

# 하향링크 패킷 스케줄링 기술

박대영  
인하대학교

## 요약

기지국이 셀 내에 있는 여러 사용자에게 신호를 전송하는 하향링크에서 셀 전체 채널 용량을 달성하기 위해서는 채널 상태가 가장 좋은 사용자에게만 전송해야 한다. 무선 페이딩 채널에서 여러 사용자 중에 채널이 좋은 사용자를 선택하면, 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 본 고에서는 이런 다중 사용자 다이버시티를 얻으면서도 사용자 간에 공평하게 자원을 할당하는 여러 방식에 대해서 알아본다.

## I. 서론

무선 이동 통신은 음성 위주의 통신 서비스에서 데이터 통신 서비스로 발달하여 왔다. 특히 멀티미디어 서비스가 발달함에 따라 고속의 멀티미디어 데이터를 무선으로 여러 사용자에게 전송하는 수요가 증가하였다. 이러한 고속의 데이터 전송을 위해서 특히 다중 안테나를 이용한 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 송수신 기법이나 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)과 같은 방식들을 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그런데, 이러한 방식들은 주로 일대일 통신 기반의 물리계층(physical layer) 방식들이다.

하향링크 페이딩 채널에서 여러 사용자의 채널이 서로 독립적으로 변한다면, 채널이 제일 좋은 사용자를 선택하여

전송을 하는 방식이 채널 용량을 달성하는 방식이다. 일대일 통신에서 이러한 방식을 사용하면 채널이 랜덤하게 변하는 것을 소극적으로 회피하는 것이 아니라 적극적으로 이용하게 되어서, 기존의 통신 시스템 설계의 패러다임이 바뀌게 된다. 따라서 물리계층 만에서의 최적화보다는 링크계층(link layer)등 상위 계층과 통합하여 최적화하는 cross-layer 기반의 효율적인 무선 자원 관리가 매우 중요하다[1].

하향링크에서 각 사용자가 자신이 받을 수 있는 전송률에 대한 정보를 기지국으로 피드백하고, 기지국이 이 정보를 바탕으로 다음 시간에 전송할 사용자를 선택하는 방식에 대해서 살펴본다. 사용자의 채널이 통계적으로 다른 특성을 가질 때에 사용자 간에 공평한 전송을 하기 위하여 사람의 본성적인 특성으로 예시하며 설명하도록 한다. II장에서는 셀룰라 통신 시스템의 하향링크에서 사용자 전송률의 총합을 최대화시키는 최적의 전송 방식에 대해서 살펴본다. III장에서는 사용자간에 여러 가지 측면에서 공평하게 자원을 할당하는 방식들을 기술한다. 마지막으로 IV장에서 결론을 맺는다.

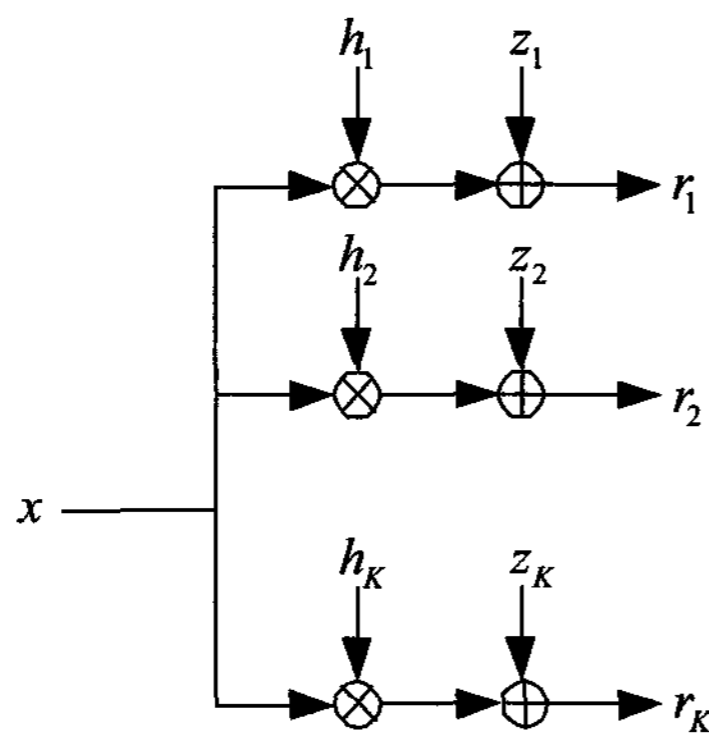
## II. 셀룰라 시스템 채널 용량

셀룰러 통신 시스템 (cellular communication system)에서 통신을 하는 영역이 여러 개의 셀(cell)로 나누어져 있고, 셀 내에 있는 하나의 기지국과 여러 사용자들이 서로 통신을 하는 구조로 이루어져 있다. 기지국에서 사용자 단말로

