

다중셀 상향링크 네트워크에서 기밀 전송률 향상을 위한 전력조절 기법

방인규*, 정방철°, 성단근*

A Power Control Scheme for Improving Secrecy Rate in Multi-Cell Uplink Networks

Inkyu Bang*, Bang Chul Jung°,
 Dan Keun Sung*

요 약

본 논문에서는 무선 다중셀 다중 사용자 네트워크에서 전송용량과 도청용량의 차로 정의되는 기밀용량을 증대시키기 위한 단말의 전력조절 기법을 제안한다. 모의실험 결과를 통해 제안 전력조절 기법과 임계값 기반의 스케줄링의 결합이 다중셀 환경에서 기밀 전송률을 상당히 향상시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

Key Words : Physical-layer security, Power control, Opportunistic user scheduling, Multiuser diversity, Secrecy rate

ABSTRACT

In this letter, we propose a power control mechanism in order to improve secrecy rate defined as the difference between capacity of main link and wiretap link in a wireless multi-cell multiuser network. Through simulations, we verify that the proposed power control mechanism with threshold based user scheduling can significantly increase secrecy rate in a multi-cell environment.

I. 서 론

오늘날, 무선통신은 사용의 편리함과 유용성으로 인하여 우리의 일상생활에서 널리 활용되고 있다. 하지만 무선 채널을 통해 전달되는 사용자의 정보는 무선 신호의 전파특성으로 인해 손쉽게 악의적 사용자에게 의해 도청될 수 있다. 따라서 무선 보안(wireless security)은 최근 들어 더욱 중요한 문제로 부각되고 있다. 이러한 흐름에 맞춰 최근 무선통신분야에서는 정보이론 관점에서 완벽한 기밀성을 보장하는 물리계층 보안(physical-layer security)이 새로운 연구 분야로 주목을 받고 있다.

정보이론에 기초한 물리계층 보안 연구 주제들 중에도 다중사용자 네트워크 상황에서 무선 보안 통신 방법을 분석하고자하는 연구들이 각광을 받고 있다¹⁾. 그러나 다중사용자 네트워크에서 정확한 기밀 용량을 계산하는 것이 이론적으로 상당히 어렵기 때문에 이를 대신하는 다양한 시스템 분석 척도들이 사용되고 있다. 예를 들어 ‘기밀 사용자 스케일링 법칙 (secure user-scaling law)’은 사용자의 수와 다중사용자 다이버시티 (multiuser diversity) 사이의 관계를 규명하기 위한 수학적 척도로서 활용되고 있다^{2,3)}.

본 논문은 다중셀 상향링크 네트워크에서 사용자 단말의 전력조절 기법이 임계값 기반의 사용자 스케줄링 방식과 결합되었을 때, 기밀용량 관점에서 얻을 수 있는 성능 이득의 효과를 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문은 L 개의 다중셀로 구성된 상향링크 네트워크를 진제한다. 각 셀에는 N 명의 사용자들이 존재하며, 악의적 사용자는 모든 셀에 걸쳐 총 K 명이 존재한다. 모든 기지국과 사용자 그리고 악의적 사용자는 단일 안테나를 지니며, 악의적 사용자들은 서로 독립적으로 도청을 시도한다고 가정하였다. 하나의 전송 블록동안, 채널 값이 변하지 않는 블록 페이딩 채널 모델을 가정하였다. 또한 하나의 전송 블록동안, 각 셀별로 한명의 사용자가 선택되어 서비스 받는 상황을 고려하였다. 사용자 단말은 자신이 속한 기지국, 인접 기지국, 그리고 악의적 사용자로부터의 채널정보

※이 논문은 2016년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2016R1A2B4014834).

♦ First Author : School of Electrical Engineering, KAIST, veronika@kaist.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr, 종신회원

* School of Electrical Engineering, KAIST, dksung@kaist.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2016-10-290, Received October 5, 2016; Revised November 14, 2016; Accepted January 13, 2017

를 얻을 수 있다고 가정하였다^[1]. 또한 채널정보는 스케줄링을 위해 사용된다.

본 논문에서 $\alpha_{iu_{n,l}} h_{iu_{n,l}}$ 은 l 번째 셀에 위치한 n 번째 사용자와 i 번째 기지국사이의 채널을 나타낸다. 여기서 $\alpha_{iu_{n,l}}$ 는 기지국과 사용자 사이의 경로감쇄를 나타내고 $h_{iu_{n,l}}$ 은 스몰 스케일 채널 페이딩 값을 나타낸다. 또한 본 논문에서는 k 번째 악의적 사용자와 l 번째 셀에 위치한 n 번째 사용자 사이의 채널을 $\beta_{ku_{n,l}} g_{ku_{n,l}}$ 으로 표시한다. $\beta_{ku_{n,l}}$ 와 $g_{ku_{n,l}}$ 는 각각 경로감쇄와 스몰 스케일 채널 페이딩을 의미한다. 분석의 편의상 $\alpha_{iu_{n,l}}$ 과 $\beta_{ku_{n,l}}$ 을 모두 1으로 가정한다^[2,3]. $h_{iu_{n,l}}$ 와 $g_{ku_{n,l}}$ 은 모두 평균이 0이고 공분산이 1인 복소 정규 가우시안으로 가정한다. 이때 주요링크 (Main link)의 i 번째 기지국과 도청링크 (Wiretap link)의 k 번째 도청자의 상향링크 수신 신호는 각각 다음과 같다.

