

멀티셀 CDMA 데이터 사용자를 위한 순방향 링크에서의 2계층 전송출력/전송률 할당체계

장근녕^{1*} · 이기동²

¹연세대학교 경영학과 / ²University of British Columbia

Two-Level Power and Rate Allocation Scheme on the Forward Link for Multicell CDMA Data Users

Kun-Nyeong Chang¹ · Ki-Dong Lee²

¹Dept. of Business Administration, Yonsei University Wonju Campus, Wonju, 220-710

²Dept. of Electrical & Computer Engineering, University of British Columbia, Canada

In this paper, an optimal power and rate allocation model is mathematically formulated on the forward link of multicell CDMA mobile systems. The model maximizes total utility considering data rates and fairness among cells under delay and PRER (Post RPL Error Rate) constraints. The two-level power and rate allocation scheme is suggested to solve the proposed model. Experimental results show that the proposed scheme provides a good solution in a fast time.

Keywords: power and rate allocation, CDMA, forward link

1. 서론

인터넷 접속 등과 같은 멀티미디어 데이터 전송에 대한 수요가 증가할 것으로 예상되는 차세대 이동통신시스템에서는 순방향 링크(forward link)가 시스템 전체의 용량을 결정하는 데 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_o ; 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_o , 데이터 전송률 등에 대한 제어 체계 연구가 많이 이루어져오고 있다(Jeong and Jeon, 1997; Razavilar *et al.*, 1999; Shen and Krzymien, 1998; TIA/EIA/IS-2000.2A, 2002). 그런데

이들 연구는 데이터 사용자에게 대한 QoS(Quality of Service)를 최소 E_b/N_o (또는 SIR; signal-to-interference ratio) 요구 사항만으로 특정화하거나 에러가 발생한 프레임을 무한정 재전송한다고 가정하고 있어 음성과 차이가 있는 데이터의 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다.

이러한 점을 보완하기 위해 Song and Mandayam(2001)은 데이터 사용자에게 대한 QoS를 음성과 차별화하여 여러 가지 요소로 특정화하고, 에러 프레임의 재전송 횟수를 지연 허용 정도와 결부시켜 제한하는 보다 실제적인 CDMA 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 여기에서는 CDMA 시스템의 순방향 링크를 대상으로 지연 및 PRER(Post RLP(Radio Link Protocol) Error Rate) 제약과 전송출력 제약하에서 데이터 전송률과 형평성(fairness)을 반영한 총효용(total utility)을 최대화하기 위한 각 사용자의 E_b/N_o 목표값 및 데이터 전송률 할당 체계를 제시하고 있다. 이 연구에서는 각각의 세트별로 개별적으로 최적

이 논문은 2003학년도 연세대학교 학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

* 연락저자 : 장근녕 교수, 220-710 강원도 원주시 흥업면 매지리 234 연세대학교 원주캠퍼스 경영학과 Fax : 033-763-4324,

E-mail : knchang@dragon.yonsei.ac.kr

2005년 2월 접수; 2005년 6월 수정본 접수; 2005년 7월 게재 확정.

E_b/N_o 목표값 및 데이터 전송률을 결정하고 있다. 그런데, 최적화 관점에서 볼 때 다수의 셀을 동시에 고려하여 각 기지국의 총평균 전송출력(total average power)과 각 사용자에 대한 E_b/N_o 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 제약하에서 데이터 사용자의 데이터 전송률과 셀 간 형평성을 반영한 총 효율을 최대화하기 위한 수리 모형을 정형화한다. 지연에 대한 제약은 재전송 횟수를 제한하는 형태로 단순화하여 모형에 반영한다. 이 모형을 통해 총 효율을 최대화하는 각 기지국의 총 평균 전송출력과 각 사용자의 E_b/N_o 목표값 및 데이터 전송률 할당 체계를 얻을 수 있다. 또한, 수립된 모형을 보다 단순화된 형태로 바꾸고, 빠른 시간 내에 해결하여 그 결과를 실시간으로 활용할 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제시한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 분석 대상이 되는 CDMA 시스템의 모형을 설명한다. 3장에서는 최적 전송출력/전송률 할당 모형을 수리적으로 정형화하고, 빠른 시간 내에 해결할 수 있는 보다 단순화된 형태로 바꾼다. 4장에서는 실시간으로 활용 가능한 2계층 전송출력/전송률 할당 체계를 제시한다. 5장에서는 실험을 통해 제시한 할당 체계의 성능을 분석하고, 6장에서는 연구내용을 요약한다.

2. 시스템 모형

본 논문은 순방향 링크에서의 데이터 전송이 <Figure 1>과 같이 데이터 세그먼트(data segment, 다수의 프레임(frame)으로 구성)과 프레임 단위로 이루어지고, 모든 데이터 사용자의 데이터 전송이 세그먼트와 프레임 단위로 동기화되는 CDMA 시

스템을 대상으로 한다(Song and Mandayam, 2001). 기지국으로부터 받은 프레임에 에러가 발생했을 경우, 이동국은 역방향 링크(reverse link)의 제어 채널을 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 20 ms이고 제어 프레임의 길이가 5ms 이므로, 트래픽 프레임 한 단위의 지연만으로 재전송이 이루어진다(Song and Mandayam, 2001; TIA/EIA/IS-2000.2A, 2002). 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 프레임의 j 번째 전송(2 이상은 재전송임)에 대한 E_b/N_o 목표값 $\gamma_{ij}(j=1, \dots, M)$ 는 세그먼트 단위로 결정된다.

