
LTE 네트워크에서 시스템 레벨 시뮬레이션 기반 인접 대역간 간섭 분석

반태원* · 정방철**

Interference Analysis based on System Level Simulation in LTE Networks

Tae Won Ban* · Bang Chul Jung**

요 약

전 세계적으로 스마트폰의 확산으로 모바일 데이터 서비스 관련 산업계 생태계가 본격적으로 활성화되었다. 이로 인해, 모바일 데이터 트래픽은 최근 몇 년간 폭발적으로 증가해왔으며 앞으로 그 증가 속도는 더욱 빨라질 것으로 예측되고 있다. 이렇게 폭발적으로 증가하는 모바일 데이터 트래픽을 원활히 수용하기 위해서는 추가적인 무선 주파수 발굴 및 확보가 불가피하다. 그러나, 무선 통신으로 활용할 수 있는 주파수 범위는 제한적이므로, 서로 다른 대역간 충분한 보호 대역을 확보하는 것은 어려운 것으로 예상되며, 앞으로는 서로 다른 대역간 간섭으로 인한 시스템 성능 저하가 매우 중요한 문제가 될 것이다. 그러나, 불행히도 이에 대한 정확한 정량적 분석 연구가 없었다. 본 논문에서는 LTE 시스템에서 서로 다른 대역간 발생할 수 있는 교차 간섭 (Cross Interference)의 영향을 시스템 레벨 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 다양한 상황에서 분석하였다. 분석 결과에 따르면, 자기 신호의 품질이 낮거나 자기의 인접 셀로부터의 간섭이 낮은 환경에서 인접 대역 간섭으로 인한 성능 열화가 심하게 나타남을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Globally, the emergence of smart phones vitalized the ecosystem of mobile data service industry. Consequentially, mobile data traffic has been explosively growing and the speed of growth will be more steep. New spectrum will be required in order to properly accommodate the explosively growing mobile data traffic. However, it will be difficult to acquire a sufficient guard band between different frequency bands because the range of frequency which is suitable for wireless communications is limited. Thus, the performance degradation caused by inter-band interference will be one of challenging problems in the next generation mobile communication systems. In this paper, we analyze the performance degradation caused by inter-band interference by computer simulations in various environments. Our results show that the impact of the inter-band interference is more critical when own signal is poor or its own interference from neighboring cells is low.

키워드

LTE, 간섭, 주파수, 시스템 레벨 시뮬레이션, 불요 방사, 보호 대역

Key word

LTE, Interference, Frequency, System Level Simulation, Spurious, Guard Band

* 증신희원 : 경상대학교 정보통신공학과 교수

접수일자 : 2012. 09. 10

** 증신희원 : 경상대학교 정보통신공학과 교수, 해양산업연구소(교신저자)

심사완료일자 : 2012. 10. 31

I. 서 론

최근 몇 년 사이에 모바일 데이터 트래픽이 폭발적으로 증가하고 있다. 미국의 경우 스마트폰 보급 이후 5년간 모바일 데이터 트래픽이 약 50배 증가하였다. 국내에서도 2009년 하반기 본격적 스마트폰 도입과 2010년 하반기 무제한 요금제 시행 등의 요인으로 2009년 대비 2011년 말 기준으로 2년간 모바일 트래픽이 약 20배 이상 증가한 것으로 나타났다 [1]. Cisco사는 글로벌 월간 IP (Internet Protocol) 트래픽은 2011년 30,734 PB (Peta Byte)에서 연평균 약 29%씩 증가하여 2016년에는 110,282 PB에 도달할 것으로 예측하였다. 또한, 월간 모바일 데이터 트래픽은 2011년 597 PB에서 2016년에는 10,804 PB에 이를 것으로 예측되었으며, 이는 약 78%의 연평균 성장률에 해당한다 [2].