$$y_{Mi} = h_{iu_{n,i}} x_{u_{n,i}} + \sum_{l=1, l \neq i}^L h_{iu_{n,l}} x_{u_{n,l}} + z_{Mi}, \quad (1)$$

$$y_{Wk} = g_{ku_{n,i}} x_{u_{n,i}} + \sum_{l=1, l \neq i}^L g_{ku_{n,l}} x_{u_{n,l}} + z_{Wk}, \quad (2)$$

여기서 $x_{u_{n,l}}$ 은 사용자 $u_{n,l}$ 이 전송하는 데이터 심벌을 의미한다. 송신전력 제약조건에 따라 사용자 $u_{n,l}$ 은 최대 P 의 전송전력을 사용하여 $x_{u_{n,l}}$ 을 전송할 수 있다. 또한 z_{Mi} 와 z_{Wk} 는 각각 평균이 0이고 공분산이 σ^2 인 복소 백색 가우시안 잡음을 의미한다. 따라서 전송용량과 도청용량의 차로 정의되는 상향링크 기밀 전송률은 수식 (1)과 수식 (2)을 바탕으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_i = \max\{C_{Mi} - C_{Wi}, 0\} \quad (3)$$

여기서 C_{Mi} 은 i 번째 기지국과 사용자사이의 전송용량 그리고 C_{Wi} 은 기지국과 악의적 사용자들 사이의 도청용량을 의미하며, 각각은 다음과 같다.

$$C_{Mi} = \log \left(1 + \frac{|h_{iu_{n,i}}|^2 \rho}{1 + \sum_{l=1, l \neq i}^L |h_{iu_{n,l}}|^2 \rho} \right), \quad (4)$$

$$C_{Wi} = \log \left(1 + \max_{\forall k} \left\{ |g_{ku_{n,i}}|^2 \rho \right\} \right), \quad (5)$$

여기서 $\rho = P/\sigma^2$ 은 송신 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio, SNR)를 의미한다. 다중셀 환경에서, 전송용량은 수식 (4)처럼 신호 대 간섭 및 잡음비 (signal to interference plus noise ratio, SINR)의 로그함수로 계산된다. 악의적 사용자들은 독립적으로 도청을 시도하기 때문에, 도청용량은 수식 (5)처럼 K 명의 악의적 사용자들의 도청용량의 최댓값으로 계산된다. 또한 수식 (5)의 도청용량은 수식 (4)와는 다르게 간섭의 영향을 포함하지 않는다. 이는 악의적 사용자들이 연속 간섭상쇄 기술 (Successive Interference Cancellation: SIC)을 사용할 경우, 각 셀에서 전송하는 총 L 명의 정보 중 한 명의 신호는 간섭 없이 복호할 수 있기 때문이다^[4].

III. 임계값 기반 사용자 스케줄링 및 제안 전력조절 기법

3.1 임계값 기반의 기회적 스케줄링 방식

임계값 기반의 기회적 스케줄링 방식 (threshold based opportunistic scheduling, TOS)은 임계값을 사용하여 인접 셀 간섭과 정보누출을 최소화한다^[3]. 예를 들어 i 번째 셀에 위치한 n 번째 사용자는 다음의 두 임계값 (η_I 과 η_L) 조건을 모두 만족하는 경우에만 자신의 기지국으로 스케줄링을 요청한다.

$$\nu_{n,i} \doteq \sum_{l=1, l \neq i}^L |h_{lu_{n,i}}|^2 \leq \eta_I, \quad (6)$$

$$\max \left\{ |g_{1u_{n,i}}|^2, \dots, |g_{Ku_{n,i}}|^2 \right\} \leq \eta_L. \quad (7)$$

각 기지국은 수식 (6)과 (7)를 기반으로 스케줄링을 요청한 단말들 중, 해당 기지국과의 채널 상태가 가장 좋은 단말에게 상향링크 데이터 전송을 승인한다. 일반적으로 TOS 방식은 임계값의 설정에 따라 성능이 달라진다. TOS 방식에서 최적의 임계값 (η_I^* 과 η_L^*)은 모의실험을 통해 계산할 수 있다^[2,3].

