

게임 이론을 이용한 펌토셀간 간섭 관리 기법 연구

이주화, 홍충선*
 경희대학교 컴퓨터공학과
 {zidarn, cshong}@khu.ac.kr

Co-tier Interference Management Scheme Research in Femtocells Using Game Theory

JooHwa Lee and Choong Seon Hong*
 Department. of Computer Engineering, Kyung Hee University
 요약

펌토셀 기지국들이 사용자를 위해 하향링크 전송을 할 경우 기지국은 자신의 전송전력을 높여 많은 데이터를 보내려고 할 것이다. 하지만 전송전력을 높이면 다른 펌토셀에 존재하는 사용자들에게 간섭으로 작용하기 때문에 그 사용자들의 전송속도를 감소시키거나 연결이 실패할 수 있다. 본 논문은 게임이론을 적용하여 펌토셀 기지국의 전송전력을 조절하여 펌토셀간 간섭을 완화하고, FUE(Femtocell User Equipment)의 최적의 하향링크 데이터 속도를 결정하는 프레임워크를 제안한다. 더불어 FAP(Femtocell Access Point)의 수익을 극대화할 수 있도록 한다.

1. 서론

펌토셀은 백홀(backhaul)을 통해 스펙트럼 운영자에게 연결된 Home NodeB(HeNB)이다. HeNB는 짧은 통신 반경을 가지고, 저전력으로 대용량 데이터 전송 서비스를 가능하게 한다. 그 결과로 모바일 펌토셀 사용자는 배터리 수명을 연장 할 수 있는 낮은 전력 소비를 가진 더 나은 음성/데이터 서비스를 제공받을 수 있다[1].

펌토셀 네트워크에서 해결되어야 할 문제점들이 있는데, 그 중의 하나가 펌토셀과 매크로셀, 펌토셀간 간섭 관리이다[2]. 전체 네트워크 처리량을 향상시키기 위해 공동 계층의 간섭을 완화하고 계층 간 간섭을 감소시키는 효과적이고 강력한 간섭 관리 체계를 채택하는 것이 필수적이다.

게임이론은 전력제어, 접근제어 등 무선 자원 배분 문제에 적용가능하다[3]. 셀룰러 기지국들이 사용자를 위해 하향링크 전송을 할 경우 기지국은 자신의 전송전력을 높여 많은 데이터를 보내려고 할 것이다. 하지만 전송전력을 높이면 다른 셀에 존재하는 사용자들에게 간섭으로 작용하기 때문에 그 사용자들의 전송속도를 감소시킨다. 이러한 trade-off가 발생하기 때문에 게임이론을 적용할 수 있다.

본 논문은 게임이론을 적용하여 펌토셀 기지국의 전송전력을 조절하여 펌토셀간 간섭을 완화하고, FUE(Femtocell User Equipment)의 최적의 하향링크 데이터 속도를 결정하는 프레임워크를 제안한다. 더불어 FAP(Femtocell Access Point)의 수익을 극대화할 수 있도록 한다. 마지막으로 성능 평가를 통해 이 문제의 유효성을 검사한다.

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT 융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2013-H0301-13-3007). * Dr. CS Hong is the corresponding author.

2. 관련 연구

분산 스펙트럼 센싱에 기반의 무선 인지 접근법은 펌토셀 네트워크에서의 간섭 완화에 사용될 수 있다.

[4]에서 OFDM 기반의 LTE 시스템을 위해 경로 손실 정보를 HeNB 이웃 간에 공유하는 효율적인 펌토셀간 다운링크 간섭 관리를 제안하였다. 이 제안하는 기법에서는 HeNB가 켜지면 인접한 이웃노드를 식별하고, 이웃노드에 의해 사용되고 있는 CC(Component Carriers)의 정보를 얻는다. 이 기법의 주요 아이디어는 각각의 HeNB가 경로 손실정보에 기초한 동일 계층의 간섭을 측정하고, 이웃 노드의 CC 사용 정보를 얻고, 간섭을 최소화하기 위해 지능적으로 스펙트럼에 접근한다. HeNB는 이웃노드가 사용하지 않는 CC, 가장 먼 이웃 노드들에 의해 사용된 CC 또는 이웃 노드들에 최소로 사용되는 CC를 선택하게 된다. 본 논문은 게임이론을 적용하여 펌토셀 기지국의 전송전력을 조절하며 펌토셀간 간섭을 완화하고, FUE의 최적의 하향링크 데이터 속도를 결정하는 프레임워크를 제안한다.