신호를 전송하는 링크를 하향링크 (downlink)라고 하며, 반대로 사용자 단말에서 신호를 전송하여 기지국이 수신하는 것을 상향링크 (uplink)라고 한다. 기지국과 각 사용자는 여러 개의 안테나를 사용하여 각각의 채널이 MIMO 채널을 이룰 수 있다. 본 장에서는 상하향 링크에서의 채널 용량을 살펴보고, 합 용량을 최대화할 수 있는 기법에 대해서 알아본다.

### 1. 하향 링크 채널 용량

한 셀 내에 기지국과  $K$  명의 사용자가 통신을 하는 모델을 생각해 보자. 각 사용자가 수신한 신호는 (그림 1)과 같고 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.



(그림 1) 하향링크 채널

$$y_k = h_k x + z_k \quad (1)$$

기지국에서 송신한 신호  $x$ 는  $k$  번째 사용자의 채널인  $h_k$ 가 곱해져서 가산성 백색잡음 신호  $z_k \sim N(0, \sigma^2)$ 가 더해져서 수신된다. 우선, 사용자 채널  $h_k$ 가 확률적으로 변하지 않고 고정된 값이라고 가정하자. 기지국이 이와 같이 하나의 송신 안테나로 전송하는 경우에는 사용자 채널 계수의 크기에 따라 정렬하였을 때에, degraded channel이 된다 [2]. 일반성을 잃지 않고, 다음과 같이 채널이 정렬되어 있다고 가정할 수 있다.

$$|h_1|^2 \geq |h_2|^2 \geq \dots \geq |h_K|^2 \quad (2)$$

최적의 전송률을 달성하기 위해서는 기지국에서 각 사용

자의 신호를 순차적으로 부호화를 하고, 각 사용자도 순차적으로 복호를 수행하여야 한다. 우선, 기지국에서는 수신 SNR이 제일 낮은  $K$  번째 사용자의 신호를 부호화하고 순차적으로,  $K-1, K-2, \dots, 2, 1$  번째 사용자 신호를 부호화한다. 각 사용자 신호를 부호화 해서 더해지면, 다음과 같은 송신 신호를 얻는다.

$$x = \sum_{k=1}^K x_k \quad (3)$$

이렇게 부호화하는 방식을 *superposition coding*이라고 한다.  $k$  번째 사용자에게 전송되는 신호의 전력을  $P_k = E|x_k|^2$ 이라 하면, 이 전력의 총 합은 사용자 기지국에서 신호를 송신하는데 사용되는 최대 전력보다 크지 않아야 하므로 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\sum_{k=1}^K P_k \leq P \quad (4)$$

$k$  번째 사용자가 신호를 수신하게 되면, 그 사용자보다 SNR이 낮은 사용자들인  $k+1, k+2, \dots, K$  번째 사용자들의 신호를 먼저 복호한다. 수신 신호에서 이렇게 먼저 복호한 신호를 제거하게 되면,  $k+1, k+2, \dots, K$  번째 사용자 신호로 인한 간섭신호가 없게 되고, 오직  $1, 2, \dots, k-1$  번째 사용자들 신호로 인한 간섭의 영향을 받게 된다. 따라서,  $R_k$ 를  $k$  번째 사용자가 달성하는 전송률이라 하면, 이러한 successive interference cancellation (SIC) 복호를 수행할 경우에 하향링크 채널의 채널 용량은 다음과 같이 주어진다 [2].

$$R_k = \log_2 \left( 1 + \frac{|h_k|^2 P_k}{\sigma^2 + |h_k|^2 \sum_{j=1}^{k-1} P_j} \right) \quad (5)$$

(4)과 같은 전력의 합에 대한 조건하에서 전송률의 총 합인  $\sum_k R_k$ 을 최대화하려면, 가장 채널이 좋은 사용자에게 모든 전력을 할당해야 한다.

$$P_k = \begin{cases} P, & k = \arg \max_j |h_j|^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

그러므로, 전송률의 총합을  $T$ 라 하면,

$$T \leq \log_2 \left( 1 + \frac{\max_k |h_k|^2 P}{\sigma^2} \right) \quad (7)$$

과 같이 상한이 주어지게 되고, 식 (6)과 같이 전력을 할당하였을 때에 등호를 만족하게 된다. 따라서, 하향링크에서 전송률의 총 합을 최대화하는 방식은 채널이 제일 좋은 사용자에게 모든 전력을 할당하는 방식이다.

