

부분 다중화의 성능 분석 및 최적화

김성환 · 반태원 · 정방철*

Optimization and Performance Analysis of Partial Multiplexing

Seong Hwan Kim · Tae Won Ban · Bang Chul Jung*

Dept. of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

요 약

최근 다수의 노드가 하나의 접속점 (AP) 혹은 기지국에 접속하는 시나리오에서 주파수 효율 및 신뢰도를 증가시켜야 할 필요성이 높아지고 있다. 본 논문은 두 개의 노드가 하나의 수신자에게 접속하는 다중 접속 (Multiple access) 시나리오를 고려한다. 기존의 할당된 자원 전체에 다수의 송신 노드의 신호를 전송하는 방식 대신, 본 논문에서는, 할당된 자원 중에서 일부의 자원만을 두 송신 노드가 공유하는 부분 다중화 방식을 고려한다. 각 노드가 할당 받은 자원 중에서 다른 노드와 공유하는 자원의 비율을 R_s 라 하고, R_s 에 대한 성능 분석 및 최적화를 수행한다. 근사된 BER 식을 통하여, 수율을 계산하고, 수율을 최대화 하는 R_s 는 1 혹은 0의 값만을 갖음을 보인다. 또한 프레임 에러율 (FER) 값에 제한을 둘 때, R_s 는 0과 1 사이의 값을 가질 수 있음을 보이고, 그것을 만족하는 R_s 의 근사값을 닫힌 형태로 구한다. 부분 다중화는 새로운 다중 접속 방식이 될 수 있다.

ABSTRACT

Recently, spectral efficiency or reliability is required to be improved in the scenario of multiple access. In this paper, we consider a scenario where two source nodes access one destination node. Different with conventional multiple access studies, in our research, a part of the allocated resource is shared by two source nodes and this scheme is called partial multiplexing. Let R_s denote the ratio of the amount of the shared resource to that of the resource allocated to each user. We analyze and optimize the performance of the partial multiplexing in term of R_s . We show that the optimal R_s to maximize the throughput is 1 or 0 based on approximated bit error rate (BER). In addition, if we set a constraint on frame error rate (FER), R_s can have a value between 0 and 1. We also find the approximated R_s to meet the constraint as a closed form. Partial multiplexing can be a novel multiple access scheme.

키워드 : 부분 다중화, 다중 접속, 수율 극대화

Key word : Partial multiplexing, Multiple access, Throughput maximization

접수일자 : 2013. 05. 13 심사완료일자 : 2013. 06. 12 게재확정일자 : 2013. 06. 27

* Corresponding Author Bang Chul Jung(E-mail:bcjung@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9171)

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.7.1589>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 모바일 단말의 폭발적인 증가로 인하여 값비싼 주파수 자원을 효율적으로 사용해야 하는 요구사항이 높아지고 있다. 뿐만 아니라, 최근 많은 관심을 받고 있는 Machine-type communications (MTC)에서는 인간으로부터 발생하는 트래픽이 아닌, 무수히 많은 기계들로부터 발생하는 작은 데이터들을 수집하는 시나리오가 중요하게 대두되고 있다 [1~4]. MTC를 수용하기 위해서, 한 기지국에서 관리해야 하는 노드들의 수는 수천에서 수만 개로 늘어날 것이고, 그러한 노드들이 상향으로 보내는 트래픽의 양도 크게 증가할 것으로 예상되고 있다.

