

## 전이중 셀룰라 네트워크에서 아웃티지 최소화를 위한 신호 품질과 사용자간 간섭량 기반의 사용자 스케줄링 알고리즘

최현호\*

### User Scheduling Algorithm Based on Signal Quality and Inter-User Interference for Outage Minimization in Full-Duplex Cellular Networks

Hyun-Ho Choi\*

Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Institute for Information Technology Convergence, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea

#### 요 약

전이중(full-duplex) 셀룰라 네트워크에서 상향링크 사용자는 하향링크 사용자에게 간섭을 유발하므로 같은 무선 자원을 동시에 사용하는 상·하향링크 사용자 쌍을 어떻게 결정하는 지가 시스템 성능에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 사용자의 서비스의 질을 보장하기 위한 목적으로 아웃티지(outage) 발생의 최소화를 위한 최적화 문제를 제시하고, 낮은 복잡도를 갖는 차선의 사용자 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안하는 스케줄링 방식은 나쁜 신호 품질을 갖는 하향링크 사용자에게 간섭을 덜 미치는 상향링크 사용자를 먼저 선택할 수 있도록 우선권을 주는 방식으로 동작한다. 시뮬레이션 결과 제안하는 사용자 스케줄링 방식을 사용하는 전이중 시스템은 최적에 가까운 아웃티지 성능을 달성하면서 기존 반이중 모드의 셀룰라 시스템 대비 아웃티지 발생을 현저히 줄인다.

#### ABSTRACT

In a full-duplex (FD) wireless cellular network, uplink (UL) users induce the severe inter-user interference to downlink (DL) users. Therefore, a user scheduling that makes a pair of DL user and UL user to use the same radio resource simultaneously influences the system performances significantly. In this paper, we first formulate an optimization problem for user scheduling to minimize the occurrence of outage, aiming to guarantee the quality of service of users, and then we propose a suboptimal user scheduling algorithm with low complexity. The proposed scheduling algorithm is designed in a way where the DL user with a worse 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 decreases the outage probability compared with the conventional half-duplex cellular system.

**키워드** : 전이중, 셀룰라 네트워크, 사용자 스케줄링, 아웃티지 최소화

**Key word** : Full-duplex, Cellular network, User scheduling, Outage minimization

Received 16 September 2015, Revised 07 October 2015, Accepted 20 October 2015

\* 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 17579, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.11.2576>

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/licenses/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

최근 하나의 통신 노드에서 동일한 주파수 자원으로 송신과 수신을 동시에 수행할 수 있게 하는 전이중(full-duplex; FD) 기술이 주목을 받고 있다. 이는 같은 채널 상에서 동시 송수신시 발생하는 자기 간섭(self-interference)을 효과적으로 없애는 획기적인 송수신기의 개발을 통해 가능하게 되었다. 대표적인 결과로 스탠포드 대학의 Katti 교수 연구팀은 RF 아날로그 단계에서의 간섭 억제 기술과 디지털 신호 처리 기술을 동시에 사용하여 자기 간섭이 잡음 레벨로 줄어드는 것을 보이고, 이를 실제로 구현하여 한 노드에서 전이중 방식의 현실적인 동작이 가능함을 보여주었다[1-3]. 이러한 전이중 방식이 셀룰라 네트워크의 기지국에 사용될 경우 셀룰라 네트워크의 전송 효율(spectral efficiency)이 기존 반이중(half-duplex; HD) 방식 대비 이론적으로 두 배까지 향상될 수 있다[4]. 따라서 전이중 셀룰라 네트워크는 5G 이동통신을 위한 핵심 기술 중의 하나로 간주되어 연구가 활발히 진행 중이다[5].

