전력/전송률 적응화 기법

이 예 훈*, 김 동 호^o

Generalized Combined Power and Rate Adaptations in DS/CDMA Communications over Fading Channels

Ye Hoon Lee*, Dong Ho Kim^o

요 약

본 논문에서는 나카가미 페이딩 채널 환경에서 직접 대역확산 부호분할 다중접속 통신을 위한 일반화된 혼합 전력/전송률 적응화 기법에 관하여 연구한다. 각 사용자를 위한 전송전력은 G_i^p 에 비례하여 할당되는데, 여기에서 G_i 는 사용자 i 의 채널 이득이고 p 는 실수이다. 전송률(즉, 처리이득)도 원하는 전송품질을 얻기 위하여 동시에 결합되어 적응화 된다. 본 연구에서는 평균 전력 및 최대 전력이 고정되어 있을 때 제안하는 혼합 적응화 방식으로 얻을 수 있는 평균 데이터율을 분석하였다. 본 논문의 결과를 통해서 제안하는 혼합 전력/전송률 적응화 방식이 전력 혹은 전송률의 단일 적응화 방식에 비하여 많은 성능 향상이 있음을 알 수 있었다.

Key Words : fading channels, code division multiple access, adaptation, combined power and rate, Nakagami.

ABSTRACT

We investigate a generalized combined power and rate adaptation scheme in direct-sequence (DS) code-division multiple-access (CDMA) communications over Nakagami fading channels. The transmission power allocated to user i is proportional to G_i^p , where G_i is the channel gain of user i and p is a real number, and the data rate (i.e., spreading gain) is jointly adapted so that a desired QoS is maintained. We analyze the average data rate of the proposed adaptation scheme subject to fixed average and peak transmission power constraints. Our results show that the proposed joint adaptation scheme provides a significant performance improvement over power-only and rate-only adaptation.

I. 서 론

송신측에 채널 정보가 제공될 때 전송 기법은 이 채널 정보를 이용하여 적응화 될 수 있고, 결국 채널을 보다 효율적으로 이용하는 것이 가능하게 된다. 전송 전력의 최적 적응화 방법은 [1]에서 고려되었고, [2]에

서는 최대 및 평균 전력 조건하에서 분석되었다. 전송률의 적응적 변화^[3], 변조율의 변화^[4,5], 부호화 기법^[6], 그리고 이러한 파라미터들의 조합들 또한 협대역 시스템에서 연구되었다^[7-10]. [11]-[13]에서는 단일 사용자 환경에서 정보이론 관점에서 연구되었는데, 최적의 전송전력 및 전송률 적응화는 채널용량 관점에서 전

* 이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부)지원으로 수행되었습니다.

• 주저자 : 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과, y.lee@snut.ac.kr, 종신회원

o 교신저자 : 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과, dongho.kim@snut.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2013-07-316, 접수일자 : 2013년 7월 31일, 최종논문접수일자 : 2013년 8월 12일

송률 적응화 대비 약간의 성능 향상만 있으며 이러한 이점 역시 다이버시티 개수가 증가할수록 거의 향상이 없음을 알아내었다.

CDMA 셀룰라 시스템에서는 각 사용자의 수신 전력이 원하는 수준에서 유지되게끔 전력 적응화가 사용되고 있다^[14,15]. 그러나 전력 적응화를 위해서는 심한 페이딩을 보상하기 위해서 높은 전송 전력을 요구하게 된다. [16]에서는 전송률 적응화가 전력 적응화에 비하여 성능이 우수함을 연구하였고, [17]에서는 이상적인 전력 적응화를 사용하는 전송률 적응화 기법을 연구하였다. 전력 및 전송률 적응화의 결합 기법도 [18]에서 고려되었고, 실시간과 비실시간 트래픽이 섞여 있는 경우 결합 전송전력 및 전송률 적응화 기법도 연구되었다^[19]. [20]에서는 적응형 전송전력/전송률 부호분할 다중접속 시스템에서의 최소 확산이득에 대하여 연구하였고, 결합 전송전력 및 전송률 기법을 위한 일반화된 탐욕스런 전송률 팩킹 알고리즘에 대하여도 연구되었다^[21]. 셀룰라 환경에서도 변조율과 전송전력을 적응화 시키는 기법^[22], 전송률 적응화와 결합하여 확장시키는 방법^[23] 모두 연구된 바 있다.