이렇게, 폭발적으로 증가하는 모바일 데이터 트래픽을 효과적으로 수용하기 위해서는 획기적인 네트워크 용량 개선 방안이 필요하다. 첫째로, 무선전송기술의 주파수 효율성(bps/Hz)을 개선하여 동일한 주파수 자원을 사용하더라도 더 많은 데이터 트래픽을 수용하는 것이다. 이를 위해서, 국내에서는 세계에서 가장 빠른 속도로 4세대 이동통신 시스템인 LTE (Long Term Evolution)가 확산되고 있다. 실질적으로 LTE의 주파수 효율성은 3세대 이동통신 시스템인 WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access)의 약 2~3배에 달하는 것으로 알려져 있다. 그러나, LTE의 주파수 효율성은 Shannon의 이론적 최대치의 약 60% 수준에도달하였으며[3], 실질적인 구현 마진 등을 고려할 때 향후 무선 접속 기술의 발전을 통한 주파수 효율성 개선은 모바일 데이터 트래픽의 증가 속도 대비 미미할 것으로 보인다. 둘째로, SNR (Signal-to-Noise Ratio) 개선을 통한 주파수 효율성 향상 방안이다. 대표적인 방안이 현재 3GPP에서 활발히 논의되고 있으며, 국내에서도 일부 상용화가 이루어진 CoMP (Coordinated Multipoint Transmission and Reception) 기술이다 [4~6]. 그러나, CoMP 기술은 성능 개선 효과가 셀 외곽으로 제한적이며, 이미 SNR이 충분히 높은 셀 중앙 지역에서는 성능 개선 효과가 미미하다 [5, 6]. 또한, 인접 셀간 시그널링과 데이터 교환 지연 시간을 최소화시키기 위해서는 많은 셀을 광대역의 광케이블로 연결하여야 하므로, 관련 인프라가 충분하지 않은 지역에서는 구축이 어려운 단

점이 있다. 마지막으로, 다중 안테나 기술인 MIMO (Multiple Input Multiple Output)를 활용하는 방안이다. 특히, MIMO의 공간 다중화 (Spatial Multiplexing) 기법을 활용할 경우, 네트워크 용량이 안테나 개수에 비례하여 선형적으로 증가하는 효과가 있다. 그러나, 기지국에서의 안테나 구축, 중계기로 인한 성능 저하, 특히 단말에서의 안테나 숫자의 제약 등으로 실질적으로 4x4 이상의 MIMO 공간 다중화 기법은 널리 상용화되기 어려운 실정이다.

따라서, 주파수 효율성(bps/Hz)을 향상시키기 위한 이러한 기술적 노력에도 불구하고, 폭발적으로 증가하는 모바일 데이터 트래픽을 원활히 수용하기에는 한계가 있으며, 이를 해결하기 위해서는 추가 주파수를 발굴하여 확보하는 노력이 필요하다. ITU (International Telecommunication Unit)는 무선 접속 기술의 발전에도 불구하고 2020년경 전 세계적으로 모바일 데이터 트래픽을 원활히 수용하기 위해서는 1280~1720MHz 정도의 추가 주파수가 필요할 것으로 예측한 바 있으며, 국내에서도 2020년까지 이동통신용으로 추가로 필요한 주파수가 최대 668MHz로 제시되고 있다 [1].

그러나, 주파수가 높아질수록 경로 손실이 급격히 증가하고 LOS(Line of Sight)상에서만 통신이 가능한 무선 통신의 한계가 존재하기 때문에 이동통신용으로 활용할 수 있는 주파수 범위에는 제한이 있다. 따라서, 주파수 대역(band)간 충분한 보호 대역을 확보할 수 없으며, 이는 주파수 확보 및 할당 과정에서 새로운 문제점으로 부각될 수 있다. 그러므로, 이동통신용 추가 주파수 확보 및 할당 과정에서 주파수 대역간 간섭이 시스템 성능에 미치는 영향을 명확히 분석하고, 합리적인 보호 대역 및 불요 방사 규정 설정을 위한 간섭 분석 방법이 필요하다.

