

멀티셀 CDMA 이동통신시스템을 위한 전송출력/전송률 할당체계

Power and Rate Allocation Scheme for Multicell CDMA mobile systems

장근녕
연세대학교 경법대학 경영학과

Abstract

본 논문에서는 다수의 셀로 구성된 CDMA 시스템의 순방향 링크를 대상으로 지연 및 PRER 제약과 전송출력 제약 하에서 데이터 전송률과 사용자간 형평성을 반영한 총효용을 최대화하기 위한 각 기지국의 총평균전송출력과 각 사용자의 데이터 전송률 할당 체계를 제시한다. 실험을 통해 모든 셀을 동시에 고려하는 OPARS(Optimal Power and Rate Allocation Scheme)가 각 셀을 개별적으로 고려하는 SPRAS(Separate Power and Rate Allocation Scheme)에 비해 더 좋은 해를 제공한다는 것을 알 수 있었다.

1. 서론

인터넷 접속 등과 같은 멀티미디어 데이터 전송에 대한 수요가 증가할 것으로 예상되는 차세대 이동통신시스템에서는 순방향 링크(forward link)가 시스템 전체의 용량을 결정하는데 있어서 중요한 역할을 할 것으로 보인다. 따라서 순방향 링크에서 지연(delay), 데이터 처리량(data throughput) 등과 같은 시스템 성능 척도를 최적화할 수 있도록 전송출력(transmission power), 비트당 에너지 대 잡음비(E_b/N_0 ; bit energy-to-noise density ratio), 데이터 전송률(data rate) 등과 같은 시스템 자원을 제어할 필요성이 증대되고 있다.

이에 따라 통합 음성/데이터 CDMA 시스템에서 전송출력, E_b/N_0 , 데이터 전송률 등에 대한 제어체계 연구가 많이 이루어져오고 있다[4,6,8,10]. 그런데 이들 연구는 데이터 사용자에게 대한 QoS(Quality of Service)를 최소 E_b/N_0 (또는 SIR; signal-to-interference ratio) 요구사항만으로 특정화하거나 에러가 발생한 프레임을 무한정 재전송한다고 가정하고 있어 음성과 차이가 있는 데이터의 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다.

이러한 점을 보완하기 위해 Song과 Mandayam[9]은 데이터 사용자에게 대한 QoS를 음성과 차별화하여 여러 가지 요소로 특정화하고, 에러 프레임의 재전송 횟수를 지연 허용정도와 결부시켜 제한하는 보다 실제적인 CDMA 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 여기에서는 CDMA 시스템의 순방향 링크를 대상으로 지연 및 PRER 제약과 전송출력 제약 하에서 데이터 전송률과 사용자간 형평성(fairness)을 반영한 총효용(total utility)을 최대화하기 위한 각 사용자의 E_b/N_0 목표값 및 데이터 전송률 할당 체계를 제시하고 있다. 이 연구

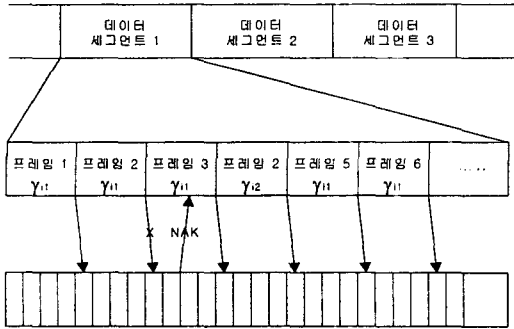
에서는 각각의 셀별로 개별적으로 최적 E_b/N_0 목표값 및 데이터 전송률을 결정하고 있다. 그런데, 최적화 관점에서 볼 때 다수의 셀을 동시에 고려하여 각 기지국의 총평균전송출력(total average power)과 각 사용자에게 대한 E_b/N_0 목표값 및 데이터 전송률을 결정하게 되면 시스템 전체의 용량을 개선할 수 있다.

