

Energy Optimal Transmission Strategy in CDMA System: Duality Perspective

Changyoon Oh *

Abstract

We investigate rate scheduling and power allocation problem for a delay constrained CDMA systems. Specifically, we determine an energy efficient scheduling policy, while each user maintains the short term (n time slots) average throughput. More importantly, it is shown that the optimal transmission strategy for the uplink is same as that of the downlink, called uplink and downlink duality. We then examine the performance of the optimum transmission strategy for the uplink and the downlink for various system environments.

▶ Keyword : Duality, Optimal Transmission, Energy

I. Introduction

최근 들어, 통신시스템 분야에서도 친환경을 고려한 Green Communications (녹색 통신) 이 화두에 오르고 있다 [1]. 지난 2010년 11월에 개최된 WWRF 25차 회의에서는 Green Radio 기술 개발에 대한 깊이 있는 논의가 이루어졌다. 이는 현재 통신 분야를 제외한 여러 분야에서 논의가 되고 있는 에너지 절감 기술에 대한 관심이 차세대 이동통신에서도 적용되는 추세로 이해할 수 있다. 차세대 이동통신 시스템에서도 친환경 개념의 도입을 통한 Green Cellular Network 개발이 필수적일 것으로 전망한다.

본 연구에서는 CDMA 상향링크와 하향링크 시스템에서 에너지 효율적인 전송률 스케줄링을 연구한다. 특히, 에너지 최적화된 전송률 스케줄링 방안을 상향링크와 하향링크의 쌍대성적 관점에서 살펴보고자 한다. 먼저, 상향링크와 하향링크의 에너지 소모 최적화 문제를 정의하고, 이에 대한 해법을 제시한다. 도출된 최적화 해법을 기반으로 상향링크와 하향링크의 에너지 최적화 스케줄링 해법은 서로 쌍대성적 특성을 가지고 있음을 증명한다.

II. Preliminaries

1. Related works

CDMA 시스템 전송률 스케줄링 문제는 이미 많은 논문에서 연구되어져 왔다. 일례로, [2]에서는 다중안테나를 기반으로 에너지 최적화 해법과 복잡도를 완화한 대안을 제시하고 있다. 하지만, [2]에서는 전송률을 최대화하고자 하는 것이 목적으로 각각의 사용자에 대한 fairness 는 고려하지 않고 있다. 이에 대한 대안으로 각각의 사용자에 대한 짧은 지연 요구사항을 만족하는 전송률 최적화 방안을 생각해 볼 수 있다. [3]에서는 각각의 사용자의 짧은 지연 요구사항을 만족하는 hybrid TDMA/CDMA 방안을 적용한 스케줄링 방안을 제안하였다. 그러나, 제안하는 방안은 경험적(Heuristic) 기법에 의존하고 있다. 이에 반해, [4]에서는 다중 코드(Multi code)를 기반으로 하는 CDMA 시스템에서 에너지 최적화 방안을 제시하고 있다. 최적화 방안의 목적은 주어진 시간 슬롯 동안에 각각의 사용자가 요구하는 총 전송량을 만족하면서 모든 사용자가 소모하는 에너지를 최소화하는 것이다. 특히, [4]에서는 상향링크에 대하여 그래프 이론을 기반으로 최단거리 기법을 적용하고 있다.

• First Author: Changyoon Oh, Corresponding Author: Changyoon Oh

*Changyoon Oh (changyoonoh@inhac.ac.kr), Dept. of Information & Communication Engineering, Inha Technical College

• Received: 2015. 06. 29, Revised: 2015. 07. 06, Accepted: 2015. 09. 02.

본 논문에서는 이를 하향링크에 대한 최적화 방안으로 확장한다. 주목할만한 점은 상향링크에서의 전송률 최적화 해법과 하향링크의 전송률 최적화 해법이 서로 쌍대성적 특징을 가진다는 점이다. 본 논문에서는 이러한 쌍대성적 특성을 수학적으로 증명한다.