CDMA 시스템에서 데이터 전송률은 가변 확산 및 코딩(variable spreading and coding)과 멀티코드(multicode) 등을 통해 조정된다(Nanda *et al.* 2000). IS-95B 기반 CDMA 시스템에서는 멀티코드를 통해 데이터 전송률 조정이 이루어지고, WCDMA와 cdma2000에서는 가변 확산 및 코딩을 통해 데이터 전송률 조정이 이루어진다.

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

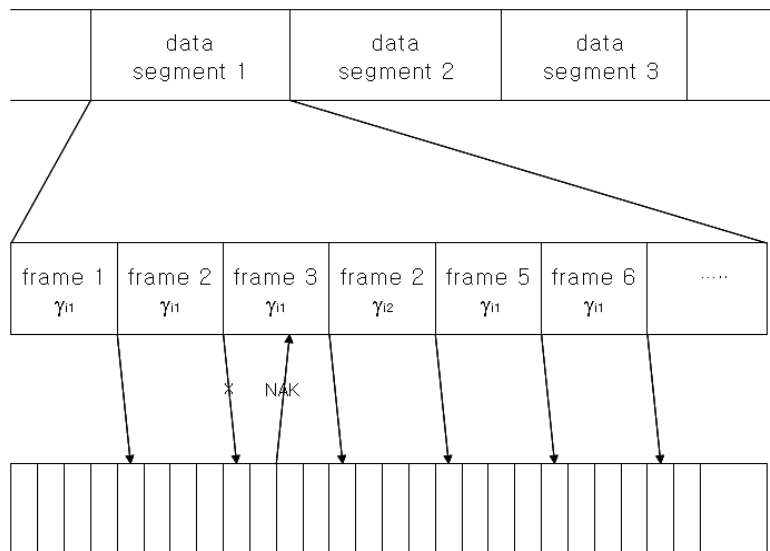


Figure 1. Data Transmission Model.

처리량과 형평성을 동시에 반영하기 위한 효용함수에 대한 연구가 유선 통신 및 무선 통신 분야에서 다양하게 이루어져 왔다(Goodman and Mandayam, 2000, Saraydar *et al.*, 2002, Song and Mandayam, 2001). 본 연구에서는 셀 k 에 대한 효용함수 $U^k(R^k)$ 를 셀 k 의 총 데이터 전송률 $R^k(= \sum_{i=1}^{N^k} R_i^k)$ 의 함수로 정의한다. 효용함수 $U^k(R^k)$ 는 단조 증가하는 오목함수라고 가정한다. $U^k(R^k)$ 가 오목함수이므로 낮은 데이터 전송률에 더 높은 페널티(penalty)를 부여하게 되고, 따라서 셀 간 형평성을 반영하게 된다. $U^k(R^k)$ 의 형태를 조정함으로써 시스템 전체의 데이터 전송률과 셀 간 형평성 간의 트레이드오프(tradeoff) 관계에 변화를 줄 수 있다.

E_b/N_o 목표값 γ_{ij} 는 이동국에서 결정되고, 이동국은 이 목표값을 충족시킬 수 있을 정도로 전송출력을 조정하도록 하는 출력 제어 정보를 기지국으로 보낸다. 본 논문에서는 시스템에서 사용되는 전송출력 제어 알고리즘을 이용하여 E_b/N_o 목표값 γ_{ij} 를 달성하도록 전송출력을 제어할 수 있다고 가정한다(Herdtner and Chong, 2000; Song and Mandayam, 2001). 이동국은 순방향 링크 채널 정보에 기초하여 미리 정한 프레임 에러 성능을 달성할 수 있도록 γ_{ij} 를 결정한다. 채널 정보는 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(Kumar *et al.*, 1997; Song and Mandayam, 2001).

3. 최적 전송출력/전송률 할당 모형

여기에서는 데이터 사용자의 데이터 전송률과 셀 간 형평성을 고려한 총효용을 최대화하는 각 기지국의 총 평균 전송출력과 각 사용자의 E_b/N_o 목표값 및 데이터 전송률을 구하기 위한 모형을 정형화한다. 제약식으로는 순방향 링크에서의 총평균 전송출력이 한계값 C 이내라야 한다는 것과 각 데이터 사용자의 PRER이 한계값 ϵ_0 이내라야 한다는 것이 고려된다.

먼저, 최적 전송출력/전송률 할당 모형의 목적식은 총효용 $\sum_{k=1}^N U^k(R^k) = \sum_{k=1}^N U^k(\sum_{i=1}^{N^k} R_i^k)$ 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_o , X_i^k ,는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 P_i^k 는 셀 k 내 사용자 i 에 대한 평균 전송출력을 나

타내고, h_i^{kl} 은 셀 k 내 사용자 i 의 셀 l 로부터의 평균 경로이득(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 유효하다(Viterbi, 1995). 식 (1)로부터 다음의 식을 구할 수 있다.

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

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.

$$\sum_{i=1}^{N^k} P_i^k = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{R_i^k X_i^k}{W} \frac{I_i^k}{h_i^{kk}}}{1 - \frac{1}{p^k} \sum_{i=1}^N \frac{R_i^k X_i^k}{W} \sum_{l=1}^N \frac{h_i^{kl}}{h_i^{kk}} p^l} \quad (3)$$

여기서 $p^k = \sum_{i=1}^{N^k} P_i^k / \sum_{i=1}^{N^1} P_i^1$ 은 기준 셀(셀 1이라고 가정) 기지국의 총 평균 전송출력에 대한 셀 k 기지국의 총 평균 전송출력의 비율을 나타낸다.