본 논문에서는 다수의 셀로 구성된 CDMA 시스템의 순방향 링크를 대상으로 지연 및 PRER 제약과 전송출력 제약 하에서 데이터 전송률과 사용자간 형평성을 반영한 총효용을 최대화하기 위한 각 기지국의 총평균전송출력과 각 사용자의 E_b/N_0 목표값 및 데이터 전송률 할당 체계를 제시하고자 한다. 여기에서는 데이터 사용자의 QoS가 데이터 전송률과 사용자간 형평성을 반영하는 효용함수(utility function)와 지연 및 에러율 제약에 의해 특정화되어진다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 분석 대상이 되는 CDMA 시스템의 모형을 설명한다. 3절에서는 최적 전송출력 및 전송률 할당 모형을 수리적으로 정형화한다. 4절에서는 실험을 통해 제시한 할당 체계의 성능을 분석하고, 5절에서는 연구내용을 요약하고 향후 연구방향을 제시한다.

2. 시스템 모형

본 논문은 [9]와 마찬가지로 순방향 링크에서의 데이터 전송이 <그림 1>과 같이 데이터 세그먼트(data segment, 다수의 프레임(frame)으로 구성)와 프레임 단위로 이루어지고, 모든 데이터 사용자의 데이터 전송이 세그먼트와 프레임 단위로 동기화되는 CDMA 시스템을 대상으로 한다. 기지국으로부터 받은 프레임에 에러가 발생했을 경우 이동국은 역방향 링크(reverse link)의 제어채널을 이용하여 프레임 재전송을 요청하는 NAK 메시지를 기지국으로 보낸다. 이 경우 기지국은 다음으로 이용 가능한 프레임 슬롯을 이용하여 에러가 발생한 프레임을 재전송하게 되고, 이러한 재전송은 지연 제약이 만족되는 범위 내에서 M번까지 반복된다. IS-2000에서는 트래픽 프레임의 길이가 20ms이고 제어 프레임의 길이가 5ms이므로, 트래픽 프레임 한 단위의 지연만으로 재전송이 이루어진다[9,10]. 에러가 발생한 프레임을 현재의 세그먼트에서 재전송할 수 없는 경우에는, 다음 세그먼트의 초기에 새로운 프레임으로 전송한다. 사용자 i 에 대한 데이터 전송률 R_i 와 사용자 i 에 대한 특정 프



<그림 1> 데이터 전송 모형

입의 j 번째 전송(2 이상은 재전송임)에 대한 E_b/N_0 목표값 γ_{ij} ($j=1, \dots, M$)는 세그먼트 단위로 결정된다.

데이터 사용자의 QoS는 지연 허용정도, 에러 성능(error performance), 데이터 처리량(데이터 전송률), 사용자간 형평성 등의 요소로 특정화된다. 지연 허용정도는 허용가능한 재전송 횟수에 대한 제약으로 정의되고, 에러 성능은 충족되어야 하는 PRER에 의해 정의된다. 지연과 PRER 제약 하에서 각 데이터 사용자는 더 높은 처리량을 선호하지만, 네트워크 관점에서는 사용자들간의 형평성이 어느 정도 요구된다. 따라서 지연 및 PRER 제약이 만족되는 범위 내에서, 처리량과 형평성을 동시에 반영해야 한다.

처리량과 형평성을 동시에 반영하기 위한 효용함수에 대한 연구가 유선 통신 및 무선 통신 분야에서 다양하게 이루어져 왔다[2,7,9]. 본 연구에서는 [9]에서와 같이 사용자 i 에 대한 효용함수 $U_i(R_i)$ 를 데이터 전송률 R_i 의 함수로 정의한다. 효용함수 $U_i(R_i)$ 는 단조 증가하는 오목함수라고 가정한다. $U_i(R_i)$ 가 오목함수이므로 낮은 데이터 전송률에 더 높은 페널티(penalty)를 부여하게 되고, 따라서 사용자간의 형평성을 반영하게 된다. $U_i(R_i)$ 의 형태를 조정함으로써 시스템 전체의 데이터 전송률과 사용자간 형평성간의 트레이드오프(tradeoff) 관계에 변화를 줄 수 있다.