III. The Proposed Scheme

K 개의 사용자와 하나의 AP(Access Point)가 양방향통신을 하는 CDMA 시스템을 고려하기로 한다. 사용자에서 AP로의 통신경로를 상향링크(Uplink), AP에서 각각의 사용자로의 통신경로를 하향링크(Downlink)라 칭한다. 각각의 사용자와 AP 사이의 채널 이득은 준고정(quasi-static)이라고 가정한다. 따라서, n 시간슬롯 구간동안의 짧은 시간에서는 사용자 i의 채널이득은 g_i 으로 고정된다. 각각의 사용자는 시간 슬롯 구간에서 코드의 개수를 가변적으로 적용하여 전송률을 변경할 수 있으며, 이 때 n 시간 슬롯 구간에서의 평균 전송율은 유지하도록 한다. 여기서 각각의 시간슬롯에서 적용되는 각각의 코드는 가상의 사용자로 해석할 수 있으며, 동일한 시간 슬롯에 적용되는 가상의 사용자끼리는 서로 간섭을 준다. 코드는 무작위로 생성된 랜덤시그니처 시퀀스(Random Signature Sequence)를 적용하기로 한다. 일례로, Fig 1 은 시간슬롯(time slot) l에서 각각의 사용자들이 여러개의 가상의 사용자(virtual user)를 전송하는 상향링크 시스템 모델을 보여주고 있다. 하향링크의 예도 상향링크와 마찬가지로 설명이 가능하며, 차이점은 전송의 주체가 사용자가 아니라 AP라는 점이다.

3.1. System Model (Uplink)

각각의 사용자가 전송하고 AP가 수신하는 상향링크에서의 신호대 잡음비를 정의하도록 한다. 시간슬롯 구간 l에서 사용자 i의 k번째 가상의 사용자의 신호대 간섭비(Signal to Interference Ratio)는 다음과 같이 정의된다.

$$SIR_{i,l} = N \cdot \frac{p_{i,k}g_i}{\sum_{j=1}^K \sum_{m=1}^{K_j} p_{j,m}g_j - p_{i,k}g_i + I} \quad (1)$$

여기서 I는 열잡음과 인접셀로부터의 간섭을 포함한 총 간섭량이며, N은 프로세싱 이득(Processing Gain)이다. $p_{i,l}$ 는 시간 슬롯 l에서 사용자 i의 k번째 가상 사용자의 송신전력 값이다. 채널이득의 크기는 $g_1 > g_2 > \dots > g_k$ 와 같이 가정하기로 한다. 즉, 낮은 인덱스를 가지는 사용자가 큰 채널 이득값을 가지는 것으로 가정한다. 시간 슬롯 l에서 사용자 i의 전송률인 $R_{i,l}$ 은 한 개의 코드에 해당하는 한 개의 가상의 사용자에 해당하는 전송률인 R_B 와 시간슬롯 l에서의 사용자 i의 가상의 사

용자 수인 $K_{i,l}$ 를 곱한 $R_{i,l} = K_{i,l} \times R_B$ 이다. 여기서, R_B 은 확산대역폭(Spreading Bandwidth)를 확산이득으로 나눈 값인 $\frac{W}{N}$ 이다. 따라서, n 시간슬롯 구간동안 사용자 i의 전송률의

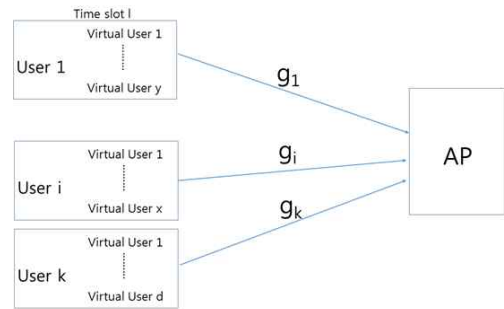


Fig. 1. System Model (Uplink)

합은 $\sum_{l=1}^n R_{i,l} = \sum_{l=1}^n K_{i,l} R_B$ 이다. 여기서, 가상의 사용자의 Target SIR은 공통으로 SIR_{target} 을 사용하기로 한다.