본 논문에서는 LTE 네트워크에서 사업자간 인접 대역 간섭이 시스템에 미치는 영향을 시스템 레벨 시뮬레이션을 통하여 정량적으로 분석하고, 이에 따른 적절한 간섭 보호 방안에 대하여 살펴본다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 간섭 분석 모델을 소개하고, III 장에서는 본 논문에서 제안하는 간섭 분석 방법에 대하여 살펴본다. IV 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 다양한 환경에서 성능을 분석하고, V 장에서 본 논문을 마무리 한다.

II. 간섭 분석 모델

본 장에서는 LTE 시스템에서 대역간 간섭 분석을 위한 주파수 할당 모델 및 간섭 채널 모델을 설명한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 A 대역의 하향 주파수와 B 대역의 상향 주파수가 인접되어 배치될 경우, 상호 간섭을 받아서 하향 링크와 사향 링크에서 각각 성능 저하가 발생된다.

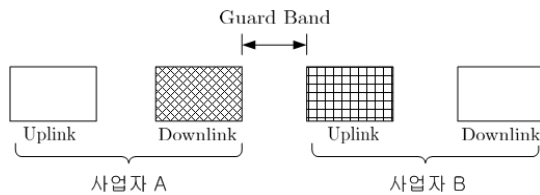


그림 1. 대역간 상호 간섭 모델 및 보호 대역
Fig. 1 Inter-Band Cross Interference Model and Guard Band

그림 2는 그림 1과 같이 주파수가 배치될 때의 간섭 채널 및 신호 모델을 나타낸다. 실선은 A와 B 밴드의 기지국과 단말이 각각이 전송하고자 하는 신호 (Signal)를 의미하며, 점선은 A와 B 밴드가 각각 상대방의 기지국과 단말에게 미치는 간섭 (Interference) 성분을 나타낸다. x_{ij} 는 i (A or B) 밴드의 j (1: 기지국, 2: 단말) 노드가 송신하는 신호를 나타낸다. 그리고, $h_{ij,kl}$ 는 i (A or B) 밴드의 j (1: 기지국, 2: 단말) 노드와 k (A or B) 밴드의 l (1: 기지국, 2: 단말) 노드간 채널 이득을 나타내며, 전파의 경로 손실, 채널 페이딩, 그리고 쉐도잉 (Shadowing) 등의 효과를 반영한다. 이때, A와 B 밴드의 단말과 기지국이 각각 수신하는 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} y_{a2} &= x_{a1}h_{a1,a2} + x_{b2}h_{b2,a2} + n_{a2} \\ y_{b1} &= x_{b2}h_{b2,b1} + x_{a1}h_{a1,b1} + n_{b1} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, y_{ij} 는 i (A or B) 밴드의 j (1: 기지국, 2: 단말) 노드가 수신하는 신호를 나타내며, n_{ij} 는 각 노드에서의 가우시안 열 잡음을 나타낸다.

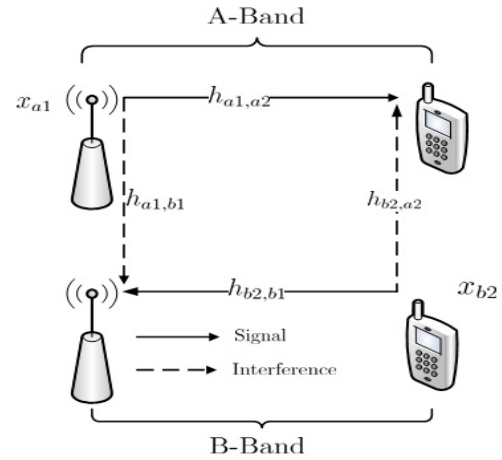


그림 2. 간섭 채널 모델
Fig. 2 Interference Channel Model

III. 시스템 레벨 시뮬레이션 기반 간섭 분석 방법

본 장에서는 시스템 레벨에서의 인접 대역간 간섭 분석 방법을 설명한다.