E_b/N_0 목표값 γ_{ij} 는 이동국에서 결정되고, 이동국은 이 목표값을 충족시킬 수 있을 정도로 전송출력을 조정하도록 하는 출력제어정보를 기지국으로 보낸다. 본 논문에서는 시스템에서 사용되는 전송출력제어 알고리즘을 이용하여 E_b/N_0 목표값 γ_{ij} 를 달성하도록 전송출력을 제어할 수 있다고 가정한다[3,9]. 이동국은 순방향 링크 채널정보에 기초하여 미리 정한 프레임 에러 성능을 달성할 수 있도록 γ_{ij} 를 결정한다. 채널정보는 주어진 γ_{ij} 에 대해 순방향 링크 프레임 에러율(FER; frame error rate)이 얼마인가의 형태로 주어진다 가정한다. 즉 γ_{ij} 에 대해서 FER $f_i(\gamma_{ij})$ 가 알려져 있다고 가정하고, $f_i(\cdot)$ 는 단조 감소하는 볼록함수라고 가정한다[5,9].

3. 최적 전송출력 및 전송률 할당 모형

여기에서는 데이터 전송률과 사용자간 형평성을 고려한 총효용을 최대화하는 각 기지국의 총평균전송출력과 각 사용자의 E_b/N_0 목표값 및 데이터 전송률을 구하기 위한 모형을 정형화한다. 제약식으로는 순방향 링크에서의 총평균전송출력이 한계값 C 이내라야 한다는 것과 각 데이터 사용자의 PRER이 한계값 ϵ_0 이내라야 한다는 것이 고려된다.

먼저, 최적 전송출력 및 전송률 할당 모형의 목적식은 총효용 $\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{N^k} U_i(R_i^k)$ 을 최대화하는 것으로 정의한다. 여기서 N 은 셀의 수를 나타내고, N^k 는 셀 k 내의 사용자 수를 나타낸다. 다음으로 셀 k 내 사용자 i 의 평균 E_b/N_0 , X_i^k , 는 다음과 같이 정의된다.

$$X_i^k = \frac{W}{R_i^k} \frac{h_i^{kk} P_i^k}{\sum_{j=1}^N h_j^{kj} \sum_{i=1}^{N^k} P_i^k + I_i^k} \approx \frac{W}{R_i^k} \frac{h_i^{kk} P_i^k}{\sum_{j=1}^N h_j^{kj} \sum_{i=1}^{N^k} P_i^k + I_i^k} \quad (1)$$

여기서 P_i^k 는 셀 k 내 사용자 i 에 대한 평균전송출력을 나타내고, h_i^{kl} 은 셀 k 내 사용자 i 의 셀 l 로부터의 평균경로이득(link gain)을 나타낸다. I_i^k 는 셀 k 내 사용자 i 에 대한 열잡음(thermal noise)을 나타내고, W 는 확산대역(spreading bandwidth)을 나타낸다. 식 (1)에서의 근사화는 시스템 전체를 좌우하는 사용자 없이 시스템에 많은 사용자가 있을 경우에 유의하다[11]. 식 (1)로부터 다음의 식을 구할 수 있다.

$$P_i^k = \frac{R_i^k X_i^k}{W} \left(\sum_{j=1}^N \frac{h_j^{kj}}{h_i^{kk}} \sum_{i=1}^{N^k} P_i^k + \frac{I_i^k}{h_i^{kk}} \right) \quad (2)$$

셀 k 의 모든 사용자 i 에 대해 식 (2)를 더한 후, $\sum_{i=1}^{N^k} P_i^k$ 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\left(1 - \frac{r_k}{r_k} \sum_{j=1}^N \frac{R_j^k X_j^k}{W} \sum_{i=1}^{N^k} \frac{h_j^{kj}}{h_i^{kk}} \right) \sum_{i=1}^{N^k} P_i^k = \sum_{i=1}^{N^k} \frac{R_i^k X_i^k}{W} \frac{I_i^k}{h_i^{kk}} \quad (3)$$

여기서 $r_k = \sum_{j=1}^{N^k} P_j^k / \sum_{i=1}^{N^k} P_i^k$ 은 기준 셀(셀 1 이라고 가정) 기지국의 총평균전송출력에 대한 셀 k 기지국의 총평균전송출력의 비율을 나타낸다.

이제 $\sum_{i=1}^{N^k} P_i^k = sr_k C$ (단, $0 \leq s \leq \min\{1, 1/r_k, \forall k\}$) 라 두면, 식 (3)은 다음의 식 (4)로 바뀐다.

$$\sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(r, s) X_i^k R_i^k = C \quad (4)$$

여기서 $Z_i^k(r, s) = \frac{1/s I_i^k + C \sum_{j=1}^N h_j^{kj} r_j}{W h_i^{kk}}$ 이다.