3.2. System Model (Downlink)

AP가 전송하고 각각의 사용자가 수신하는 하향링크에서의 신호대 간섭비를 정의하도록 한다. 시간슬롯 구간 l에서 사용자 i의 k번째 가상의 사용자의 신호대 간섭비(Signal to Interference Ratio)는 다음과 같이 정의된다.

$$SIR_{i,l} = N \cdot \frac{w_{i,k}g_i}{\sum_{j=1}^K \sum_{m=1}^{K_j} w_{j,m}g_j - w_{i,k}g_i + I} \quad (2)$$

$w_{i,l}$ 는 시간 슬롯 l에서 사용자 i의 k번째 가상 사용자의 송신전력 값이다. 식 (2)가 식 (1)와 비교해서 차이점은 간섭성분에 해당하는 분모에서 가상의 사용자의 채널이득이 모두 신호에 해당하는 분자에서의 채널이득 g_i 와 같다는 점이다.

3.3. Problem Formulation (Uplink)

n 시간슬롯에서 각각의 시간 슬롯구간 길이가 동일한 경우, 소모되는 총 전송에너지 최소화 문제는 소모되는 총 전력 최소화 문제와 같다. 따라서, 본 논문에서는 n 시간슬롯 구간 동안에 모든 사용자가 소모하는 총 송신전력을 최소화 하는 것을 목적으로 한다. 여기서, 각각의 사용자는 n 시간 슬롯구간 동안에 요구되는 전송률을 만족하여야 한다. 사용자 i는 평균적으로 각각의 시간슬롯 구간에서 $\sum_{l=1}^n \frac{K_{i,l} R_B}{n} = \bar{R}_i$ 의 전송률을 유지하여야 한다. 여기서 \bar{R}_i 는 사용자 i의 평균 전송률로 정의한

다. 상향링크 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\min \sum_{l=1}^n \sum_{i=1}^K \sum_{k=1}^{K_i} p_{i,kl} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } SIR_{i,kl} \geq SIR_{target} \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^n K_{il} = \frac{n\bar{R}_i}{R_B} \quad \forall i \quad (5)$$

$$p_{i,kl} \geq 0 \quad (6)$$

식 (4)은 각각의 가상의 사용자가 만족해야하는 신호대 간섭비를 나타내며, 식 (5)는 각각의 사용자가 만족해야하는 평균 전송률이다. 시간슬롯 l 에서 M_l 개의 가상사용자가 존재할 경우, i.e., $M_l = \sum_{i=1}^K K_{il}$, 신호대 간섭비인 식 (4)가 등식으로 성립할 때, 최소의 전력값을 가진다. 이 때 각각의 가상의 사용자는 동일한 수신전력값을 가지게 되고 수신 전력값은 다음과 같다.

$$q_i^* = \frac{\frac{I\gamma^*}{1+\gamma^*}}{1 - M_l \frac{\gamma^*}{1+\gamma^*}} \quad (7)$$

여기서 $\gamma^* = \frac{SIR_{target}}{N}$ 는 신호대 간섭비를 프로세싱이득 N 으로 정량화한 값이다. 식 (6)으로부터 송신전력값에 해당하는 수신전력값은 항상 양(positive)의 값, $q^* > 0$ 이 되어야 하므로, 이를 만족하는 조건은 $\left[\frac{1+\gamma^*}{\gamma^*} \right]$ 이다. 송신전력과 수신 전력값의 관계인 $p_{i,l}g_i = p_{i,l}g_i \dots = p_{i,K_l}g_i = q_i^*$ 를 이용하여 식 (3)을 재구성하면 다음과 같다.

$$\min \sum_{l=1}^n q_l^* \sum_{i=1}^K \frac{K_{il}}{g_i} \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \sum_{l=1}^n K_{il} = \frac{n\bar{R}_i}{R_B} \quad (9)$$

식 (9)에서 재구성한 최적화 문제는 만족하면서 단말들이 소모하는 전송에너지의 합을 최소화하는 전송률 벡터 $R = [K_{11}, K_{12}, \dots, K_{1n}, \dots, K_{K2}, \dots, K_{Kn}]$ 를 구하는 것이다. 사용자 i 는 K_{il} 만큼의 가상사용자를 시간슬롯 l 에 포함하고 있으며, 따라서 n 슬롯 구간동안에 총 $T_i = \sum_{l=1}^n K_{il} = \frac{n\bar{R}_i}{R_B}$ 만큼의 가상의 사용자를 스케줄링 하여야 한다.