본 논문에서는 [16]과 [18]의 연구 결과를 확장하여 일반화된 결합 전송전력 및 전송률 적응화 기법에 관하여 다룬다. 각 사용자를 위한 전송전력은 G_i^p 에 비례하여 할당되는데, 여기에서 G_i 는 사용자 i 의 채널 이득이고 p 는 실수이다. 전송률 (즉, 확산이득)은 주어진 전송 품질을 유지하기 위하여 동시에 적응화 된다. p 가 양수이면 좋은 채널 상태에 더 많은 전송 전력이 할당됨을 의미한다. p 가 음수이면, 전송 전력은 채널이득에 반비례해서 할당된다. 본 논문에서 제안하는 결합 전송전력/전송률 적응화 방식은 $p=0$ 일 때 전송률 적응화 방식과 일치하고, $p=-1$ 일 경우에는 전송전력 적응화 방식의 경우가 된다. 본 연구에서는 평균 및 최대 전력의 조건하에서 제안하는 결합 적응화 방식이 기존의 전송전력 및 전송률의 단일 적응화 방식에 비하여 얼마만큼의 전력 이득이 있는지를 p 에 대한 함수로 분석한다. 본 논문에서는 전송률 및 전송전력이 모두 연속적인 값을 가진다고 가정하는데, 이산 값을 가질 경우의 효과는 [10]과 [24]의 결과를 본 논문에 적용함으로써 얻을 수 있다.

II. 시스템 모델

다중 반송과 부호분할 다중접속 통신 시스템에서는 전체 사용 대역을 겹치지 않는 M 개의 동일한 대역폭의 본 논문에서는 이진 위상변조 신호를 이용하는 상

향 DS/CDMA 통신시스템을 고려한다. 다중경로 페이딩에 의해서 생기는 채널의 변화는 전송 비트 구간 동안 천천히 변화한다고 가정한다. 또한 다중경로 페이딩은 나카가미- m 확률 밀도 함수(Probability Density Function)로 모델링 된다고 가정하였다. 본 논문에서는 단일 셀 시스템을 고려한다. 다중 셀 시스템의 경우는 바깥 셀 간섭 계수에 의해서 그 영향이 고려되어 질 수 있다^[4]. 시스템 상에 K 명의 동시 사용자가 존재하고 각각의 사용자 신호는 기준 사용자 신호에 비하여 $\tau_k, k=1,2,\dots,K$ 만큼 시간차가 있다고 가정한다. 여기서 $\tau_k, k=1,2,\dots,K$ 는 한 비트 구간 동안 균일하게 분포되어 있다.

사용자 i 의 L -탭 RAKE 수신기 출력에서의 비트 에너지 대 등가 잡음 스펙트럼 밀도 비 E_b/N_e 는

$$E_b/N_e = \frac{G_i S_i T_i}{\sum_{k=1, k \neq i}^K 2G_k S_k T_c / 3 + N_0} \quad (1)$$

로 주어지는데^[16], 여기서

$$G_i = \sum_{l=1}^L G_{i,l} \quad (2)$$

이며 $G_{i,l}$ 은 사용자 i 의 l 번째 다중 경로의 페이딩으로 인한 채널 전력 이득이다. S_i 와 T_i 는 각각 사용자 i 의 전송 전력과 비트 구간이며 T_c 는 칩 시간, N_0 는 배경잡음의 단방향 전력 스펙트럼 밀도이다. 본 논문에서는 $G_{k,l}$ 이 다음과 같은 평균값을 갖는 확률 변수라고 가정한다.

