JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 18, No. 11 : 2613~2620 Nov. 2014

전이중 무선 셀룰라 네트워크에서 셀 용량 최대화를 위한 사용자 스케쥴링 방식

최현호*

User Scheduling Algorithm for Cell Capacity Maximization in Full Duplexing Wireless Cellular Networks

Hyun-Ho Choi*

Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Institute for Information Technology Convergence, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

요 약

본 논문에서는 전이중(full duplexing) 모드로 동작하는 기지국과 시분할 이중(TDD: Time Division Duplexing) 모드로 동작하는 사용자들이 통신하는 전이중 무선 셀룰라 네트워크를 고려한다. 전이중 모드 사용시 상향링크 사용자는 하향링크 사용자에게 간섭을 유발하므로 시스템 성능을 극대화하기 위해서는 같은 무선 자원을 동시에 사용하는 상・하향링크 사용자 쌍을 어떻게 결정하는 지가 매우 중요하다. 본 논문은 셀 용량을 최대화하기 위한 최적화 문제를 제시하고 낮은 복잡도를 갖는 차선의 사용자 스케쥴링 알고리즘을 제안한다. 제안하는 스케쥴링 방식은 더 좋은 신호 품질을 갖는 하향링크 사용자가 자신에게 간섭을 덜 미치게 하는 상향링크 사용자를 먼저 선택할 수 있도록 우선권을 갖는 방식으로 동작한다. 시뮬레이션 결과 제안 사용자 스케쥴링 방식을 사용하는 전이중 시스템은 최적 성능을 달성하면서 기존 TDD 시스템의 셀 용량을 현저히 개선한다.

ABSTRACT

In this paper, we consider a full duplexing (FD) wireless cellular network where a central base station (BS) works in the FD mode while the downlink (DL) and uplink (UL) users work in the time division duplexing (TDD) mode. Since this FD system induces the inter-user interference from UL user to DL user, the main challenge for maximizing the system performances is user scheduling that makes a pair of DL user and UL user to use the same radio resource simultaneously. We formulate an optimization problem for user pairing to maximize the cell capacity and propose a suboptimal user scheduling algorithm with low complexity. This scheduling algorithm is designed in a way where the DL user with a better signal quality has a higher priority to choose its UL user that causes less interference. Simulation results show that the FD system using the proposed user scheduling algorithm achieves the optimal performance and significantly outperforms the conventional TDD system in terms of the cell capacity.

키워드 : 전이중 모드, 사용자 스케쥴링, 무선 자원 관리, 셀 용량 최대화

Key word : Full duplexing, User scheduling, Radio resource management, Cell capacity maximization

접수일자 : 2014. 09. 25 심사완료일자 : 2014. 10. 19 게재확정일자 : 2014. 11. 04

* **Corresponding Author** Hyun-Ho Choi(E-mail:hhchoi@hknu.ac.kr, Tel:+82-31-670-5297)
Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Institute for Information Technology Convergence, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.11.2613 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

전통적인 무선 통신 시스템에서는 한 노드에서의 송수신 신호에 대하여 주파수분할 듀플렉싱(frequency division duplexing; FDD) 또는 시분할 듀플렉싱(time division duplexing; TDD) 방식을 일반적으로 사용해왔다. 하지만 최근 새로운 듀플렉싱 방식으로 전이중(full duplexing) 방식이 주목을 받고 있다. 전이중 방식은 노드의 송신과 수신을 동시에 같은 주파수 상에서 할 수 있게 해줌으로써 전송 효율을 이론적으로 두 배까지 증가시킬 수 있다. 하지만 전이중 모드를 무선 셀룰라 네트워크에 적용하기 위해서는 기지국의 송신 안테나와 수신 안테나 사이에 발생하는 자기 간섭(self-interference) 문제와 상향링크(uplink) 사용자와 하향링크(downlink) 사용자 사이에 발생하는 사용자간 간섭(inter-user interference) 문제를 해결하는 것이 매우 중요하다.