3. 제안 기법

3.1 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 두 개의 펌토셀로 구성되어 있고, 매크로셀로부터의 간섭은 무시되는 시스템 모델을 가정한다. 두 FAP는 Femto GW(Gateway)와 연결되어 있고, 같은 주파수 대역을 공유하고 있다. Femto GW는 인접한 FAP의 간섭을 분석하며, 전력과 접근을 제어한다. FAP1과 FAP2의 거리는 D 이다. 펌토셀의 커버리지에는 $N(N \leq 20)$ 의 FUE가 존재한다. FUE는 각각 고유한 채널 이득을 갖기 때문에 다른 전송 속도를 가지고 있지만, 소규모의 펌토셀에 있는 FUE들은 같은 용량을 공유한다고 가정한다. $FUE_{1k}(k=1, \dots, n)$ 는 FAP1에 의해 서비스를 받는 노드이며, $FUE_{2k}(k=1, \dots, n)$ 는 FAP2에 의해 서비스를 받는 노드이다. FUE_{1k} 이 수신하는 하향링크

크 데이터 속도[6]는 식 1과 같이 표현한다. FUE_{2k} 이 수신하는 하향링크 데이터 속도[6]는 식 2와 같이 표현한다.

$$r_1 = B \log_2 \left(1 + \frac{g_{f_1} P_1}{g_{f_d} P_2 + I} \right), \quad (1)$$

$$r_2 = B \log_2 \left(1 + \frac{g_{f_2} P_2}{g_{f_d} P_1 + I} \right), \quad (2)$$

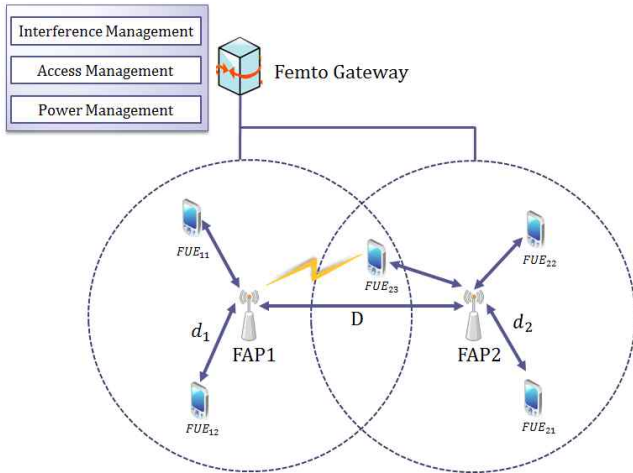


그림 1 시스템 모델

B 는 채널 대역폭을 의미하고, P_1, P_2 는 각각 FAP1, FAP2의 전송 전력이다. g_{f_1} 와 g_{f_2} 는 각각 FAP1과 FEU, FAP2와 FEU의 채널 이득을 나타낸다. g_{f_d} 는 FAP1과 FAP2의 채널 이득을 나타낸다. I 는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)라고 가정된 백그라운드 잡음이다.

펌토셀 접근 정책에는 두 가지가 있는데, 하나는 FAP에 가까이 있는 모든 FUE가 FAP의 서비스를 제공받을 수 있는 Open Access이고, 다른 하나는 FUE가 FAP에 등록되어 있어야 FAP로부터 서비스를 제공받을 수 있는 Closed Access이다[1]. 본 논문은 Closed Access 네트워크를 고려한다.

표 1 펌토셀간 전력제어 게임

		FAP2	
		$P_2 > P_\lambda$	$P_2 \leq P_\lambda$
FAP1	$P_1 > P_\lambda$	0, 0	$r_1^{max}, 0$
	$P_1 \leq P_\lambda$	0, r_2^{max}	r_1^*, r_2^*

3.2 게임 이론

게임 이론은 게임에 참가하는 경기자(player), 각 경기자가 선택할 수 있는 전략(strategy), 각각의 전략에 따른 최종 결과와 그에 따른 보수(pay-off)로 구성된다[3]. 본 논문은 사전 협약이 존재하는 협조 게임을 가지고 게임을 진행한다. 게임의 참가자는 FAP1과 FAP2이고, 각각의 전력 P_1, P_2 의 조절에 따라 표 1과 같이 보상이 주어진다. P_1, P_2 이 모두 전력의 한계점 P_λ 보다 높을 때는 FAP1, FAP2에 존재하는 FUE의 하향링크 데이터 속도

는 0을 갖는다. P_1 이 P_λ 보다 높고, P_2 이 P_λ 이 낮을 때는 FAP1의 FUE의 하향링크 데이터 속도는 최고속도인 r_1^{max} 를 갖는다. 반대로 P_2 이 P_λ 보다 높고, P_1 이 P_λ 이 낮을 때는 FAP2의 FUE의 하향링크 데이터 속도는 최고속도인 r_2^{max} 를 갖는다. P_1, P_2 가 P_λ 보다 작으면 최적화 기법(식 5)으로 적절한 하향링크 데이터 속도 r_1^*, r_2^* 를 보상으로 얻는다.

