논문 16-41-12-05 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '16-12 Vol.41 No.12
https://doi.org/10.7840/kics.2016.41.12.1707

# 비선형 고전력 증폭기를 가진 이종 직교주파수분할다중화 시스템에서 스펙트럼 공유/중복 효과에 대한 연구

이 성 복◆, 박 재 현°, 박 재 철*, 강 규 민*

# A Study on the Effect of Spectrum Sharing/Overlapping in a Heterogeneous OFDM System with Nonlinear High Power Amplifiers

Sung-bok Lee◆, Jaehyun Park°, Jae Cheol Park*, Kyu-Min Kang*

요 약

이 논문은 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)기반의 이종 네트워크에서 주파수 공존 방식에 따른 시스템 전체의 전송률을 분석한다. 특히, 시간 축 또는 주파수 축 기준으로 직교한 형태의 공존 방식과 비직교 방식의 공존 방식 간의 성능을 비교하였으며, 비직교 공존 방식에서 이종 네트워크의 주파수 공유 또는 겹침(overlapping)이 전체 전송률에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 실제 구현 환경을 고려하기 위해 송신단에 HPA(High Power Amplifier)의 nonlinear effect를 추가하여 이 HPA 파라미터에 따른 성능 분석을 하였으며 이에 따른 최적화된 이종 네트워크의 주파수 공존 전략을 제시하였다.

**Key Words** : HetNet, OFDM, Spectrum Coexistence, HPA nonlinear effect

ABSTRACT

This paper presents the effect of spectrum sharing/overlapping in a heterogeneous OFDM system with nonlinear High Power Amplifier (HPA). According to the spectrum sharing strategies, the achievable rate performances are analyzed. In the non-orthogonal spectrum sharing, we address how the portion of the overlapped or overlaid spectrum band and the nonlinear properties of HPA affect the system performance and accordingly, propose the optimized spectrum sharing strategies.

## Ⅰ. 서 론

최근 스마트폰 등 통신기기의 발달에 따른 무선 데이터 서비스 수요가 증가하고 있으며, 특히 이러한 데이터 트래픽은 도심지역의 지하철역이나 시내 중심 등 사람들이 밀접한 곳에서 집중되는 경향이 있다. 이 밀집된 지역에서의 데이터 트래픽증가 문제를 해결하기 위해서 3GPP(3rd Generation Partnership Project)LTE에서는 기지국의 커버리지 증대를 위해 간섭제어기술(ICIC), 기지국 부하 분산을 위한 단말기 간 직접통신(D2D communication)기술, 유휴TV대역(UHF대역)을 사용하기 위한 인지 무선(Cognitive Radio)기술 등이 개발되고 있으나, LTE에서의 Macro-BS기반의 point-to-point 링크의 스펙트럼 효율은 이미 한계치에 다다른 상황이다. 따라서 인구가 많은 밀집지역을 중심으로 넓은 커버리지를 가지는

※이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1C1A1A01051490).
◆ First Author : Pukyong National University, Department of Electronics Engineering, pa339@naver.com, 학생회원
° Corresponding Author : Pukyong National University, Department of Electronics Engineering, jaehyun@pknu.ac.kr, 정회원
* 한국전자통신연구원
논문번호 : KICS2016-09-238, Received September 2, 2016; Revised November 9, 2016; Accepted November 17, 2016

Macro cell 과 좁은 커버리지를 가지는 small cell이 공존하는 이기종 네트워크 (Heterogeneous networks, HetNet)에 대한 표준화가 진행되었으며, 급증하는 데이터 트래픽을 효과적으로 처리하기 위해 small cell 들을 고밀도 네트워크(High dense network)로 구축하는 방안이 연구되고 있다.[1,2] HetNet에서는 Macro cell의 데이터 트래픽 부하가 감소되고, small cell을 통해서 고용량의 데이터 트래픽을 지원할수 있기 때문에 시스템 전체의 용량(capacity)이 크게 향상될수 있고,[3] Macro cell과 small cell이 공존하는 상황에서 단말간 직접 통신을 통해서 Macro user가 small cell user를 통해서 small cell에 접속하는 협력통신방법에 대해서 제안한 바 있으며, 적은 자원으로 비슷한 성능을 낼수 있어 여분의 자원이 발생하게 되고, 이로 인해 여분의 자원을 Macro user와 small cell user가 사용하게 되어 Macro cell과 small cell의 상향링크 용량을 향상시킬 수 있다 [4]. 뿐만아니라 최근 고갈되고있는 주파수자원문제를 해결하기 위한 방안으로 CR(Cognitive Radio), LTE-U 등이 주목받고 있다. 이 LTE-U는 기존 LTE 면허 대역 뿐만 아니라 비면허 대역에서도 주파수 집성기술을 이용해서 LTE 서비스를 제공하며, LBT(Listen Before Talk)를 사용하지 않기 때문에 서로 다른 시스템의 OFDM신호가 간섭원으로 들어올 수 있다[5,6]. 따라서 논문에서는 OFDM 기반의 이종 네트워크에서 주파수 공존 방식에 따른 시스템 전체의 전송률을 분석한다. 특히, 시간 축 또는 주파수 축 기준으로 직교한 형태의 공존 방식과 비직교 방식의 공존 방식 간의 성능을 비교하였으며, 비직교 공존 방식에서 이종 네트워크의 주파수 공유 또는 겹침(overlapping)이 전체 전송률에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, OFDM기반 시스템에서는 높은 PAPR(Peak to Power Ratio)로 인해 송신단의 고전력 증폭기(High Power Amplifier, HPA)에서 비선형 왜곡이 발생하게 되는데[7], 본 논문에서는 실제 구현 환경을 고려하기 위해 송신단의 HPA의 nonlinear effect를 추가하여 이 HPA 파라미터에 따른 성능 분석을 하였으며 이에 따른 시스템 전체의 전송률 관점에서 최적화된, 이종 네트워크의 주파수 공존 전략을 제시한다.