기존 관련 연구로써 전이중 방식을 사용하는 노드의 송신단과 수신단 사이에 발생하는 자기 간섭 문제를 해결하기 위해 스마트 코드가 개발되었다[1, 2]. 이와 같은 코딩 기술은 송수신 신호를 코드 레벨에서 구분함으로써 송수신기 사이에 간섭을 효과적으로 없애준다. 또한 스마트 코드를 적용한 코드분할 듀플렉싱(code division duplexing; CDD) 시스템이 제안되어 전송 효율이 기존 FDD 시스템 대비 두 배까지 증가됨을 보였다[3]. 반면 최근에는 전이중 방식의 현실화를 위하여 송・수신단 사이에 발생하는 자기 간섭을 RF 아날로그 단계에서의 간섭 억제와 디지탈 신호 처리 기술을 동시에 사용하여 해결하는 향상된 간섭 제거 기술을 선보였고, 이를 실제로 구현하여 한 노드에서 전이중 방식의 실제 동작이 가능함을 보여주었다[4-6].

이러한 연구가 주로 물리 계층에서의 해결책에 초점을 맞추었다면, MAC 계층에서의 스케쥴링은 전이중 시스템에서의 자기 간섭 문제를 해결하는데 또 다른 해결 방안이 되어 왔다. 전이중 모드를 사용하는 무선 중계(relay) 시스템에서 자기 간섭 문제를 해결하는 동적 자원 할당 방식이 제안되었다[7-9]. 실용적인 전이중 셀룰라 시스템으로써 기지국의 다수개의 수신 안테나가 송신 안테나와 분리되어 셀 내에 분산되어 있는 구조가 제안되었으며, 이러한 구조에서 상향링크 사용자와 하향링크 사용자간에 발생하는 간섭 문제를 고려하여 주파수 채널 자원과 전송 방향을 결정하는 스케쥴링 알고리즘이 제안되었다[10]. 하지만 지금까지 일반적인 전이중 무선 셀룰라 네트워크 환경에서 상향링크와 하향링크 사용자들이 동시 송수신을 수행할 때 어떻게 사용자 스케쥴링을 수행할 지에 대한 연구는 다루어지지 않았다[11].

본 논문에서는 전이중 모드를 사용하는 기지국과 기존 TDD 모드를 사용하는 사용자 단말이 존재하는 무선 셀룰라 네트워크를 고려한다[12]. 여기에서 사용자 단말은 전이중 방식을 처리하기에 물리적인 한계가 존재하기 때문에 기존과 동일한 TDD 모드를 사용하게 된다. 이러한 전이중 방식의 셀룰라 시스템은 상향링크 전송 단말에서 하향링크 수신 단말로 사용자간 간섭을 일으키기 때문에 시스템 전체 성능을 극대화시키기 위해서는 주파수 자원을 동시에 사용하는 상향링크 단말과 하향링크 단말을 어떻게 짝지을지에 대한 사용자 스케쥴링이 매우 중요하다. 본 연구에서는 셀 용량을 최대화하기 위한 사용자 스케쥴링의 최적화 문제를 제시한다. 제시한 최적화 문제는 매우 높은 계산 복잡도를 요구하기 때문에 이를 실용화 하기 위한 낮은 복잡도를 갖는 차선의(suboptimal) 사용자 스케쥴링 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 사용자가 수신하는 신호 품질과 사용자간 간섭량을 고려하여 신호 품질이 좋은 사용자가 더 적은 간섭을 받도록 만들어 줌으로써 전체 셀 용량을 극대화 시킨다. 다양한 시뮬레이션을 통하여 제안한 사용자 스케쥴링 알고리즘을 사용하는 전이중 셀룰라 시스템이 최적 성능에 근접하며, 기존 듀플렉싱 방식을 사용하는 시스템 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. Ⅱ장에서는 고려하는 전이중 무선 셀룰라 네트워크의 시스템 모델을 기술한다. Ⅲ장에서 제안하는 사용자 스케쥴링 알고리즘을 설명하고, Ⅳ장에서는 시뮬레이션 결과를 보여준다. Ⅴ장에서 본 연구의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 전이중 셀룰라 네트워크 모델

그림 1은 고려하는 전이중 무선 셀룰라 네트워크를 보여준다. 각 셀은 N개의 이웃 셀로 둘러싸여 있으며, 각 셀에는 $2M$명의 사용자가 존재한다. 여기에서 모든

사용자는 상향링크로 전송하거나, 하향링크로 전송받아야 할 데이터가 항상 존재하여, M명의 사용자는 상향링크로 서비스를 받으며 나머지 M명의 사용자는 하향링크로 서비스를 받는다고 가정한다. 또한 하나의 전송 프레임은 M개의 타임슬롯으로 나뉘며 각 사용자는 항상 한 프레임 내에 전어도 한 슬롯을 할당 받아 송신하거나 수신하는데 사용한다. 이러한 타임슬롯 할당 방식은 무선 자원의 라운드 로빈(round-robin) 스케쥴링 방식에 해당되며, 본 논문에서는 자원 사용 측면에서 모든 사용자들에게 어느 정도의 공평성을 보장하기 위하여 이러한 타임슬롯 할당 방식을 채택한다[13].