한편 순방향 링크에서의 총 평균 전송출력이 한계값 C 이내여야 하므로 $\sum_{i=1}^{N^k} P_i^k \leq C, \forall k$ 를 만족해야 한다. 그런데 $\sum_{i=1}^{N^k} P_i^k \leq C, \forall k$ 는 $\sum_{i=1}^{N^k} P_i^k = s p^k C, \forall k$ (단, $0 \leq s \leq \min\{1, 1/p^k, \forall k\}$)로 변형할 수 있다. 이제 식 (3)은 다음의 식 (4)로 바뀐다.

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

여기서 $Z_i^k(p, s) = \frac{1}{s p^k} \frac{I_i^k + C \sum_{l=1}^N h_i^{kl} \frac{p^l}{p^k}}{W h_i^{kk}}$ 이다.

$\sum_{i=1}^{N^1} P_i^1 = s p^1 C = sC$ 이고, 따라서 s 는 총 평균 전송출력 한계값 C 에 대한 셀 1 기지국의 실제 출력 비율을 의미한다. $s p^k$ 는 총 평균 전송출력 한계값 C 에 대한 셀 k 기지국의 실제 출력 비율을 의미한다.

한편, X_i^k 는 E_b/N_o 목표값 γ_{im}^k 와 다음과 같은 관계가 있다(Song and Mandayam, 2001).

$$X_i^k = \sum_{m=1}^M \gamma_{im}^k q_{im}^k \quad (5)$$

여기서 γ_{im}^k 는 셀 k 의 사용자 i 가 이미 $m-1$ 번 전송한 프레임을 m 번째 전송할 때의 E_b/N_o 목표값을 나타내고, q_{im}^k 는 셀 k 의 사용자 i 에게 전송되는 프레임이 $m-1$ 번 전송된 프레임일 확률을 나타낸다. q_{i1}^k 는 사용자 i 에게 전송되는 프레임이 이전에 전송되지 않은 프레임일 확률이다. q_{im}^k 는 마코

프 체인 분석을 통해 다음과 같이 결정된다(Song and Mandayam, 2001).

$$q_{im}^k = \frac{\prod_{i=1}^{m-1} f_i(\gamma_{ii}^k)}{1 + \sum_{j=1}^{M-1} \prod_{i=1}^j f_i(\gamma_{ij}^k)} \quad (6)$$

마지막으로, 각 데이터 사용자의 PRER이 한계값 ε_0 이내 라야 한다는 제약은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$PRER_i^k = \prod_{m=1}^M f_i(\gamma_{im}^k) \leq \varepsilon_0 \quad (7)$$

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 다음의 식을 만족한다고 가정한다.

$$\prod_{m=1}^M f_i(\gamma_{im}^k) < \varepsilon_0 < \prod_{m=1}^M f_i(\gamma_{im}^k), \forall i \quad (8)$$

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

$$(PRA) \quad \text{Max} \sum_{k=1}^N U^k(R^k) \quad (9)$$

$$s. t. \sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(p, s) X_i^k R_i^k = C, \forall k \quad (10)$$

$$\prod_{m=1}^M f_i(\gamma_{im}^k) \leq \varepsilon_0, \forall k, i \quad (11)$$

$$\gamma_{\min} \leq \gamma_{im}^k \leq \gamma_{\max}, \forall k, i, m \quad (12)$$

$$R_{\min} \leq R_i^k \leq R_{\max}, \forall k, i \quad (13)$$

$$p_L \leq p^k \leq p_U, \forall k \quad (14)$$

$$0 \leq s \leq \min\{1, \frac{1}{p^k}, \forall k\} \quad (15)$$

여기서 $R^k = \sum_{i=1}^{N^k} R_i^k$ 이고, R_{\min} 과 R_{\max} 는 각 사용자의 데이터 전송률의 하한값과 상한값을 나타내고, p_L 과 p_U 는 p^k 값의 하한값과 상한값을 나타낸다.

최적 전송출력/전송률 할당 모형 PRA는 비선형 계획 문제(nonlinear programming problem)로, 빠른 시간 내에 좋은 해를 구하는 것이 어렵다. 따라서 우선 PRA를 좀더 풀기 쉬운 형태로 바꾸는 과정이 필요하다.

먼저, $\prod_{m=1}^M f_i(\gamma_{im}^k) \leq \varepsilon_0$ (단, $\gamma_{\min} \leq \gamma_{im}^k \leq \gamma_{\max}$)를 만족하는 X_i^k 의 최대값 X_{\max}^k 는 식 (5)와 식 (8)에 의해 모든 사용자 i 에 대해서 γ_{\max} 이다. 이제 \bar{X}_i^k 를 $\prod_{m=1}^M f_i(\gamma_{im}^k) \leq \varepsilon_0$ (단, $\gamma_{\min} \leq \gamma_{im}^k \leq \gamma_{\max}$)를 만족하는 X_i^k 의 최소값이라 하고, $X_i^k = \bar{X}_i^k + Y_i^k$ 라 두면, PRA는 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\text{Max} \sum_{k=1}^N U^k(R^k) \quad (16)$$

$$s. t. \sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(p, s) (\bar{X}_i^k + Y_i^k) R_i^k = C, \forall k \quad (17)$$

$$R_{\min} \leq R_i^k \leq R_{\max}, \forall k, i \quad (18)$$

$$0 \leq Y_i^k \leq X_{\max} - \bar{X}_i^k, \forall k, i \quad (19)$$

$$0 \leq s \leq \min\{1, \frac{1}{p^k}, \forall k\} \quad (20)$$

$$p_L \leq p^k \leq p_U, \forall k \quad (21)$$

위의 문제는 Lemma 1에 의해 아래의 RPRA 로 바꿀 수 있다.