서로 다른 노드들에게 시간, 주파수, 코드 등의 직교 자원을 할당하는 방법은 지난 세대의 통신에서 실제적으로 구현되어 다수의 단말에게 통신 서비스를 제공하여 왔다. 최근 기지국 및 단말에 다수의 안테나를 설치하여, 안테나 간 간격을 적절히 떨어뜨렸을 때 채널 간 상관관계가 매우 적어지는 성질 이용하여, 송수신 안테나 개수의 최소값 만큼 주파수 효율을 높일 수 있음이 이론적으로 증명되었다 [5]. 만약 송신단에서 채널을 예측할 수 없다면, 페이딩 현상에 의해서 통신의 신뢰도가 떨어지지만, 송수신단에 다수개의 안테나를 사용하면, 복수의 데이터 스트림을 전송하는 동시에 여러 확률의 기율기를 감소시킬 수 있다. 이때, 데이터 스트림의 개수와 여러 확률의 기율기 사이의 Tradeoff 관계가 있음이 밝혀졌다(Diversity-multiplexing tradeoff)[6]. [5][6]에서 사용한 다중송수신 안테나 (MIMO) 기술은 단일 송신자와 단일 수신자가 있을 경우에 적용 가능하다. 다수의 송신자가 하나의 수신자에 동시 접속하는 다중 접속 (multiple access) 방식에서 MIMO 기술을 사용했을 때 얻을 수 있는 Diversity-multiplexing Tradeoff에 대한 연구가 진행되었다.[7].

기존의 연구에서 고려하는 다중 접속 시나리오는, 할당된 자원 전체에 다수의 송신 노드의 신호를 전송하는 방식이었다. 기존 연구들과 다르게 본 논문에서는, 할당된 자원 중에서 일부의 자원만을 두 송신 노드가 공유하고, 나머지 자원은 노드 간에 서로 겹치지 않게 나누어 전송하는 부분 다중화 방식을 고려한다. 각 노드가 할당 받은 자원 중에서 다른 노드와 공유하는 자원의 비율을 R_s 라 하고, R_s 에 대한 성능 분석 및 최적화

를 수행한다. 두 노드 모두 BPSK 변조를 사용하고, 주파수 선택적 채널을 겪으며, 채널 이득 값은 수신단에 서만 정확히 안다고 가정한다. 근사된 BER 식을 통하여, 수율을 계산하고, 이 수율식이 R_s 에 대한 convex 함수임을 보임으로써, 수율을 최대화 하는 R_s 는 1 혹은 0의 값만을 갖음을 보인다. 또한 프레임 에러율 (Frame error rate, FER) 값에 제한을 두고 이를 만족시켜야 할 때, R_s 는 0과 1 사이의 값을 갖을 수 있음을 보이고, 그것을 만족하는 R_s 의 근사값을 닫힌 형태로 구한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델과 부분 다중화 기법을 소개하고, III장에서는 평균 BER을 분석을 설명한다. IV장에서는 수율을 최대화 하는 R_s 과 FER 제한을 만족하는 R_s 를 구하고, V장에서 본 논문을 마무리 한다.

II. 시스템 모델

하나의 기지국과 두 개의 단말이 존재하며, 두 개의 단말이 기지국에 접속하는 상향 링크의 상황을 고려한다. 기지국이 두 단말에게 할당한 자원은 세부분으로 나누어, 단말 1만 사용하는 영역, 단말 2만 사용하는 영역, 단말 1과 2가 동시에 사용하는 영역으로 나눌 수 있으며, 이를 그림 1에서 확인 할 수 있다. 그림 1은 일반적인 직교주파수분할다중 (OFDM) 시스템 하에서, 두 단말에게 부분적으로 자원을 공유하도록 할당한 부분 다중화 자원 할당 방식을 보여준다. 그림 1에서는 OFDM 심볼을 기준으로 단말에게 자원을 할당 하였다. 본 논문에서는 단말 1과 2에게 동일한 양의 자원을 할당한다고 가정한다. 각 단말에게 할당된 자원중, 다른 단말과 공유해야 하는 자원의 비율을 R_s 로 표시하고 공유율이라고 지칭한다.