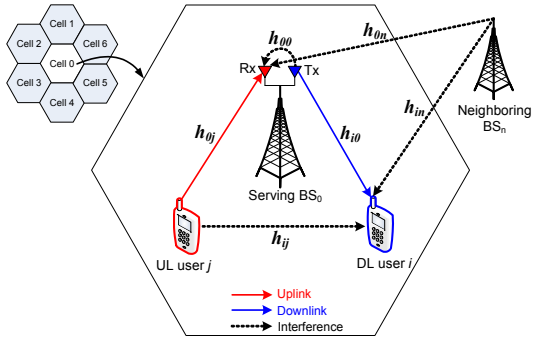

그림 1. 전이중 무선 셀룰라 네트워크의 시스템 모델
Fig. 1 System model of full duplexing wireless cellular network

전이중 모드를 사용하는 기지국의 송신단과 수신단은 같은 시간에 같은 주파수 밴드를 사용하기 때문에 기지국의 수신단은 자신의 송신단과 이웃 기지국의 송신단으로부터 강한 간섭을 받는다. 본 논문에서 이러한 기지국이 받는 간섭은 기지국의 RF 단에서 간섭 제거 기술과 채널 추정 방식을 사용하여 제거 가능하다고 가정한다[5, 10]. 또한 하향링크 사용자는 이웃 기지국의 송신단으로 부터의 간섭과 동일 셀에 위치하여 같은 타임슬롯을 사용하는 상향링크 사용자로부터의 간섭을 받는다. 이때 이웃 셀에 위치한 상향링크 사용자로부터 받는 간섭들은 해당 상향링크 단말의 송신 파워가 작고 서로 다른 셀에 위치한 단말들 간의 거리가 멀다는 가정하에 무시한다.

따라서 i번째 하향링크 사용자가 수신하는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_i = \sqrt{P_d}\,h_{i0}x_i + \sqrt{P_u}\,h_{ij}x_j + \sum_{n=1}^{N}\sqrt{P_d}\,h_{in}\tilde{x}_n + n_i \quad \text{for } i = 1, 2, \ldots, M \tag{1}$$

여기에서 P_d와 P_u는 각각 기지국의 송신 파워와 상향링크 사용자의 송신 파워를 나타낸다. 심볼 x_i, x_j, $\tilde{x}_n$는 각각 서빙 기지국 BS$_0$와 같은 타임슬롯을 사용하는 j번째 상향링크 사용자와 n번째 이웃 기지국에서 송신한 신호를 나타낸다. 또한 h_{i0}, h_{ij}, h_{in}은 각각 서빙 기지국 BS$_0$, j번째 상향링크 사용자, n번째 이웃 기지국으로부터 i번째 하향링크 사용자로의 전송 링크에 해당하는 채널 계수를 나타낸다. n_i는 평균이 0이고 N_0의 분산을 갖는 additive white Gaussian noise (AWGN)을 나타낸다. 채널 계수 h_{i0}, h_{ij}, h_{in}는 각각 $CN(0,\sigma^2/d_{i0}^{\alpha})$, $CN(0,\sigma^2/d_{ij}^{\alpha})$, $CN(0,\sigma^2/d_{in}^{\alpha})$의 분포를 따른다. 여기에서 d_{i0}^{α}, d_{ij}^{α}, d_{in}^{α}은 해당 링크의 물리적인 전송 거리를 나타내며, α는 경로 감쇠 지수(path loss exponent)를 나타낸다.