$$(RPRA) \quad \text{Max} \sum_{k=1}^N U^k(R^k) \quad (22)$$

$$s. t. \sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(p, s) (\bar{X}_i^k R_i^k + R_{\max} Y_i^k) = C, \forall k \quad (23)$$

(18)~(21)

Lemma 1. $\bar{R}_i^k, \forall i, k$ 와 $\bar{Y}_i^k, \forall i, k$ 를 PRA의 최적해라고 하자. 이 때 어떤 셀 k_1 에 $\bar{R}_{i_1}^{k_1} < R_{\max}$ 인 사용자 i_1 이 있으면, 셀 k_1 의 모든 사용자 i 에 대해서 $\bar{Y}_i^{k_1} = 0$ 이다. 즉, 어떤 셀 k_1 에 $\bar{Y}_{i_1}^{k_1} > 0$ 인 사용자 i_1 이 있으면, 셀 k_1 의 모든 사용자 i 에 대해서 $\bar{R}_i^{k_1} = R_{\max}$ 이다.

<증명> 셀 k_1 에 $\bar{R}_{i_1}^{k_1} < R_{\max}$ 인 사용자 i_1 이 있고, 어떤 사용자 i_2 에 대해서 $\bar{Y}_{i_2}^{k_1} > 0$ 라 하자. 이 때 제약식 (17)을 만족하면서 0보다 큰 $\bar{Y}_{i_2}^{k_1}$ 를 줄이고 R_{\max} 보다 작은 $\bar{R}_{i_1}^{k_1}$ 를 늘릴 수 있고, 따라서 목적식의 값을 증가시킬 수 있다. 이는 $\bar{R}_{i_1}^{k_1}$ 가 최적해라는 것과 모순된다. 따라서 어떤 셀 k_1 에 $\bar{R}_{i_1}^{k_1} < R_{\max}$ 인 사용자 i_1 이 있으면, 셀 k_1 의 모든 사용자 i 에 대해서 $\bar{Y}_i^{k_1} = 0$ 이다.

한편, $\gamma_{im}^k = \gamma_i^k, \forall m$ 이면, $\prod_{m=1}^M f_i(\gamma_{im}^k) \leq \varepsilon_0$ (단, $\gamma_{\min} \leq \gamma_{im}^k \leq \gamma_{\max}$)를 만족하는 X_i^k 의 최소값 \bar{X}_i^k 는 Lemma 2에 의해 $f_i^{-1}(\varepsilon_0^{1/M})$ 이다.

Lemma 2. $\gamma_{im}^k = \gamma_i^k, \forall m$ 이면, 셀 k 의 사용자 i 에 대해서 $\prod_{m=1}^M f_i(\gamma_{im}^k) \leq \varepsilon_0$ (단, $\gamma_{\min} \leq \gamma_{im}^k \leq \gamma_{\max}$)를 만족하는 X_i^k 의 최소값은 $f_i^{-1}(\varepsilon_0^{1/M})$ 이다.

<증명> $\gamma_{im}^k = \gamma_i^k, \forall m$ 이라고 하면, $X_i^k = \sum_{m=1}^M \gamma_{im}^k q_{im}^k = \gamma_i^k \sum_{m=1}^M q_{im}^k = \gamma_i^k$ 이다. $f_i(\cdot)$ 는 단조 감소하는 볼록함수이고, $\prod_{m=1}^M f_i(\gamma_{im}^k) = f_i(\gamma_i^k)^M \leq \varepsilon_0$ 이어야 하므로 $\gamma_i^k \geq f_i^{-1}(\varepsilon_0^{1/M})$ 이다. 따라서 X_i^k 의 최소값은 $f_i^{-1}(\varepsilon_0^{1/M})$ 이다.

RPRA를 통해 총효율을 최대화하는 최적해 $\bar{R}_i^k, \forall i, k, \bar{Y}_i^k, \forall i, k, \bar{p}^k, \forall k, \bar{s}$ 를 구할 수 있다. \bar{R}_i^k 는 셀 k 의 사용

자 i 에 할당되는 최적 데이터 전송률이고, $\overline{s}p^k C$ 는 셀 k 에 대한 최적 총 평균 전송출력이 된다. 한편, $X_i^k = \overline{X}_i^k + Y_i^k$ 이므로, $\overline{Y}_i^k, \forall i, k$ 를 이용하여 셀 k 의 사용자 i 에 대한 최적 평균 E_b/N_o 인 $\overline{X}_i^k, \forall i, k$ 를 구할 수 있다. 또한, $\gamma_{im}^k = \gamma_i^k, \forall m$ 이면 $\gamma_{im}^k = \gamma_i^k = X_i^k, \forall m$ 이므로, 셀 k 의 사용자 i 에 대한 m 번째 전송 시의 최적 E_b/N_o 목표값은 $\overline{\gamma}_{im}^k = \overline{X}_i^k$ 가 된다.