전이중 셀룰라 네트워크는 일반적으로 전이중 방식을 사용하는 기지국과 이 기지국으로부터 서비스를 받는 반이중 방식의 이동 단말을 고려한다. 단말은 구현 비용 및 복잡도의 문제로 인하여 반이중 방식의 사용을 우선적으로 고려한다. 전이중 모드의 기지국을 통하여 일부 단말은 하향링크(downlink) 서비스, 나머지 일부 단말은 상향링크(uplink) 서비스를 동시에 같은 주파수를 사용하여 받게 된다. 이때, 기지국에서 발생하는 자기 간섭 문제는 기지국 송수신기 내에서 해결 가능하지만, 상·하향링크 사용자의 동시 송수신으로 인한 상향링크 단말에서 하향링크 단말로 발생하는 사용자간 간섭(inter-user interference) 문제는 해결되어야 할 또 다른 중요한 이슈이다[6]. 만약 동시에 같은 채널을 사용하는 상·하향링크 단말이 서로 인접해 있다면, 하향링크 단말은 상향링크 단말로부터 강한 간섭을 받아 수신한 패킷의 복원이 어렵게 된다.

이러한 자기 간섭 문제를 해결하기 위하여 같은 무선 자원을 사용하는 상·하향링크 단말을 결정하는 사용자 스케줄링에 관한 연구가 수행되었다. 먼저 전이중 모드를 사용하는 무선 중계(relay) 시스템에서 자기 간섭 문제를 해결하는 다양한 동적 자원 할당 방식이 연구되었다[7-9].

또한 전이중 기지국이 다수개의 송·수신 안테나를 사용할 때 상향링크 사용자와 하향링크 사용자간에 발생하는 간섭 문제를 고려하여 주파수 채널 자원과 전송 방향을 결정하는 스케줄링 알고리즘이 제안되었다[10]. 아울러, 전이중 기지국이 매우 많은 단말을 관장할 때 간단한 기회적인 상·하향링크 사용자 스케줄링 방식을 제시하고, 사용자간 간섭이 잡음 수준으로 줄어드는 다중 사용자 다이버시티(diversity) 이득이 있음을 보였다[11]. 또한 전이중 셀룰라 네트워크에서 셀 용량을 최대화하기 위한 최적화 문제를 제시하고 최적 성능에 근접하면서도 복잡도를 낮춘 휴리스틱(heuristic) 사용자 스케줄링 알고리즘이 제안되었다[12, 13].

지금까지 전이중 셀룰라 네트워크에서 사용자간 간섭 문제를 해결하기 위한 상·하향링크 사용자 스케줄링 방식들은 주로 셀 용량을 향상시키는데 초점을 맞추어 왔다. 시스템 운용 측면에서 전체 셀 용량의 향상도 중요하지만, 실제 서비스를 받는 사용자 입장에서는 언제 어디서든 서비스의 질(quality of service; QoS)을 보장받는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 전이중 셀룰라 네트워크에서 사용자 QoS를 보장하기 위한 목적으로 아웃티지(outage) 발생의 최소화를 위한 상·하향링크 사용자 스케줄링 문제를 다룬다. 이를 위하여 아웃티지 발생의 최소화를 위한 사용자 스케줄링의 최적화 문제를 제시한다. 이 최적화 문제는 매우 높은 계산 복잡도를 요구하기 때문에 실현 가능성을 고려하여 낮은 복잡도를 갖는 차선의(suboptimal) 사용자 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 사용자가 수신하는 신호 품질과 사용자간 간섭량을 고려하여 신호 품질이 나쁜 사용자가 더 적은 간섭을 받도록 해주는 방식으로 동작하여 아웃티지 발생 확률을 줄인다. 다양한 시뮬레이션을 통하여 제안한 사용자 스케줄링 알고리즘을 사용하는 전이중 셀룰라 시스템이 최적 아웃티지 성능에 근접하며, 기존 반이중 방식을 사용하는 셀룰라 시스템 대비 아웃티지 발생을 크게 줄일 수 있음을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 고려하는 전이중 셀룰라 네트워크의 시스템 모델을 기술한다. III장에서 제안하는 사용자 스케줄링 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  $N$ 개의 이웃 셀로 둘러싸여 있으며, 각 셀에는  $2M$ 명의 사용자가 존재한다. 여기에서 모든 사용자는 상향링크로 전송하거나, 하향링크로 전송받아야 할 데이터가 항상 존재하여,  $M$ 명의 사용자는 상향링크로 서비스를 받으며 나머지  $M$ 명의 사용자는 하향링크로 서비스를 받는다고 가정한다. 또한 하나의 전송 프레임은  $M$ 개의 타임슬롯으로 나뉘며 각 사용자는 항상 한 프레임 내에 전이도 한 슬롯을 할당 받아 송신하거나 수신하는데 사용한다. 이러한 타임슬롯 할당 방식은 무선 자원의 라운드 로빈(round-robin) 스케줄링 방식에 해당되며, 본 논문에서는 자원 사용 측면에서 모든 사용자들에게 어느 정도의 공정성을 보장하기 위하여 이러한 타임슬롯 할당 방식을 채택한다 [14].