반면 j번째 상향링크 사용자로부터 서빙 기지국 BS$_0$가 수신하는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_j = \sqrt{P_u}\,h_{0j}x_j + \sqrt{P_d}\,h_{00}x_i + \sum_{n=1}^{N}\sqrt{P_d}\,h_{0n}\tilde{x}_n + n_0 \quad \text{for } j = 1, 2, \ldots, M \tag{2}$$

여기에서 h_{0j}, h_{00}, h_{0n}은 각각 j번째 상향링크 사용자, 서빙 기지국 BS$_0$의 송신단, n번째 이웃 기지국의 송신단으로부터 서빙 기지국 BS$_0$의 수신단으로의 전송 링크에 해당하는 채널 계수를 나타낸다. 마찬가지로 이들 채널 계수 h_{0j}, h_{00}, h_{0n}은 각각 $CN(0,\sigma^2/d_{0j}^{\alpha})$, $CN(0,\sigma^2/d_{00}^{\alpha})$, $CN(0,\sigma^2/d_{0n}^{\alpha})$의 분포를 따르며, 여기에서 d_{0j}^{α}, d_{00}^{α}, d_{0n}^{α}은 해당 링크의 물리적인 전송 거리를 나타낸다.

채널 추정을 위하여 서빙 기지국과 이웃 기지국들은 파일롯(pilot) 신호를 전송하고, 서빙 기지국의 수신기는 이를 활용한다. 기지국에서 수신되는 간섭의 파워가

수신되는 신호의 세기에 비하여 매우 큼에도 불구하고, 간섭 파워는 아날로그와 디지털 간섭 제거 기술을 차례로 적용하여 수신단 노이즈 플로워(noise floor) 수준으로 낮아진다[4-6]. 게다가 least-square (LS)나 minimum mean square error (MMSE)와 같은 채널 추정 기술을 적용하여 채널 계수 h_{00}와 h_{0n}을 추정할 수 있다[14].[1] 이러한 간섭 채널의 추정과 서빙 기지국과 이웃 기지국으로부터 백홀을 통하여 전달된 알려진 신호를 이용하여, 서빙 기지국 BS_0의 수신단은 수신 신호로부터 해당 간섭 신호를 없앨 수 있다. 간섭 제거 후 j번째 상향링크 사용자의 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{y_j} = \sqrt{P_u} h_{0j} x_j + \sqrt{P_d}(h_{00} - \hat{h}_{00}) x_i + \sum_{n=1}^{N} \sqrt{P_d}(h_{0n} - \hat{h}_{0n}) \tilde{x}_n + n_0 \quad (3)$$

여기에서 $\hat{h}_{00}$와 $\hat{h}_{0n}$은 추정된 채널 계수 값을 나타낸다.

식 (1)과 (3)으로부터 수신신호 y_i와 $\hat{y}_j$의 신호대 간섭 및 잡음비(signal to interference plus noise ratio; SINR)는 각각 다음과 같이 결정된다.

$$\gamma_i = \frac{P_d \|h_{i0}\|^2}{P_u \|h_{ij}\|^2 + \sum_{n=1}^{N} P_d \|h_{in}\|^2 + N_0} \quad (4)$$

$$\gamma_j = \frac{P_u \|h_{0j}\|^2}{P_d \|h_{00} - \hat{h}_{00}\|^2 + \sum_{n=1}^{N} P_d \|h_{0n} - \hat{h}_{0n}\|^2 + N_0} \quad (5)$$

따라서 i번째 하향링크 사용자와 j번째 상향링크 사용자의 전송 효율은 다음과 같이 된다.

$$R_i = \log_2(1 + \gamma_i) \quad (6)$$

$$R_j = \log_2(1 + \gamma_j) \quad (7)$$

추가적으로 기존의 TDD 시스템은 자기 간섭과 사용자간 간섭이 모두 존재하지 않으므로 i번째 하향링크 사용자와 j번째 상향링크 사용자는 다음과 같은 SINR을 갖는다.

$$\gamma_i^{TDD} = \frac{P_d \|h_{i0}\|^2}{\sum_{n=1}^{N} P_d \|h_{in}\|^2 + N_0} \quad (8)$$

$$\gamma_j^{TDD} = \frac{P_u \|h_{0j}\|^2}{N_0} \quad (9)$$

Ⅲ. 제안하는 사용자 스케쥴링 알고리즘

식 (4)와 (5)를 통해 보면 고려하는 전이중 시스템에서 우리가 제어할 수 있는 파라미터는 h_{ij}가 유일하다. 나머지 다른 파라미터는 노드의 위치에 따라 주어지거나 일반적으로 고정된 값을 취한다. h_{ij}의 제어는 어떠한 상향링크 사용자와 하향링크 사용자를 동시에 전송하게 만들지에 관한 것으로 사용자 스케쥴링을 의미한다. 이때 h_{ij}값은 하향링크 사용자의 SINR에만 영향을 주며, 상향링크 사용자의 SINR에는 영향을 주지 않는다. 따라서 셀 용량을 극대화하기 위해서는 하향링크 사용자의 SINR이 극대화되도록 h_{ij}를 결정하는 사용자 스케쥴링이 수행되어야 한다.