4.2 계층 전송출력/전송률 할당 체계

여기에서는 3장에서 제시한 최적 전송출력/전송률 할당 모형 $RPRA$ 의 좋은 해를 구하기 위한 2계층 전송출력/전송률 할당 체계(Two-level Power and Rate Allocation Scheme: TPRAS)를 제시한다. $RPRA$ 는 $p^k, \forall k$ 가 주어지면 빠른 시간 내에 쉽게 해결할 수 있는 문제가 되고(계층 1), 따라서 $RPRA$ 는 최적의 $p^k, \forall k$ 를 찾으면 쉽게 해결될 수 있다(계층 2). 이러한 점을 반영하여 $RPRA$ 의 최적해를 구하는 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Max}_p L(p) \\ & \text{s.t.} \quad (21) \end{aligned}$$

여기서 p 는 (p^1, \dots, p^N) 을 나타내고, $L(p)$ 는 아래의 문제 $RPRA(p)$ 의 최적 목적식 값을 나타낸다.

$$\begin{aligned} & (RPRA(p)) \\ & \text{Max}_{R,s} \sum_{k=1}^N U^k(R^k) \\ & \text{s.t.} \quad (18) - (20), (23) \end{aligned}$$

$p^k, \forall k$ 가 $\overline{p}^k, \forall k$ 로 주어졌다고 하자. 이때 $RPRA(\overline{p})$ 는 다음과 같은 방법으로 쉽게 해결될 수 있다. 여기서 \overline{p} 는 $(\overline{p}^1, \dots, \overline{p}^N)$ 을 나타낸다. 먼저 Lemma 3에 의해 $RPRA(\overline{p})$ 에서 s 의 최적값 $\overline{s} = \min\{1, \frac{1}{\overline{p}^k}, \forall k, s_{\max}^k, \forall k\}$ 이다. 여기

서 s_{\max}^k 는 $\sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(\overline{p}, s) \geq \frac{C}{X_{\max} R_{\max}}$ 를 만족하는 s 의 최대 값을 나타낸다.

Lemma 3. $RPRA(\overline{p})$ 에서 s 의 최적값 $\overline{s} = \min\{1, \frac{1}{\overline{p}^k}, \forall k, s_{\max}^k, \forall k\}$ 이다.

<증명> $I_i^k > 0$ 이면 s 가 증가할수록 $Z_i^k(\overline{p}, s)$ 는 감소하고, 따라서 R_i^k 를 증가시킬 수 있다. $I_i^k = 0$ 이면 s 는 어떤 값을 가져도 $Z_i^k(\overline{p}, s)$ 는 동일하다. 따라서 s 는 클수록 좋다. 다만, 제약식 (19)를 만족하는 R_i^k, Y_i^k 가 있어야 하므로, $R_i^k = R_{\max}, Y_i^k = X_{\max} - \overline{X}_i^k, \forall i$ 일 때 $\sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(\overline{p}, s) (\overline{X}_i^k R_i^k + R_{\max} Y_i^k) = \sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(\overline{p}, s) X_{\max} R_{\max} \geq C$ 를 만족하는 s 가 존재해야 한다. 따라서 $\sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(\overline{p}, s) \geq \frac{C}{X_{\max} R_{\max}}$ 를 만족하는 s 의 최대 값을 s_{\max}^k 라 하면, 제약식 (20)에 의해 $\overline{s} = \min\{1, \frac{1}{\overline{p}^k}, \forall k, s_{\max}^k, \forall k\}$ 이다.

s 의 값이 \overline{s} 로 주어지면 $RPRA(\overline{p})$ 는 N^k 개의 문제 $RPRA^k(\overline{p})$ 로 나누어진다.

$$\begin{aligned} & (RPRA^k(\overline{p})) \\ & \text{Max } U^k(R^k) \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(\overline{p}, \overline{s}) (\overline{X}_i^k R_i^k + R_{\max} Y_i^k) = C \\ & \quad R_{\min} \leq R_i^k \leq R_{\max}, \forall i \\ & \quad 0 \leq Y_i^k \leq X_{\max} - \overline{X}_i^k, \forall i \end{aligned}$$

$RPRA^k(\overline{p})$ 의 해는 다음과 같이 구해진다. 먼저, $\sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(\overline{p}, \overline{s}) \overline{X}_i^k R_{\max} \leq C$ 이면 $\overline{R}_i^k = R_{\max}, \forall i$ 이다.

$\sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(\overline{p}, \overline{s}) \overline{X}_i^k R_{\max} > C$ 이면 $\overline{Y}_i^k = 0, \forall i$ 이므로, 다음의

Procedure PRRPRA^k

Step 1. (최소 데이터 전송률 할당)

$$\begin{aligned} R_i^k &= R_{\min} \\ \overline{C} &= C - \sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(\overline{p}, \overline{s}) \overline{X}_i^k R_{\min} \end{aligned}$$

Step 2. (데이터 전송률 추가 할당)

Step 2.1. $S = \{1, 2, \dots, N^k\}$.

Step 2.2. $i^* = \arg \min_{i \in S} \{Z_i^k(\overline{p}, \overline{s}) \overline{X}_i^k\}$. $S = S - \{i^*\}$.

$$R_{i^*}^k = R_{i^*}^k + \min\{R_{\max} - R_{\min}, \frac{\overline{C}}{Z_{i^*}^k(\overline{p}, \overline{s}) \overline{X}_{i^*}^k}\}$$

$$\overline{C} = \overline{C} - \min\{R_{\max} - R_{\min}, \frac{\overline{C}}{Z_{i^*}^k(\overline{p}, \overline{s}) \overline{X}_{i^*}^k}\} \times Z_{i^*}^k(\overline{p}, \overline{s}) \overline{X}_{i^*}^k$$

Step 2.3 If $\overline{C} = 0$, then terminate, otherwise go to Step 2.2.