지금까지는 사용자의 채널  $h_k$  가 확률적으로 결정되는 값이 아니라고 가정했으나, 이제부터는 어떤 분포에 따라 결정되는 확률변수라고 가정하자. 또한 전력에 대한 제한인 식 (4)를 평균 전력에 대한 제한으로 바꾸게 되면, 최적의 전력할당은 water-filling에 의해서 구해진다.

$$P_k = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} - \frac{\sigma^2}{|h_k|^2}, & k = \arg \max_j |h_j|^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

여기에서  $\lambda$ 는 식 (8)이 평균 전력에 대한 제한 조건을 만족하도록 하는 상수이다. 식 (8)이 의미하는 것은, 매 순간 채널이 좋은 사용자를 선택하고, 그 사용자에게만 전력을 할당하되, water-filling 방식으로 전력 할당하면 전체 전송률의 합이 최대가 된다.

## 2. 다중 사용자 다이버시티

사용자 채널  $h_k$ 의 실수부와 허수부가 각각 독립인 가우시안 분포  $N(0,1/2)$ 를 갖는 확률변수라고 하면, 그것의 절대값의 제곱인  $|h_k|^2$ 은 다음과 같이 평균이 1인 exponential 분포를 갖게 된다.

$$F_{|h_k|^2}(x) = 1 - e^{-x} \quad (9)$$

여기에서  $F_x(x)$ 는 확률변수  $X$ 의 누적확률밀도 함수(cumulative density function)이다. 총  $K$ 명의 사용자가 있을 때에,  $K$ 명 중에  $|h_k|^2$ 의 최대값을 선택하면, 누적확률밀도 함수는

$$F_{\max_k |h_k|^2}(x) = (1 - e^{-x})^K \quad (10)$$

가 된다. Extreme value theory에 의하면,  $K$ 가 아주 큰 값일 때  $\max_k |h_k|^2$ 는  $\log K$ 의 속도로 증가를 하게 된다 [3]. 원래

$|h_k|^2$ 의 평균이 1이었음을 감안하면,  $\max_k |h_k|^2$ 의 채널의 이득이  $\log K$  배만큼 커졌다는 것을 의미한다. 여러 사용자가 있을 때에, 페이딩 채널(fading channel)에서 사용자 채널의 최대값을 취함으로써 얻는 이러한 이득을 다중 사용자 다이버시티 이득(multiuser diversity gain)이라 한다. 사용자 수가 증가함에 따라 다중 사용자 다이버시티 이득은 로그 함수로 증가하게 된다.

채널이 깊은 페이딩에 빠지게 되면 에러 확률이 커지게 되므로, 기존에는 무선 채널의 페이딩은 극복해야 할 대상으로서 여겨져 왔다. 하나의 신호가 페이딩에 빠질 확률이  $p$ 라고 할 때에, 독립적인 신호를 겪은 두 신호가 동시에 페이딩에 빠질 확률은  $p^2$ 으로 감소하게 된다. 이와 같이 독립적인 페이딩을 거치는 여러 신호를 수신단에서 잘 결합하여 다이버시티 이득을 얻음으로써, 페이딩을 극복하여 왔다. 그러나, 다중 사용자 다이버시티는 페이딩을 극복하는 것이 아니라, randomness를 이용하여 신호가 peak에 도달할 때를 골라서 전송함으로써 적극적으로 페이딩을 이용하는 방식이다.

## III. 무선 채널 패킷 스케줄링

II장에서는 하향링크에서 전송률의 총 합을 최대로 하기 위해서는 채널이 제일 좋은 사용자에게 전력을 할당하는 방식이 최적임을 보였다. 또한 페이딩 채널에서 채널이 좋은 사용자를 선택할 때에 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 어떤 사용자는 기지국에서 가깝고 어떤 사용자는 기지국에서 먼 경우를 가정해 보자. 신호가 전송되는 거리의 2~4승에 비례해서 신호가 감쇄되므로, 기지국에서 가까운 사용자의 채널이 기지국에서 먼 사용자의 채널보다 더 좋을 가능성이 높다.  $\max_k |h_k|^2$ 를 취하게 되면, 기지국에서 먼 사용자가 선택이 될 확률이 적어지게 되므로, 사용자 간에 공평성(fairness) 문제가 발생하게 된다. 따라서, 전체 사용자의 총 전송률을 최대화하면서도 사용자간에 공평하게 전송을 하는 방식이 필요하게 된다. 이러한 할당 방식을 무선 패킷 스케줄링(wireless packet scheduling)이라 한다.