스케쥴링 문제를 만들기 위하여 (i, j) 쌍을 같은 타임슬롯을 할당 받은 i번째 하향링크 사용자와 j번째 상향링크 사용자라고 나타내자. 가능한 조합은 한번 뽑은 수를 다시 뽑을 수 없다는 조건 하에 $\{1, 2, ..., M\}$에서 번호 i를 뽑고 $\{1, 2, ..., M\}$에서 번호 j를 뽑는 경우가 된다. 모든 가능한 사용자 쌍을 Π로 나타낼 때, M=3인 경우에 Π는 다음과 같이 6개의 다른 스케쥴링 조합을 갖는다.

$$\Pi = \left\{ \begin{array}{l} \{(1,1),(2,2),(3,3)\}, \\ \{(1,1),(2,3),(3,2)\}, \\ \{(1,2),(2,1),(3,3)\}, \\ \{(1,2),(2,3),(3,1)\}, \\ \{(1,3),(2,1),(3,2)\}, \\ \{(1,3),(2,2),(3,1)\} \end{array} \right\} \quad (10)$$

1) 자세한 채널 추정 방법은 본 논문의 범위를 넘어서므로 생략한다. 본 논문에서는 전이중 시스템의 효과적인 동작을 위하여 기지국에서 수행하는 채널 추정은 완벽하다고 가정한다.

일반적인 M값에 대해서 가능한 스케줄링 조합의 전체 개수는 $M!$이 됨을 알 수 있다. 또한 여기에서 Π의 k번째 원소를 π_k로 나타내자 ($k = 1, 2, ..., M!$).

셀 용량 최대화를 목적으로 하는 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\pi_k = \arg\max \sum_{(i,j)\in\pi_k} R_i + R_j \quad (11)$$
$$s.t. \quad i,j \in \{1, 2, ..., M\}$$

이 최적화 문제를 풀기 위해서는 전체 $M!$개의 조합에 대해서 모두 조사해야 하므로 $O(M!)$의 매우 높은 계산 복잡도를 갖는다. 이는 M값이 커짐에 따라 현실적으로 불가능하므로 낮은 복잡도를 갖는 차선의 사용자 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

식 (5)에 따르면 상향링크 사용자의 SINR γ_j는 하향링크 사용자로부터 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 채널 추정과 간섭 제거가 완벽하면 γ_j는 상향링크 채널 h_{0j}에만 의존한다. 반면 하향링크 사용자의 SINR γ_i는 하향링크 채널 h_{i0} 뿐만 아니라 j번째 상향링크 사용자에서 i번째 하향링크 사용자로의 직접 채널 h_{ij}에 의존한다. 따라서 사용자 스케줄링은 하향링크 사용자의 SINR γ_i에만 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 모든 사용자의 전송률의 총합을 최대화하기 위해서는 좀 더 좋은 신호 품질을 갖는 사용자에게 보다 적은 간섭을 받게 하여 전송률을 보다 높이는 것이 유리하다 [15]. 따라서 제안하는 스케줄링 알고리즘에서는 더 좋은 신호 품질 (즉, 더 높은γ_i^{TDD} 값)을 갖는 하향링크 사용자가 먼저 자신의 파트너로 더 작은 h_{ij}값을 갖는 상향링크 사용자를 고르도록 한다. 이와 같은 방식은 좀 더 좋은 신호 품질을 갖는 하향링크 사용자에게 상향링크 사용자로부터의 간섭을 보다 많이 줄여줌으로써 하향링크 사용자의 SINR을 보다 증가시키고 사용자 전송률의 총합을 극대화시킨다.

제안하는 사용자 스케줄링 알고리즘은 다음의 알고리즘 1과 같이 기술된다. 제안하는 스케줄링 알고리즘은 M명의 상・하향링크 사용자들에 대한 정렬과 검색만으로 가능하므로 복잡도가 $O(M^2)$으로 크게 줄어든다.