## Ⅱ. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 이종 네트워크의 구성을 보여준다. 본 논문에서는 송수신기 1 (Transceiver 1, TRx1)과 송수신기 2 (Transceiver 2, TRx2)의 이종 무선 통신 시스템이 공존하는 상황을 고려하며 Tx1과 Tx2는 각각 OFDM 신호를 전송하고 모든 송수신기는 단일 안테나 환경을 고려한다. 이때 이종 네트워크가 사용할 수 있는 스펙트럼 대역폭은 $B$로 고정되어 있다고 각각의 송신기는 $P_{tx1}$, $P_{tx2}$의 전력을 쓸 수 있다고 가정한다. 그리고 스펙트럼을 공유하기 때문에 시스템 부하(overhead)를 증가시키는 채널 정보 피드백은 존재하지 않는다고 가정한다. 즉, Tx1과 Tx2는 해당 링크의 채널 정보를 모른다고 가정한다. 참고로, Rx1의 관점에서 Tx1의 송신 신호가 수신하고자 하는 수신 희망 신호(Desired Signal) 이며 반면, Tx2의 송신 신호는 간섭 신호 (Interference Signal) 이다. 그리고 Tx1은 $N_1$개의 부반송파(subcarrier)를 가지며 대역폭 $B_1$를 차지하여 신호를 전송한다. 반면, Tx2는 $N_2$개의 부반송파를 이용하여 $B_2$의 대역폭을 차지하여 신호를 전송한다고 가정한다. 참고로 부반송파 간의 간격 $\Delta f$는 고정되어 있다고 가정한다면, 부반송파의 개수와 대역폭은 다음과 같은 관계가 있다.

$$B_i = N_i \Delta f, \qquad i = 1,2 \tag{1}$$

따라서 본 논문에서는 $\Delta f$를 고정시켜 이종 시스템의 스펙트럼 공존 방식에 따라 ($N_1$, $N_2$) 및 스펙트럼 중첩 여부를 달리 두어 시스템 성능을 분석할 예정이다. 편의 상, 전체 대역폭 $B$은 부반송파 간의 간격 $\Delta f$으로 나누어떨어지며 이때 $N \equiv \frac{B}{\Delta f}$으로 주어진다. 참고로 OFDM시스템의 기저대역에서 FFT를 취하기 때문에 $N$은 2의 제곱승의 형태로 나타나며, 즉 $N$은 짝수이다.

그림 1에서 채널환경은 Tx1과 Rx1간의 시간축의 다중경로 채널 벡터를 $\boldsymbol{h}_{11}$, Tx1과 Rx2간의 다중경로 채널은 $\boldsymbol{h}_{21}$, Tx2와 Rx1간 (Tx2와 Rx2간)의 다중 경