기지국과 각 단말은 단일 안테나를 사용하며, Binary phase shift keying (BPSK) 변조를 사용한다. 단말 i 의 신호를 s_i 라고 하면 $s_i \in \{+1, -1\}$ 가 된다. 이때 단말 1에게 할당된 자원 상에서 수신 신호는 다음과 같다.

$$y = \begin{cases} h_1 \sqrt{P_1} s_1 + n, & \text{case 1} \\ h_1 \sqrt{P_1} s_1 + h_2 \sqrt{P_2} s_2 + n, & \text{case 2} \end{cases} \quad (1)$$

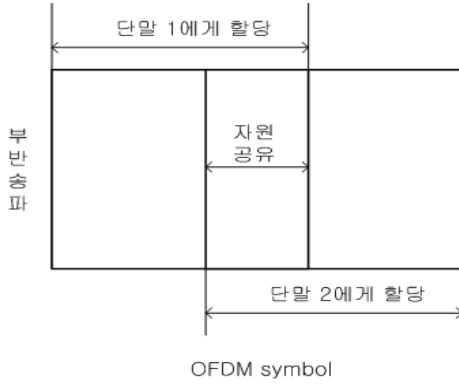


그림 1. 부분 다중화의 자원 할당 방식

Fig. 1 Resource allocation method of partial multiplexing

여기서 y 는 수신된 신호, P_i 는 단말 i 의 송신 전력, h_i 는 단말 i 의 채널 상수, n 은 AWGN 잡음을 각각 나타낸다. h_i 는 파일럿 신호를 이용하여 수신측인 기지국이 정확한 값을 알고 있다고 가정한다. 수식 (1)에서 case 1은 단말 1이 단독으로 자원을 사용하는 경우이고, case 2는 단말 1과 2가 동시에 자원을 사용하는 경우이다. h_i 는 평균이 0인 원형 대칭 복소 가우시안 랜덤 변수이며, $h_i \sim CN(0,1)$ 로 표현한다. 본 논문에서는 주파수 선택적 페이딩을 가정하므로, 같은 프레임안에 존재하는 자원 원소마다 h_i 는 다를 수 있다. 본 논문에서는 h_i 는 매 자원 원소마다 독립적인 동일 분포(i.i.d.)를 갖는다고 가정한다. n 도 평균이 0인 원형 대칭 복소 가우시안 랜덤 변수이며, $n \sim CN(0, \sigma^2)$ 로 나타낸다. case 1에서 수신 신호를 Maximum likelyhood (ML) 방식을 사용하여 복호하는 방법은 잘 알려져 있으므로 생략한다. case 2에서 s_1 의 값을 추출하기 위한 Log-Likelihood Ratio (LLR) 값은 다음과 같다.

$$A_1 = \log \frac{\sum_{s_2=\{1,-1\}} p(y|s_1=1, s_2)}{\sum_{s_2=\{1,-1\}} p(y|s_1=-1, s_2)} \quad (2)$$

$$= \log \frac{\sum_{s_2=\{1,-1\}} \exp\left(-\frac{|y - h_1\sqrt{P_1} - h_2\sqrt{P_1}s_2|^2}{2\sigma^2}\right)}{\sum_{s_2=\{1,-1\}} \exp\left(-\frac{|y + h_1\sqrt{P_1} - h_2\sqrt{P_1}s_2|^2}{2\sigma^2}\right)}$$

III. 평균 BER 분석

R_s 가 FER 및 수율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 R_s 에 대한 평균 BER 분석이 선행되어야 한다. 하나의 단말만이 사용하는 자원에서의 BER 분석은 잘 알려져 있다[7]. 본 섹션에서는 두 단말이 동시에 전송할 때 (case 2)의 BER을 알아본다. 이를 위해 [8]의 레일리 페이딩에서의 BPSK를 사용하는 두 단말의 신호가 충돌할 때의 BER을 분석한 부분을 발췌하였다.