3.1. 셀 구성

인접 셀로부터의 간섭 효과를 충분히 반영하기 위하여, 반지름이 R인 육각 셀 (Hexagonal cells) 19개로 구성된 2-tier 시스템을 구성하였다. 대역간 간섭이 최악인 경우를 고려하기 위하여 A와 B 대역의 기지국은 동일한 위치에 존재하는 것으로 가정하였다. 각 기지국은 3개의 섹터로 구성되어 있으며, 각 섹터 안테나의 감쇄 이득, $A(\theta)$ 는 다음과 같이 결정된다 [3].

$$A(\theta) = \min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_{\max} \right] \quad (2)$$

여기서, θ_{3dB} 는 3dB 빔폭, A_{\max} 는 최대 감쇄 이득을 나타낸다. 각 셀 내에서 A와 B 대역의 단말은 균등하게 분포하는 것으로 가정하였다.

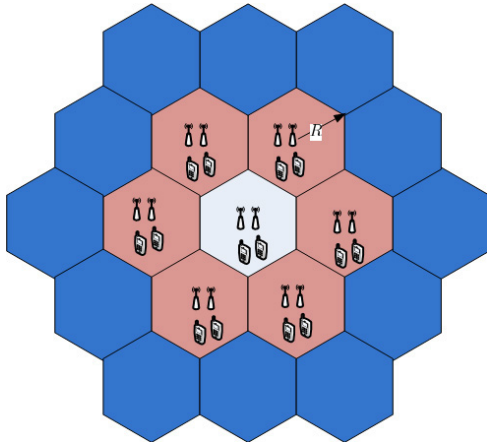


그림 3. 셀 구성
Fig. 3 Cell Layout

3.2. 경로 손실 모델

본 논문에서는 경로 손실 모델에 기반하여 채널 이득을 계산하였으며, 채널 페이딩은 고려하지 않았다. 채널 페이딩 효과는 최종 성능 분석 결과에서 적정 마진을 고려함으로써 반영될 수 있다. 먼저, 단말과 기지국간 경로 손실, $L[dB]$ 는 다음과 같이 3GPP (3rd Generation Partnership Project)에서 고려되고 있는 도심 지역 모델을 적용하였다 [7].

$$L[dB] = 40(1 - 4 \times 10^{-3} D_{hb}) \log_{10}(R) - 18 \log_{10}(D_{hb}) + 21 \log_{10}(f) + 80 \quad (3)$$

여기서, R 은 노드간 거리(km), f 는 반송파 주파수 (MHz), D_{hb} 는 기지국의 안테나 높이(m)를 나타낸다. 실제 수신 전력은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P_{rx} = P_{tx} - \max(L + \eta - G_{tx} - G_{rx}, MCL) \quad (4)$$

여기서, P_{rx} , P_{tx} , η , G_{tx} , G_{rx} , MCL (Minimum Coupling Loss)은 각각 수신 전력, 송신 전력, 웨도잉, 송신 안테나 이득, 수신 안테나 이득, 그리고 최소 결합 손실을 나타낸다. 웨도잉 표준 편차 10dB의 Log-normal 분포를 가정하였다.

기지국과 기지국간의 경로 손실은 동일 장소에 위치하고 기지국이 고정되어 있는 점을 고려하여 MCL만을 적용하였다.

3.3. 전력 제어 모델

LTE 시스템에서 전력 제어 효과를 반영하기 위하여 단말의 송신 출력을 다음과 같이 모델링 하였다[3].

$$P_{tx} = P_{max} \times \min \left[1, \max \left(R_{min}, \left(\frac{L}{L_{x-ile}} \right)^\gamma \right) \right] \quad (5)$$

여기서, P_{max} 는 단말의 최대 전송 전력, R_{min} 은 단말의 최저 전력 감소 비율, L_{x-ile} 은 x %의 경로 손실 값, 그리고 γ 는 단말들 간의 전송 전력 안배를 위한 변수이다. 본 논문에서는 3GPP에서 고려하는 Power Control Set 1 (PC 1)과 2를 고려하였으며, PC1은 PC2 대비 단말의 수신 전력을 보다 높게 유지하는 방식이다 [3].