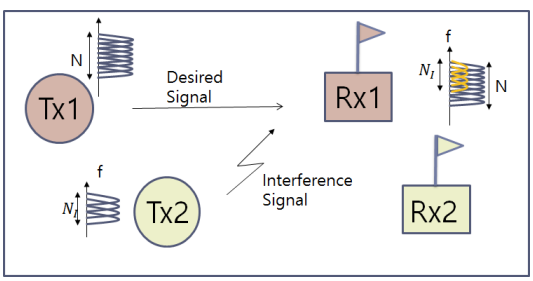



Fig. 1. Configuration of HetNet

로 채널 벡터는 $\boldsymbol{h}_{12}$ ($\boldsymbol{h}_{22}$)로 정의한다. 이때, $\boldsymbol{h}_{ij}$은 $L_{ij}$의 채널길이를 가진다고 하면, $\boldsymbol{h}_{ij} \in C^{L_{ij}\times 1}$이고, $\boldsymbol{h}_{ij} = [h_{ij}(0) \cdots h_{ij}(L_{ij}-1)]^T$로 나타낼수 있으며 채널 지연 프로파일(Channel delay profile)은 고려하는 채널 환경에 따라 달라질 수 있다. 편의상, $L = \max\{L_{11}, L_{12}, L_{21}, L_{22}\}$로 정의하며, $\boldsymbol{h}_{11}$, $\boldsymbol{h}_{22}$, $\boldsymbol{h}_{12}$, $\boldsymbol{h}_{21}$의 원소들은 각각 분산이 채널 지연 프로파일의 전력값을 분산으로 가지는 zero-mean Complex Gaussian분포를 따른다고 가정한다. 이때, 아래와 같이 $N_i$-point FFT를 취하여, 주파수 영역의 부반송파에 해당하는 채널 이득을 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H_{ij}(0) \\ H_{ij}(1) \\ \vdots \\ H_{ij}(N_i-1) \end{bmatrix} = \boldsymbol{W} \begin{bmatrix} h_{ij}(0) \\ h_{ij}(1) \\ \vdots \\ h_{ij}(L-1) \end{bmatrix},$$

이때, $\boldsymbol{W}(\in C^{N_i \times L})$는 $N_i$-point FFT matrix의 처음 L개의 열로 이루어진 부행렬(Submatrix)로 주어진다. 다음절에서는 이종 시스템의 스펙트럼 공존 방식에 따라 수신신호의 모델을 달리 나타낼 수 있으며 이에 따른 획득가능한 전송률(Achievable rate)를 비교, 분석하고자 한다.

## Ⅲ. 이종 네트워크 스펙트럼 공존 방식

### 3.1 스펙트럼 직교 기반의 공존 방식

#### 3.1.1 주파수 분할 기반의 직교 공존 방식

그림 2의 첫 번째 그림과 같이 주파수 분할 기반의 직교 공존 방식은 이종 네트워크 간의 간섭을 없애기 위해 TRx1과 TRx2는 서로 겹치지 않는 주파수 스펙트럼을 차지하여 송수신하는 방식이다. 편의 상 TRx1과 TRx2가 할당받은 스펙트럼 대역폭은 동일하다고 한다면, 즉 $B_1 = B_2 = \frac{B}{2}$라 둔다면, $N_1 = N_2 = \frac{N}{2}$이 된다. 따라서 주파수 분할 기반의 직교 공존 방식을 썼을 때 수신신호 모델 $y_1$과 $y_2$는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} y_1 &= H_{11}[n]s_1[n] + z_1[n] \quad 0 \le n \le \frac{N}{2}-1 \\ y_2 &= H_{22}[n]s_2[n] + z_2[n] \quad \frac{N}{2} \le n \le N-1 \end{aligned} \tag{1}$$

즉, 이러한 방식의 주파수 공존방식은 스펙트럼이 할당된 사용자에게 간섭이 없는 하나의 채널이 온전하게 할당됨으로서 안정적인 전송을 할수 있는 장점이 있지만, 사용자가 많아지게 되는 경우 대역폭이 협대역으로 좁아지게 되며 성능이 저하된다는 점과 사용자가 지속적으로 사용하지 않을 때 주파수효율이 크게 떨어지는 단점이 있다.

이때, 송신단에서는 채널정보를 모르기 때문에 각각의 부반송파에 동일한 전력을 할당하여 송신하는 것이 최적이므로, Rx1과 Rx2에 나타나는 잡음의 전력을 각각 $\sigma_{n1}^2$, $\sigma_{n2}^2$이라 하면, 각 수신기의 n번째 부반송파에서의 수신SNR은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} SNR_1^1[n] &= \frac{2P_{tx1} \parallel H_{11}[n] \parallel^2}{N\sigma_{n1}^2} \\ SNR_2^1[n] &= \frac{2P_{tx2} \parallel H_{22}[n] \parallel^2}{N\sigma_{n2}^2} \end{aligned} . \tag{2}$$

따라서, 주파수 분할 기반의 직교 공존방식을 취할 때 System achievable rate, $R_1$은 다음과 같이 주어진다.

$$R_1 = \sum_{n=0}^{N/2-1} \log_2(1 + SNR_1^1[n]) + \sum_{n=N/2}^{N-1} \log_2(1 + SNR_2^1[n]) \tag{3}$$

#### 3.1.2 시간 분할 기반의 직교 공존 방식

시간분할 기반의 직교 공존 방식은 그림 2의 두 번째 그림과 같이 여러 사용자가 시간적으로 분리된 자원을 할당받아 사용할 수 있는 모든 주파수대역을 해당 사용자가 되는 방식이다. 따라서 수신신호 모델 $y_1$과 $y_2$는 각각 다음과 같이 주어진다.