알고리즘 1. 제안하는 사용자 스케줄링 알고리즘
Algorithm. 1 Proposed user scheduling algorithm

1: **Initialize:** $U_j \leftarrow 0, j = 1, 2, ..., M$ /* flag for selected or not */
2: Sort the DL users in order of high γ_i^{TDD} value
3: **for** i = [sorted DL users] **do**
4: Unpaired UL users ← find($U_j = 0$)`
5: Measure h_{ij} from unpaired UL user j to DL user i where $j \in$ {1, 2, ..., M}
6: Choose the UL user j with the smallest h_{ij} among unpaired UL users
7: $U_j \leftarrow 1$
8: Complete the user pair (i, j)
9: **end for**

Ⅳ. 시뮬레이션 결과 및 고찰

시뮬레이션을 위하여 그림 1과 같은 7개의 셀을 가진 셀룰라 네트워크를 고려하고 가운데 위치한 서빙 셀에서 제안 방식의 성능을 도출한다[10]. 하향링크 사용자와 상향링크 사용자의 수는 모두 M명으로 동일하며, 각 사용자는 서빙 셀 영역 내에 랜덤하게 분포한다. 또한 시뮬레이션 기간 동안 상・하향링크 사용자는 자신의 전송 방향을 변경하지 않는다. 아울러 채널 계수는 타임슬롯 시간 동안에는 변하지 않으며 각 타임슬롯 간에는 독립적이다고 가정한다. 기지국과 사용자간에는 line- of-sight (LOS)를 가정하여 경로 감쇠 지수 값을 2로 설정하고 사용자간에는 non line-of-sight (NLOS)를 가정하여 3으로 설정하였다. 보다 자세한 시뮬레이션 파라미터는 표1에 나와 있다. 제안하는 사용자 스케줄링 알고리즘은 전이중 방식을 사용하지 않는 기존의 TDD 방식, 사용자 쌍을 랜덤하게 결정하는 랜덤 스케줄링 방식, 전체 검색을 통해 구한 최적 스케줄링 방식과 비교된다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table. 1 Simulation Parameters

Parameter	Value
Cell radius	500 m
Number of neighboring BSs (N)	6
BS transmission power (P_b)	43 dBm
User tranmsission power (P_u)	23 dBm
Channel variance (σ^2)	3 dB
Path loss exponent (a)	2 (BS-to-user) or 3 (user-to-user)
Noise variance (N_0)	1
Bandwidth	10 MHz

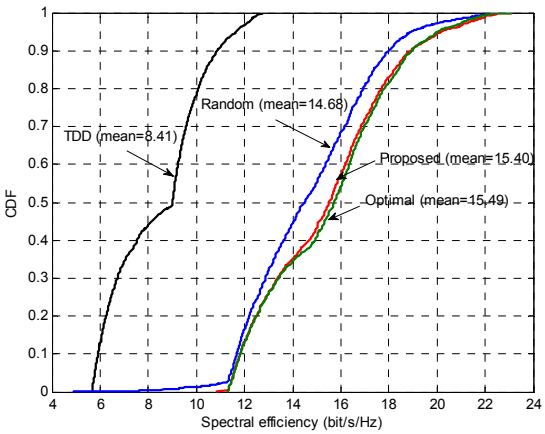

그림 2. 사용자 전송 효율의 누적 분포 함수 (M=8일 때)
Fig. 2 CDF of spectral efficiency of users when M=8

그림 2는 하향링크 및 상향링크 사용자 수(M)가 각각 8명으로 주어졌을 때 모든 사용자의 전송 효율(spectral efficiency)의 누적 분포 함수(cumulative distribution function; CDF)를 나타낸다.[2] 보는바와 같이 최적 스케쥴링, 제안 스케쥴링, 랜덤 스케쥴링, 기존의 TDD 방식 순으로 성능이 좋다. 제안한 사용자 스케쥴링 알고리즘은 최적 성능에 거의 근접함을 볼 수 있는데, 이는 차선 알고리즘으로써의 효용성을 입증한다. 한 가지 주목할 만 한 점은 간단한 랜덤 스케쥴링을 사용하여도 전이중 시스템은 기존의 TDD 성능을 크게 향상 시킨다는 점이다. 기존 TDD 방식과 비교하여 랜덤 스케쥴링과 제안 스케쥴링을 사용할 때, 전이중 시스템은 사용자 전송 효율이 각각 평균 1.74배와 1.83배 증가함을 확인할 수 있다.