3.4. Problem Formulation (Downlink)

하향링크 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\min \sum_{l=1}^n \sum_{i=1}^K \sum_{k=1}^{K_i} w_{i,kl} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } SIR_{i,kl} \geq SIR_{target} \quad \forall i \quad (11)$$

$$\sum_{l=1}^n K_{il} = \frac{n\bar{R}_i}{R_B} \quad \forall i \quad (12)$$

$$w_{i,kl} \geq 0 \quad (13)$$

3.5. Optimal Scheduling

이번 장에서는 참고문헌 [4]에서 얻은 상향링크 최적화 방안의 결과를 소개하기로 한다.

Proposition 1. The optimum policy schedules the virtual users in such a way that any virtual user with a lower channel gain is assigned to a time slot with a lighter load, i.e., a slot with smaller number of virtual users.

Proposition 1에 의하면 load 가 작은 (즉, 채널이득이 작은) 가상의 사용자들은 가상의 사용자수가 더 적은 시간슬롯에 할당함을 의미하며, load balancing 과 같은 개념이다. 따라서, 에너지 최적화를 위해서는 채널이득이 작은 가상의 사용자는 가상의 사용자수가 더 적은 시간 슬롯에 할당되어야 한다.

Proposition 2. For any given reordered virtual user sets, the optimum scheduling order of T virtual users is in the order of increasing channel gain, i.e.,

$$\underbrace{g_K, \dots, g_K}_{T_K} \underbrace{g_{K-1}, \dots, g_{K-1}}_{T_{K-1}}, \dots, \underbrace{g_1, \dots, g_1}_{T_1} \quad (14)$$

Proposition 2에 의하면 최적화 스케줄링을 하는 순서는 식 (14) 과 같이 먼저 채널이득 크기가 작은 순으로 나열하고 나서, 채널이득이 작은 가상의 사용자가 가상의 사용자가 더 적게 할당된 시간슬롯에 할당할지의 문제로 전환된다. 이러한 문제에 대한 해법은 참고문헌 [4]에서 이미 자세히 소개하고 있으며, 본 논문에서는 간단하게 요약하면 다음과 같다. 식 (14)에 서와 같이 K 개의 사용자로부터 얻은 $\sum_{i=1}^K T_i$ 개의 가상 사용자

로부터 Fig. 2와 같이 $\sum_{i=1}^K T_i = T$ 개의 스트링을 구성할 수 있다. 따라서, 최적화 문제는 T 개의 스트링을 시간슬롯 개수로 분할하는 문제이며, 이러한 문제는 그래프 이론(Graph Theory)을 기반으로 한 최단거리 기법(Shortest Path Algorithm)을 이용하여 구할 수 있다. 식 (8)과 식 (10)의 최적

화 문제는 소비하는 전송에너지를 최소화 되도록하는 분할문제(Partitioning Problem)인 식 (15)로 전환된다.

$$\arg \min_{\{s_1, \dots, s_n\}} \sum_{l=1}^n q_l \sum_{i \in s_l} \frac{1}{g_i} \quad (15)$$

하향링크 최적화 방안은 다음 장에서 설명되는 상향링크 전송 에너지를 최소화하는 전송률벡터와 하향링크 전송에너지를

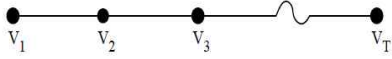


Fig. 2. A string constructed from the virtual users scheduling order

최소화하는 전송률벡터가 서로 쌍대성적 특성을 가지는 점을 기반으로 상향링크의 해법을 그대로 적용이 가능하다.

3.6. Duality

일반적으로 상향링크에서 필요한 전송률과 하향링크에서 요구하는 전송률이 같을 필요는 없다. 하지만, 본 논문에서는 상향링크와 하향링크에서 n 시간슬롯 구간동안에 요구하는 전송률 $\sum_{i=1}^n K_{il} = \frac{nR_i}{R_B}$ 이 같은 시스템(본 논문에서는 이러한 시스템을 ‘대칭 시스템’이라고 칭하기로 하자)에 대하여 상향링크 전송과정에서 소모하는 에너지와 하향링크에서 소모하는 전송 에너지를 살펴보고자 한다. 주목할만한 점은 대칭시스템에서 상향링크와 하향링크의 최적화 문제에 대한 해법이 동일한 전송률 벡터 $R = [K_{11}, K_{12}, \dots, K_{1n}, \dots, K_{k1}, \dots, K_{kn}]$ 를 가지는 쌍대성(Duality)적 특성을 가진다는 점이다. 다음의 Observation 1에서는 하나의 시간슬롯에서 사용자들이 소정의 전송률을 만족하는데 필요한 최소 전송에너지는 상향링크와 하향링크가 서로 같음을 설명하고 있다.