<표 1> SNR과 전송률의 관계 [4]

-12.5	38.4
-9.5	76.8
-8.5	102.6
-6.5	153.6
-5.7	204.8
-4.0	307.2
-1.0	614.4
1.3	921.6
3.0	1228.8
7.2	1843.2
9.5	2457.6

### 1. 시스템 모델

하향링크에서 전송률의 총합을 최대화하기 위해서는 한 명의 사용자만 선택하여 전송해야 한다. 따라서 전송 시간을 slot으로 나누고, 매 slot별로 한 명의 사용자를 선택하여 TDMA 방식으로 동작을 시킨다. 기지국의 전력은 평균 전력이 아니라 최대 전력이 제한된다고 가정한다. 각 사용자 채널은 확률 변수로 모델이 되고, 사용자간에 서로 독립인 확률 변수가 매 슬롯마다 발생한다고 가정한다. 만약 시간  $n$ 에서  $k$ 번째 사용자의 채널이  $h_k(n)$ 이라고 할 때에, 이 사용자에게 기지국의 최대 전력  $P$ 를 할당하면, 다음과 같은 전송률을 얻을 수 있다.

$$R_k(n) = \log_2 \left( 1 + \frac{|h_k(n)|^2 P}{\sigma^2} \right) \quad (11)$$

또는 신호대 잡음비 (signal-to-noise ratio; SNR)가  $|h_k(n)|^2 / \sigma^2$  일 때에 달성할 수 있는 실제적인 전송률을 <표 1>을 참조하여,  $R_k(n)$ 을 구할 수 있다.

사용자는 채널  $h_k(n)$ 을 측정하여 SNR을 구한 후에, 만약 이번 slot에 자신이 선택된다면 달성할 수 있는 전송률  $R_k(n)$ 을 구한다. 각 사용자는 이렇게 구한 전송률의 값 또는 이 값을 양자화한 인덱스를 기지국으로 전송한다. 그러면, 기지국은 각 사용자가 보내준 전송률 정보를 바탕으로 해서, 다음 slot에 전송할 사용자를 선택하고, 그 사용자가 요청한 전송률로 패킷을 보내게 된다.

기지국에서 다음 시간에 전송할 사용자를 선택할 때에, 과거의 선택한 결과에 무관하게 현재의 전송률에만 의존하여 선택을 한다면, 사용자 선택은 일반적으로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$k^*(n) = \arg \max_k g_k(R_k(n)) \quad (12)$$

여기에서  $k^*(n)$ 은 시간  $n$ 에 전송되도록 선택된 사용자의 인덱스이고,  $g_k(x)$ 는 단조증가함수이다. 따라서 패킷 스케줄링 방식은  $\{g_k(x)|k=1,2,\dots,K\}$ 로써 완전하게 기술된다. 단조증가함수  $\varphi(x)$ 는  $x_1 < x_2$  이면  $\varphi(x)$ 는  $\varphi(x_1) < \varphi(x_2)$  이므로, 부등식 양변을  $\varphi$ 로 변환하더라도 부등식의 방향이 변하지 않고 유지된다. 따라서,  $\{\varphi(g_k(x))|k=1,2,\dots,K\}$ 로 기술되는 패킷 스케줄링 방식과  $\{g_k(x)|k=1,2,\dots,K\}$ 로 기술되는 패킷 스케줄링 방식은 두 명 이상이 동시에 최대값을 갖는 경우를 제외하면 항상 동일한 사용자를 최대값 사용자로 선택하게 된다. 결국,  $\{g_k(x)|k=1,2,\dots,K\}$ 로 기술되는 스케줄링 방식에 임의의 단조증가함수  $\varphi$ 로 변환시켜서 동등한 결과를 가져오는 패킷 스케줄링 방식을 얼마든지 얻을 수 있다.