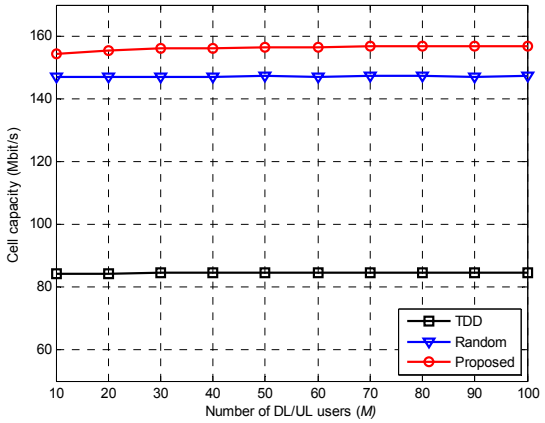

그림 3. 상·하향링크 사용자 수에 따른 평균 셀 용량
Fig. 3 Average cell capacity vs. number of DL/UL users

그림 3은 상・하향링크 사용자 수에 따른 평균 셀 용량을 보여준다. 참고로 최적 스케쥴링 방식은 M 값이 커짐에 따라 높은 복잡도로 인하여 성능을 구할 수 없어 배제되었다. TDD 모드와 비교하여 랜덤 스케쥴링과 제안 스케쥴링 방식을 사용하는 전이중 방식의 평균 성능 이득은 각각 174%와 185%가 된다.

따라서 전이중 시스템의 성능은 사용자 스케쥴링에 큰 영향을 받는 다는 것을 알 수 있고, 상・하향링크 사용자 쌍을 랜덤하게 결정하는 것보다 제안 방식과 같이 상・하향링크 사용자간의 채널을 고려하여 결정하는 것이 보다 높은 성능을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 상・하향링크 사용자 수가 증가함에 따라 다른 방식은 일정한 성능을 보이는 반면, 제안 스케쥴링 방식은 약간씩 증가하는 현상을 보이는데 이는 사용자 수가 증가함에 따라 제안 방식이 사용자 다양성(diversity)를 갖기 때문이다.

2) M을 좀 더 높은 값으로 선택하지 못한 이유는 최적 스케쥴링 방식의 계산 복잡도가 $O(M!)$로 너무 높아 성능을 구하기 어렵기 때문이다.

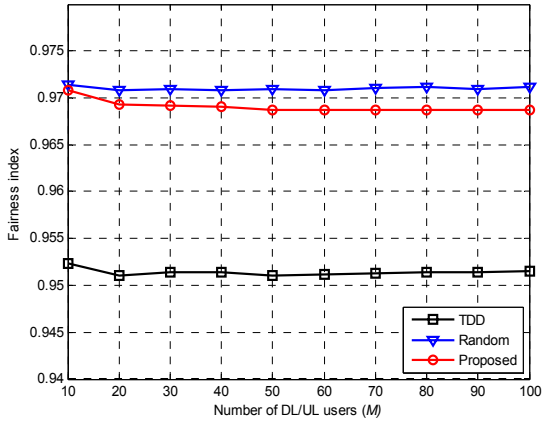

그림 4. 상·하향링크 사용자 수에 따른 공평 지수
Fig. 4 Fairness index vs. number of DL/UL users

그림 4는 상・하향링크 사용자 수에 따른 공평 지수(fairness index)를 보여준다. 공평 지수는 널리 사용되는 Jain's fairness index를 사용하였으며 다음과 같이 정의된다 [16].

$$I = \left(\sum_{i=1}^{2M} r_i\right)^2 / \left(2M \sum_{i=1}^{2M} r_i^2\right) \quad (12)$$

여기에서 r_i는 상・하향링크 사용자의 전송률을 나타낸다. 랜덤 스케줄링을 사용한 경우에 가장 좋은 공평도 성능을 보이며 제안 스케줄링 방식이 그보다 약간 낮게 나온다. 이는 제안 방식이 좀 더 높은 신호 품질을 갖는 하향링크 사용자에게 간섭을 보다 덜 받게 하여 전송률을 차별화하기 때문이다. 하지만 TDD 방식을 포함하여 전체적으로 공평 지수의 차이가 크지 않은데, 이는 제안하는 전이중 시스템은 모든 사용자에게 한 프레임 내에서 하나의 타임슬롯을 할당하기 때문이다. 따라서 제안하는 사용자 스케줄링 방식은 셀 용량을 증대시키면서도 사용자간 공평 지수를 그다지 낮추지 않음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 전이중 무선 셀룰라 네트워크에서 셀 용량 최대화를 위한 사용자 스케줄링 방식을 제안하였다. 제안하는 사용자 스케줄링 방식은 더 좋은 신호 품질을 갖는 하향링크 사용자에게 사용자간 간섭을 덜 받도록 상향링크 사용자를 먼저 선택할 권한을 준다. 이렇게 제안된 스케줄링 알고리즘은 낮은 복잡도를 가지면서 최적의 성능에 거의 근접한다. 또한 기존의 TDD 시스템과 비교하여 제안 스케줄링 방식을 사용하는 전이중 시스템은 셀 용량과 공평 지수 측면에서 보다 높은 성능을 보여준다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0025424).