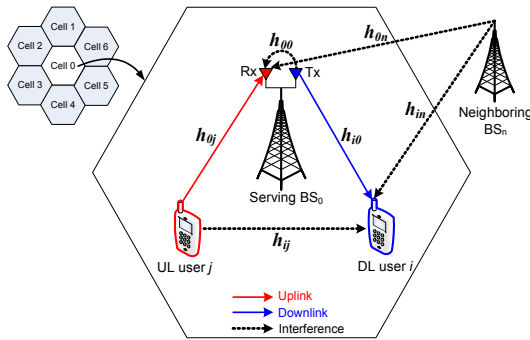


Fig. 1 System model of full-duplex cellular network

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[10, 11]. 또한 하향링크 사용자는 이웃 기지국의 송신단으로부터의 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 가

정하에 무시된다 [10].

따라서  $i$ 번째 하향링크 사용자가 수신하는 신호는 다음과 같이 표현된다.

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

여기에서  $P_d$ 와  $P_j$ 는 각각 기지국의 송신 파워와  $j$ 번째 상향링크 사용자의 송신 파워를 나타낸다. 심볼  $x_i, x_j, \tilde{x}_n$ 는 각각 서빙 기지국 BS<sub>0</sub>와 같은 타임슬롯을 사용하는  $j$ 번째 상향링크 사용자와  $n$ 번째 이웃 기지국에서 송신한 신호를 나타낸다. 또한  $h_{i0}, h_{ij}, h_{in}$ 은 각각 서빙 기지국 BS<sub>0</sub>,  $j$ 번째 상향링크 사용자,  $n$ 번째 이웃 기지국으로부터  $i$ 번째 하향링크 사용자로의 전송 링크에 해당하는 채널 계수를 나타낸다.  $n_i$ 는 평균이 0이고  $N_0$ 의 분산을 갖는 additive white Gaussian noise (AWGN)을 나타낸다. 채널 계수  $h_{i0}, h_{ij}, h_{in}$ 은 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  $d_{i0}^\alpha, d_{ij}^\alpha, d_{in}^\alpha$ 은 해당 링크의 물리적인 전송 거리를 나타내며,  $\alpha$ 는 경로 감쇠 지수 (path loss exponent)를 나타낸다.

반면  $j$ 번째 상향링크 사용자로부터 서빙 기지국 BS<sub>0</sub>가 수신하는 신호는 다음과 같이 표현된다.

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

여기에서  $h_{0j}, h_{00}, h_{0n}$ 은 각각  $j$ 번째 상향링크 사용자, 서빙 기지국 BS<sub>0</sub>의 송신단,  $n$ 번째 이웃 기지국의 송신단으로부터 서빙 기지국 BS<sub>0</sub>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  $d_{0j}^\alpha, d_{00}^\alpha, d_{0n}^\alpha$ 은 해당 링크의 물리적인 전송

거리를 나타낸다.

채널 추정을 위하여 서빙 기지국과 이웃 기지국들은 파일럿(pilot) 신호를 전송하고, 서빙 기지국의 수신기는 이를 활용한다. 기지국에서 수신되는 간섭의 파워가 수신되는 신호의 세기에 비하여 매우 크에도 불구하고, 간섭 파워는 아날로그와 디지털 간섭 제거 기술을 차례로 적용하여 수신단 노이즈 플로워(noise floor) 수준으로 낮아진다[1-3]. 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[15]. 본 논문에서는 전이중 시스템의 효과적인 동작을 위하여 기지국에서 수행하는 채널 추정은 완벽하다고 가정한다. 이러한 간섭 채널의 추정과 서빙 기지국과 이웃 기지국으로부터 백홀을 통하여 전달된 알려진 신호를 이용하여, 서빙 기지국 BS<sub>0</sub>의 수신단은 수신 신호로부터 해당 간섭 신호를 없앨 수 있다. 간섭 제거 후  $j$ 번째 상향링크 사용자의 신호는 다음과 같이 표현된다.