한편, X_i^k 는 E_b/N_0 목표값 γ_{im}^k 와 다음과 같은 관계가 있다[9].

$$X_i^k = \sum_{m=1}^M \gamma_{im}^k a_{im}^k$$

여기서 a_{im}^k 는 사용자 i 에게 전송되는 프레임이 $m-1$ 번 전송된 프레임일 확률을 나타낸다. a_{i1}^k

는 사용자 i 에게 전송되는 프레임이 이전에 전송되지 않은 프레임일 확률이다. d_{im}^k 는 마코프 체인 분석을 통해 다음과 같이 결정된다[9].

$$q_{im}^k = \frac{\prod_{l=1}^{m-1} f_l(\gamma_{il}^k)}{1 + \sum_{j=1}^{M-1} \prod_{k=1}^M f_j(\gamma_{ik}^k)}$$

마지막으로, [9]에서와 같이 각 데이터 사용자의 PRER이 한계값 ϵ_0 이내라야 한다는 제약은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$PRER_m^k = \prod_{m=1}^M f_m(\gamma_{im}^k) \leq \epsilon_0.$$

γ_{\min} 과 γ_{\max} 를 E_b/N_0 목표값의 하한값과 상한값을 나타낸다고 할 때, 이들 제약식을 만족하는 해가 하나 이상은 존재하도록 하고, γ_{\min} 이 제약식을 만족하거나 γ_{\max} 만이 제약식을 만족하여 명백한 문제(trivial problem)가 되는 경우를 제외하기 위해 [9]에서와 같이 다음의 식을 만족한다고 가정한다.

$$\prod_{m=1}^M f_m(\gamma_{\max}) < \epsilon_0 < \prod_{m=1}^M f_m(\gamma_{\min}), \forall i.$$

이제 최적 전송출력 및 전송률 할당 모형 PRA는 다음과 같이 정형화된다.

$$\text{Max} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M U_i(R_i^k)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^M Z_i^k(r, s) X_i^k R_i^k = C, \forall k \\ & \prod_{m=1}^M f_m(\gamma_{im}^k) \leq \epsilon_0, \forall k, i \\ & \gamma_{\min} \leq \gamma_{im}^k \leq \gamma_{\max}, \forall k, i, m \\ & R_{\min} \leq R_i^k \leq R_{\max}, \forall k, i \\ & r_L \leq r_k \leq r_U, \forall k \\ & 0 \leq s \leq \min\{1, \frac{1}{r_k}, \forall k\}. \end{aligned}$$

여기서 R_{\min} 과 R_{\max} 는 각 사용자의 데이터 전송률의 하한값과 상한값을 나타내고, r_L 과 r_U 는 r_k 값의 하한값과 상한값을 나타낸다.

최적 전송출력 및 전송률 할당 모형 PRA는 비선형계획문제(nonlinear programming problem)로, 빠른 시간 내에 좋은 해를 구하는 것이 어렵다. 따라서 우선 PRA를 좀 더 풀기 쉬운 형태로 바꾸는 과정이 필요하다.

먼저, X_i^k 를 $\prod_{m=1}^M f_m(\gamma_{im}^k) \leq \epsilon_0$ (단, $\gamma_{\min} \leq \gamma_{im}^k \leq \gamma_{\max}$)를 만족하는 X_i^k 의 최소값이라 하자. $\gamma_{im}^k = \gamma_i^k$ 라는 가정 하에서는 $X_i^k = \gamma_i^k = f_i^{-1}(\epsilon_0^{1/M})$ 로 쉽게 해결된다[9]. 다음으로 $\prod_{m=1}^M f_m(\gamma_{im}^k) \leq \epsilon_0$ (단, $\gamma_{\min} \leq \gamma_{im}^k \leq \gamma_{\max}$)를 만족하는 X_i^k 의 최대값은 Lemma 1에 의해 모든 사용자 i 에 대해서 $X_{\max} = \gamma_{\max}$ 이다.

Lemma 1. 셀 k 의 사용자 i 에 대해서 $\prod_{m=1}^M f_m(\gamma_{im}^k) \leq \epsilon_0$ (단, $\gamma_{\min} \leq \gamma_{im}^k \leq \gamma_{\max}$)를 만족하는 X_i^k 의 최대값은 γ_{\max} 이다.