Observation 1. 시간슬롯 l 에서의 K 개의 사용자 전송률 벡터를 $[K_{1l}, K_{2l}, \dots, K_{kl}]$ 라고 할 때, 상향링크에서 소모되는 최소 전송전력과 하향링크에서 소모되는 최소 전송전력은 같다.

증명) 시간슬롯 l 에는 $k = \sum_{i=1}^K K_{il}$ 개의 가상의 사용자가 존재한다. 특히, 가상의 사용자 각각의 전력값을 p_1, \dots, p_k 라고 하자. 마찬가지로 가상의 사용자 각각의 채널이득을 g_1, \dots, g_k 라고 하자. 여기서, g_i 와 g_j 는 동일한 사용자로부터 생성된 가상의 사용자이면 $g_i = g_j$ 이다. 식 (1)에서 가상의 사용자 i 가 γ^* 의 신호대 간섭비 (SIR)를 가지도록 하면 다음과 같다.

$$\gamma^* = N \cdot \frac{p_i g_i}{\sum_{j \neq i} p_j g_j + I} \quad (16)$$

여기서, γ^* 는 요구하는 신호대 간섭비 SIR_{target} 를 나타낸

다. 모든 k 개의 가상의 사용자에게 식 (16)을 적용하고 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 1 & -\gamma^* & \cdot & -\gamma^* \\ -\gamma^* & 1 & -\gamma^* & -\gamma^* \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\gamma^* & -\gamma^* & -\gamma^* & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 g_1 \\ p_2 g_2 \\ \cdot \\ p_k g_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I}{N} \gamma^* \\ \frac{I}{N} \gamma^* \\ \cdot \\ \frac{I}{N} \gamma^* \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (17)은 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$[I - \gamma^* F] P = \gamma^* \frac{I}{N} \mathbf{1} \quad (18)$$

여기서, $P = [p_1 g_1, \dots, p_k g_k]$ 는 상향링크 수신전력 벡터이며, F 는 diagonal 성분이 0의 값이고 나머지는 1의 값을 가지는 정방행렬(Square Matrix)이다. 특히, 참고문헌 [5]에 의하면 상향링크의 전송 전력 벡터 P 는 역행렬 $[I - \gamma^* F]^{-1}$ 식 (18)의 양변에 곱해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P = \gamma^* [I - \gamma^* F]^{-1} \mathbf{1} = \gamma^* \frac{I}{N} A \mathbf{1} \quad (19)$$

여기서 A 는 symmetric 이다. 따라서, 시간슬롯 l 에서 상향링크에서 소모되는 전송전력의 합은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^k p_i = \gamma^* \frac{I}{N} \sum_{i=1}^k \frac{1}{g_i} \sum_{j=1}^k A_{ij} \quad (20)$$

다음은 시간슬롯 l 하향링크에서 소모되는 총 전송전력값을 구하는 과정이다. 하향링크에서의 가상의 사용자 i 에 대한 신호대 간섭비는 다음과 같다.

$$\gamma^* = N \cdot \frac{p_i g_i}{\sum_{j \neq i} p_j g_j} \quad (21)$$

하향링크에서의 신호대 간섭비인 식 (21)이 상향링크에서의 신호대 간섭비인 식 (16)과의 차이점은 간섭성분의 채널이득이 신호성분의 채널이득과 같다는 점이다. 가상의 사용자 i 의 하향링크 전송전력을 w_i 라 하자. 모든 k 개의 가상의 사용자에게 식 (8)을 적용하고 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 1 & -\gamma^* & \cdot & -\gamma^* \\ -\gamma^* & 1 & -\gamma^* & -\gamma^* \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\gamma^* & -\gamma^* & -\gamma^* & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ w_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I}{N g_1} \gamma^* \\ \frac{I}{N g_2} \gamma^* \\ \cdot \\ \frac{I}{N g_k} \gamma^* \end{bmatrix} \quad (22)$$