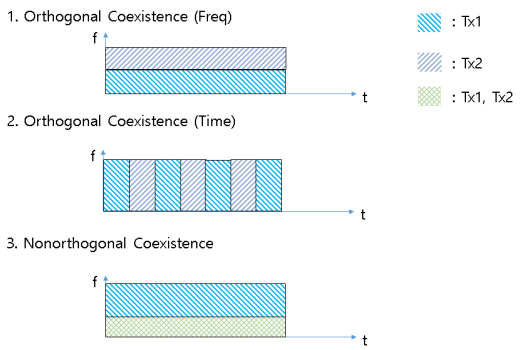



Fig. 2. Coexistence policy of HetNet

$$\begin{aligned} y_1 &= H_{11}[n]s_1[n]+z_1[n] \quad 0 \le n \le N-1 \\ y_2 &= H_{22}[n]s_2[n]+z_2[n] \quad 0 \le n \le N-1 \end{aligned} \tag{4}$$

따라서 SNR은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} SNR_1^2[n] &= \frac{P_{tx1} \parallel H_{11}[n] \parallel^2}{N\sigma_{n1}^2} \\ SNR_2^2[n] &= \frac{P_{tx2} \parallel H_{22}[n] \parallel^2}{N\sigma_{n2}^2} \end{aligned} . \tag{5}$$

이때의 TRx1과 TRx2는 각각 시간자원을 반으로 나누어서 할당되었기 때문에, System Achievable Rate, $R_2$는 다음과 같이 주어진다.

$$R_2 = (\sum_{n=1}^{N} \log_2(1+SNR_1^2[n]) + \sum_{n=1}^{N} \log_2(1+SNR_2^2[n]))/2 \tag{6}$$

### 3.2 비직교 스펙트럼 공존 방식

그림 2의 세 번째 그림과 같이 비직교 스펙트럼 공존방식은 일부 스펙트럼을 두 사용자가 공동으로 사용하는 방식이다. 그림은 TRx1이 전체 대역폭을 차지하고, (즉 $N_1 = N$) TRx2는 TRx1과 일부 대역폭을 겹쳐서 쓰는 환경을 나타내고 있다. 따라서 비직교 스펙트럼 공존방식을 사용하였을 때 수신신호모델 $y1$과 $y_2$는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} y_1 &= \begin{cases} H_{11}[n]s_1[n]+H_{12}[n]s_2[n]+z_1[n] & 0 < n \le N_I-1 \\ H_{11}[n]s_1[n]+z_1[n] & N_I \le n \le N-1 \end{cases} \\ y_2 &= H_{21}[n]s_1[n]+H_{22}[n]s_2[n]+z_2[n] \quad 0 \le n \le N_I-1 \end{aligned} \tag{7}$$

두 이종 OFDM시스템이 주파수대역을 겹치는 정도에 따른 성능을 분석하기 위해, 수식(7)과 같이 TRx1이 전체 주파수 대역을 차지하고 TRx2가 일부 부반송파를 겹쳐서(overlapping) 송수신할 때를 고려하고 있다 (그림 1 및 그림 2 참고). 하지만 본 논문의 성능 분석 방식을 일반적인 환경으로 쉽게 확장이 가능하다. 수식(7)에서 $N_1 = N$, $N_2 = N_I$이며 $N_I$는 $1 \le N_I \le N$의 값을 가지며, 주파수 대역의 겹치는 정도를 나타내는 척도이다. 이때 TRx1의 관점에서 TRx2의 신호는 간섭신호로써 Signal-to-Interference ratio (SIR)를 다음과 같이 주어지게 된다.

$$SIR[dB] = \frac{P_{tx1}}{P_{tx2}} = \frac{P_s \times N}{P_I \times N_I} . \tag{8}$$

여기서, $P_s$를 TRx1의 부반송파 당 신호의 평균전력, $P_I$를 TRx2의 부반송파 당 평균전력이다. 수식에서 확인할 수 있듯이 SIR이 동일하더라도 Tx1과 Tx2의 신호 전력이 고정되어 있다면, $N_I$가 클수록 즉, 겹치는 주파수대역이 넓다면, 부반송파당 간섭신호전력 $P_I$가 작아지게 된다. 즉 넓은 대역에 낮은 전력으로 간섭을 일으키는 환경과 좁은 대역에 높은 전력으로 간섭을 일으키는 환경을 비교하여 전송용량 관점에서 어떠한 환경이 이종 네트워크의 공존에 유리한지 비교하고자 한다. 이때 공통으로 사용하는 (Overlap) 대역폭 정도 $k$는

$$k = \frac{N_I}{N} \times 100 \quad (\%) \tag{9}$$

으로 정의하며 k는 (0,100)사이의 값을 가질 수 있으나 $N_I$는 최소한의 데이터 전송률을 얻기 위해서 N의 10%이상의 대역폭을 사용한다 가정한다. (즉, $N_I \ge 0.1N$)