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

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

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

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

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

아웃티지는 현재 수신하는 SINR 값이 요구되는 SINR 값을 만족시키지 못할 때 발생한다. 따라서  $i$ 번째 하향링크 사용자와  $j$ 번째 상향링크 사용자의 아웃티지 확률은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$P_i^{out} := \Pr\{\gamma_i < \gamma_{req}\} \quad (6)$$

$$P_j^{out} := \Pr\{\gamma_j < \gamma_{req}\} \quad (7)$$

여기에서  $\gamma_{req}$ 는 QoS 보장을 위해 요구되는 SINR 값을 나타낸다.

추가적으로 기존 반이중 모드의 셀룰라 시스템은 자기 간섭과 사용자간 간섭이 모두 존재하지 않으므로  $i$ 번째 하향링크 사용자와  $j$ 번째 상향링크 사용자는 다음과 같은 SINR을 갖는다.

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

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

### III. 신호 품질과 사용자간 간섭량 기반의 사용자 스케줄링 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 스케줄링을 의미한다. 이때  $h_{ij}$ 값은 하향링크 사용자의 SINR에만 영향을 주며, 상향링크 사용자의 SINR에는 영향을 주지 않는다. 따라서 아웃티지 발생을 최소화하기 위해서는 최대한 많은 수의 하향링크 사용자가  $\gamma_{req}$  이상의 SINR을 갖도록  $h_{ij}$ 를 결정하는 스케줄링이 수행되어야 한다.

스케줄링 문제를 만들기 위하여  $(i, j)$  쌍을 같은 타임슬롯을 할당 받은  $i$ 번째 하향링크 사용자와  $j$ 번째 상향링크 사용자라고 나타내자. 가능한 조합은 한번 뽑은 수를 다시 뽑을 수 없다는 조건 하에  $\{1, 2, \dots, M\}$ 에서 번호  $i$ 를 뽑고  $\{1, 2, \dots, M\}$ 에서 번호  $j$ 를 뽑는 경우가 된다. 모든 가능한 사용자 쌍을  $\Pi$ 로 나타낼 때,

$M=3$ 인 경우에  $\Pi$ 는 다음과 같이 6개의 다른 스케줄링 조합을 갖는다.

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

일반적인  $M$ 값에 대해서 가능한 스케줄링 조합의 전체 개수는  $M!$ 이 됨을 알 수 있다. 또한 여기에서  $\Pi$ 의  $k$ 번째 원소를  $\pi_k$ 로 나타내자 ( $k = 1, 2, \dots, M!$ ).

아웃티지 최소화를 목적으로 하는 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \pi_k^* = \operatorname{argmin}_{(i,j) \in \pi_k} P_i^{\text{out}} + P_j^{\text{out}} \quad (11) \\ \text{s.t. } P_j \leq P_{\max} \\ i, j \in \{1, 2, \dots, M\} \end{aligned}$$

여기에서  $P_{\max}$ 는 상향링크 단말의 최대 송신파위를 나타낸다. 이 최적화 문제를 풀기 위해서는 전체  $M!$ 개의 조합에 대해서 모두 조사해야 하므로  $O(M!)$ 의 매우 높은 계산 복잡도를 갖는다. 이는  $M$ 값이 커짐에 따라 현실적으로 불가능하므로 낮은 복잡도를 갖는 차선의 사용자 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

식 (5)에 따르면 상향링크 사용자의 SINR  $\gamma_j$ 는 하향링크 사용자로부터 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 채널 추정과 간섭 제거가 완벽하면  $\gamma_j$ 는 상향링크 채널  $h_{0j}$ 에만 의존한다. 반면 하향링크 사용자의 SINR  $\gamma_i$ 는 하향링크 채널  $h_{i0}$  뿐만 아니라  $j$ 번째 상향링크 사용자에서  $i$ 번째 하향링크 사용자로의 직접 채널  $h_{ij}$ 에 의존한다. 따라서 사용자 스케줄링은 하향링크 사용자의 SINR  $\gamma_i$ 에만 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