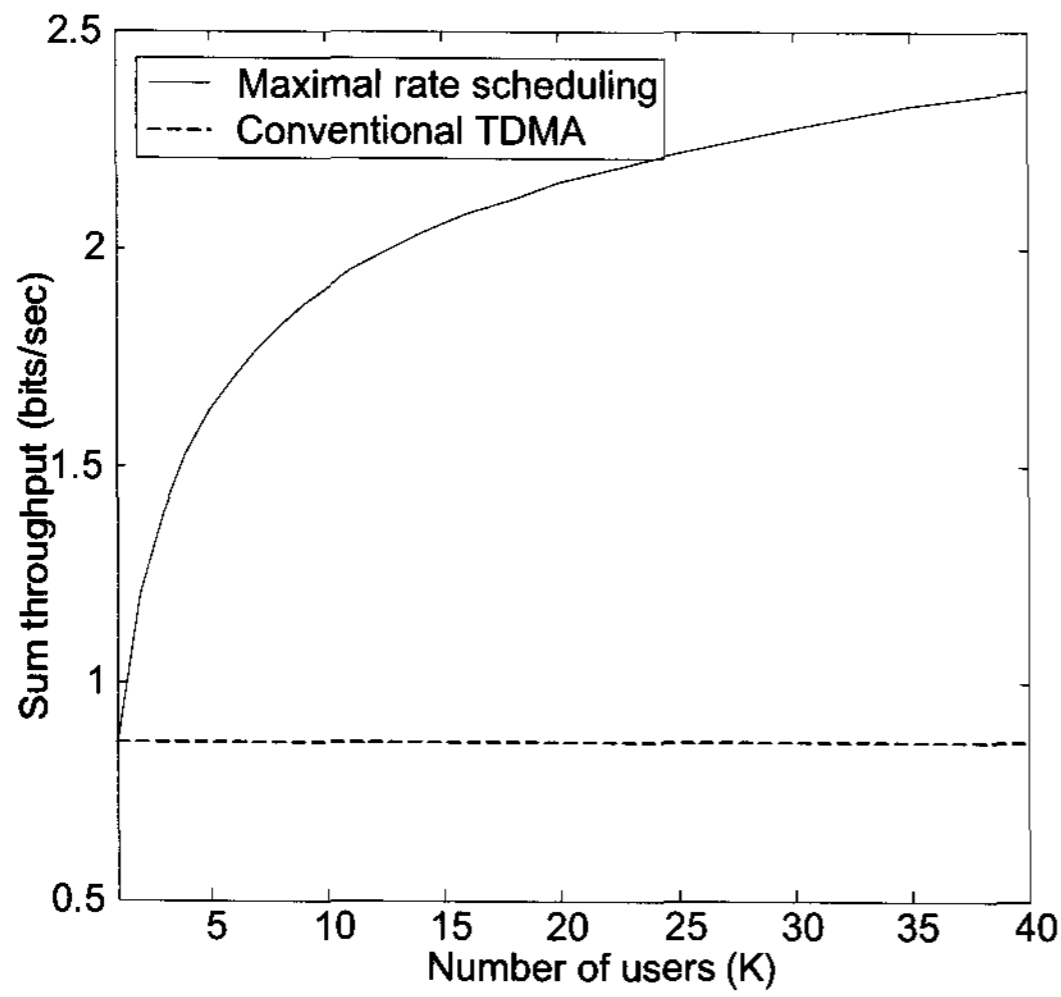
### 2. Maximal Rate Scheduling

여러 가지 배타적인 선택의 기회가 있다면, 하나의 기회를 선택하게 되면 다른 기회들을 버리게 된다. 경제학에서 하나의 기회를 선택함으로써 버려지는 기회 중에 가장 좋은 기회의 가치를 기회 비용(opportunity cost)이라 한다. 예를 들면, 화단에 사과 나무를 심거나 감 나무를 심을 수 있을 때에, 사과 나무를 심는다면 감 나무의 가치가 기회 비용이 된다.

원래의 패킷 스케줄링 문제로 돌아와서, 하향링크에서 각 사용자가  $R_k(n)$ 의 전송률로 전송된 신호를 수신할 수 있다고 기지국에 알려왔다고 하자. 기지국이  $j$ 번째 사용자를 선택한다면, 이 때에 발생하는 기회비용은  $\max_{k \neq j} R_k(n)$ 가 된다. 이 기회비용을 최소화하는 스케줄링 방식은

$$k^*(n) = \arg \max_k R_k(n) \quad (13)$$

이 된다. 이것은 단순히 사용자 전송률이 최대가 되는 사용자를 선택해서 전송하는 방식이며 Maximal Rate (MR) 스케줄링이라 한다. MR 스케줄링은 매 순간 채널이 좋은 사용자를 선택하여 사용자 전송률의 합이 최대가 되도록 하는 방식이다. 이 방식은 기지국에서 멀리 떨어져 있는 사용자가 있을 경우에, 이 사용자가 선택될 가능성이 낮아서 공정성 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 공정하게 사용자를 선택하는 스케줄링 방식이 필요하다.