하향링크 전송전력 벡터를 $W = [w_1, \dots, w_k]$ 라 정의하고 채널이득의 역수를 취한 벡터를 $u = [\frac{1}{g_1}, \frac{1}{g_2}, \dots, \frac{1}{g_k}]$ 라 하면, 식 (22)를 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$[I - \gamma^* F] W = \gamma^* \frac{I}{N} u^T \quad (23)$$

하향링크 전송전력 벡터 W 는 식(23) 양변에 역행렬 $[I - \gamma^* F]^{-1}$ 를 곱하여 다음과 같이 얻어진다.

$$W = \gamma^* \frac{I}{N} [I - \gamma^* F]^{-1} u^T = \gamma^* \frac{I}{N} A u^T \quad (24)$$

따라서, 시간슬롯 l 에서의 총 소모전력은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^k w_i = \gamma^* \frac{I}{N} \sum_{i=1}^k \frac{1}{g_i} \sum_{j=1}^k A_{ij} \quad (25)$$

$$(20) \text{와 } (25) \text{이 같으므로, } \sum_{i=1}^k p_i = \sum_{i=1}^k w_i.$$

따라서, 상향링크에서 소모되는 최소 전송전력과 하향링크에서 소모되는 최소 전송전력은 같다.

다음은 **Observation 1**에서 얻은 결과를 n 개의 시간슬롯으로 확장하여 상향링크와 하향링크에서 최적의 총 전력량을 소모하는 전송률 벡터를 같음을 보여준다.

Observation 2. $R = [K_{11}, K_{12}, \dots, K_{1n}, \dots, K_{K1}, \dots, K_{Kn}]$ 에서 임의의 K 개 사용자의 n 시간슬롯구간 동안에서 상향링크에서 소모되는 최소 전송전력과 하향링크에서 소모되는 최소 전송전력은 같다. 즉,

$$\sum_R p_i = \sum_R w_i \quad (26)$$

증명 **Observation 1**에 의하여 각각의 시간슬롯 l ($l = 1, 2, \dots, n$)에서 소모되는 상향링크와 하향링크의 최소 전송전력은 같으므로, n 시간슬롯 구간동안에 소모한 상향링크와 하향링크의 총 전송전력 역시 같다.

Proposition 3. 상향링크에서 최소의 전력을 소모하는 전송률 벡터(R_{up})와 하향링크에서 최소의 전력을 소모하는 전송률 벡터(R_{down})는 같다. 즉, $R_{up} = R_{down}$.

증명 모순(Contradiction) 증명법을 이용하기 위하여, 먼저 **Proposition 1** 이 사실이 아니라고 가정하면, ‘상향링크에서 최소의 전력을 소모하는 전송률 벡터 R_{up} 와 하향링크에서 최소의 전력을 소모하는 전송률 벡터 R_{down} 가 같지 않다’ 라고 할 수 있다. 즉,

$$R_{up} \neq R_{down}. \quad (27)$$

Observation 2 의 식 (26) 에 의하여

$$\sum_{R_{up}} p_i = \sum_{R_{up}} w_i \quad (28)$$

$$\sum_{R_{down}} p_i = \sum_{R_{down}} w_i \quad (29)$$

즉, 전송률 벡터 R_{up} 에 대한 상향링크 전송에너지의 합과 하향링크 전송에너지의 합은 같으며, 전송률 벡터 R_{down} 에 대한 상향링크 전송에너지의 합과 하향링크 전송에너지의 합은 같아야 한다. R_{up} 가 상향링크 최적의 전송률 벡터이므로 R_{up} 가 아닌 다른 전송률 벡터를 상향링크에 적용하는 경우보다 R_{up} 를 상향링크에 적용하게 되면 더 적은 전송에너지를 소모하게 된

다. 특히, R_{up} 와 R_{down} (여기서, 가정 (26)에 의하여 $R_{up} \neq R_{down}$)을 상향링크에 적용하여 전송에너지를 비교하면,