$$E[G_{k,l}] = \Omega_o e^{-\delta(l-1)} \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 δ 는 다중 경로 지연의 변화율을 의미하며 Ω_o 는 첫 번째 경로의 평균 채널 전력 이득이다. 즉, $\Omega_o = E[G_{k,1}]$ 이다. G_i 의 확률 밀도 함수는

$$P_{G_i}(g) = \left(\frac{m_g}{\Omega_g} \right)^{m_g} \frac{g^{m_g-1}}{\Gamma(m_g)} e^{-\frac{m_g}{\Omega_g} g} \quad (4)$$

이며, Ω_g 는

$$\Omega_g = \Omega_o \sum_{l=1}^L e^{-\delta(l-1)} \quad (5)$$

이고

$$m_g = \begin{cases} mL, & \text{if } \delta = 0 \\ m \frac{(1+e^{-\delta})(1-e^{-\delta L})}{(1-e^{-\delta})(1+e^{-\delta L})}, & \text{if } \delta \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

인데, m 은 나카가미 페이딩 파라미터이고 $\Gamma(m)$ 은 다음과 같이 정의된 감마 함수이다²⁵⁾.

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} t^{m-1} e^{-t} dt, \quad m > 0. \quad (7)$$

수식 (1)로부터 적절한 전송 품질을 유지하기 위한 사용자 i 의 전송률 R_i [비트/초]와 전송 전력 S_i 는 다음과 같이 주어진다.

$$R_i = \frac{1}{(E_b/N_e)_o} \cdot \frac{G_i S_i}{\sum_{k=1, k \neq i}^K 2G_k S_k / (3R_c) + N_0} \quad (8)$$

위 식 (8)에서 $(E_b/N_e)_o$ 는 모뎀과 복호기에서 원하는 적절한 성능을 얻기 위한 목표 값이다. 일반적으로 $(E_b/N_e)_o$ 값은 구현 방식, 페이딩과 같은 채널에서의 손상, 오류 정정 부호의 사용 유무, 그리고 요구되는 오류율 등에 의해서 결정된다. 그러면 평균 데이터율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{R_i} = \frac{E[G_i S_i / S_T]}{(E_b N_e)_o} \cdot E\left[\frac{1}{I}\right] \quad (9)$$

위 식 (9)에서

$$I = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K 2G_k S_k / (3S_T R_c) + N_0 / S_T \quad (10)$$

이고 S_T 는 단말에서의 평균 전송 전력이다. $E[1/I]$ 은 다음과 같이 표현되는데

$$\begin{aligned} E\left[\frac{1}{I}\right] &= \int_{N_0/S_T}^{\infty} \frac{1}{x} P_I(x) dx \\ &= \frac{3R_c}{4\pi} \int_{N_0/S_T}^{\infty} \frac{1}{x} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi^{K-1}(\omega) \\ &\quad \times e^{-j\omega 3R_c(x - N_0/S_T)/2} d\omega dx \end{aligned} \quad (11)$$

$P_I(x)$ 는 I 의 확률밀도 함수이고 $\varphi(x)$ 는 $G_k S_k / S_T$

의 특성 함수이다. 하지만 $1/I$ 이 아래로 볼록 함수이므로 쥘슨의 부등식을 사용하면²⁶⁾ 평균 데이터율의 하계값은 다음과 같이 주어진다.

$$\overline{R_i} \geq \frac{E[G_i S_i / S_T]}{(E_b N_e)_o} \cdot E\left[\frac{1}{I}\right] \quad (12)$$

$$= \frac{1}{(E_b/N_e)_o} \cdot \frac{1}{2(K-1)/(3R_c) + N_0/(S_T E[G_i S_i / S_T])}$$

III. 제안하는 혼합 전력 및 전송률 적응화

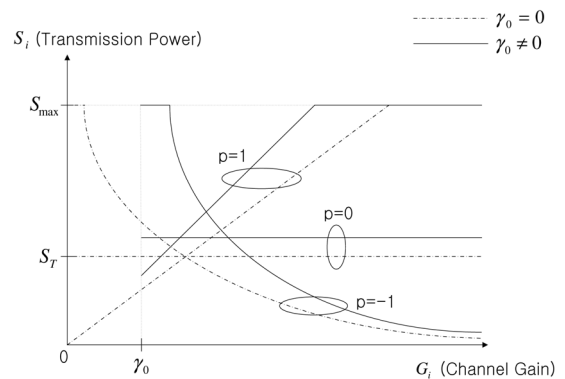


그림 1. 혼합 전송전력/전송률 적응화 기법에서의 사용자 i 의 전송전력

Fig. 1. Transmission power for user i in the proposed combined power and rate adaptation scheme.