3.2 TOS 방식의 단점 및 제안 전력조절 기법

TOS 방식은 최적의 임계값 조건을 통해 채널 상태가 좋은 일부 사용자들을 미리 선별해냄으로써, 기밀 전송률을 일정 수준 이상으로 보장한다. 그러나 TOS 방식은 셀 안에 존재하는 전체 사용자를 효과적으로 사용하지 못하는 단점을 지닌다. 예를 들어 인접 셀이 많거나 악의적인 사용자들의 수가 많을 경우, 각 셀에

는 임계값 조건을 만족하는 사용자의 수가 적기 때문에 TOS 방식은 효과적이지 않다. 따라서 TOS 방식의 단점을 보완하기 위해서는, 모든 사용자가 스케줄링 요청을 할 수 있도록 임계값 조건에 맞게 각 단말의 송신전력을 적응적으로 조절하는 기법 필요하다. 제안 전력조절 기법은 수식 (6)과 (7)의 임계값을 이용하여 다음과 같이 표현된다. 제안 기법을 사용할 경우 단말은 임계값 이하의 도청용량과 간섭을 보장받을 수 있다.

$$P_{n,i}^* = \min \left\{ \frac{\eta_I^*}{\nu_{n,i}}, \frac{\eta_L^*}{\max_{\forall k} \{ |g_{ku,n,i}|^2 \}}, 1 \right\} P. \quad (8)$$

IV. 모의실험 결과

이 장에서는 제안기법의 성능을 검증하기 위한 모의실험을 수행하였다. 비교를 위해 TOS 기법을 포함한 다음의 세 가지 기법을 함께 도시하였다. MaxSNR은 사용자와 기지국 간의 채널만을 고려한 스케줄링 방식이다. MinSNRoc은 다른 셀로 방출되는 간섭의 양이 가장 적은 사용자를 선택하는 스케줄링 방식이다. Round Robin은 모든 사용자에게 동등하게 순차적으로 기회를 제공하는 스케줄링 방식이다. 모의실험에서는 기본적으로 총 3개의 셀로 구성된 무선망을 고려하고 있으며, 전체 영역에 총 3명의 악의적 사용자가 존재한다고 가정하였다.

그림 1은 송신 SNR에 따라 얻은 각 스케줄링 기법의 평균 기밀 전송률의 결과이다. SNR이 증가함에 따라 기존의 세 스케줄링 기법은 빠르게 기밀 전송률이 감소한다. 하지만 제안기법은 높은 SNR 영역에서도 다른 스케줄링 기법들에 비해 우수한 기밀 전송률을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

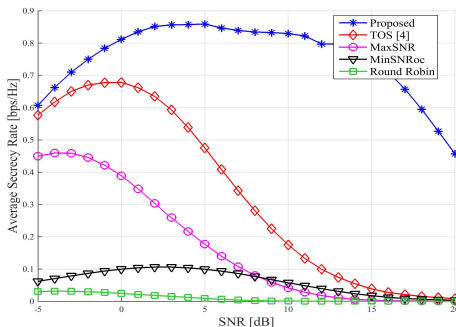


그림 1. $L=3$, $N=100$ 그리고 $K=3$ 일 때, 송신 SNR 변화에 따른 평균 기밀 전송률
Fig. 1. Average secrecy rate for varying SNR when $L=3$, $N=100$, and $K=3$.

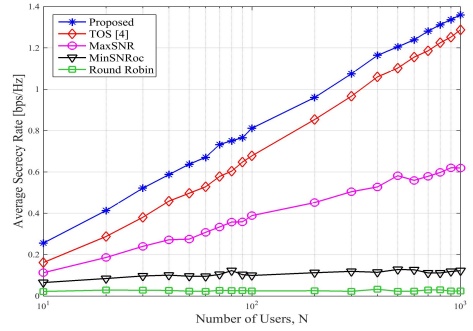


그림 2. $L=3$, $K=3$ 그리고 $\rho=0$ dB 일 때, 사용자 수 변화에 따른 평균 기밀 전송률
Fig. 2. Average secrecy rate for varying N when $L=3$, $K=3$, and $\rho=0$ dB.

그림 2는 각 셀의 사용자 수 따라 얻은 각 스케줄링 기법의 평균 기밀 전송률의 결과이다. 기존 기법과 비교했을 때, 제안기법의 기밀전송률이 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서 제안하는 전력조절 기법은 다중사용자 다이버시티를 효과적으로 활용하여 다중셀 환경에서 상향링크 기밀 전송률을 크게 향상시킨다.

References

- [1] A. Mukherjee, S. A. A. Fakoorian, J. Huang, and A. L. Swindlehurst, "Principles of physical layer security in multiuser wireless networks: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 3, pp. 1550-1573, Third Quarter, 2014.
- [2] I. Bang, S. M. Kim, and D. K. Sung, "Effects of multiple antennas and imperfect channel knowledge on secrecy multiuser diversity," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 9, pp. 1564-1567, Sept. 2015.
- [3] H. Jin, W. Y. Shin, and B. C. Jung, "On the secrecy capacity of multi-cell uplink networks with opportunistic scheduling," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. 2016*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016.
- [4] S-W. Jeon and B. C. Jung, "Interference neutralization for small-cell wireless networks," *J. KICS*, vol. 38, no. 12, pp. 1117-1124, Dec. 2013.