

다중 셀 하향 링크 OFDMA 중계 네트워크를 위한 셀간 간섭 조정 기법

은준호 이재홍

서울대학교 전기컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연구소
jheun@snu.ac.kr

An Inter-cell Interference Coordination Scheme for a Downlink OFDMA Relay Networks with Multicells

Junho Eun Jae Hong Lee

Department of Electrical Engineering and INMC, Seoul National University

요 약

차세대 무선통신에서는 높은 데이터 전송률을 필요로 하여 높은 밀도의 주파수 재사용을 요구하게 된다. 따라서 셀 간 간섭을 효율적으로 줄이는 방법을 필요로 하게 된다. 기존의 정적인 간섭 조정 기법들은 셀 가장자리 성능을 향상시키기 위해서 네트워크 전체의 성능을 희생한다는 단점이 존재한다.

한편, 높은 전송률을 필요로 하며, 동시에, 높은 신뢰도의 통신을 위해서 중계단말기를 사용한 OFDMA 중계 네트워크에 대한 관심이 높아지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 다중 셀 환경의 OFDMA 중계 네트워크에서의 셀 간 간섭을 적응적으로 조정하는 기법을 제안한다. 제안된 기법에서는 셀 간 간섭을 줄여서 셀 가장자리 성능을 향상시키고 동시에 네트워크 전체 성능 또한 향상시키는 것을 목적으로 한다. 모의실험을 통해, 제안된 알고리즘이 정적 셀 간 간섭조정 기법들 보다 셀 가장자리 성능과 네트워크 전체 성능이 우수함을 확인한다.

1. 서론

OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)는 주파수 선택적 페이딩으로 인한 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference) 문제를 해결하는 고유의 특성 뿐 아니라, 사용자에게 적응적으로 부반송파, 전력 등의 자원을 할당하여 주파수 다이버시티 이득과 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있어, 차세대 무선 통신 표준의 후보군인 LTE-Advanced 와 802.16m(mobile WiMAX)에서 사용하는 변조방법으로 익히 알려져 있다. [1], [2].

중계기를 통한 협력 통신(Cooperative Communication)은 하나의 안테나를 가진 사용자들과 중계기들이 가상의 안테나 열을 형성하여, 각 사용자와 중계기에 다중 안테나를 설치하지 않고도 그보다 적은 비용으로 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있다 [3], [4].

따라서, 협력 통신을 사용하는 중계 네트워크와 OFDMA 의 결합은 동적 할당에 대한 높은 자유도와 자원 재사용에 대한 장점을 가지기 때문에, 차세대 이동통신에서의 높은 전송률과 신뢰도를 만족시켜 줄 것으로 기대되고 있다 [5], [6], [7].

한편, 3 세대 이후의 셀 기반 시스템에서 높은 데이터 전송률을 충족시키기 위해서는 높은 밀도의 주파수 재사용을 필요로 한다. 하지만, 높은 주파수 재사용으로 인한 셀 간

간섭에 의한 성능열화가 발생하게 된다. 그러므로, 높은 밀도의 주파수 재사용 환경에서 OFDMA 의 적응적 할당 기법을 이용해 셀간 간섭을 조정하는 기법이 필요하다. [8]

기존의 정적 셀 간 간섭 조정 기법은 클러스터 기반으로 다루어졌다 [9]. 예를 들어, Reuse-3 방법은 3 개의 셀에 주파수 분배를 통해 셀 가장자리 사용자 성능을 향상시킬 수 있지만, 네트워크 전체 성능의 많은 희생을 필요로 한다. 그러므로 이를 보완하여 셀 중심부 사용자와 셀 가장자리 사용자를 나누어서, 서로 다른 주파수 재사용 지수(Reuse factor)를 갖도록 할당하는 기법인 FFR(Fractional Frequency Reuse) 기법이 제안되었다 [10], [11]. 하지만, 이 방법 역시 네트워크 전체 성능의 약간의 희생을 필요로 한다.

기존의 중계기가 없는 다중 셀 환경과는 달리, 다중 셀 기반 중계 네트워크에서는 인접 셀의 고정 중계기들이 셀 가장자리 사용자에게 가깝기 때문에 그로 인한 간섭의 영향이 크다. 그래서 중계기로부터의 간섭을 매우 중요하게 다루어야 한다.