문제 $RRPRA^k(\bar{p})$ 를 풀면 해결된다. $RRPRA^k(\bar{p})$ 는 $U^k(\cdot)$ 가 단조 증가하는 오목함수이므로 프로시저 $PRRRA^k$ 에 의해 쉽게 해결된다.

$$\begin{aligned} & (RRPRA^k(\bar{p})) \\ & \text{Max } U^k(R^k) \\ & \text{s.t. } \sum_{i=1}^{N^k} Z_i^k(\bar{p}, \bar{s}) \bar{X}_i^k R_i^k \leq C \\ & \quad R_{\min} \leq R_i^k \leq R_{\max}, \forall i \end{aligned}$$

이제 $L(p)$ 를 최대화하는 $p^k, \forall k$ 값을 구하면 되는데, 아래의 프로시저 PRS(Power Ratio Search)를 이용하면 국지적 최적해(local optimum)를 구할 수 있다. 프로시저 PRS에서는 총 효율을 가장 많이 증가시키는 방향으로 p^k 를 주어진 값 α 만큼 조정한다. 이를 통해 더 이상 총 효율을 증가시킬 수 없을 경우, α 값이 충분히 작으면(즉, ϵ 보다 작으면) 프로시저를 종료하고 그렇지 않으면 α 값을 조정한다(즉, $\alpha = \alpha_0 \times \alpha$, 단 $0 < \alpha_0 < 1$). 프로시저 PRS에서 p_t^k 는 t 번째 이터레이션(iteration)에서의 p^k 값을 나타내고, p_t 는 (p_t^1, \dots, p_t^N) 을 나타낸다.

5. 실험 결과

여기에서는 제시한 모형의 성능을 분석한다. 먼저 효율함수는 다음과 같이 가정하였다.

$$U^k(R^k) = \frac{R^k}{N \cdot R_{\max}} - \left(\frac{R^k}{N \cdot R_{\max}} \right)^\rho$$

파라미터 $\rho \leq 0$ 이면 $U^k(R^k)$ 는 오목함수가 된다. ρ 는 셀 간 형평성을 반영하기 위해 사용된다. ρ 가 0이면 형평성을 전혀 반영하지 않고 데이터 전송률만을 고려하는 것이고, ρ 가 작을 수록 셀 간의 형평성을 많이 반영하는 것이 된다. FER 함수 $f_i(\cdot)$ 는 다음과 같이 가정하였다(Song and Mandayam, 2001).

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

여기서 F_i 는 페이드 마진(fade margin)을 나타내는 파라미터이다(Zorzi et al., 1998). 채널 간의 차이를 반영하기 위해 페이드 마진은 다음과 같이 정의하였다(Song and Mandayam, 2001).

$$F_i = \beta_i F_0 \gamma_i$$

여기서 F_0 는 상수이고, β_i 는 전송출력 제어의 효율성을 반영하는 파라미터이다(Garg and Sneed, 1996). 전송출력 제어가 완전한 경우에는 $\beta_i = 1$ 이다.

확산대역(spreading bandwidth)은 10MHz로 가정하였고, 데이터 사용자에게 대한 최소 데이터 전송률 R_{\min} 은 20,000bps로, 최대 데이터 전송률 R_{\max} 는 200,000bps로 가정하였다. E_b/N_0 목표값의 하한값 γ_{\min} 과 상한값 γ_{\max} 는 3dB과 19dB로 가정하였고, 총 평균 전송출력의 한계 C 는 8와트로 가정하였다. p_L 과 p_U 는 각각 0.2와 5로 가정하였다. RLP는 에러 프레임을 3번까지 전송한다고 가정하였고(즉, $M=3$), PRER은 5×10^{-6}

Procedure PRS

Step 1. (초기값 설정)

Initialize $\alpha, \alpha_0, \epsilon$, and $p_0^k, \forall k$. Set $t = 0$.

Step 2. (총효율 증가량 계산)

Substep 2.1. Compute $L(p_t)$ by procedure $PRRRA^k$.

Substep 2.2.

For ($k = 2; k \leq N; k++$) {

If ($p_t^k + \alpha \leq p_U$), then compute $L(p_t^1, \dots, p_t^k + \alpha, \dots, p_t^N)$ by procedure $PRRRA^k$ and set $\Delta_{+1}^k = L(p_t^1, \dots, p_t^k + \alpha, \dots, p_t^N) - L(p_t)$.

If ($p_t^k - \alpha \geq p_L$), then compute $L(p_t^1, \dots, p_t^k - \alpha, \dots, p_t^N)$ by procedure $PRRRA^k$ and set $\Delta_{-1}^k = L(p_t^1, \dots, p_t^k - \alpha, \dots, p_t^N) - L(p_t)$.

}

Step 3. (p^k 조정)

Substep 3.1. If ($\max \{\Delta_v^k, k = 2, 3, \dots, N, v = -1, 1\} \leq 0$), then go to Step 3.2, otherwise go to Step 3.3.

Substep 3.2. If ($\alpha \leq \epsilon$), then terminate, otherwise set $\alpha = \alpha_0 \times \alpha$ and go to Substep 2.2.

Substep 3.3. (k^*, v^*) = arg max $_{(k, v)} \{\Delta_v^k, k = 2, 3, \dots, N, v = -1, 1\}$.

For ($k = 1; k \leq N; k++$) { $p_{t+1}^k = p_t^k$ }.

Set $p_{t+1}^{k^*} = p_{t+1}^{k^*} + v^* \times \alpha$ and go to Substep 2.1 with replacing $t+1$ by t .

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. 이때, 평균 E_b/N_o 의 최소값, \bar{X}_i^k 는 Lemma 2에 의해 쉽게 계산할 수 있다.

2계층 전송출력/전송률 할당 체계 TPRAS(Two-level Power and Rate Allocation Scheme)에서, $\alpha, \alpha_0, \epsilon$ 은 각각 0.1, 0.1, $1E-10$ 을 가정하였고, $p_0^k = 1, \forall k$ 로 가정하였다.