(그림 2) MR 스케줄링 방식과 기존 TDMA 방식의 비교

기존의 TDMA는 사용자를 채널 정보를 이용하여 선택하지 않고, 순서대로 돌아가며 각 사용자를 선택하는 방식이다. (그림 2)는 Rayleigh fading에서 기존의 TDMA와 MR 스케줄링을 사용자 수가 증가할 때의 사용자 전송률의 합의 관점에서 비교하였다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 기존의 TDMA는 사용자의 수가 증가하여도 전송률의 합은 일정하지만, MR 스케줄링은 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻는 것을 볼 수 있다.

### 3. Proportional Fairness Scheduling

사람에게 자극을 가했을 때에, 자극의 실제 크기와 사람이 느끼는 체감 강도의 관계에 대한 법칙이 Weber-Fechner의 법칙이다. 어떤 사람이 1 kg의 물체를 들고 있는 상태에서 추가로 물체를 더 올려놓았을 때에, 그 사람이 느끼는 무게의 체감 증가분은 원래 물체의 무게에 대한 상대적인 비에 비례한다. 즉, 감각의 변화  $dS$ 에 대한 체감 강도  $dQ$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$dQ = c \frac{dS}{S} \quad (14)$$

예를 들면, 100 Mbps로 서비스를 받고 있는 사용자와 1 Mbps로 서비스를 받고 있는 사용자가 있다고 할 때에, 추가로 1 Mbps를 증가시킨다고 하자. 그러면, 전송률이 100 Mbps에서 101 Mbps로 증가한 사용자보다는 1 Mbps에서 2

Mbps로 증가한 사용자가 체감 증가량이 더 크게 된다. 식 (14)를 적분하면, 사람이 체감하는 강도  $Q$ 는

$$Q = c \log S \quad (15)$$

와 같이 주어진다.

이 Weber-Fechner의 법칙을 무선 패킷 스케줄링 방식에 적용해 볼 수 있다. 기지국이 한 명의 사용자만을 선택하여 전송하였을 때에,  $k$ 번째 사용자가 얻는 평균 전송률은

$$T_k(n) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k(n) + \frac{1}{t_c} R_k(n) 1_{k=k^*(n)} \quad (16)$$

과 같이 표현된다. 여기에서  $t_c$ 는 채널의 coherence time을 나타내며,  $1_{k=k^*(n)}$ 은  $n$ 번째 시간에 사용자  $k$ 가 선택되었을 때는 1이 되고 선택되지 않았을 때에는 0이 되는 함수로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$1_{k=k^*(n)} = \begin{cases} 1, & k = k^*(n) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

Weber-Fechner의 법칙을 적용하면, 매 순간 평균 전송률에 비해서 이번 시간의 전송률이 가장 큰 사용자, 즉 체감 전송률의 증가량이 제일 큰 사용자를 선택하게 된다 [5].

$$k^*(n) = \arg \max_k \frac{R_k(n)}{T_k(n)} \quad (18)$$

여기에서  $T_k(n)$ 은 식 (14)의  $S$ 에  $R_k(n)$ 는  $dS$ 에 해당한다고 볼 수 있다. 식 (18)과 같이 주어지는 스케줄링 방식을 Proportional Fairness (PF) 스케줄링이라 한다. Proportional fairness한 상태는 어떤 한 사용자의 평균 전송률을 1%증가시켰을 때에 다른 사용자들의 평균 전송률의 감소량이 1% 이상인 것을 의미한다. 식 (15)에서 알 수 있듯이, PF 스케줄링 방식을 적용하면, 평균 전송률의 로그함수, 즉  $\sum_k \log(T_k(n))$ 를 최대화하는 방식이 된다.