따라서 수식(7)으로부터, SINR을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} SINR_1^3[n] &= \frac{P_{tx1}/N \parallel H_{11}[n] \parallel^2}{P_{tx2}/N_I \parallel H_{21}[n] \parallel^2 + \sigma_{n1}^2} \\ SINR_2^3[n] &= \frac{P_{tx2}/N_I \parallel H_{22}[n] \parallel^2}{P_{tx1}/N \parallel H_{12}[n] \parallel^2 + \sigma_{n2}^2} \end{aligned} , \tag{10}$$

$n = 0,...,N_I-1$. 그리고 부반송파 인덱스 $n = N_I,...,N-1$에 대해서는 TRx1의 SNR은

$$SNR_1^3[n] = \frac{P_{tx1} \parallel H_{11}[n] \parallel^2}{N\sigma_{n1}^2} \tag{11}$$

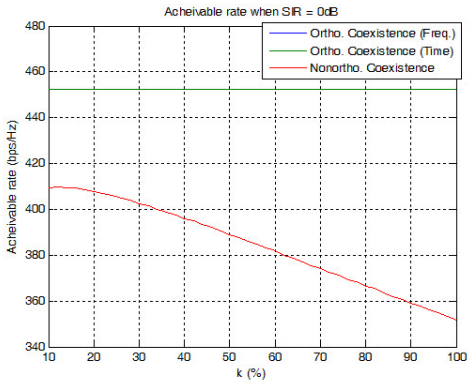
로 주어진다. 따라서 System Achievable Rate, $R_3$는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_3 = &\sum_{n=0}^{N_I-1} \log_2(1+SINR_1^3[n])(1+SINR_2^3[n]) \\ &+ \sum_{n=N_I}^{N-1} \log_2(1+SNR_1^3[n]) \end{aligned} . \tag{12}$$

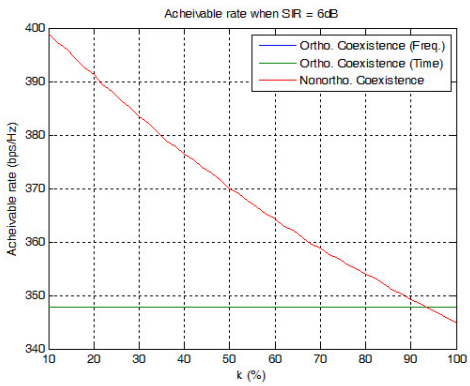
### 3.3 주파수 공존 방식에 따른 모의실험 결과

그림 3은 SIR이 각각 0dB, 6dB에 대해 Overlap 정

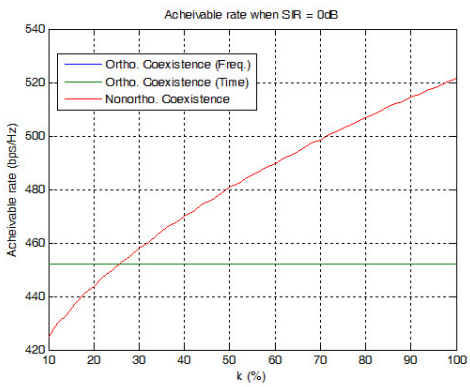
도를 나타내는 수식 (9)의 $k$에 따른 SIR에 따른 주파수 분할 기반의 직교공존방식과 시간 분할 기반의 직교 공존방식, 비직교 스펙트럼 공존 방식기법의 전송률 $R_1, R_2,\ R_3$ 을 각각 분석한 것이다. 모의실험에서 채널 $\boldsymbol{h}_{ij}$는 모두 3개의 탭을 가지며, $\boldsymbol{h}_{11}$과 $\boldsymbol{h}_{22}$의 세




(a) SIR = 0dB, $\alpha_{PL} = 0.7(=-1.55dB)$




(b) SIR =6dB, $\alpha_{PL} = 0.7(=-1.55dB)$




(c) SIR = 0dB, $\alpha_{PL} = 0.2(=-7dB)$

Fig. 3. Achievable rate vs. $k$ in (9)