3.4. 시스템 Throughput 및 자원 할당

기지국에서 서비스할 사용자를 선택하였을 경우, 그 사용자의 SINR, ρ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\rho = \frac{P_{rx}}{N_0 + I_{oc} + I_{band}} \quad (6)$$

여기서, 수신 전력 P_{rx} 는 식 (4)에 의해서 결정되며, N_0 는 열잡음전력, I_{oc} 는 자기 시스템내의 인접 셀들로부터의 간섭, I_{band} 는 인접 대역으로부터 유입되는 간섭을 나타낸다. 주어진 ρ 에 따른 네트워크의 이론적 최대 throughput, T 는 Shannon capacity 식에 의해서 결정되지만, 구현상의 성능 감소 및 변복조 방식의 제한으로 인해서 실제 얻을 수 있는 성능은 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$T[bps/Hz] = \begin{cases} 0, & \rho < \rho_{min} \\ \alpha \log_2(1 + \rho), & \rho_{min} < \rho < \rho_{max} \\ T_{max}, & \rho > \rho_{max} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 ρ_{\min} 은 변복조가 가능한 최소의 SINR 값, ρ_{\max} 는 LTE에서 얻을 수 있는 최고 데이터 전송 속도를 얻을 수 있는 최대 SINR 값, α 는 이론치 대비 구현이 슈등을 고려했을 실제 얻을 수 있는 성능 비율, T_{\max} 는 LTE에서 실제 얻을 수 있는 최대 전송 속도를 나타낸다.

10MHz 채널 대역의 LTE 시스템에서 최소 자원 할당 단위인 resource block (RB)은 12개의 부반송파로 구성되며 180kHz 대역을 점유한다. 따라서, 시스템에는 총 50개의 RB가 존재하게 되며, 스케줄러는 각 RB들을 적합한 단말에게 할당하게 된다. 본 논문에서는 단말당 할당되는 RB의 수를 5개 또는 15개로 가정하고, 단말은 충분히 많은 집합들 중에서 임의로 선택되는 것으로 가정하였다. 또한, 대역간 간섭의 영향이 최소화 되는 환경과 최대화 되는 환경을 고려하기 위하여, 셀간 간섭을 전혀 고려하지 않고 셀별로 독립적으로 자원이 할당하는 경우와 셀간 간섭 영향을 고려하여 7개의 기지국 클러스터 내에서 RB를 직교적으로 할당하는 경우로 구분하였다.

IV. 성능 평가

일반적으로 기지국 대비 단말의 전송 전력이 20dB 이상 낮기 때문에 상향 링크에 의하여 셀 반경 등이 결정되는 것이 일반적이다. 따라서, 본 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 A 대역의 기지국 간섭으로 인한 B 대역 상향 링크의 성능을 분석해본다. 비록, 본 논문에서는 상향 링크의 성능만을 분석하였으나, 동일한 접근 방법을 통하여 하향 링크의 성능도 분석가능하다. 시뮬레이션에서 반영된 파라미터 및 그 값들은 표 1에 나타나 있다 [3]. 그리고, 인접 대역간 보호 대역은 11MHz이며, 인접 대역으로부터의 스푸리어스로 인해 유입되는 간섭은 3GPP 표준 규격을 반영하여 -96dBm/100kHz로 가정하였다 [8].

그림 4는 셀간 간섭 제어 없이 각각의 셀들이 독립적으로 자원을 할당하는 경우에 인접 대역 간섭이 없는 환경에서의 수율 대비 인접 대역으로부터 간섭이 존재하는 환경에서의 수율 비율을 셀 반경에 대하여 나타내었다. 비율 값이 1에 가까울수록 인접 대역으로부터의 간섭이 성능이 미치는 영향이 없음을 나타내며, 그 값이 작

아질수록 간섭으로 인한 성능 저하가 심각함을 의미한다. 그림 4-(a)와 (b)는 사용자당 할당되는 RB 수가 각각 5개와 15개일 때의 성능을 나타낸다. 먼저, 역방향 링크에서 인접 대역 간섭으로 인한 성능 감소는 셀 반경이 클수록 증가한다. 셀 반경이 커질수록 단말로부터의 수신 전력은 감소하는 반면, 서로 다른 두 밴드의 기지국은 동일 지점에 위치하여 간섭량은 줄어들지 않기 때문이다. 동일한 이유로, 역방향에서 상대적으로 더 낮은 전력을 사용하는 PC2 방식이 PC1 대비 성능 열화가 높게 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 각 단말에게 할당하는 RB 수가 많을수록 제한된 송신 전력으로 인하여 RB당 할당되는 전력이 감소하므로 외부 간섭에 대하여 성능 열화가 더욱 심하다.