두 단말이 모두 다음과 같은 BPSK 변조를 사용한다고 가정한다: $(0 \rightarrow 1), (1 \rightarrow -1)$. 각 단말이 보낸 패킷 내의 심볼은 R_s 의 비율 만큼 다른 단말로부터 간섭을 받으므로, (2)와 같은 LLR을 사용해야 한다. 두 단말이 보낸 신호가 충돌한다면, 수신 심볼 후보들은 각각 다음과 같은 값을 가지며 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{00} &= h_1 \sqrt{P_1} + h_2 \sqrt{P_2} \\ S_{10} &= -h_1 \sqrt{P_1} + h_2 \sqrt{P_2} \\ S_{11} &= -h_1 \sqrt{P_1} - h_2 \sqrt{P_2} \\ S_{01} &= h_1 \sqrt{P_1} - h_2 \sqrt{P_2} \end{aligned} \quad (3)$$

두 단말이 보낸 신호가 $\{0, 0\}$ 이라고 가정할 때, 수신된 심볼은 S_{00} 을 평균으로 한 복소 가우시안 분포를 띄게 된다.

그림 3은 각 심볼 후보들의 검파 결정 영역을 나타낸다. 단말 1이 보낸 신호가 0일 경우 수신된 심볼이 영역 A_1, A_2 에 있으면 ML 검파기가 올바르게 검파할 것이고, 영역 A_3, A_4 에 있을 경우는 오류가 발생할 것이다. 따라서 단말 1이 0을 보냈을 경우, 단말 1의 BER은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{bit} &= \Pr(y \in A_3 | b = S_{00}) + \Pr(y \in A_4 | b = S_{00}) \\ &= \Pr(\hat{b} \in S_{10} | b = S_{00}) + \Pr(\hat{b} \in S_{11} | b = S_{00}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 b 는 올바른 심볼 후보를 나타내고 $\hat{b}$ 는 ML 검파기로 검파한 심볼이다. 수신된 심볼이 각각 영역 A_3, A_4 에 있을 확률은 union bound 로 아래와 같이 표현할 수 있다[9].

$$\Pr(\hat{b} \in S_{10} | b = S_{00}) \leq Q\left(\frac{|S_{10} - S_{00}|/2}{\sqrt{\sigma^2/2}}\right) \quad (5)$$

$$\Pr(\hat{b} \in S_{11} | b = S_{00}) \leq Q\left(\frac{|S_{11} - S_{00}|/2}{\sqrt{\sigma^2/2}}\right).$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하여 BER의 union bound를 얻을 수 있다. 신호 대 잡음비 (SNR)가 높은 경우에 각 영역의 확률 계산에 들어가는 $|S_{10} - S_{00}|$ 과 $|S_{11} - S_{00}|$ 중에서 거리가 짧은 쪽의 확률이 먼 쪽의 확률에 비해 매우 큰 값을 가지므로 실제의 BER과 잘 맞는다.

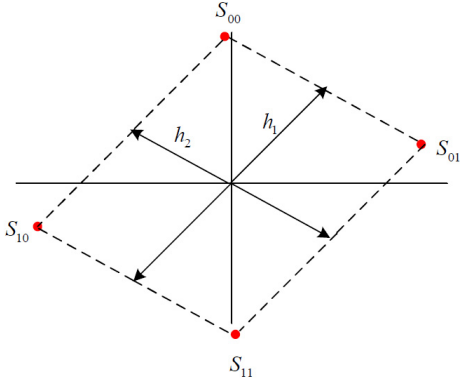


그림 2. 단말 1과 2가 동시에 전송했을 때, 특정 시간의 수신 심볼 후보

Fig. 2 Received symbol candidates when terminal 1 and 2 transmit simultaneously

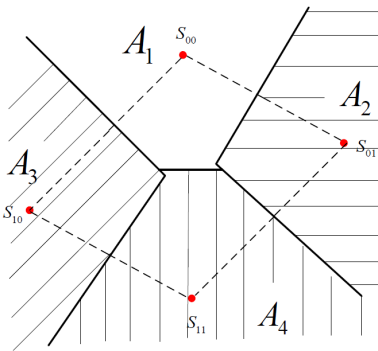


그림 3. 각 심볼 후보들의 검파 결정 영역

Fig. 3 Detection decision region of each symbol candidate

식 (3)을 식 (5)에 대입하여, BER을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{bit} \leq Q\left(\frac{\sqrt{P_1}|h_1|}{\sqrt{\sigma^2/2}}\right) + Q\left(\frac{\sqrt{P_1+P_2}|h'|}{\sqrt{\sigma^2/2}}\right) \quad (6)$$

여기서 h' 은 h_1 과 마찬가지로 분산이 1인 복소 가우시안 랜덤 변수를 나타낸다.