### 4. Temporal Fairness Scheduling

무선 패킷 스케줄링은 여러 사용자에게 가급적 공평하게 무선 자원을 할당하면서도 전송률을 최대화시키는 방식이다. 각 사용자가 선택되어 전송되는 빈도를 모든 사용자가 같도록 할당하는 방식이 있다면, 이것은 기회균등을 보장하는 방식이라 할 수 있다.  $k$ 번째 사용자가 전체 시간 slot 중

에 100%  $\phi_k$  % 만큼 선택이 되도록 한다고 하자. 이때, 선택되는 빈도는 1로 정규화되어 있다.

$$\sum_{k=1}^K \phi_k = 1 \quad (19)$$

각 사용자의 빈도  $\phi_k$ 를 보장하면서, 사용자 전송률의 합  $\sum_{k=1}^K T_k(n)$  을 최대화하는 방식은 [6]

$$k^*(n) = \arg \max_k (R_k(n) + v_k) \quad (20)$$

과 같이 주어진다. 여기에서  $v_k$ 는  $k$  번째 사용자가 선택될 확률이  $\phi_k$ 가 되도록 하는 상수로 채널 분포에 따라 결정된다.

### 5. Utilitarian Fairness Scheduling

PF 스케줄링의 경우에는 사용자가 느끼는 체감 효용이 로그 함수로 주어지는 경우라고 할 수 있다. 사용자의 효용 함수(utility function)가 일반적으로  $U_k(x)$ 로 주어진다고 하자. 최대다수의 최대행복을 얻기 위해서  $\sum_{k=1}^K U_k(T_k(n))$  를 최대화하는 스케줄링 방식을 생각해 볼 수 있다.  $n+1$  번째 시간과  $n$  번째 시간에서 효용함수의 차이는 Taylor 전개를 사용하고, 식 (16)을 사용하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & U_k(T_k(n+1)) - U_k(T_k(n)) \\ & \approx U_k'(T_k(n))(T_k(n+1) - T_k(n)) \\ & = U_k'(T_k(n)) \left( \frac{R_k(n) - T_k(n)}{t_c} \right), \end{aligned} \quad (21)$$

$n$  번째 시간에서  $T_k(x)$ 이 주어졌을 때에, 식 (21)을 최대화하기 위해서는 다음과 같이 사용자를 선택해야 한다 [1].

$$k^*(n) = \arg \max_k U_k'(T_k(n)) R_k(n) \quad (22)$$

이러한 스케줄링 방식은 사용자의 총 효용을 최대화하는 방식이 된다.  $U(x) = \log x$  일 때에, 식 (22)가 식 (18)로 변환되므로, PF 스케줄링은 효용함수가 로그로 표현되는 경우임을 재확인할 수 있다.

### 6. CDF-based Scheduling

$k$  번째 사용자에게 전송할 수 있는 전송률  $R_k(x)$ 의 누적확률분포함수는  $F_{R_k}(x)$ 로 나타낼 수 있다.  $k$  번째 사용자의 전송률이  $r$ 이라 할 때, 전송률이  $r$ 이상이 될 확률은

$$\Pr(R_k(n) \geq r) = 1 - F_{R_k}(r) \quad (23)$$

이 된다. 만약 사용자의 현재 전송률보다 더 좋은 채널을 얻기가 제일 힘든 사용자를 선택한다면,  $\Pr(R_k(n) \geq r)$ 이 제일 작은 사용자를 선택하면 된다.

예를 들어, A와 B라는 학생이 서로 다른 학교를 다니고 있고, A는 시험에서 90점을 B는 85점을 받았다고 하자. 서로 다른 학교에서 다른 문제로 시험을 보았으므로 A가 B보다 성적이 더 우수한 학생인지 판별하기가 쉽지 않다. 그런데, 학생 A의 점수 90점이 그가 다니는 학교에서 상위 10%에 드는 점수이고, 학생 B의 85점은 그의 학교에서 상위 5%에 드는 점수라고 하자. 그러면, 학생 B의 점수는 학생 A보다 절대적인 점수는 낮지만, 각 학교 학생들의 성적 분포를 고려할 때에, 더 얻기가 어려운 점수라고 할 수 있다. 즉, 학생 B의 성적이 학생 A의 성적보다 성취하기가 더 어려운 성적이 라고 볼 수 있다.

이와 같이, 각 사용자 채널의 분포를 고려하여 더 좋은 채널을 얻기가 힘든 사용자를 선택하는 것은 의미가 있다.  $\Pr(R_k(n) \geq r)$ 를 최소화하는 것은  $F_{R_k}(r)$ 를 최대화하는 것과 동치이므로, 다음과 같은 CDF-based scheduling 방식을 고려할 수 있다 [7].

$$k^*(n) = \arg \max_k F_{R_k}^{1/w_k}(R_k(n)) \quad (24)$$

여기에서  $w_k$ 는 사용자 별 가중치를 나타내는 양의 상수로서  $\sum_{k=1}^K w_k = 1$  로 주어진다.