그림 5는 셀 간 간섭 제어를 위하여 클러스터 내 모든 셀들이 서로 다른 부반송파를 사용할 때의 성능 열화 정도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 클러스터 내 셀들이 부 반송파를 공유하지 않을 경우 인접 셀로부터의 간섭 양이 감소하므로, 외부 인접 대역 간섭에는 더욱 민감함을 알 수 있다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table. 1 Parameters for Simulation

항목	값	비고
θ_{3dB}	65°	
A_{\max}	20 dB	
f	900 MHz	
D_{hb}	39 m	
P_{\max}	200 mW	단말
	20 W	기지국
G_{tx}, G_{rx}	0 dB	단말
	12 dB	기지국
MCL	70 dB	단말-기지국
	30 dB	기지국-기지국
R_{\min}	-54 dBm	
L_{x-ile}	112	Power Control Set 1 (PC1)
	129	Power Control Set 2 (PC2)
γ	1	PC1
	0.8	PC2
ρ_{\min}	-10 dB	상향 링크
ρ_{\max}	15 dB	
α	0.4	
T_{\max}	2.0	

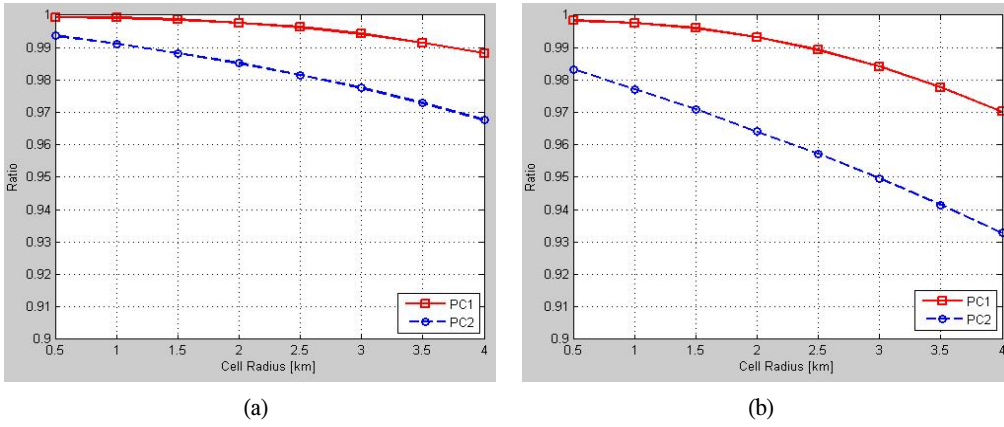


그림 4. 셀간 간섭 제어가 없는 경우의 LTE 네트워크 성능(Throughput) 비율
 (a) 사용자당 RB 할당 수=5개 (b) 사용자당 RB 할당 수=15개
 Fig. 4 Throughput Ratio with no Inter-Cell Interference Control
 (a) RBs per user=5 (b) RBs per user=15