본 절에서는 채널 이득 G_i 에 대해서 전송 전력 및 전송률을 동시에 변화시키는 일반화된 혼합 적응화에 대하여 고려한다. 그림 1에서 보듯이 채널 이득이 어떤 컷오프 페이딩 정도인 γ_0 ($G_i < \gamma_0$) 보다 아래일 때는 전송 전력이 할당되지 않는다 (즉, 데이터의 전송이 중단된다.) 그 외의 경우는 전송 전력이 G_i^p 에 비례하여 할당되는데, 동시에 전송률도 $(E_b/N_e)_o$ 를 만족시키기 위하여 결합 적응화 된다. p 값이 증가할수록 이러한 방식은 좋은 채널에 더 많은 전송 전력을 할당하게 된다. 만일 송신기가 최대 전송 전력값이 S_{max} 로 제한되어 있다면, 제안하는 결합 적응화 기법에서의 전송 전력은 다음과 같이 주어진다.

$$S_i / S_T = \begin{cases} 0, & G_i < \gamma_0 \\ \min\left(c_p G_i^p, \frac{S_{max}}{S_T}\right), & G_i \geq \gamma_0 \end{cases} \quad (13)$$

위 식 (13)에서 상수 c_p 는 평균 전송 전력의 조건

$E[S_i/S_T]=1$ 으로부터 구할 수 있다. 그림 1은 제안하는 결합 적응화 기법을 p 값이 $-1, 0, 1$ 의 경우에도 시한 것이다. [16]에서 고려한 전력 적응화 기법과 전송률 적응화 기법은 각각 $p=-1, S_{\max}=\infty, \gamma_0=0$ 와 $p=0, \gamma_0=0$ 의 특별한 경우이다. 즉, 전력 적응화의 경우는 채널 이득의 역수로 전송 전력을 보내는데 최대치 전력이나 컷오프 페이딩이 없는 경우이고, 전송률 적응화는 전송 전력은 평균 전송 전력으로 고정되어 있고 컷오프 페이딩이 없이 채널 이득에 따라 전송률만 조정해 주는 기법들인 것이다. 또한 [27]에서 고려한 끝을 자른 전력 적응화 기법은 $p=-1, S_{\max}=\infty, \gamma_0 \neq 0$ 의 특별한 경우이다. 역시 마찬가지로, [18]에서 고려한 끝을 자른 전송률 적응화와 전력 및 전송률 적응화 기법들도 $p=0, \gamma_0 \neq 0$ 와 $p=-1, S_{\max} \neq \infty, \gamma_0=0$ 의 특별한 경우가 된다.

평균 전송 전력 S_T 를 충족시키기 위해서는 다음을 만족하여야 한다.

$$E[S_i/S_T] = \begin{cases} c_p \int_{\gamma_0}^{\gamma_p} g^p P_{G_i}(g) dg \\ + \frac{S_{\max}}{S_T} \int_{\gamma_p}^{\infty} P_{G_i}(g) dg, & p \geq 0 \\ \frac{S_{\max}}{S_T} \int_{\gamma_0}^{\max(\gamma_0, \gamma_p)} P_{G_i}(g) dg \\ + c_p \int_{\max(\gamma_0, \gamma_p)}^{\infty} g^p P_{G_i}(g) dg, & p < 0 \end{cases}$$

$$= \begin{cases} c_p \{f_p(\gamma_0) - f_p(\gamma_p)\} \\ + \frac{S_{\max}}{S_T} f_0(\gamma_p), & p \geq 0 \\ \frac{S_{\max}}{S_T} \{f_0(\gamma_0) - f_0(\max(\gamma_0, \gamma_p))\} \\ + c_p f_p(\max(\gamma_0, \gamma_p)), & p < 0 \end{cases} \quad (14)$$