따라서, 본 논문에서는 협력통신을 사용하는 다중 셀 OFDMA 중계 네트워크에서 중계기의 적절한 주파수 사용 제한을 통해 네트워크 전체 성능의 희생 없이 셀 가장자리 성능을 향상시키는 알고리즘을 제안한다. 제안된 기법과 기존의 기법들을 실험적 누적분포함수(empirical CDF)를 통해 비교한다.

2. 시스템 모델

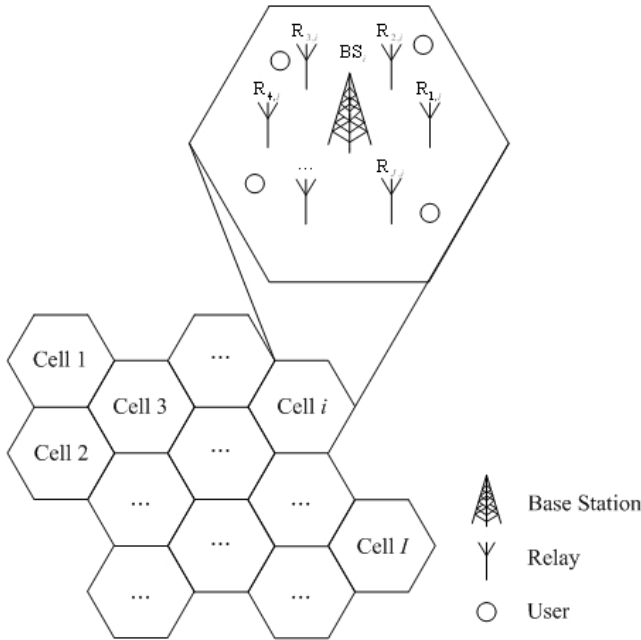


그림 1. I개의 cell로 구성된 OFDMA 중계 네트워크

가. 셀 구조

시스템은 그림 1 과 같이 I 개의 cell 로 구성된 하향링크 OFDMA 중계 네트워크를 가정한다. 각 셀의 중심에는 기지국(BS)이 위치하고, J 개의 고정된 중계단말기(RS)가 동심 원 위에 같은 각의 간격으로 분포하고 있으며, K 개의 수신단말기(UT)가 균일하게 분포한다고 가정한다.

각 셀의 기지국(BS)는 J 개의 고정된 중계단말기를 통해 K 수신단말기와 협력 통신을 한다고 가정한다. 중계단말기는 동시에 송신과 수신을 할 수 없다고 가정된다. 통신은 두 타임슬롯으로 나뉘어진다. 첫 번째 타임슬롯에서는 기지국이 선택된 중계단말기와 수신단말기로 데이터를 전송하고, 두 번째 타임슬롯에서는 중계단말기들이 받은 신호를 증폭하여 선택된 수신단말기로 전송을 한다.

$\gamma_{i,j,k}^{(n)}$ 는 i 번째 cell 에서 RS j ($R_{i,j}$)를 통한 UT k 에서 부반송파 n 을 통한 수신 SINR 이라고 하자. BS-UT, BS-RS, 그리고 RS-UT 의 채널 정보를 각각 $H_{U_{i,k}}^{i,(n)}$, $H_{R_{i,j}}^{i,(n)}$, 그리고 $H_{U_{i,k}}^{R_{i,j},(n)}$ 라 하면, 그에 대한 수신 SINR $\gamma_{i,j,k}^{(n)}$ 을 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\gamma_{i,j,k}^{(n)} = \frac{|H_{U_{i,k}}^{i,(n)}|^2 P_B}{|\Gamma_{1,U_{i,k}}^{(n)}|^2 + N_0} + \frac{\frac{|H_{R_{i,j}}^{i,(n)}|^2 P_B}{|\Gamma_{1,R_{i,j}}^{(n)}|^2 + N_0} \times \frac{|H_{U_{i,k}}^{R_{i,j},(n)}|^2 P_R}{|\Gamma_{2,U_{i,k}}^{(n)}|^2 + N_0}}{1 + \frac{|H_{R_{i,j}}^{i,(n)}|^2 P_B}{|\Gamma_{1,R_{i,j}}^{(n)}|^2 + N_0} + \frac{|H_{U_{i,k}}^{R_{i,j},(n)}|^2 P_R}{|\Gamma_{2,U_{i,k}}^{(n)}|^2 + N_0}} \quad (1)$$