개의 다중경로 탭은 각각 $[0dB, -8dB, -15dB]$의 분산값을 가지고 평균이 0인 Complex Gaussian분포를 가지도록 랜덤하게 생성하였다. 교차 링크(cross link) $\boldsymbol{h}_{21}$과 $\boldsymbol{h}_{12}$에 대해서는 $[0dB, -8dB, -15dB] + \alpha_{PL}(dB)$의 분산값을 가지고 평균이 0인 Complex Gaussian분포를 가지도록 랜덤하게 생성하였다. 이때 $\alpha_{PL}$은 교차링크의 상대적 경로손실 정도를 나타내며 $\alpha_{PL} \approx 1(=0dB)$은 강한 간섭채널(Strong interference channel)을, $\alpha_{PL} \approx 0(=-\infty dB)$은 약한 간섭채널(Weak interference channel)을 나타낸다.

모의실험에서 주파수 분할 기반의 방식은 두 사용자가 동일한 대역폭을 사용한다고 가정하였고, 시간 분할 기반의 방식은 두 사용자가 동일한 시간동안 대역폭을 점유한다고 가정하였다. 그 결과 주파수 분할 기반의 방식과 시간 분할 기반의 방식은 전송률은 차이가 없었으며, TRx1과 TRx2가 서로 직교하도록 자원을 분할하기 때문에, x축의 $k$에 무관하게 성능이 나타남을 확인할 수 있다. 반면, 비직교 방식의 경우, $k$에 따라 성능이 달라짐을 확인할 수 있다.

그림 3의 (a)와 (b)로부터, SIR이 6dB일 때 즉, Tx1이 쓸 수 있는 전력이 Tx2가 쓸 수 있는 전력보다 클 때에는 주파수 자원을 1:1로 분할해서 할당받은 주파수 분할 기반 또는 시간 분할 기반의 주파수 공존방식보다, TRx1이 전체 대역폭을 차지하는 형태로 스펙트럼을 공유하되 서로 간섭을 허용하며 주파수를 공유하는 것이 전체 시스템 성능 (TRx1과 TRx2가 획득할 수 있는 전송속도의 합, System Achievable Rate) 관점에서 유리하다는 것을 확인할 수 있다. 참고로 TRx2의 관점에서 사용하는 대역폭이 증가할수록 하나의 부반송파당 SINR은 감소하지만, 부반송파의 개수가 증가함에 따라 achievable rate은 증가함을 예상할 수 있다. 하지만 이러한 증가폭보다 수식 (11)과 같이 $k$가 작을수록 간섭 없이 사용할 수 있는 TRx1의 부반송파의 개수가 증가하므로 전체 시스템 성능은 $k$가 작을 때 가장 좋은 성능을 내고 있다. 그림 3의 (a)와 (c)를 비교하였을 때, 강한 간섭환경에서는 (즉, $\alpha_{PL}$이 클 때) Overlap되는 대역폭 정도 $k$가 작을 때 높은 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 즉, TRx2입장에서 좁은 대역에 높은 전력을 실어서 전송하는 것이 전체 시스템 전송 용량 관점에서 유리하다. 반면, 약한 간섭환경에서는 (즉, $\alpha_{PL}$이 작을 때) Overlap되는 대역폭 정도 $k$가 클 때, 더 높은 전송용량을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 즉 TRx2입장에서 넓은 대역

에 대해 낮은 전력으로 TRx1에 간섭을 미치는 것이 더 유리하다.

## Ⅳ. 고출력증폭기의 비선형 특성이 주파수 공존 방식에 미치는 영향 분석

### 4.1 고출력 증폭기 (HPA) 모델

앞의 III절에서는 간섭 환경에 따라 비직교 공존 방식의 전략이 달라질 수 있음을 확인하였다. 넓은 대역에 낮은 전력으로 간섭을 일으키는 환경과 좁은 대역에 높은 전력으로 간섭을 일으키는 환경을 비교하였는데, 이때, OFDM 송신기는 완벽한 증폭기를 사용한다고 가정하였다. 하지만, OFDM시스템에서 PAPR가 커짐에 따라 전력 증폭기에서 비선형 왜곡이 발생된다. 즉, 현실적인 전력 증폭기를 이용할 때에는 송신 전력이 높아지면, 전력의 Dynamic range가 넓어지고, 또한 부반송파의 개수가 증가함에 따라 PAPR이 커질 수 있다. 이러한 복합적인 영향으로 인해 신호의 왜곡이 생겨 전체 시스템에 영향을 주게 된다. 따라서 본 절에서는 이러한 HPA의 비선형 왜곡을 고려하여 이종 네트워크의 성능분석을 분석한다. 이때, 전력증폭기 모델로써 널리 쓰이는 SSPA(Solid State Power Amplifier)모델을 사용하였다[8]. 참고로, 전력증폭기에 입력되는 신호가

$$x(t) = r(t)e^{j\phi(t)} \tag{13}$$

이라면 전력증폭기의 출력신호는 다음과 같이

$$\hat{x}(t) = F_A[r(t)]e^{j[\phi(t)+F_P[r(t)]]} \tag{14}$$

이며 SSPA 모델의 AM/AM AM/PM변환은 다음과 같다.