상향링크 사용자의 전송은 하향링크 단말에게 간섭을 주기 때문에 상향링크 사용자는  $\gamma_j = \gamma_{req}$ 와  $P_j \leq P_{\max}$ 의 조건하에서 송신 파워를 최대한 낮추는 것이 바람직하다. 이러한 상향링크 사용자의 송신 파워 제어는 자신의 SINR을 만족시키면서도 하향링크 사용자로의 간섭을 줄여주어 하향링크 사용자의 아웃

티지 발생을 낮추기 때문이다. 이와 같이 상향링크 사용자의 송신 파워를 제어할 경우 송신 파워가  $P_{\max}$ 로 제한되는 상향링크 사용자만 아웃티지가 발생하게 된다.

하향링크 사용자 관점에서 아웃티지 발생을 최소화하기 위해서는 더 나쁜 신호 품질을 갖는 하향링크 사용자에게 보다 적은 간섭을 받게 하여 SINR을 높여주는 것이 바람직하다 [16]. 따라서 제안하는 스케줄링 알고리즘에서는 더 나쁜 신호 품질(즉, 더 낮은  $\gamma_i^{HD}$  값)을 갖는 하향링크 사용자가 먼저 자신의 파트너로 더 작은 간섭량  $P_j \|h_{ij}\|^2$ 을 갖는 상향링크 사용자를 고르도록 한다. 이와 같은 방식은 더 나쁜 신호 품질을 갖는 하향링크 사용자에게 상향링크 사용자로부터의 간섭을 더 줄여줌으로써 해당 하향링크 사용자의 SINR을 보다 증가시켜 아웃티지 발생을 줄인다.

제안하는 사용자 스케줄링 알고리즘은 다음의 알고리즘 1과 같이 기술된다.

---

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

---

- Ensure:  $\gamma_{req}$  = required SINR
- 01: **Initialize:**
- $$P_j \leftarrow \min \left\{ \frac{\gamma_{req} N_0}{\|h_{0j}\|^2}, P_{\max} \right\}, j = 1, 2, \dots, M$$
- $$U_j \leftarrow 0, j = 1, 2, \dots, M \quad /* \text{flag for selected or not} */$$
- 02: Sort the DL users in order of low  $\gamma_i^{HD}$  value
- 03: **for**  $i$  = [sorted DL users] **do**
- 04: Unpaired UL users  $\leftarrow$  find( $U_j = 0$ )
- 05: Measure  $h_{ij}$  from unpaired UL user  $j$  to DL user  $i$  where  $j \in \{1, 2, \dots, M\}$
- 06: Choose the UL user  $j$  with the smallest interference  $P_j \|h_{ij}\|^2$  among unpaired UL users
- 07: **if**  $\gamma_i > \gamma_{req}$  when choosing the UL user  $j$  **then**
- 08:  $U_j \leftarrow 1$
- 09: Complete the user pair  $(i, j)$
- 10: **else**
- 11: Outage DL users  $\leftarrow i$
- 12: **end if**
- 13: **end for**
- 14: Execute random user pairing for outage DL users and unpaired UL users
-

제안하는 스케줄링 알고리즘은  $M$ 명의 상·하향링크 사용자들에 대한 정렬과 검색만으로 가능하므로 복잡도가  $O(M^2)$ 으로 크게 줄어드는 장점을 갖는다.

#### IV. 시뮬레이션 및 성능 분석

시뮬레이션을 위하여 그림 1과 같은 7개의 셀을 가진 셀룰라 네트워크를 고려하고 가운데 위치한 서빙 셀에서 제안 방식의 성능을 도출한다 [12]. 하향링크 사용자와 상향링크 사용자의 수는 모두  $M$ 명으로 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 독립적이라고 가정한다. 기지국과 사용자 간에는 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 반이중 방식, 사용자 쌍을 무작위로 결정하는 랜덤 스케줄링 방식, 모든 경우의 수를 고려하여 구한 최적 스케줄링 방식과 비교된다.