먼저 4개의 셀로 구성되고 각 셀에 6명의 사용자가 있는 시스템(즉, $N=4, N^k=6, 2 \times 2$ 시스템)을 대상으로 실험을 실시하였다. 경로이득은 <Table 1>과 같이 가정하였고, 열잡음은 무시하였다. 각 셀에서 사용자 1이 기지국에 가장 가까이 있고, 사용자 6이 기지국에서 가장 멀리 떨어져 있다고 가정하였다.

Table 1. Link gain

User	1	2	3	4	5	6
h_i^{kk} (dB)	-20	-23	-26	-29	-32	-35
h_i^{kl} (dB)	$(k=2, l=3)$	randomly selected among -53, -56,				
	$(k=3, l=2)$	-59, -62, -65, and -68				
	otherwise	randomly selected among -38, -41, -44, -47, -50, and -53				

FER 함수의 F_0 는 7.5로 가정하였고, β_i 는 사용자 1, 2, 3, 4, 5, 6에 대해서 각각 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2로 가정하였다. 이때 평균 E_b/N_o 의 최소값, \bar{X}_i^k 는 <Table 2>와 같이 계산되어진다.

<Table 3>에는 TPRAS(Two-level Power and Rate Allocation Scheme)의 실험 결과가 정리되어 있다. ρ 값이 감소함에 따라 셀 간의 형평성은 증가하는 반면에, 시스템 전체의 총 데이터 전송률이 감소한다. 모든 문제에 대해 펜티엄 IV 3.2GHz에서

Table 3. Experimental Results for TPRAS

ρ	0	-1	-5	-10
Total utility	-1.8148911140	-5.1378098541	-80.1354109888	-1694.6380718828
p^1	1	1	1	1
p^2	0.691637	0.693734408	0.703849939	0.7067
p^3	0.3508081001	0.347559899	0.339631879	0.3294251943
p^4	0.5146401	0.5208284	0.535801	0.54009
Data rate	2622130.7	2622122.2	2622034.4	2621922.7
Cell 1	653926.2	653734.6	653239.4	653291.2
Cell 2	660062.4	660000.0	660000.0	660000.0
Cell 3	662015.6	661715.2	660948.4	660197.9
Cell 4	646126.5	646672.4	647846.6	648433.6

Table 2. Minimum Value of Average $E_b/N_o, \bar{X}_i^k$

User	1	2	3	4	5	6
\bar{X}_i^k	11.04	12.88	15.46	19.33	25.77	38.65

20 ms 이내에 해를 구했다.

<Table 4>에서는 SPRAS(Separate Power and Rate Allocation Scheme)와 TPRAS의 결과를 비교하고 있다. SPRAS는 모든 셀의 총 평균 전송출력이 동일하다고 가정한 경우이다(즉, $p^k = 1, \forall k$). $p^k = 1, \forall k$ 이면 모형 RPRAs는 각 셀별로 1개씩 총 N 개의 문제로 나누어지고, 나누어진 각각의 문제는 프로시저 PRRPRAs^k를 이용하여 쉽게 해결할 수 있다. 결국 SPRAS에서는 모든 셀을 동시에 고려하여 전송출력과 전송률을 결정하지 않고, 각 셀별로 개별적으로 전송출력과 전송률을 결정하게 된다. 표에서 보듯이 TPRAS의 총효용은 SPRAS에 비해 더 큰 것으로 나타났다.

Table 4. Comparison of SPRAS and TPRAS

ρ	SPRAS	TPRAS
0	-1.833781	-1.814891
-1	-5.227524	-5.13781
-5	-85.07876	-80.135411
-10	-1955.124	-1694.638072

<Table 5>에서는 TPRAS가 최적해(optimal solution)에 얼마나 가까운 해를 구할 수 있는지를 알아보기 위해 TPRAS를 통해 구한 해와 최적해를 비교하고 있다. 최적해를 구하는 것이 용이하도록 하기 위해서 2개의 셀로 구성된 시스템을 대상으로 실험하였다(즉, $N=2, N^k=6$). 최적해는 가능한 한 총 평균 전송출력의 비율(p^k)을 전부 대입해서 구했다(단, 10^{-10} 의 자리까지만 고려).

표에서 보듯이 총 평균 전송출력의 비율은 차이가 있지만 총 효용은 동일하다. 이러한 점을 감안해 볼 때, 본 논문에서 제시한 2계층 전송출력/전송률 할당체계 TPRAS를 통해 최적해에 근접한 해를 얻을 수 있다고 할 수 있다.

다음으로 보다 다양한 환경을 대상으로 실험을 실시하였다. 셀의 개수 (N)는 4 (2×2)개, 9 (3×3)개, 16 (4×4)개로 가정하였다. 각 셀 내의 사용자 수는 $N=4$ 인 경우는 5명~7명 중에서, $N=9,16$ 인 경우는 4명~6명 중에서 무작위로 선택하였다. 경로이득은 <Table 6>과 같이 가정하였고, 열잡음은 무시하였다.