다음으로 평균 BER을 구하기 위해 i.i.d. 한 h' , h_1 에 대하여 평균을 취한다. 평균 BER의 union bound는 다음과 같이 표현할 수 있다 [8].

$$\overline{P_{bit}} \leq E\left[Q\left(\frac{\sqrt{P_1}|h_1|}{\sqrt{\sigma^2/2}}\right)\right] + E\left[Q\left(\frac{\sqrt{P_1+P_2}|h'|}{\sqrt{\sigma^2/2}}\right)\right] \quad (7)$$

$$= \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\rho_1}{1+\rho_1}}\right) + \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\rho_1+\rho_2}{1+\rho_1+\rho_2}}\right),$$

여기서 $\rho_i = P_i/\sigma^2$ 을 나타낸다. 높은 SNR에서 식 (7)은 테일러 급수 확장에 따라서 다음 식으로 근사화된다 [8].

$$\overline{P_{bit}} \approx \frac{1}{4\rho_1} + \frac{1}{4(\rho_1+\rho_2)}. \quad (8)$$

단말 1이 사용한 자원 중에서, R_S 만큼의 자원을 단말 2와 같이 사용했을 때의 BER을 살펴본다. 코딩이 걸리지 않은 상황에서, 패킷 내의 심볼들은 서로 상관관계가 없다. 즉 공유율 R_S 에서의 BER은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{P_{bit}}(R_S) = (1 - R_S)\overline{P_{bit}^{NS}} + R_S\overline{P_{bit}^S} \quad (9)$$

여기서 P_{bit}^{NS}, P_{bit}^S 는 각각 공유하지 않는 상황의 BER과 공유 상황의 BER을 나타낸다. $\overline{P_{bit}^{NS}}$ 은 $\overline{P_{bit}^{NS}} \approx 1/4\rho_1$ 으로 근사된다[7]. 따라서 식 (9)는 아래와 같이 근사화 된다.

$$\overline{P_{bit}}(R_S) = (1 - R_S)\frac{1}{4\rho_1} + R_S\left(\frac{1}{4\rho_1} + \frac{1}{4(\rho_1+\rho_2)}\right). \quad (10)$$

IV. R_S 의 최적화 제안

4.1. 수율 최대화 관점

BER 분석을 토대로 두 단말이 얻을 수 있는 수율을 분석하며, 수율을 최대화 하는 R_S 을 찾는 알고리즘을 제시한다. 우선 단말 i 의 Frame error rate (FER)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} FER_i &= 1 - (1 - BER_i)^L \\ &= 1 - (1 - (A_i + B_i R_C))^L, \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $A_i = \frac{1}{4\rho_i}$, $B_i = \frac{1}{4\rho_i + 4\rho_{\bar{i}}}$ 이며, L 은 한 프레임에 들어있는 bit 수를 나타낸다. BPSK 변조 방식에서는 비트 수와 심볼 수가 같으므로, L 은 한 단말이 사용한 심볼 수와 같게 된다. 두 단말이 동일한 양의 데이터, L 을 보내고 각각의 평균 SNR이 ρ_1, ρ_2 일 때, 수율은 다음과 같다.

$$T(R_S) = \frac{L(1 - FER_1) + L(1 - FER_2)}{L(2 - R_S)}. \quad (12)$$

$T(R_S)$ 의 R_S 에 대한 경향을 수학적으로 용이하게 분석하기 위하여, $\rho_1 = \rho_2$ 로 가정하여 식 (12)을 아래와 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} T(R_S) &= \frac{2L(1 - FER)}{L(2 - R_S)} \\ &= \frac{2(1 - (A + BR_S))^L}{(2 - R_S)}, \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $A = A_1 = A_2$, $B = B_1 = B_2$ 이다. 그림 4을 통하여, R_S 의 변화에 따른 $T(R_S)$ 가 SNR에 따라서 바뀌는 것을 볼 수 있다. R_S 는 0과 1 사이의 값을 갖는다. 그림 4.(a)는 $\rho_1 = \rho_2 = 10dB$ 인 경우로서, 상대적으로 SNR이 낮은 환경이며, 이때에는 $R_S = 0$ 일 때, 즉 자원을 서로 공유하지 않을 때에, 수율이 최대되는 것을 알 수 있다.