REFERENCES

[1] W. C. Y. Lee, "The most spectrum-efficient duplexing system: CDD," *IEEE Commun.* Mag., vol. 40, no. 3, pp. 163-166, Mar. 2002.

[2] W. C. Y. Lee, "CS-OFDMA: A new wireless CDD physical layer scheme," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 2, pp. 74-79, Feb. 2005.

[3] X. Jin, M. Ma, B. Jiao, and W. C. Y. Lee, "Studies on spectral efciency of the CDD system," in *Proc. Veh. Technol. Conf. 2009-Fall*, Alaska, USA, Sept. 2009.

[4] J. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," in *Proc. the 16th annual int. conf. Mob. comp. and Networking*, Chicago, Illinois, USA, Sept. 2010.

[5] D. Bharadia, E. McMilin, and S. Katti, "Full duplex radios," in *ACM SIGCOMM'13*, Hong Kong, China, pp. 375-386, Aug. 2013.

[6] S. Hong, J. Brand, J. Choi, M. Jain, J. Mehlman, S. Katti, and P. Levis, "Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 114-121, Feb. 2014.

[7] D. W. K. Ng and R. Schober, "Dynamic resource allocation in OFDMA systems with full-duplex and hybrid relaying," in *Proc. IEEE ICC'11*, Kyoto, pp. 1-6, June 2011.

[8] D. W. K. Ng, E. S. Lo, and R. Schober, "Dynamic resource allocation in MIMO-OFDMA systems with full-duplex and hybrid relaying," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 5, pp. 1291-1304, May 2012.

[9] W. Cheng, X. Zhang, and H. Zhang, "Full/half duplex based resource allocations for statistical quality of service provisioning in wireless relay networks," in *Proc. INFOCOM 2012*, Orlando, FL, pp. 864-872, Mar. 2012.

[10] X. Shen, X. Cheng, L. Yang, M. Ma, and B. Jiao, "On the design of the scheduling algorithm for the full duplexing wireless cellular network," in *IEEE Globecom'13*, Atlanta, GA, pp. 4970-4975, Dec. 2013.

[11] S. Goyal, P. Liu, S. Hua, and S. Panwar, "Analyzing a full-duplex cellular system," in *Proc. Information Sciences and Systems (CISS) 2013*, Baltimore, MD, pp. 1-6, Mar. 2013.

[12] Hyun-Ho Choi, "On the Design of User Pairing Algorithms in Full Duplexing Wireless Cellular Networks," in *Proc. International Conference on ICT Convergence (ICTC) 2014*, Busan, Korea, pp. 490-495, Oct. 2014.

[13] A. Sarkar, P. P. Chakrabarti, and R. Kumar, "Frame-based proportional round-robin," *IEEE Trans. on Computers*, vol. 55, no. 9, pp. 1121-1129, Sept. 2006.

[14] M. Jain, J. Choi, T. Kim, et al., "Practical, real-time, full duplex wireless," in *Proc. ACM MobiCom'11*, Las Vegas, USA, pp. 301-312, Sept. 2011.

[15] H.-H. Choi and J.-R. Lee, "Distributed Transmit Power Control for Maximizing End-to-End Throughput in Wireless Multi-hop Networks," *Springer Wireless Personal Communications,* vol. 74, no. 3, pp. 1033-1044, Feb. 2014.

[16] R. Jain, D. M. Chiu, and W. Hawe, "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems," *DEC Research Report TR-301*, 1984.

최현호(Hyun-Ho Choi)

2001년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학사
2003년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학석사
2007년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학박사
2007년 3월 ~ 2011년 2월: 삼성종합기술원 전문연구원
2011년 3월 ~ 현재: 국립한경대학교 전기전자제어공학과 조교수
※관심분야 : 매체접속제어, 분산자원관리, 저전력 프로토콜, 생체모방 알고리즘, 차세대 이동통신 시스템