CDF-based scheduling을 이용해 사용자를 선택할 때에, 사용자  $k$ 를 선택하게 될 확률은

$$\Pr(k^*(n) = k) = w_k \quad (25)$$

로 주어진다. 따라서, CDF-based scheduling은 사용자 별 가중치  $w_k$ 를 조절해서 사용자별 선택 빈도수를 조절할 수 있다. 또한 사용자의 평균 전송률은 다음과 같이 주어진다.

$$T_k = \int_0^1 u^{1/w_k - 1} F_{R_k}^{-1}(u) du \quad (26)$$

따라서, 각 사용자의 평균 전송률은 자기 자신의 분포에만 의존하고 다른 사용자의 분포에는 독립적이다. 앞서 설명한 모든 스케줄링 방식에서는 한 사용자의 평균 전송률이 다른 사용자의 분포에 의존하기 때문에, 한 사용자의 평균 전송

를 구하려면 사용자의 수만큼 채널에 대해서 다중 적분을 수행하여야 하므로 구하는 것이 매우 힘들다. 따라서, 식 (26)과 같이 사용자 평균 전송률을 closed-form으로 구할 수 있는 것은 CDF-based scheduling이 다른 스케줄링과 비교하여 가지는 큰 장점이다.

CDF-based scheduling을 이용하면, 사용자별 QoS (quality-of-service)를 만족시킬 수 있다. 만약 어떤 사용자가 평균 전송률  $T_k$ 를 요구한다면, 이 사용자의 평균 전송률  $T_k$ 를 만족시키기 위해 필요한  $w_k$ 를 식 (26)을 이용해서 거꾸로 구할 수 있다.

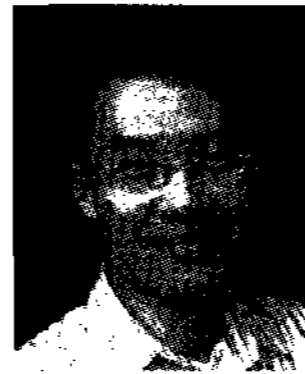
## IV. 결 론

본고에서는 하향링크에서 사용자 전송률을 최대화하면서도 사용자 간에 공평하게 할당하는 방식에 대해서 알아보았다. 정보이론적 관점에서 하향링크의 채널 용량을 최대화하기 위해서는 채널이 좋은 한 명의 사용자에게만 모든 전력을 할당하는 방식이 최적이다. 사용자 채널의 통계적 특성이 서로 다른 경우에 사용자 간에 불공평하게 자원을 할당하는 것을 보완하기 위해 여러 무선 패킷 스케줄링 방식이 제안되었다. 사람들이 체감하는 정도, 기회 공평성, 효율 최대화, 더 좋은 기회를 얻기가 힘든 정도 등 여러 가지 관점에서 최적인 방식들을 비교 분석하였다.

Sindhushayana, and A. Viterbi, "CDMA/HDR: A bandwidth-efficient high-speed wireless data service for nomadic users," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 38, pp. 70-77, Jul. 2000.

- [5] A. Jalali, R. Padovani, and R. Pankaj, "Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, 2000, pp. 1854-1858.
- [6] X. Liu, E. K. P. Chong, and N. B. Shroff, "Opportunistic transmission scheduling with resource-sharing constraints in wireless networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 19, no. 10, pp. 2053-2064, Oct. 2001.
- [7] D. Park, H. Seo, H. Kwon, and B. G. Lee, "Wireless packet scheduling based on cumulative distribution function of user transmission rates," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 11, pp. 1919-1929, Nov. 2005.

## 약 력



박 대 영

1998년 서울대학교 전기공학부 학사  
 2000년 서울대학교 전기공학부 석사  
 2004년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사  
 2004년 ~ 2007년 삼성전자 책임연구원  
 2007년 ~ 2008년 University of Southern California, Visiting Scholar  
 2008년 ~ 현재 인하대학교 정보통신공학부 전임강사  
 관심분야 : MIMO, Resource allocation, 이동통신



- [1] B. G. Lee, D. Park, and H. Seo, *Wireless Communication Resource Management*. Wiley, to be published.
- [2] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*, Wiley, 1991.
- [3] E. Castillo, *Extreme Value Theory in Engineering*, Academic Press, 1998.
- [4] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N.