반면, 그림 4.(b)는 $\rho_1 = \rho_2 = 25dB$ 인 경우로서, 상대적으로 SNR이 높은 환경을 나타낸다. $T(R_S)$ 는 R_S 에 대한 convex 함수의 형태를 나타내는 것을 볼 수 있다. 부록에서 $0 \leq R_S \leq 1$, $0 \leq A + BR_S \leq 1$, $L \geq 2$ 을 만족하면, $\frac{d^2 T(R_S)}{d^2 R_S} \geq 0$ 임을 증명하여,

복수의 심볼로 이루어진 프레임 형태의 구조에서는 항상 $T(R_S)$ 가 convex 형태임을 증명하였다. $T(R_S)$ 가 convex 형태일 경우, 구간 $0 \leq R_S \leq 1$ 에서의 $T(R_S)$ 의 최대값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\max(T(0), T(1)) \quad (14)$$

따라서, 수율의 극대화를 목적으로 할 경우에, 두 단말이 모든 자원을 공유하거나, 아니면, 자원을 공유하지 않는 것 중 하나가 최적의 답이 된다.

4.2. FER 제한을 만족하는 R_S 선택

식 (11)에 따라서, FER은 R_S 에 따라서 증가하는 함수임을 알 수 있다. 수율이 높더라도 서비스의 품질을 높이기 위해서 FER을 특정한 값 이하로 낮춰야 하는 조건을 만족시켜야 한다. 이 조건은 $FER \leq \epsilon$ 로 둔다. 만약 수율을 최대화 하는 R_S 가 0이면, FER 조건을 고려할 필요 없지만, $R_S = 1$ 에서 수율이 최대화가 된다면, $R_S = 1$ 일 때 $FER \leq \epsilon$ 을 만족하는 지 확인하고, 만족하지 않는다면, $FER = \epsilon$ 인 R_S 를 선택해주어야 한다. 식 (11)을 이용하여, $FER = \epsilon$ 인 R_S 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$R_S \approx \frac{1}{B}(1 - A + \sqrt[4]{1 - \epsilon}) \quad (15)$$

위 근사식은 $0 \leq R_S \leq 1$, $0 \leq A + BR_S \leq 1$, $A \leq 1, B \leq 1$ 일 때 유효한 값을 갖는다. 그림 5에서 R_S 에 따른 FER의 경향을 살펴볼 수 있다. R_S 가 1일 때, 수율 성능이 최대화를 나타냈지만, 만약 ϵ 이 0.1로 설정되어 있을 경우에는 $R_S = 0.66$ 를 초과하는 값에서