Table. 1 Simulation Parameters

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

그림 2는 하향링크 및 상향링크 사용자 수( $M$ )가 각각 8명으로 주어졌을 때 요구되는 SINR에 따른 아웃티지 확률을 보여준다.

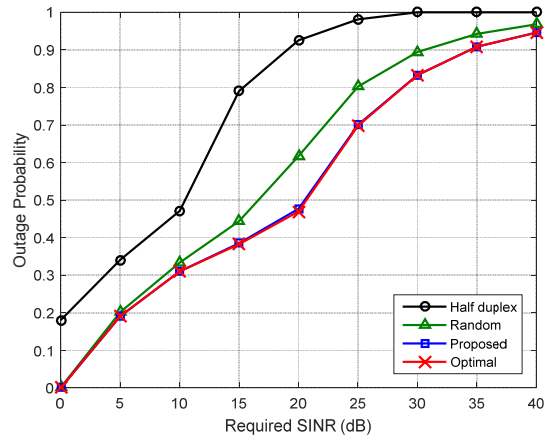


Fig. 2 Outage probability vs. required SINR when  $M=8$

$M=8$ 로 제한한 이유는 최적 스케줄링 방식의 계산 복잡도가  $O(M!)$ 로 매우 높아 최적 성능을 구하기 어렵기 때문이다. 아웃티지 확률 측면에서 최적 스케줄링, 제안 스케줄링, 랜덤 스케줄링, 기존 반이중 방식 순으로 좋은 성능을 보여준다. 제안 스케줄링 알고리즘은 최적 성능에 거의 근접함을 볼 수 있는데, 이는 차선 알고리즘으로써의 효율성을 입증한다. 또한 제안 스케줄링 방식은 요구 SINR이 5 dB 이상인 경우에 기존 방식 대비 아웃티지 발생을 현저히 낮춰준다. 한 가지 주목할 만한 점은 간단한 랜덤 스케줄링을 사용하여도 전이중 시스템은 기존 반이중 방식의 성능을 크게 향상시킨다는 점이다.

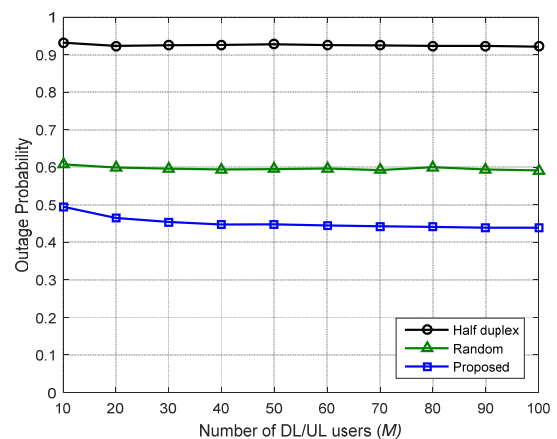


Fig. 3 Outage probability vs. number of DL/UL users when  $\gamma_{req}=20$  dB

그림 3은 상·하향링크 사용자 수에 따른 아웃티지 확률을 보여준다. 참고로 최적 스케줄링 방식은  $M$  값이 커짐에 따라 높은 복잡도로 인하여 성능을 구할 수 없어 배제되었다. 기존 반이중 모드와 비교하여 랜덤 스케줄링과 제안 스케줄링 방식을 사용하는 전이중 방식은 아웃티지 확률을 평균적으로 각각 0.3과 0.5 만큼 감소시킨다. 따라서 전이중 시스템의 성능은 사용자 스케줄링에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있고, 상·하향링크 사용자 쌍을 랜덤하게 결정하는 것보다 제안 방식과 같이 상·하향링크 사용자간의 간섭량을 고려하여 결정하는 것이 보다 좋은 아웃티지 성능을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 상·하향링크 사용자 수가 증가함에 따라 다른 방식은 일정한 아웃티지 성능을 보이는 반면, 제안 스케줄링 방식은 아웃티지 확률이 약간씩 낮아지는 현상을 보이는데 이는 사용자 수가 증가함에 따라 제안 방식이 사용자 다이버시티를 갖기 때문이다.