여기에서,

$$\gamma_p = \left(\frac{S_{\max}}{c_p S_T} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (15)$$

$$f_p(u) = \int_u^{\infty} g^p P_{G_i}(g) dg \quad (16)$$

$$= \left(\frac{\Omega_g}{mg} \right)^p \frac{\Gamma(m_g + p, m_g u / \Omega_g)}{\Gamma(m_g)}$$

$$\Gamma(\alpha, x) = \int_x^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (17)$$

이다. 상수 c_p 를 구하기 위한 일반적인 해법은 없고, 단지 수치적인 방법으로 구할 수 있다. 본 논문에서는 뉴턴 방법을 사용하여 c_p 를 구하였다^[27]. c_p 를 구하고 나면 식 (9)에 있는 $E[G_i S_i/S_T]$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$E[G_i S_i/S_T] = \int_{\gamma_0}^{\infty} \min \left(c_p g^p, \frac{S_{\max}}{S_T} \right) g P_{G_i}(g) dg$$

$$= \begin{cases} c_p \{f_{p+1}(\gamma_0) - f_{p+1}(\gamma_p)\} \\ + \frac{S_{\max}}{S_T} f_1(\gamma_p), & p \geq 0 \\ \frac{S_{\max}}{S_T} \{f_1(\gamma_p) - f_1(\max(\gamma_0, \gamma_p))\} \\ + c_p f_{p+1}(\max(\gamma_0, \gamma_p)), & p < 0 \end{cases} \quad (18)$$

그림 2는 여러 가지 p 값의 경우에 S_T/N_0 대비 평균 데이터율을 그린 것이다. 그림 2로부터 식 (12)의 하계값이 실제값과 매우 가까이 일치하는 것을 관찰할 수 있다. 실제로 하계값은 다중 접속 사용자의 간섭을 그 평균값으로 근사화하는 것으로서, 사용자의 수가 충분히 큰 환경에서는 *weak law of large numbers* 법칙에 의해서 간섭의 정도는 거의 그 평균값으로 수렴하게 된다.

한편, 전력 적응화($p=-1, S_{\max}=\infty, \gamma_0=0$)가 사용되었을 때, $E[G_i S_i/S_T]$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$E[G_i S_i/S_T] = c_{-1} f_0(0) = \Omega_g(m_g - 1)/m_g \quad (19)$$

식 (12), (18), (19)로부터 제안하는 적응화 기법은 전력 적응화 방식에 대비하여 다음의 전력 이득 G_p 를 가지게 된다.

$$G_p = \begin{cases} \frac{m_g}{\Omega_g(m_g-1)} [c_p \{f_{p+1}(\gamma_0) - f_{p+1}(\gamma_p)\} \\ \quad + \frac{S_{\max}}{S_T} f_1(\gamma_p)], & p \geq 0 \\ \frac{m_g}{\Omega_g(m_g-1)} [\frac{S_{\max}}{S_T} \{f_1(\gamma_0) - f_1(\max(\gamma_0, \gamma_p))\} \\ \quad + c_p f_{p+1}(\max(\gamma_0, \gamma_p))], & p < 0 \end{cases} \quad (20)$$

전송률 적응화 ($p=0, \gamma_0=0$) 가 사용되었을 때, $E[G_i S_i / S_T]$ 는

$$E[G_i S_i / S_T] = \Omega_g \quad (21)$$

이다. 식 (19), (21)로부터 제안하는 적응화 기법은 전송률 적응화 방식에 비하여 다음의 전력 이득 G_r 를 가지게 된다.