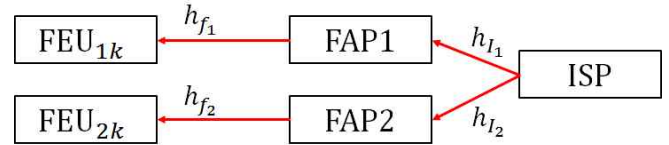


그림 2 FAP의 수익 구조

3.3 게임이론 기반 펌토셀간 전력제어 기법

경제학적인 관점에서 FAP는 수익을 극대화하기를 원한다. 그림 2에서 보는 것처럼 FUE_{1k}, FUE_{2k} 는 네트워크 접근을 위해 각각 FAP1과 FAP2에 이용-금액 h_{f_1}, h_{f_2} 를 부과한다. 그리고 ISP는 백홀 네트워크로써 FAP에 접근 서비스를 제공하기 때문에 각각 FAP1과 FAP2는 이용-금액 h_{I_1}, h_{I_2} 를 부과한다. FAP에게 금액 h_{f_1}, h_{f_2} 를 부과하는 FUE의 망 이익은 식 (2)와 같이 표현한다.

$$\Theta(r) = u_f(r) - h_f r, \quad (3)$$

r 은 FEU의 하향링크 속도이고, 유틸리티 함수 $u_f(r)$ 는 $\sigma_f \frac{1}{1-\alpha_f} r^{1-\alpha_f}$, $0 < \alpha_f < 1$ 이다[5]. 기에서 σ_f 는 수신되는 데이터의 콘텐츠의 인기도와 같은 FEU의 유틸리티 수준을 나타낸다. FEU들은 망의 이익 $\Theta(y)$ 가 음수가 아니면 FAP로부터 서비스를 이용할 수 있다. FAP1, FAP2의 수익은 각각 식 (3),(4)와 같다. FAP의 수익 극대화 문제(RMP: Revenue Maximization Problem)는 (5)와 같이 표현한다. 수익 극대화 문제를 통해 최적의 다운링크 데이터 속도 r_1^*, r_2^* 를 알아낼 수 있다.

$$R(r_1) = (h_{f_1} - h_{I_1})r_1 \quad (4), \quad R(r_2) = (h_{f_2} - h_{I_2})r_2 \quad (5)$$

알고리즘1. 전력 제어 알고리즘

Step 1 Initialize P_1 and P_2 .

Step 2

Set $n_{f_{ap1}} \leftarrow \text{getNumOfUserFAP10}$,

$n_{f_{ap2}} \leftarrow \text{getNumOfUserFAP20}$

Step 3

if $n_{f_{ap2}} == 0$ then

Set $P_1 \leftarrow \max$, $r_1 \leftarrow \max$, $P_2 \leftarrow \min$

else if $n_{f_{ap1}} == 0$ then

Set $P_2 \leftarrow \max$, $r_2 \leftarrow \max$, $P_1 \leftarrow \min$

else if $n_{f_{ap1}} != 0$ and $n_{f_{ap2}} != 0$ then

Compute Formular (5)

Set $P_1 \leftarrow P^*$, $P_2 \leftarrow P^*$, $r_1 \leftarrow r_1^*$, $r_2 \leftarrow r_2^*$

else

```

Set  $P_1 \leftarrow \min, P_2 \leftarrow \min$ 
end if
    
```

본 논문에서 제안하는 기법은 알고리즘 1과 같다. 첫 단계에서는 P_1 과 P_2 를 초기화한다. 두 번째 단계에서 FAP1과 FAP2에서 각각 서비스 중인 사용자가 몇 명인지를 결정한다. 마지막 단계에서는 FAP1에서 서비스 중인 사용자가 없으면 P_1 를 최소로 설정하고, P_2 를 최대로 설정한다. FAP2에서 서비스 중인 사용자가 없으면 P_2 를 최소로 설정하고, P_1 를 최대로 설정한다. FAP1과 FAP2가 모두 서비스 중인 사용자가 있으면 식 (5)를 계산하여 최적의 하향링크 데이터 속도를 구한다. FAP1과 FAP2가 모두 서비스 중인 사용자가 없으면 P_1, P_2 를 최소로 설정한다.