Table 6. Distribution of link gain

h_i^{kk}		U(-20dB, -35dB)
h_i^{kl}	if $0 < d^{kl} \leq 1$	U(-38dB, -53dB)
	if $1 < d^{kl} \leq 7$	U(-53dB, -68dB)
	if $d^{kl} > 7$	0

d^{kl} : distance between cell k and cell l

$U(a,b)$: uniformly distributed over interval (a,b)

FER 함수의 F_0 는 7.5로 가정하였고, β_i 는 아래와 같이 가정하였다.

$$\beta_i = \begin{cases} 0.2 & \text{if } h_i^{kk} = -35dB \\ 0.2 + 0.5 * (35 + h_i^{kk}) / 15 & \text{if } -35dB < h_i^{kk} < -20dB \\ 0.7 & \text{if } h_i^{kk} = -20dB \end{cases}$$

<Table 7>에서는 SPRAS와 TPRAS의 결과를 비교하고 있다. 모든 경우에 대해서 TPRAS의 총 효용이 SPRAS의 총효용에 비해 더 크다는 것을 알 수 있다. TPRAS의 해는, N 이 4인 경우 펜티엄 IV 3.2GHz에서 20 ms 이내에 구했고, N 이 9인 경우 60ms 이내에 구했고, N 이 16인 경우 360 ms 이내에 구했다.

한편 모든 가능한 총 평균 전송출력의 비율(p^k)을 전부 대입하여 최적해를 구하는 경우, p_L 과 p_U 를 각각 0.2와 5로 가정하였으므로 10^{-10} 의 자리까지만 고려하더라도 $(4.8 \times 10^{10})^{N-1}$ 번 $RPRAS^k(\bar{p})$ 를 풀어야 한다. 따라서 N 이 조금만 크더라도 이러한 방법으로 최적해를 구하는 것은 매우 어렵다.

Table 5. Analysis on the performance of TPRAS

ρ	TPRAS			Optimal Solution		
	Total utility	p^1	p^2	Total utility	p^1	p^2
0	-0.8044350008	1	1.7974879990	-0.8044350008	1	1.7974878047
-1	-2.1501334806	1	1.7974978000	-2.1501334806	1	1.7974979522
-5	-25.0052024460	1	1.7975249999	-25.0052024460	1	1.7975251194
-10	-342.0445424539	1	1.7975517900	-342.0445424539	1	1.7975515986

Table 7. Comparison of SPRAS and TPRAS

N	ρ	SPRAS	TPRAS
4	0	-1.786207	-1.448898
	-1	-5.712445	-4.806292
	-5	-332.098316	-261.997569
	-10	-90139.765409	-51907.334598
9	0	-7.622305	-7.067194
	-1	-80.353321	-65.249060
	-5	-80014.164276	-600338.415197
16	-10	-8000000240	-60000059001
	0	-13.95	-13.664868
	-1	-149.768182	-142.284633
	-5	-1500017.819482	-1400231.427898
	-10	-15000000392	-14000046124

6. 결론

본 논문에서는 다수의 셀로 구성된 CDMA 시스템의 순방향 링크를 대상으로 지연 및 PRER 제약과 전송출력 제약하에서 데이터 전송률과 셀 간 형평성을 반영한 총 효용을 최대화하기 위한 각 기지국의 총 평균 전송출력과 각 사용자의 E_b/N_0 , 목표값 및 데이터 전송률을 결정하는 최적 전송출력/전송률 할당 모형을 제시하였다.

또한 제시한 최적 전송출력/전송률 할당 모형의 좋은 해를 빠른 시간 내에 구하기 위한 2계층 전송출력/전송률 할당 체계 (TPRAS)를 제시하였다. 실험 결과 TPRAS는 각 셀을 개별적으로 다루는 SPRAS에 비해 더 좋은 해를 구할 수 있는 것으로 나타났고, TPRAS가 최적해에 근접한 해를 제공할 수 있음을 확인할 수 있었다. 다만 본 논문에서는 수립한 모형에 대한 하나의 휴리스틱 알고리즘을 제시하였고, 따라서 더 빠른 시간 내에 더 좋은 해를 구할 수 있는 휴리스틱 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- Garg, V. and Sneed, E. (1996), Digital Wireless Local Loop System, *IEEE Communications Magazine*, 112-115.
- Goodman, D. and Mandayam, N. (2000), Power Control for Wireless Data, *IEEE Personal Communications Magazine*, 7, 48-54.
- Hardtner, J. and Chong, E. (2000), Analysis of a Class of Asynchronous Power Control Algorithms for Cellular Wireless Systems, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18, 436-446.
- Jeong, D. G. and Jeon, W. S. (1997), Rate Controlled Data Transmission for IS-95 CDMA Networks, *Proc. IEEE VTC*, 1567-1571.
- Kumar, S., Nanda, S., and Falconi, A. (1997), *Reverse Link Power Control Performance for High Speed Data over CDMA*, TIA.
- Nanda, S., Balachandran, K., and Kumar, S. (2000), Adaptation Techniques in Wireless Packet Data Service, *IEEE Communications Magazine*, 54-64.
- Razavilar, J., Liu, R., and Marcus, S. (1999), Optimal Rate Control in Wireless Networks with Fading Channels, *Proc. IEEE VTC*, 807-813.
- Saraydar, C., Mandayam, N., and Goodman, D. (2002), Efficient Power Control Via Pricing in Wireless Data Networks, *IEEE Transactions on Communications*, 50, 291-303.
- Shen Q. and Krzymien, W. (1998), Optimal Power Assignment for Maximum Throughput in CDMA Personal Communications Systems with Integrated Voice/Data Traffic, *Wireless Personal Communications*, 8, 277-289.
- Song L. and Mandayam, N. B. (2001), 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*, 19, 1871-1882.
- TIA/EIA/IS-2000.2A (2002), *Physical Layer Standard for CDMA 2000 Spread Spectrum Systems*, Telecommunication Industry Association.
- Viterbi, A. J. (1995), *CDMA: Principles of Spread Spectrum Communications*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Zorzi, M., Rao, R., and Milstein, L. (1998), Error Statistics in Data Transmission over Fading Channels, *IEEE Transactions on Communications*, 46, 1468-1477.