적응적 변조 및 부호화 기법(AMC)이 적용된다고 가정한다. 그러므로, 각 부반송파에서의 목적 비트오율을 만족하는 가능한

최대 전송률은 부반송파의 대역폭과 수신 SINR 에 대한 함수이다.

$$r_{i,j,k}^{(n)} = W \log_2 \left(1 + \frac{-1.5\gamma_{i,j,k}^{(n)}}{\ln(5P_e)} \right) \quad (2)$$

여기에서 P_e 는 목적 비트오율이고 W 는 부반송파의 대역폭이다.

나. 최적화 문제

셀 중심에 있는 UT 에 비해 셀 가장자리에 있는 UT 는 더 많은 경로손실과 상당한 간섭을 경험하게 되므로, 셀 가장자리에 있는 UT 는 더 적은 SINR 값을 갖게 된다. 따라서, 최선 또는 차선의 할당 기법은 네트워크 전체 처리량뿐 아니라 셀 가장자리의 UT 또한 고려하여야 한다. 그러한 공정성을 고려한 알고리즘을 이용하여 할당하고, 공정성을 위해서 제안된 부반송파 사용을 제한하는 제한조건을 부가한 유틸리티를 최대화 하는 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\max \sum_i \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{i,j,k}^{(n)} u_{i,j,k}^{(n)}; \quad u_{i,j,k}^{(n)} = r_{i,j,k}^{(n)} d_{i,j,k}^{(n)} \quad (3)$$

$$\rho_{i,j,k}^{(n)} \in \{0,1\}; \forall i,j,k,n \quad (4)$$

$$\alpha_i^{(n)} \in \{0,1\}; \quad (5)$$

여기에서 $\alpha_i^{(n)}$ 는 i 번째 셀에서 부반송파 n 의 사용이 제한이 확정되었을 경우 1 의 값을, 그 외에는 0 의 값을 갖는다.

3. 주파수 분할 기반 간섭 조정 기법

어떠한 주파수 재사용 없이 모든 셀에서 모든 주파수 대역을 사용하는 것을 Reuse-1 기법이라고 한다. 이 경우 주파수 재사용 지수는 1 이다. 그리고 주파수 대역을 3 부분으로 분할해서 3 개의 셀이 그 부분을 각각 나누어서 사용하는 것은 Reuse-3 기법이라고 한다. 이 경우는 주파수 재사용 지수는 3 이 된다. Reuse-1 기법은 한 셀에서 사용 가능한 부반송파가 Reuse-3 기법에 비해 많지만, 인접 셀에서의 간섭의 영향이 있다. 그와는 반대로, Reuse-3 기법에서는 주파수 분할로 인하여 인접 셀의 간섭은 매우 줄어들게 되지만, 사용 가능한 부반송파의 개수가 적다.

PFR(Partial Frequency Reuse)기법은 FFR 기법의 한 종류로서, 효과적으로 reuse-1 과 reuse-3 기법을 결합한 기법이다. 우선, 사용자를 셀 중심부 사용자와 가장자리 사용자로 나눈 후, 주파수 대역을 두 부분으로 나누어서 한 부분은 셀 중심부에 있는 사용자를 위해 할당을 하고, 나머지 대역폭을 다시 세 부분으로 나누어서 각 셀의 가장자리 사용자를 위해 할당한다. 시스템 주파수 대역폭을 B 라고 하고, 셀 중심부에 사용되는 대역폭과 셀 가장자리에 사용되는 대역폭을 각각 B_i 과 B_o 라고 하자. 이 이때의 재사용 지수는 $B / (B_i + (B_o / 3))$ 과 같다.