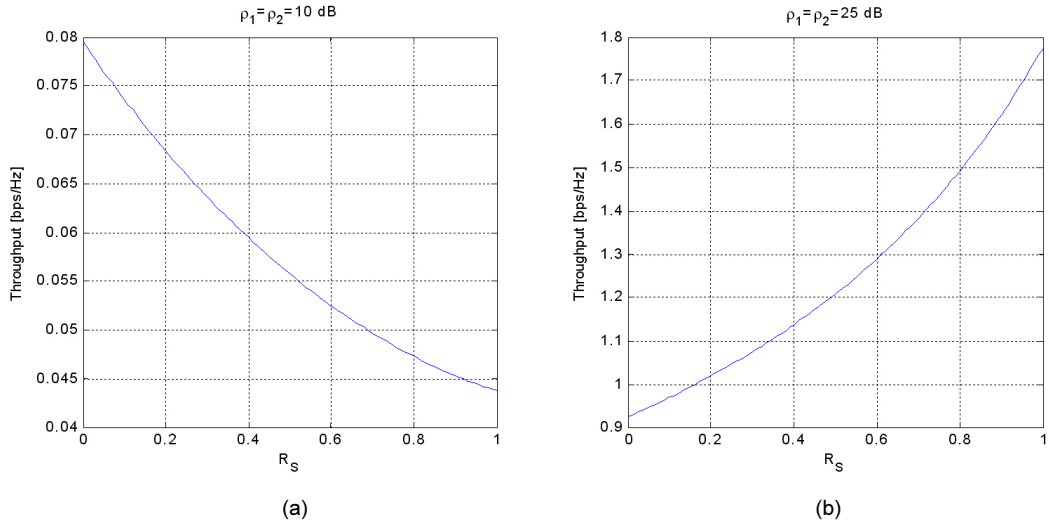


그림 4. R_S 에 대한 Throughput (a) $\rho_1 = \rho_2 = 10 \text{ dB}$, $L = 100$ (b) $\rho_1 = \rho_2 = 20 \text{ dB}$, $L = 100$
 Fig. 4 Throughput for varying R_S (a) $\rho_1 = \rho_2 = 10 \text{ dB}$, $L = 100$ (b) $\rho_1 = \rho_2 = 20 \text{ dB}$, $L = 100$

는 FER이 0.1보다 커지므로, 적당한 값이 아니다. FER이 0.1보다 작으면서, 수율을 최대화 하는 $R_S = 0.66$ 이 최적의 값이 되고, 이는 식 (15)의 값과 동일하다.

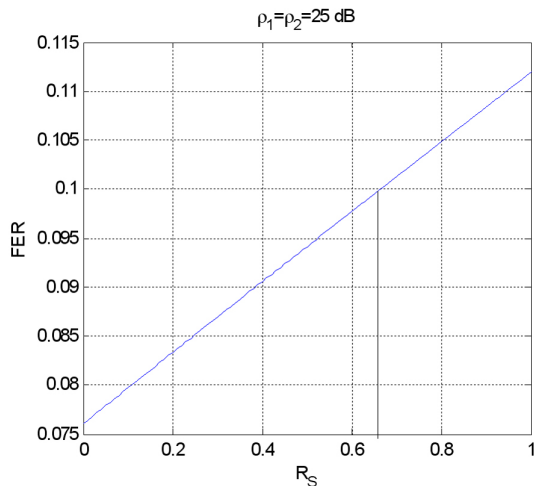


그림 5. R_S 에 대한 FER
 Fig. 5 FER for varying R_S when $\rho_1 = \rho_2 = 25 \text{ dB}$.

V. 결 론

본 논문은 두 개의 노드가 하나의 수신자에게 접속하는 다중 접속 (Multiple access) 시나리오를 고려한다. 기존 연구들과 다르게 본 논문에서는, 할당된 자원 중에서 일부의 자원만을 두 송신 노드가 공유하고, 나머지 자원은 노드 간에 서로 겹치지 않게 나누어 전송하는 부분 다중화 방식을 고려한다. 각 노드가 할당 받은 자원 중에서 다른 노드와 공유하는 자원의 비율을 R_S 라 하고, R_S 에 대한 성능 분석 및 최적화를 수행한다. 두 노드 모두 BPSK 변조를 사용하고, 주파수 선택적 채널을 겪으며, 채널 이득 값은 수신단에서만 정확히 안다고 가정한다. 근사된 BER 식을 통하여, 수율을 계산하고, 이 수율식이 R_S 에 대한 convex 함수임을 보임으로써, 수율을 최대화 하는 R_S 는 1 혹은 0의 값만을 갖음을 보인다. 또한 FER 값에 제한을 두고 이를 만족시켜야 할 때, R_S 는 0과 1 사이의 값을 갖을 수 있음을 보이고, 그것을 만족하는 R_S 의 근사값을 닫힌 형태로 구한다. QPSK 혹은 16QAM 와 같이 보다 높은 효율의 변조 방식에도 쉽게 적용할 수 있다. 부분 다중화 방식은 사용자들의 패킷 길이가 다름에도 불구하고 다중 접속을

수행할 수 있으며, 논문의 분석을 토대로 시스템 요구 조건에 맞게 짝을 결정해 줄 수 있다.