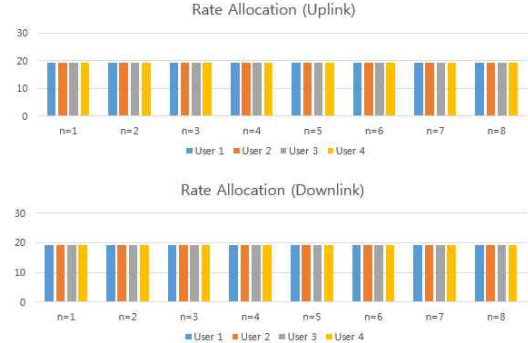


Fig. 3. Rate Allocation for equal distance case

$$\sum_{R_{up}} p_i < \sum_{R_{down}} p_i \quad (30)$$

마찬가지로, R_{down} 가 하향링크 최적의 전송률 벡터이므로, R_{down} 가 아닌 다른 전송률 벡터를 하향링크에 적용하는 경우보다 R_{down} 를 하향링크에 적용할 경우 더 적은 전송에너지를 소모하게 된다. 특히, R_{up} 와 R_{down} (여기서, 가정 (26)에 의하여 $R_{up} \neq R_{down}$)을 상향링크에 적용하여 전송에너지를 비교하면,

$$\sum_{R_{down}} w_i < \sum_{R_{up}} w_i \quad (31)$$

(29),(30),(31)에 의하여 식 (32)를 얻는다.

$$\sum_{R_{up}} p_i < \sum_{R_{down}} p_i = \sum_{R_{down}} w_i < \sum_{R_{up}} w_i \quad (32)$$

식(28)에 의하면, 전송률 벡터 R_{up} 에 대하여 $\sum_{R_{up}} p_i = \sum_{R_{up}} w_i$ 의 등식이 성립되어야만 한다. 하지만, 식(32)에 의하면 $\sum_{R_{up}} p_i < \sum_{R_{up}} w_i$ 이다.

즉, 식 (27)에서 가정한 $R_{up} \neq R_{down}$, ‘상향링크에서 최소의 전력을 소모하는 전송률 벡터 R_{up} 와 하향링크에서 최소의 전력을 소모하는 전송률 벡터 R_{down} 가 같지 않다’는 식 (28)에 모순된다. 따라서, 상향링크에서 최소의 전력을 소모하는 전송률 벡터 R_{up} 와 하향링크에서 최소의 전력을 소모하는 전송률 벡터 R_{down} 는 같아야 한다. 즉, $R_{up} = R_{down}$.

IV. Numerical Examples

확산 대역폭(Spreading Bandwidth) $W=1.228MHz$ 와 프로세싱이득(Processing Gain) $N=128$ 을 가지는 시스템을 고려한다. 동일채널 간섭은 $I=10^{-13}$ 이며, Target SIR 은 $SIR_{target} = 5$ 으로 설정한다. 프레임 사이즈는 $n=8$ 이며, 각

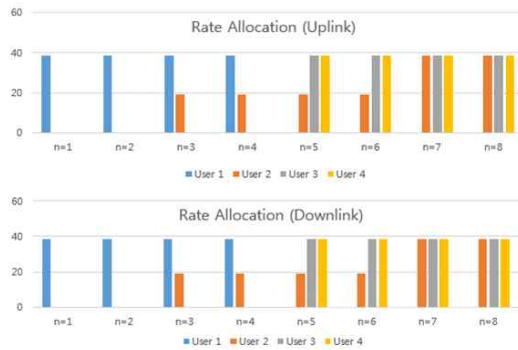


Fig. 4. Rate Allocation for Non equal distance case

각의 사용자의 채널이득은 $g_i = \frac{r_i}{d_i^\alpha}$ 으로 모델링한다. 여기

서, d_i 는 AP 와 사용자 i 사이의 거리이며, r_i 는 variance $8dB$ 를 가지는 log-normal fading 이다. 각각의 사용자가 선택할 수 있는 전송률은 $R = 9.6Kbps, 19.2Kbps, 28.8Kbps, 38.4Kbps$ 이며, 평균 전송률은 $\bar{R} = 19.2Kbps$ 이다.