$$F_A[r(t)] = \frac{r(t)}{[1+(\frac{r(t)}{A_0})^{2p}]^{1/2p}}, F_P[r(t)] = 0 \tag{15}$$

여기에서 $A_0$는 포화점에서의 출력진폭, p는 전력증폭기의 선형성을 조절하는 파라미터이다. 이때 p는 클수록 선형성이 좋다는 것을 의미한다. 그림 4는 HPA를 포함한 OFDM 블록도를 나타내고 있는데, 모의실험에서 시스템 성능을 분석하기 위해, 주파수 영역의 부반송파에 정보를 실어서 IFFT를 통해 시간 축의 OFDM 신호를 만들게 된다. 이 신호를 수식 (14)와 (15)를 참고하여 HPA에 통과하여 송신신호를 생성하게 된다. 참고로 수식 (15)의 SSPA의 출력 진폭 모델의 물리적 의미를 살펴보면, $r(t)$가 작은 값을 가질 때에는 $F_A[r(t)] \approx r(t)$가 되고, $r(t)$가 큰 값을 가질 때에는 $F_A[r(t)] \approx A_0$가 된다. 즉, 아래와 같은 Limiter 함수와 같이 표현할 수 있다[8].

$$F_A[r(t)] \approx \begin{cases} r(t) & 0 < r(t) < A_0 \\ A_0 & r(t) \geq A_0 \end{cases} \tag{16}$$

따라서, 시간 영역에서의 OFDM신호의 Dynamic range가 클수록 왜곡이 커짐을 예상할 수 있다. 다음 절에서는 그림 4와 같이 IFFT를 통해서 나오는 time domain 신호를 HPA에 통과시켜 신호의 왜곡 효과를 모델링하였으며, 이로 인해 수신단의 freq. domain에서의 각 subcarrier 별 SINR을 측정하여 System Achievable Rate를 계산하여 HPA왜곡이 전체 시스템 성능에 어떠한 영향을 미치는지 모의실험을 통해 확인하였다.

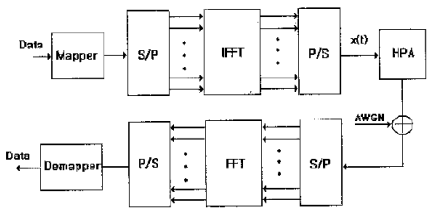



Fig. 4. OFDM transceiver with HPA

### 4.2 HPA의 비선형효과에 따른 비직교 공존 방식의 성능 모의실험 결과

그림 5는 비선형효과를 포함하였을 때 ($A_0 = [0.1, 0.3,\ 0.5]$ ) 비직교 공존 방식의 성능 모의실험 결과를 나타낸다. 모의실험에서 선형성 조절 파라미터는 일반적으로 널리 쓰이는 p=2로 가정하였다[8]. SIR은 5dB이고, $\alpha_{PL}$은 0.4로 가정하였다. 그림에서 알 수 있듯이, $A_0$가 작을 때 낮은 전송 용량을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 $A_0$가 작을 때 비선형 왜곡이 크기 때문이다. 재미있는 것은 왜곡이 작을 때(즉, $A_0$가 클 때)에는 TRx2가 좁은 대역에 높은 전력으로 간섭을 일으키는 것이(즉, $k$가 작을 때가) 전체 시스템 용량이 증가에 유리한 반면, 왜곡이 클 때(즉, $A_0$가 작을 때)는 넓은 대역에 낮은 전력으로 간섭을

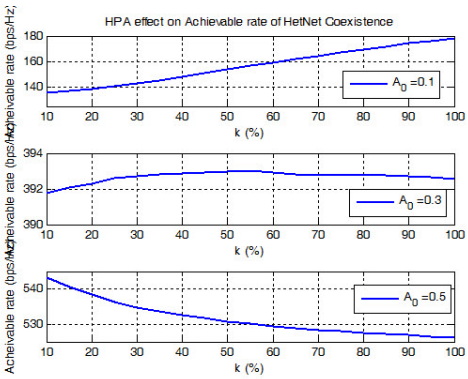



Fig. 5. Achievable rate vs. $k$ in (9) with HPA effect ($A_0 = [0.1, 0.3, 0.5]$)