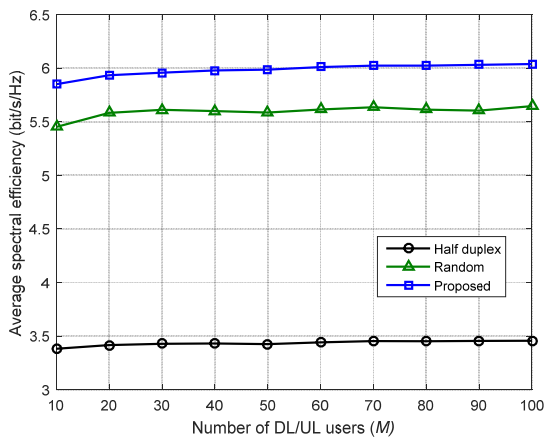


Fig. 4 Average spectral efficiency vs. number of DL/UL users when  $\gamma_{req}=20$  dB

그림 4는 상·하향링크 사용자 수에 따른 사용자의 평균 전송 효율을 보여준다. 기존 반이중 모드와 비교하여 랜덤 스케줄링과 제안 스케줄링 방식을 사용하는 전이중 방식은 사용자 전송 효율이 각각 평균 1.63배와 1.75배 증가함을 확인할 수 있다. 제안 스케줄링 방식은 아웃티지 성능 뿐만 아니라 전송 효율 측면에서도 랜덤 스케줄링 방식 보다 좋은 성능을 보여주는데, 이는 사용자간 채널 상황을 고려하기 때문이다.

## V. 결론

본 논문에서는 전이중 셀룰라 네트워크에서 아웃티지 확률의 최소화를 위한 사용자 스케줄링 방식을 제안하였다. 제안하는 사용자 스케줄링 방식은 더 나은 신호 품질을 갖는 하향링크 사용자에게 사용자간 간섭을 덜 받도록 상향링크 사용자를 먼저 선택할 권한을 준다. 이렇게 제안된 스케줄링 알고리즘은 낮은 복잡도를 가지면서 최적의 아웃티지 성능에 거의 근접하였다. 또한 기존 반이중 시스템 및 랜덤 스케줄링 방식과 비교하여 제안 스케줄링 방식을 사용하는 전이중 시스템은 아웃티지 성능과 전송 효율 측면에서 보다 높은 성능을 보여주었다. 이러한 스케줄링 알고리즘은 향후 전개될 전이중 셀룰라 네트워크에서 상·하향링크 사용자 쌍을 결정할 때 효과적으로 사용 가능하리라 예상된다.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2011-0025424).

## REFERENCES

- [1] 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.
- [2] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, "Full duplex radios," in *ACM SIGCOMM'13*, Hong Kong, China, pp. 375-386, Aug. 2013.
- [3] 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.
- [4] S. Goyal, Pei Liu, S.S. Panwar, et al., "Full duplex cellular systems: will doubling interference prevent doubling capacity?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 5,

- pp. 121-127, May 2015.
- [ 5 ] Z. Zhang, X. Chai, K. Long, et al., "Full duplex techniques for 5G networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 5, pp. 128-137, May 2015.
- [ 6 ] D. Kim, H. Lee, and D. Hong, "A Survey of In-band Full-duplex Transmission: From the Perspective of PHY and MAC Layers," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Feb. 2015.
- [ 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] C. Karakus and S. Diggavi, "Opportunistic Scheduling for Full-Duplex Uplink-Downlink Networks," in *Proc. ISIT'15*, Hong Kong, June 2015.
- [12] H.-H. 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] H.-H. Choi, "User Scheduling Algorithm for Cell Capacity Maximization in Full Duplexing Wireless Cellular Networks," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 18, no. 11, pp. 2613-2620, Nov. 2014.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.



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 부교수  
 ※ 관심분야 : 매체접속제어, 분산자원관리, 저전력 프로토콜, 생체모방 알고리즘, 차세대 이동통신 시스템