4. 제안된 셀간 간섭 조정 기법

제안된 기법은 네트워크 전체 성능의 감소 없이 셀 가장자리 성능을 효과적으로 향상시키도록 동적 주파수 제한을 위한 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 두 단계로 이루어진다. 먼저, 부반송파를 할당하고, 각 셀에서 각 부반송파에 대해 조건에 따라, 인접 셀에서의 부반송파 제한을 요청한다. 그 이후로 주파수 간섭 제한 요청이 충돌 할 경우 그 충돌을 공정성을 고려해 해결한다.

가. 부반송파 할당 및 주파수 사용 제한 알고리즘

앞서 제시된 최적화 문제에서 주파수 사용 제한 제한조건만 제외하고, 최대 사용 가능한 부반송파 제한조건 하에서 유틸리티를 최대화 하도록 부반송파를 할당한다. 본문에서는 예시로 비례적 공정 스케줄링 알고리즘을 적용해서 비례적 전송률이 최대인 수신단말기에 대해 중계단말기를 선택하고 부반송파를 할당한다.

그 이후에, 각 부반송파 n 에 대해서, 평균 데이터 처리량이 일정 기준 이하인 사용자들에 대해, 계산된 전송률과 인접 셀에서 그 부반송파를 중계기들이 사용 제한 되었을 경우의 전송률의 차이를 비교를 해서, 그 값이 일정 기준 이상 되면, 인접 셀의 주파수 사용 제한 요청을 하게 된다. 위의 두 조건을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{T}_{i,k} \leq \bar{T}_{th} \tag{6}$$

$$r_{i,j,k}^{(n)} - r_{i,j,k}^{(n)} \geq r_{th} \tag{7}$$

여기에서 제한이란, 협력통신의 두 번째 타임슬롯에 중계단말기들이 전송을 안 하는 것을 말한다.

나. 제한요청 충돌 시 선택 알고리즘

어떤 부반송파 n 에 대해 주변 셀에서 서로 사용 제한을 요청하는 경우가 있으므로 그 충돌을 해결하는 알고리즘이 필요하다. 충돌했을 때, 부반송파 제한 시 가장 유틸리티가 큰 요청을 선택하게 된다. 본 논문은 비례 공정 할당 기법을 예시로 사용하였으므로, 부반송파 제한 시 비례적 전송률, 즉, 제한 시 전송률 차이 비 평균 데이터 처리량이 가장 높은 사용자의 제한요청을 선택한다.

5. 모의실험

모의실험에서는 3 개의 셀로 구성된 다중 셀 하향링크 OFDMA 중계 네트워크를 가정한다. 기지국 간 거리는 1km 이라고 가정한다. 각 셀에는 3 개의 중계단말기가 기지국을 중심으로 셀 반경의 절반의 반지름으로 그려진 동심원 위에 같은 각 간격으로 분포한다고 가정한다. 10 명의 수신단말기가 균등하게 분포한다고 가정한다. 전체 대역폭은 10MHz 이고, 사용 가능한 부반송파의 개수는 60 개라고 가정한다.

채널 모델은 WiMAX 포럼[12]의 WINNER C2 채널 모델[13]이 채택하였다. 셀 내부의 기지국과 중계단말기

사이의 채널에는 WINNER C2 LOS 경로손실 모델과 라이시안 페이딩 모델을 사용하였으며, 4dB 의 쉐도잉을 고려하였다. 그 외의 채널에는 WINNER C2 NLOS 경로손실 모델과 레일리 페이딩 모델을 사용하였으며, 8dB 의 쉐도잉을 고려하였다.

모의실험에서는 평균 사용 데이터 처리량의 경험적 누적 분포함수의 5%를 만족시키는 평균 처리량의 값을 셀 가장자리 UT 의 성능의 지표로 사용하였다. 이때 달성 가능한 전송률을 위한 목적 비트오율 P_e 은 10^{-3} 으로 설정되었다.

대조군으로는 앞서서 설명된 Reuse-1 기법과 Reuse-3 기법, PFR 기법을 제시하였다.