$$G_r = \frac{(m_g - 1)}{m_g} G_p \quad (22)$$

IV. 수치적 결과 및 토론

그림 2에서는 침두대 평균 전력비 S_{\max}/S_T 의 여러 값에 대하여 p 값의 변화에 따른 전력이득 G_p 를 도시하였다. p 값이 증가함에 따라서 전력이득이 커짐을 알 수 있는데, 그 이유는 채널 상태가 좋지 않을 때 전송전력을 줄임으로써 좋은 채널 상태에서 보다 더 많은 전력을 효율적으로 사용할 수 있기 때문이다. 전송 전력은 침두전력에 의하여 제한되기 때문에 전력이득 또한 S_{\max}/S_T 의 함수로 포화됨을 관찰할 수 있다. 레일레이 페이딩 채널이며 $\gamma_0=0, \delta=0.5$ 일 때, 제안하는 혼합 전송전력/전송률 적응화는 전송전력 적응화에 비하여 3.7-5.4 dB, 전송률 적응화에 비하여는 1.5-3.2 dB의 전력이득을 보임을 알 수 있다. S_{\max}/S_T 의 값을 증가시키면 p 값이 양수일 때 좋은 상태의 채널에 보다 더 많은 전력을 할당할 수 있고, 반면에 p 값이 음수일 때는 S_{\max}/S_T 의 값을 줄임으로써 채널 상태가 나쁠 때 전송전력을 아낄 수 있다. 즉, p 값이 음수일 때는 S_{\max}/S_T 의 값이 감소할수록 더 많은 전력이득을 얻을 수 있다.

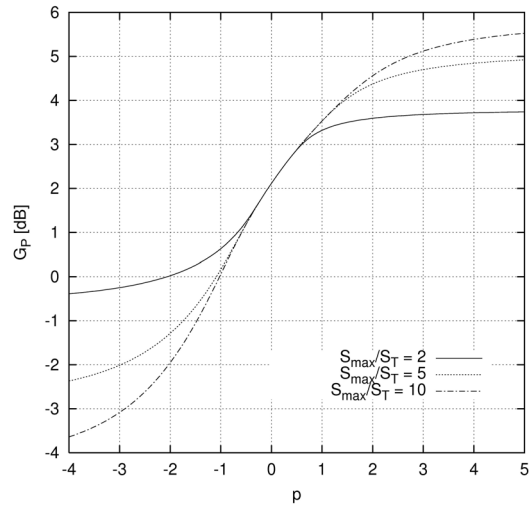


그림 2. p 값에 따른 전력이득 G_p 의 변화
($m=1, \delta=0.5, \gamma_0=0, L=3, \Omega_g=1$)
Fig. 2. The power gain G_p versus p
($m=1, \delta=0.5, \gamma_0=0, L=3, \Omega_g=1$)

그림 3은 여러 m 값에 대하여 δ 값의 변화에 따른 전력이득 G_r 을 그린 것이다. 침두대 평균 전력비가 높을수록 그리고 채널의 다중경로 프로파일의 감쇄가 빠르거나 직접파 성분이 약할수록 제안하는 혼합 적응화 방식의 전력이득이 커짐을 관찰할 수 있다. 여기에서 레이크 수신기 출력 신호의 분산이 δ 값이 크거나 m 값이 작을수록 증가한다는 사실에 주목할 필요가 있다. 즉, 제안하는 혼합 적응화 방식은 채널 상태가 나쁠 때 전송전력을 적게 할당함으로써 채널 상태가 좋을 때 효율적으로 전력을 사용함으로써 전송률 적응화에 비하여 전력이득을 얻을 수 있는 것이다. 다시 말해서 혼합 적응화 방식은 채널 상태가 나쁠 때 저장된 전력을 채널 상태가 좋을 때 효율적으로 사용하는 반면 전송률 적응화는 채널 페이딩에 관계없이 항상 일정한 전력을 전송하는 것이다.

본 논문에서 연구된 혼합 전송전력/전송률 적응화 방식은 전송전력 혹은 전송률 단일 적응화 방식에 비하여 많은 성능 향상을 가져온다. 이것은 기존의 단일 사용자 환경에서 연구된 [11]-[13]의 결과와는 사뭇 다른 것으로서, 기존의 결과는 정보 이론적 관점에서 전송전력 및 전송률의 결합 적응화는 채널용량을 아주 조금 증가시킬 뿐이었다. 본 연구가 의미하는 것은 부호분할 다중접속 채널에서 전송전력과 전송률의 추가적인 최적화를 통하여 전송전력 혹은 전송률의 단일 적응화 대비 많은 성능 향상을 가져올 수 있다는 것을 보여준다.