증명. 생략 ■

이제 $X_i^k = X_i^k + Y_i^k$ 라 두면, 아래의 Lemma 2

에 의해 $Y_i^k R_i^k$ 를 $Y_i^k R_{\max}$ 로 바꿀 수 있다.

Lemma 2. \overline{R}_i^k 와 \overline{Y}_i^k 를 PRA의 최적해라고 할 때, $\overline{R}_i^k < R_{\max}$ 이면 $\overline{Y}_i^k = 0$ 이다.

증명. 생략 ■

결국 Lemma 1과 2를 이용하여 PRA를 아래의 RPRA로 바꿀 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M U_i(R_i^k) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^M Z_i^k(r, s) (X_i^k R_i^k + R_{\max} Y_i^k) = C, \forall k \\ & R_{\min} \leq R_i^k \leq R_{\max}, \forall k, i \\ & 0 \leq Y_i^k \leq X_{\max} - X_i^k, \forall k, i \\ & r_L \leq r_k \leq r_U, \forall k \\ & 0 \leq s \leq \min\{1, \frac{1}{r_k}, \forall k\}. \end{aligned}$$

4. 실험 결과

여기에서는 제시한 모형의 성능을 4개의 셀로 구성되고 각 셀에 6명의 사용자가 있는 시스템을 대상으로 분석한다. 먼저 효용함수는 다음과 같이 가정하였다[9].

$$U_i(R_i) = \frac{R_i}{R_{\max}} - \left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^\rho.$$

패러미터 $\rho \leq 0$ 이면 $U_i(R_i)$ 는 오목함수가 된다. ρ 는 사용자간의 형평성을 반영하기 위해 사용된다. ρ 가 0이면 형평성을 전혀 반영하지 않고 데이터 전송률만을 고려하는 것이고, ρ 가 작을수록 사용자간의 형평성을 많이 반영하는 것이 된다. FER 함수 $f_i(\cdot)$ 는 다음과 같이 가정하였다[9].

$$f_i(\gamma_i) = 1 - e^{-1/F_i}.$$

여기서 F_i 는 페이드 마진(fade margin)을 나타내는 패러미터이다[12]. 채널간의 차이를 반영하기 위해 페이드 마진은 다음과 같이 정의하였다[9].

$$F_i = \beta_i F_0 \gamma_i.$$

여기서 F_0 는 상수이고, β_i 는 전송출력제어의 효율성을 반영하는 패러미터이다[1]. 전송출력제어가 완전한 경우에는 $\beta_i = 1$ 이다.

경로이득은 <표 1>과 같이 가정하였고, 열잡음은 무시하였다. 각 셀에서 사용자 1이 기지국에 가장 가까이 있고, 사용자 6이 기지국에서 가장 멀리 떨어져 있다고 가정하였다.

<표 1> 경로이득

사용자	1	2	3	4	5	6
h_i^{kl} (dB)	-20	-23	-26	-29	-32	-35
h_i^{kl} (dB)	(k=1, l=2) (k=2, l=1)	-53, -56, -59, -62, -65, -68 중에서 랜덤하게 결정				
	이외의 경우	-38, -41, -44, -47, -50, -53 중에서 랜덤하게 결정				

FER 함수의 F_0 는 7.5로 가정하였고, β_i 는

사용자 1, 2, 3, 4, 5, 6 에 대해서 각각 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2로 가정하였다. 확산대역(spreading bandwidth)은 1 MHz로 가정하였고, 데이터 사용자에게 대한 최소 데이터 전송률 R_{\min} 은 20000bps로, 최대 데이터 전송률 R_{\max} 는 200000bps로 가정하였다. E_b/N_0 목표값의 하한값 γ_{\min} 과 상한값 γ_{\max} 는 3dB과 19dB로 가정하였고, 총평균전송출력의 한계 C 는 8와트로 가정하였다. RLP는 에러프레임을 3번까지 전송한다고 가정하였고(즉, $M=3$), PRER은 5×10^{-6} 이내라야 한다고 가정하였다(즉, $\epsilon_0 = 5 \times 10^{-6}$). 또한, $\gamma_{im}^k = \gamma_i^k, \forall m$ 로 가정하였다. 이렇게 가정할 경우 최대 전송출력이 더 중요하게 여겨지는 실제 시스템의 특성을 더 잘 반영할 수 있다. 이 때, 평균 E_b/N_0 값, \mathcal{X}_i^k 는 <표 2>와 같이 계산되어 진다.