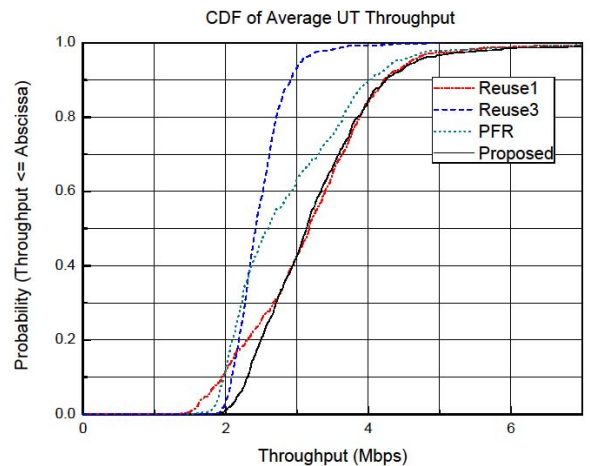


그림 2. 평균 사용자 데이터 처리량의 경험 누적분포함수

그림 2 는 셀 가장자리 사용자의 성능이 앞서 설명한 것과 같이 Reuse-3 기법, PFR 기법, Reuse-1 기법 순으로 성능이 좋으며, CDF 의 값이 올라갈수록 Reuse-1, PFR, Reuse-3 기법이 좋은 것을 보여준다. 이 기법들과 비교해서 제안된 기법은 Reuse-3 보다도 좋은 셀 가장자리 UT 성능을 보여주며, 셀 중심부 UT 성능은 Reuse-1 기법과 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 제안된 기법에서는 네트워크 전체 데이터 처리량이 줄어들지 않고, 셀 가장자리 사용자의 성능이 효과적으로 향상되었음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 OFDMA 중계 네트워크 에서 사용 될 수 있는 동적 셀간 간섭 조정기법에 대해 제안하였다. 제안된 간섭 조정 기법은 다중 셀 환경의 중계 네트워크에서 인접 셀의 중계기로부터의 간섭을 제한하여 네트워크 전체의 성능은 감소하지 않고 셀 가장자리 사용자의 성능을 향상시킬 수 있었다. 모의실험을 통해서 제안된 기법은 Reuse-1 기법과 Reuse-3 기법, 그리고 PFR 기법에 비해 우수한 성능을 보여주었음을 확인할 수 있었다.

7. 감사의 글

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0017437)

WiMAX Forum, Sept. 2007.

- [13] WINNER, "WINNER II Channel Models," available online: <http://www.ist-winner.org/WINNER2-Deliverables/D.1.1.2v1.1.pdf>, Mar. 2008.

8. 참고문헌

- [1] "Mobile WiMAX-part I: A technical overview and performance evaluation," White Paper, WiMAX Forum, Aug. 2006.
- [2] Requirements for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced) (Release 8), 3GPP Technical Specification TR 36.913 V8.0.0, June 2008. [online] <http://www.3gpp.org>.
- [3] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity-Part I: System description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1927-1938, Nov. 2003.
- [4] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [5] D. Choi, D. Lee, and J. H. Lee, "Joint subcarrier and power allocation for an OFDMA relay network with multicells," in *Proc. IEEE VTC 2010-Spring*, Taipei, Taiwan, May 2010.
- [6] M. Salem, A. Adinoyi, H. Yanikomeroglu, and D. Falconer, "Opportunities and challenges in OFDMA-based cellular relay networks: A radio resource management perspective," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 2496-2510, Jan. 2010.
- [7] L. Le and E. Hossain, "Multihop cellular networks: Potential gains, research challenges, and a resource allocation frameworks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, no. 9, pp. 66-73, Sept. 2007.
- [8] V. H. Macdonald, "The cellular concept," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 58, pp. 15-41, Jan. 1979.
- [9] M. Rahman and H. Yanikomeroglu, "Enhancing cell-edge performance: A downlink dynamic interference avoidance scheme with inter-cell coordination," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 4, pp. 1414-1425, Apr. 2010.
- [10] OFDMA Downlink Inter-Cell Interference Mitigation, 3GPP Project Document R1-060 291, Feb. 2006. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org>
- [11] Soft Frequency Reuse Scheme for UTRAN LTE, 3GPP Project Document R1-050 507, May 2005. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org>
- [12] K. Ramadas and R. Jain, "Mobile WiMAX Part I: A technical overview and performance evaluation,"