일으키는 것이(즉, $k$가 클 때가) 유리하다는 것을 확인할 수 있다. 이는 $A_0$가 작을 때는 신호 왜곡으로 인한 성능 저하가 시스템 용량 저하에 지배적이므로, 넓은 대역에 낮은 전력으로 신호를 송수신하는 것이 이종 네트워크의 공존 환경에 적합함을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 이종 OFDM시스템에서 두 시스템이 단일안테나를 사용하였을 때, 다양한 공존 방식(주파수기반 직교 공존, 시간기반 직교 공존, 비직교 주파수 공존)에 대해 시스템 전송 용량 성능을 분석하였다. 이종 네트워크 간의 간섭량, 이종 네트워크의 전송 전력에 따라 공존방식의 성능에 차이를 보였으며, HetNet의 동작 환경에 따라 적절한 공존방식을 취할 수 있음을 확인하였다. 또한 OFDM시스템 송신단의 HPA의 비선형 효과가 비직교 공존방식에 미치는 영향을 살펴보았으며, 이 비선형성 파라미터에 따른 비직교 공존 방식의 성능을 모의실험을 통해 확인하였으며, 이를 바탕으로 시스템 전송 용량 성능 관점에서 이종 네트워크의 공유하는 대역폭의 정도를 달리 두는 공존 전략을 제시할 수 있었다. 추후에 본 논문에서 제시한 분석 방법을 바탕으로 공존 시스템에서 비선형 파라미터가 BER 성능에 미치는 영향을 분석하고 최적화된 공존전략 (Modulation order 및 (Overlap) 대역폭 정도 $k$ 등)을 제시할 수 있을 것으로 예상한다.

## References

[1] 3GPP TR36.814 V9.0.0, *Further advancements for E-UTRA physical layer aspects* (Release 9), Mar. 2010.

[2] Y. J. Park, A. S. Park, and S. Y. Kang "Trend on development of network capacity of LTE-Advanced to support increasing mobile data traffic" *Electron. and Telecommun. Trends*, vol. 27 no. 1, Feb. 2012.

[3] C. S. Yang and C. G. Kang, "QoS-oriented user association in HetNet with a backhaul constraint," *J. KICS*, vol. 39B, no. 10, pp. 654-663, Oct. 2014.

[4] W. J. Jo, C. Y. Oh, and T. J. Lee, "Uplink capacity improvement by cooperative communications and radio resource partitioning of macro-users and femto-users for HetNets," *J. KICS*, vol. 40, no. 3, pp. 139-146, Jun. 2013.

[5] Y. W. Blankenship, "Achieving high capacity with small cells in LTE-A," in *50th Annu. Allerton Conf. Commun., Contr., and Comput.*, pp. 1680-1687, Oct. 2012.

[6] E. Almeida, et al., "5G communications race: pursuit of more capacity triggers LTE in unlicensed band," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 10, no. 1, pp. 43-51, Mar. 2015.

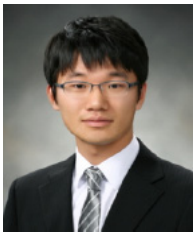
[7] C. G. An and H. G. Ryu, "BER performance comparison and evaluation of 5G candidate waveforms based on DFT spreading under the nonlinear HPA," *J. KICS,* vol. 41, no. 4, pp. 415-423, Apr. 2016.

[8] E. Costa and S. Pupolin, "M-QAM-OFDM system performance in the presence of a nonlinear amplifier and phase noise," *IEEE Trans. Commun.,* vol. 50, no. 3, pp. 462-472, Mar. 2002.

**이 성 복** (Sung-bok Lee)

2016년 2월 : 부경대학교 전자공학과 졸업
2016년 3월~현재 : 부경대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> 통신공학, OFDM, 인지무선기술

**박 재 철** (Jae Cheol Park)



2009년 2월 : 경희대학교 전자공학과 학사
2011년 2월 : 경희대학교 전자전파공학과 석사
2011년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 연구원
<관심분야> 무선통신, 주파수 공동사용기술

**박 재 현** (Jaehyun Park)

2003년 2월 : KAIST 전기 및 전자 공학과 학사
2010년 2월 : KAIST 전기 및 전자 공학과 박사
2010년~2013년 : 한국전자통신연구원 선임연구원
2013년~2014년 : Imperial College London, Research Associate
2014년~현재 : 부경대학교 조교수
<관심분야> 다중안테나 기반 통신 신호처리, 동시전력 및 정보 전송 기술, 인지무선기술

**강 규 민** (Kyu-Min Kang)

1997년 2월 : 포항공대 전기전자공학과 학사
1999년 2월 : 포항공대 전기전자공학과 석사
2003년 2월 : 포항공대 전기전자공학과 박사
2003년 8월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원
<관심분야> 통신 시스템/네트워크, 인지무선기술