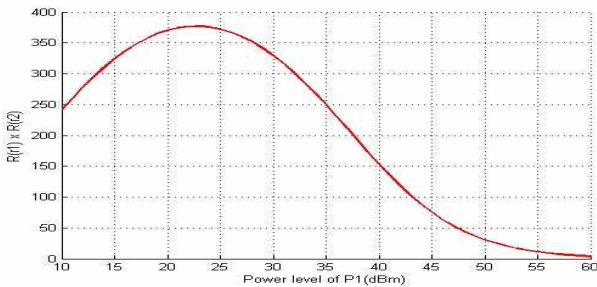


그림 3 FAP1과 FAP2의 수익의 곱

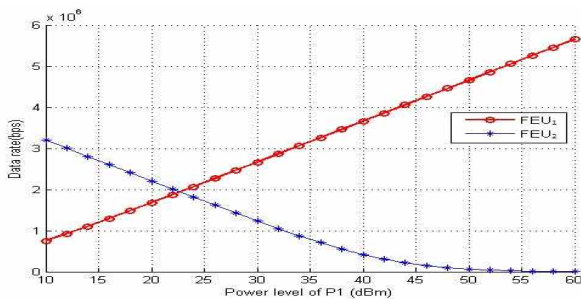


그림 4 FUE_1 와 FUE_2 의 하향링크 데이터 속도

표 2 수치 파라미터

파라미터	의미	값
B	채널 대역폭	300 KHz
P_2	FAP2의 전송 전력	20 dBm
I	백그라운드 잡음	10^{-14}
D	FAP1과 FAP2의 거리	25 m
d_1	FAP1과 FEU의 거리	10 m
d_2	FAP2와 FEU의 거리	7m
L	경로 손실 상수	1
α_1	FAP1, FAP2로부터의 경로손실	3.5
α_2	다른 FAP로부터의 경로손실	3.7
h_f	FAP에 대한 FEU의 이용-금액	$2 * 10^{-5}$
h_I	ISP에 대한 FAP의 이용-금액	10^{-5}

4. 성능 평가

시뮬레이션 환경은 표 1과 같다. 수신되는 전력은 오직 송신된 전력이고, 경로손실(반사, 산란)은 생략한다. 따라서 채널 이득은 간단한 경로 손실 모델인, $g_{f_1} = Ld_1^{-\alpha_1}$, $g_{f_2} = Ld_2^{-\alpha_1}$, $g_{f_D} = LD^{-\alpha_2}$ 를 사용하여 정의한다. 그림 3은 P_2 의 전송 전력을 20dBm으로 설정한 후, P_1 을 10dBm부터 60dBm까지 변화시켰을 때, FAP1과 FAP2의 수익의 곱을 나타낸다. P_1 이 22.7dBm일 때, FAP1의 FAP2의 수익은 19.40, 19.42로써 최대의 수익을 얻는다. 그림 4는 P_2 의 전송 전력을 20dBm으로 설정한 후, P_1 의 전송 전력을 10dBm부터 60dBm까지 변화시켰을 때, FUE_1 과 FUE_2 의 하향링크 속도를 나타낸다. FUE_2 는 P_1 의 전송 전력이 커질수록 간섭이 심해지기 때문에 하향링크 데이터 속도가 줄어들었다. P_1 이 22.7dBm일 때, FUE_1 와 FUE_2 의 최적의 하향링크 속도 r_1^*, r_2^* 은 각각 1.940mbps, 1.943mbps를 갖는다.

5. 결론 및 향후 과제

본 논문은 게임이론을 적용하여 펌토셀 기지국의 전송 전력을 조절하여 펌토셀간 간섭을 완화하고, FUE의 최적의 하향링크 데이터 속도를 결정하는 프레임워크를 제안하였다. 그리고 FAP의 수익을 극대화할 수 있도록 하였다. 본 논문의 문제에 관한 분석을 증명하기 위해 성능평가를 이용하였다. 향후에는 매크로셀과 펌토셀, 펌토셀간 간섭을 모두 완화하는 방향으로 연구를 진행할 것이다.

참고 문헌

[1] Chandrasekhar, Vikram, Jeffrey Andrews, and Alan Gatherer. "Femtocell networks: a survey," Communications Magazine, IEEE 46.9 (2008): 59-67.
 [2] Saquib, N.; Hossain, E.; Long Bao Le; Dong In Kim, "Interference management in OFDMA femtocell networks: issues and approaches," Wireless Communications, IEEE, vol.19, no.3, pp.86,95, June 2012
 [3] MacKenzie, A.B.; Wicker, S.B., "Game theory in communications: motivation, explanation, and application to power control," Global Telecommunications Conference, 2001.
 [4] Lu Zhang; Lin Yang; Tao Yang, "Cognitive Interference Management for LTE-A Femtocells with Distributed Carrier Selection," Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd, vol., no., pp.1,5, 6-9 Sept. 2010
 [5] Wu, Yuan, et al. "Revenue sharing among ISPs in two-sided markets." INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE. IEEE, 2011.
 [6] A. Goldsmith, Wireless Communications. Cambridge University Press,2004.