부 록

$T(R_S)$ 의 convexity 증명

R_S 의 영역은 다음으로 제한된다: $0 \leq R_S \leq 1$, $0 \leq A + BR_S \leq 1$. $T(R_S) = f(R_S)/g(R_S)$ 로 두면 $f(R_S) = 2(1 - (A + BR_S))^L$, $g(R_S) = 2 - R_S$ 로 둘 수 있다.

$$\frac{d^2 T(x)}{d^2 x} = \frac{\left[f''(x)g^2(x) - 2g'(x)f'(x)g(x) \right]}{g^3(x)} \quad (\text{A.1})$$

여기서 $f'(x)$ 과 $f''(x)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f'(x) &= -2BL(1 - (A + Bx))^{L-1} \\ f''(x) &= 2B^2L(L-1)(1 - (A + Bx))^{L-2}. \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

$T(R_S)$ 의 convexity는 $\frac{d^2 T(x)}{d^2 x} \geq 0$ 을 증명하면 되고 다음의 부호를 판단하면 된다.

$$f''(x)g^2(x) + 2f'(x)g(x) + 2f(x) \quad (\text{A.3})$$

$f'(x)$ 과 $f''(x)$ 를 대입하면 다음의 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} & 2B^2L(L-1)(1 - (A + Bx))^{L-2}(2-x)^2 \\ & - 4BL(1 - (A + Bx))^{L-1} + 4(1 - (A + Bx))^L \\ & \geq (2(1 - (A + Bx)) - BL)^2 + B^2L(L-2) \end{aligned}$$

따라서 $L \geq 2$ 이면, $\frac{d^2 T(x)}{d^2 x} \geq 0$ 이 되어 $T(x)$ 는 x 에 대한 convex 함수가 된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2013R1A1A2A10004905).

REFERENCES

- [1] IEEE 802.16-10/0004r3, "IEEE 802.16p machine to machine (M2M) system requirements document (SRD)", Std. Sep. 2011.
- [2] M. Chui, M. Loffler, and R. Roberts, "The internet of things," McKinsey Quarterly, Mar. 2011.
- [3] 3GPP TR 22.868 V8.0.0, Tech. Spec. Group Services and System Aspects, Study on Facilitating Machine to Machine Communication in 3GPP Systems, (Release 8), 3GPP Std., Dec. 2008.
- [4] IEEE C80216-10-002r7 "Machine to Machine (M2M) Communication Study Report", IEEE 802.16 Contribution, May. 2010.
- [5] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," Europ. Trans. Telecommun., vol. 10, pp. 585-596, Nov.-Dec. 1999.
- [6] L. Zheng and D. N. C. Tse, "Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple antenna channels," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 49, pp. 1073 - 1096, May 2003.
- [7] D. N. C. Tse, P. Viswanath, and L. Zheng, "Diversity - multiplexing tradeoff in multiple-access channels," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 50, no. 9, pp. 1859 - 1874, Sep. 2004.
- [8] S. H. Kim, "Performance analysis of orthogonal resource hopping multiple access systems with two MIMO schemes," M.S. theses, KAIST, Daejeon, Korea, 2008.
- [9] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1993.



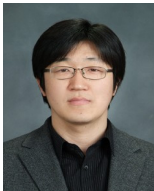
김성환(Seong Hwan Kim)

2006년 8월 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
2008년 8월 KAIST 전자전산학과 석사
2013년 2월 KAIST 전기전자공학과 박사
2013년 3월~4월 경상대학교 정보통신공학과 박사후 연구원
※관심분야: 이동통신, 자원관리, 협력 및 중계통신, 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



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