<표 2> 평균 E_b/N_0 값, \mathcal{X}_i^k

사용자	1	2	3	4	5	6
\mathcal{X}_i^k (dB)	10.57	11.10	11.89	12.86	14.09	15.87

<표 3>에서는 SPRAS(Separate Power and Rate Allocation Scheme)와 OPRAS(Optimal Power and Rate Allocation Scheme)를 비교하고 있다. SPARS는 모든 셀의 총평균전송출력이 동일하다고 가정한 경우로(즉, $r_k=1$), 모든 셀을 동시에 고려하지 않고 개별적으로 고려한다. OPRAS는 모든 셀을 동시에 고려한다. SPRAS와 OPRAS 하에서 제시한 모형 RPRA를 LINGO를 이용하여 풀었다. 표에서 보듯이 OPRAS가 SPRAS에 비해 총효율과 총데이터전송률이 더 큰 것으로 나타났다.

<표 3> SPRAS와 OPRAS의 비교

ρ	SPRAS		OPRAS	
	총효율	$\sum R_i$ (bps)	총효율	$\sum R_i$ (bps)
0	-11.00269	2599463	-10.88936	2622129
-1	-54.08814	1973182	-52.16039	2003577
-5	-4530.738	1774700	-3447.175	1816471
-10	-1294915	1738780	-555222.9	1781194

5. 결론

본 논문에서는 다수의 셀로 구성된 CDMA 시스템의 순방향 링크를 대상으로 지연 및 PRER 제약과 전송출력 제약 하에서 데이터 전송률과 사용자간 형평성을 반영한 총효율을 최대화하기 위한 각 기지국의 총평균전송출력과 각 사용자의 E_b/N_0 목표값 및 데이터 전송률 할당 체계를 제시하였다. 실험 결과 OPRAS는 각 셀을 개별적으로 다루는 SPRAS보다 더 좋은 해를 구할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

그런데, 본 논문에서 다루고 있는 시스템은 기본적으로 실시간으로 운영되어야 하고, 따라서 빠른 시간 내에 제시한 모형의 좋은 근사해를 구하는

방법을 개발하기 위한 연구가 추가로 이루어져야 한다.

참고문헌

- [1] Garg, V. and E. Sneed, "Digital wireless local loop system," *IEEE Communications Magazine*, (1996), pp. 112-115.
- [2] Goodman, D. and N. Mandayam, "Power control for wireless data," *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 7(2000), pp. 48-54.
- [3] Herdtner, J. and E. Chong, "Analysis of a class of asynchronous power control algorithms for cellular wireless systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18(2000), pp. 436-446.
- [4] Jeong, D. G. and W. S. Jeon, "Rate controlled data transmission for IS-95 CDMA networks," *Proc. IEEE VTC*, (1997), pp. 1567-1571.
- [5] Kumar, S., S. Nanda, and A. Falconi, *Reverse link power control performance for high speed data over CDMA*, TIA, 1997.
- [6] Razavilar, J., R. Liu, and S. Marcus, "Optimal rate control in wireless networks with fading channels," *Proc. IEEE VTC*, (1999), pp. 807-813.
- [7] Saraydar, C., N. Mandayam, and D. Goodman, "Efficient power control via pricing in wireless data networks," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 50(2002), pp. 291-303.
- [8] Shen Q. and W. Krzymien, "Optimal power assignment for maximum throughput in CDMA personal communications systems with integrated voice/data traffic," *Wireless Personal Communications*, vol. 8(1998), pp. 277-289.
- [9] Song L. and N. B. Mandayam, "Hierarchical SIR and rate control on the forward link for CDMA data users under delay and error constraints," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19(2001), 1871-1882.
- [10] TIA/EIA/IS-2000.2A, *Physical Layer Standard for CDMA2000 Spread Spectrum Systems*, Telecommunication Industry Association, 2002.
- [11] Viterbi, *CDMA: Principles of Spread Spectrum Communications*, Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [12] Zorzi, M., R. Rao, and L. Milstein, "Error statistics in data transmission over fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46(1998), pp. 1468-1477.