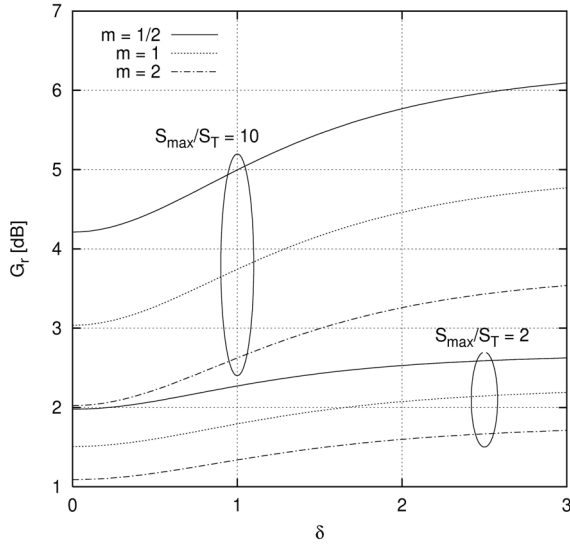


그림 3. δ 값에 따른 전력이득 G_r 의 변화
 ($p = 4, \gamma_0 = 0.1, L = 3, \Omega_g = 1$)
 Fig. 3. The power gain G_r versus δ
 ($p = 4, \gamma_0 = 0.1, L = 3, \Omega_g = 1$)

V. 결론

본 논문에서는 나카가미 페이딩 채널 환경에서 직접 대역확산 부호분할 다중접속 통신을 위한 혼합 전력/전송률 적응화 기법을 일반화하여 제안하고 그 성능을 평균 전력 및 최대 전력 고정되어 있을 때 분석하였다. 본 연구를 통하여 제안하는 혼합 전력/전송률 적응화 방식이 전력 혹은 전송률의 단일 적응화 방식에 비하여 많은 성능 향상이 있음을 알 수 있었는데, 이것은 단일 사용자 환경에서의 정보 이론적 관점에서의 연구 결과와 다소 다른 것으로써 부호분할 다중접속 채널에서는 전송 전력과 전송률의 추가적인 최적 결합을 통하여 전송 전력 혹은 전송률의 단일 적응화 대비 많은 성능 향상을 가져올 수 있다는 것을 보여주었다.

References

[1] J. F. Hayes, "Adaptive feedback communications," *IEEE Trans. Commun. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 29-34, Feb. 1968.
 [2] Y. H. Lee and Y. Bar-Ness, "Power adaptation for BPSK signaling with average and peak power constraints in Rayleigh fading

channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1871-1876, Nov. 2003.
 [3] J. K. Cavers, "Variable-rate transmission for Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 15-22, Feb. 1972.
 [4] W. T. Webb and R. Steele, "Variable rate QAM for mobile radio," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 7, pp. 2223-2230, July 1995.
 [5] Y. Kamio, S. Sampei, H. Sasaoka, and N. Morinaga, "Performance of modulation level controlled adaptive modulation under limited transmission delay time for land mobile communications," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 221-225, Chicago, U.S.A., July 1995.
 [6] B. Vucetic, "An adaptive coding scheme for time varying channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 39, no. 5, pp. 653-663, May 1991.
 [7] S. M. Alamouti and S. Kallel, "Adaptive trellis-coded multiple phase shift keying for Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no. 6, pp. 2305-2314, June 1994.
 [8] T. Ue, S. Sampei, and N. Morinaga, "Symbol rate and modulation level controlled adaptive modulation/TDMA/TDD for personal communication systems," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 1, pp. 306-310, Chicago, U.S.A., July 1995.
 [9] A. J. Goldsmith and S. G. Chua, "Variable rate variable power MQAM for fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 10, pp. 1218-1230, Oct. 1997.
 [10] Y. H. Lee, "On the optimal antenna weighting method for closed-loop transmit antenna diversity with average and peak power constraints," *J. Korean Inst. Commun. Inform. Soc. (KICS)*, vol. 32, no. 7, pp. 694-699, July 2007.
 [11] A. J. Goldsmith and P. P. Varaiya, "Capacity of fading channels with channel side information," *IEEE Trans. Inform. Theory*,