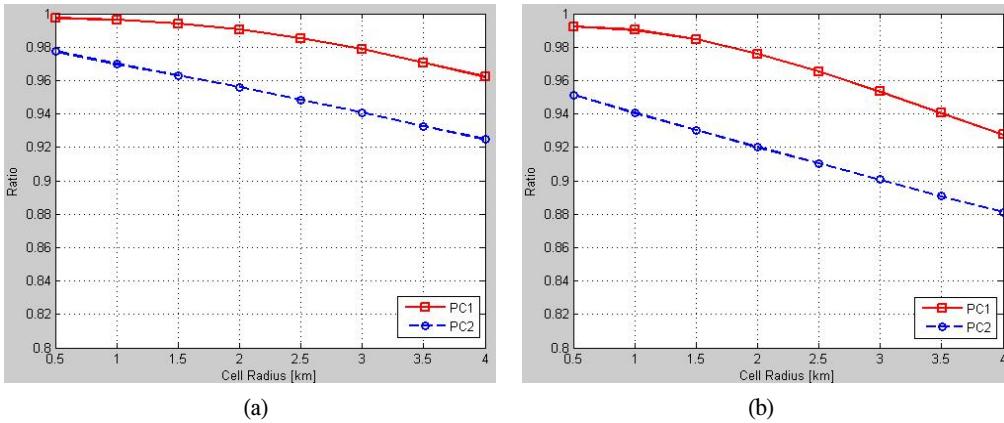


그림 5. 셀간 간섭 제어가 있는 경우의 LTE 네트워크 성능(Throughput) 비율
 (a) 사용자당 RB 할당 수=5개 (b) 사용자당 RB 할당 수=15개
 Fig. 5 Throughput Ratio with Inter-Cell Interference Control
 (a) RBs per user=5 (b) RBs per user=15

V. 결 론

향후, 폭발적으로 증가할 것으로 예상되는 무선 주파수 소요량을 고려할 때 서로 다른 대역간 충분한 보호 대역을 확보하기 어려울 것으로 예상된다. 그러나, 아직까지 서로 다른 대역간 간섭에 따른 영향을 시스템 레벨에서 정확하게 정량화한 연구가 진행되지 못했다.

따라서, 본 논문에서는 LTE 시스템에서 서로 다른 대역간 발생할 수 있는 교차 간섭 (Cross Interference)을 시스템 레벨에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 정량적으로 분석하였다. 분석 결과에 따르면, 셀 반경이 커지거나, 각 단말이 사용하는 RB가 많아지거나, 또는 인접 셀간 간섭 제어를 통하여 자기 시스템으로부터의 간섭이 줄어드는 경우에 인접 대역으로부터의 간섭 영향은

증가함을 확인하였다. 즉, 자기 신호의 품질이 낮거나 자기의 인접 셀로부터의 간섭이 낮은 환경에서 인접 대역 간섭으로 인한 성능 열화가 심하게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 윤현영, "4G 시대 도래에 따른 주파수 확보 및 관리 방향," kt경제경영연구소 Digieco, 2011년 12월
- [2] Cisco Visual Networking Index, *Forecast and Methodology*, 2011-2016, May, 2012
- [3] 3GPP, TR 36.942 Radio Frequency (RF) system scenarios
- [4] 3GPP TR 38.819 CoMP operation for LTE physical layer aspects
- [5] NTTDocomo Technical Report, MIMO and CoMP in LTE-Advanced
- [6] 3GPP R1-111922 CoMP Phase 1 results
- [7] 3GPP TR 25.942 Radio Frequency (RF) system scenarios
- [8] 3GPP, TS 36.104 E-UTRA BS radio transmission and reception

저자소개



정방철(Bang Chul Jung)

2002년 2월 아주대학교 전자공학부
학사
2004년 8월 KAIST 전자전산학과
석사

2008년 2월 KAIST 전자전산학과 박사
2008년 3월 ~ 2009년 8월 KAIST IT 융합연구소 팀장
2009년 9월 ~ 2010년 2월 KAIST IT 융합연구소
연구교수
2010년 3월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수
※ 관심분야: 이동통신, 신호처리, 협력 및 중계통신,
Cognitive Radios, Compressed Sensing, 차세대 이동통신
시스템



반태원(Tae Won Ban)

1998년 2월 경북대학교 전자공학과
학사
2000년 2월 경북대학교 전자공학과
석사

2010년 2월 KAIST 전기전자공학과 박사
2000년 2월 ~ 2012년 8월 KT 네트워크부문
2012년 9월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수
※ 관심분야: 이동통신, 자원관리, 간섭관리, 협력 및
중계통신, 인지통신, 주파수 공유, 차세대 이동통신
시스템