Fig 3. 은 $K=4$ 명의 사용자와 AP 사이의 거리가 크게 차이가 나지 않는 경우(equi distance case)에 대한 상향링크와 하향링크의 최적화 전송률 할당(Rate Allocation) 벡터 결과이다. Fig 3.에서 세로축은 각각의 시간슬롯(n)에서의 전송률을 나타내며, 가로축은 시간슬롯(n=1,2,...,8)을 나타낸다. 각각의 시간슬롯에는 사용자(User 1, User 2, User 3, User 4)의 전송률이 포함된다. Proposition 3에서 증명하였듯이 상향링크 최적화 전송률 벡터와 하향링크 최적화 전송률 벡터는 동일한 값을 가진다. 즉, equidistance 의 경우에는 동일한 숫자만큼의 가상의 사용자를 시간슬롯에 할당하는 기법이 최적화 기법의 대안이 될 수 있음을 알 수 있다.

Fig 4. 은 $K=4$ 명의 사용자와 AP 사이의 거리가 차이가 나는 경우(Non equidistance) 에 대한 상향링크와 하향링크의 최적화 전송률 벡터 결과이다. Fig 4. 에서는 예를 들어 시간슬롯 n=1,2에서는 User 1 만 전송하기 때문에 나머지 사용자인 User 2, User 3, User 4의 전송률은 표시되지 않았다. 결과에서 볼 수 있듯이, 상향링크 최적화 전송률 벡터와 하향링크 최적화 전송률 벡터는 동일한 값을 가진다. 사용자마다 채널 이득값이 크게 차이가 나는 경우에는 채널이득값이 작은 가상의 사용자가 가상의 사용자 숫자가 적게 할당된 시간슬롯에 할당되도록 하는 것이 에너지 최적화 기법이다.

IV. Conclusions

본 연구에서는 CDMA 상향링크와 하향링크 시스템에서 에너지 효율적인 전송률 스케줄링을 살펴보았다. 특히, 에너지 최적화된 전송률 스케줄링 방안을 상향링크와 하향링크의 쌍대성적 관점에서 살펴보았으며, 상향링크 최적화 전송률 할당벡터가 하향링크 최적화 전송률 할당 벡터와 동일한 결과를 가짐을

수학적으로 증명하고, 이에 대한 예시를 실험을 통하여 보여주었다. 에너지 최적화 관점에서 상향링크와 하향링크가 동일한 전송률 벡터를 가지는 성질은 AP와 단말사이의 채널이득이 동일한 경우, 차이가 나는 경우 모두 해당됨을 실험 예제를 통해 확인하였다. 특히, 상향링크와 하향링크가 쌍대성적 특징을 보인다는 점은 다음과 같은 실용적인 측면을 살펴볼 수 있다. 예를 들어, 하향링크의 최적화 알고리즘을 추가적으로 적용할 필요없이 상향링크에서 도출한 결과를 바로 하향링크에 적용하여 최적화 알고리즘의 계산과정을 단순화할 수 있는 장점을 가진다는 점이다.

REFERENCES

- [1] Z. Hasan et al., "Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 13, no. 4, p534-540, Fourth Quarter 2011.
- [2] Il-Min Kim, R. Yim, and H. Chaskar, Optimum scheduling for smart antenna systems in Rayleigh fading channels, IEEE Transactions on Communications, 53(7):1210 - 1219, July 2005.
- [3] Tao Shu and Marwan Krunz. Energy-efficient power/rate control and scheduling in hybrid TDMA/CDMA wireless sensor networks. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, Vol. 53 Issue 9, 1395-1408. June 2009.
- [4] Changyoon Oh, Energy Optimized Transmission Strategy in CDMA Reverse Link: Graph Theoretic Approach, Vol. 6, 2015.
- [5] R. W. Nettleton and W. Alavi, Power control for a spread spectrum cellular mobile radio system. In Proceedings of the 33rd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'83), pp.242-246, Toronto, Canada, May 1983.

Authors



Changyoon Oh received the B.S degree in Electrical Engineering from Yonsei University in 1999 and M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Pennsylvania State University, U.S.A in 2001 and 2005, respectively.

Dr. Oh joined the faculty of the Department of Information & Communication Engineering at Inha Technical College, Incheon, Korea, in 2011. Before joining the Inha Technical College, he worked at Samsung Electronics in the area of Wireless Standards as a senior research engineer. He is interested in Physical & MAC Lay Issue in Wireless Standards.