- vol. 43, no. 6, pp. 1986-1992, Nov. 1997.
- [12] M. Alouini and A. Goldsmith, "Capacity of Nakagami multipath fading channels," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 1, pp. 358-362, Phoenix, U.S.A., May 1997.
- [13] M. Alouini and A. Goldsmith, "Capacity of Rayleigh fading channels under different adaptive transmission and diversity - combining technique," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, no. 4, pp. 1165-1181, July 1999.
- [14] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver Jr., and C. E. Wheatley III, "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, no. 2, pp. 303-312, May 1991.
- [15] J. Zander, "Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 41, no. 1, pp. 57-62, Feb. 1992.
- [16] S. W. Kim, "Adaptive rate and power DS/CDMA communications in fading channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp. 85-87, Apr. 1999.
- [17] S.-J. Oh and K. M. Wasserman, "Dynamic spreading gain control in multiservice CDMA networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 5, pp. 918-927, May 1999.
- [18] S. W. Kim and Y. H. Lee, "Combined rate and power adaptation in DS/CDMA communications over Nakagami fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 1, pp. 162-168, Jan. 2000.
- [19] S.-J. Oh, D. Zhang, and K. M. Wasserman, "Optimal resource allocation in multiservice CDMA networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 4, pp. 811-821, July 2003.
- [20] R. Mo, Y. H. Chew, and C. C. Chai, "Capacity of DS/CDMA system under multipath fading with different adaptive rate adaptive power schemes," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Networking Conf. (WCNC 2003)*, vol. 1, pp. 190-195, New Orleans, U.S.A., Mar. 2003.
- [21] F. Berggren and S.-L. Kim, "Energy-efficient control of rate and power in DS-CDMA systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 3, pp. 725-733, May 2004.
- [22] X. Qiu and K. Chawla, "On the performance of adaptive modulation in cellular systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 6, pp. 884-895, June 1999.
- [23] C. C. Chai, T. T. Tjhung, and L. C. Leck, "Combined power and rate adaptation for wireless cellular systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 1, pp. 6-13, Jan. 2005.
- [24] P. Ligdas and N. Farvardin, "Optimizing the transmit power for slow fading channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 565-576, Mar. 2000.
- [25] M. Nakagami, "The m-distribution: a general formula of intensity distribution of rapid fading," in *Statistical Methods in Radio Wave Propagation: Proc. Symp. Held Jun 18-20, 1958*, pp. 3-36, Pergamon Press, 1960.
- [26] W. Feller, *An Introduction to Probability Theory and Its Applications. Vol. II*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, 1971.
- [27] S. W. Kim and A. J. Goldsmith, "Truncated power control in code division multiple access communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 3, pp. 965-972, May 2000.
- [28] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flanner, *Numerical Recipes in C*, 2nd Ed., Cambridge, 1997.

이 예 훈 (Ye Hoon Lee)



2000년 2월 KAIST 전기및전
자공학과 박사

2000년 8월~2001년 7월 LG
전자 차세대 단말 연구소
선임연구원

2001년 8월~2002년 12월 미
국 뉴저지주립공대 Research

Associate

2003년 3월~2005년 9월 삼성종합기술원 i-Network
-ing Lab. 전문연구원

2005년 10월~현재 서울과학기술대학교 전자IT미디어
공학부 부교수

<관심분야> 이동통신, 통신이론, 방송통신

김 동 호 (Dong Ho Kim)



1997년 2월 연세대학교 전자
공학과 학사

1999년 2월 KAIST 전기및전
자공학과 석사

2004년 8월 KAIST 전기및전
자공학과 박사

2004년 9월~2007년 2월 삼성
종합 기술원 삼성전자 책임연구원

2007년 3월~현재 서울과학기술대학교 전자IT미디어
공학부 부교수

<관심분야> 무선통신시스템, 통신이론, 오류정정부호