

양방향 복호전달 릴레이를 사용하는 레거시 OFDMA 시스템에서의 자원 할당 기법

서 종 필*, 한 철 희*, 박 성 호**, 정 재 학^o

Resource Allocation Schemes for Legacy OFDMA Systems with Two-Way DF Relay

Jongpil Seo*, Chulhee Han*, Seongho Park**, Jaehak Chung^o

요 약

OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) 시스템은 주파수 선택적 페이딩 문제를 효율적으로 해결하며 최적의 부반송파 및 송신 전력을 할당함으로써 보다 향상된 성능을 얻는다. Two-way 릴레이는 양방향 통신을 통해 기존의 반이중 릴레이보다 향상된 주파수 효율을 제공한다. WiBro와 같은 레거시 OFDMA 시스템에 two-way DF (decode-and-forward) 릴레이를 적용 시 파일럿 재배치 문제와 자가 간섭으로 인한 채널 추정 및 수신 신호 복호가 어려운 문제가 발생한다. 본 논문에서는 WiBro와 같은 레거시 OFDMA 시스템에 적합한 two-way DF 릴레이 자원 할당 기법을 제안한다. 제안된 기법은 릴레이와 연결된 노드를 기지국과 직접 통신하는 노드로 간주하여 부반송파를 할당한다. 그리고 다른 노드가 사용하지 않는 부반송파를 중첩 할당함으로써 직교 할당으로 발생하는 대역폭 손실을 보완한다. 전산모의실험을 통해 제안된 자원 할당 기법의 성능 향상을 검증한다.

Key Words : two-way relay, legacy OFDMA, resource allocation

ABSTRACT

OFDMA systems solves frequency selective fading problem and provides improved performance by optimal allocation of subcarriers and transmit power. Two-way relay systems provide improved spectral efficiency compared to that of the conventional half-duplex relay using bidirectional communications. In legacy OFDMA system such as WiBro, two-way DF relay utilization causes pilot re-assignment and impossibility of channel estimation and decoding at relay nodes by self-interference. In this paper, resource allocation schemes for legacy OFDMA systems with two-way DF relay are proposed. The proposed schemes allocate subcarriers considering destinations nodes which are connected to relay nodes as individual nodes which are directly connected to a base station. Subsequently, the proposed schemes compensate bandwidth loss due to orthogonal allocations by overlapped allocating unused subcarriers at other nodes. Numerical simulations show that the proposed resource allocation schemes provide improved performance compared with orthogonal allocation.

※ 본 연구는 삼성탈레스(주)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

◆ First Author : Inha University, Department of Electronic Engineering, slavik@nate.com, 정희원

◦ Corresponding Author : Inha University, Department of Electronic Engineering, jchung@inha.ac.kr, 종신회원

* Samsung Thales, chulhee.han@samsung.com, 정희원

** Inha University, Department of Electronic Engineering, pshdaniel@gmail.com, 학생회원

논문번호 : KICS2014-08-291, Received August 4, 2014; Revised September 23, 2014; Accepted September 23, 2014

I. 서 론

OFDMA (orthogonal frequency division multiple access)는 무선 채널의 다중 경로 특성으로 인한 주파수 선택적 페이딩 (frequency selective fading)과 심볼 간 간섭 (inter-symbol interference) 문제를 해결하는 효과적인 방법 중 하나로 최신 무선 통신 표준 기술로 자리잡고 있다. OFDMA 심볼은 다수의 부반송파 (subcarrier)로 분할되고 다중 사용자가 서로 다른 부반송파를 할당 받아 동시에 데이터를 주고 받는다. 무선 채널의 주파수 선택적 특성을 이용하여 부반송파 할당, 송신 전력 할당 등의 자원 할당 기법을 통해 주파수 다이버시티 (frequency diversity)를 극대화하고 전체 시스템의 성능을 향상시키는 기법이 연구되어 왔다¹⁻³.

릴레이 기반 무선 통신 시스템은 송신 전력의 증가 없이 데이터 전송 신뢰도를 높이고 기지국의 전송 커버리지를 확장하는 방식으로 주목 받고 있다⁴⁻⁶. 주로 사용되는 릴레이 프로토콜은 증폭 후 전달 (amplify-and-forward: AF)과 복호 후 전달 (decode-and-forward: DF) 등이 있다. AF 프로토콜은 릴레이에서 수신한 신호를 그대로 증폭하여 전송하는 방식으로 복잡도가 낮으나 잡음도 함께 증폭하여 전달한다. DF 프로토콜은 릴레이에서 수신한 신호를 복호한 후 다시 부호화하여 전달하는 방식으로 복잡도는 높지만 AF에 비해 잡음 증폭을 낮출 수 있다.

기존의 반이중 (half-duplex) 릴레이 방식에서는 2-홉 (hop)을 기준으로 소스 노드에서 도착 노드로 신호를 전송하기까지 두 개의 시간 슬롯을 필요로 하며 소스 노드와 도착 노드가 신호를 주고받기까지 총 네 개의 시간 슬롯을 필요로 한다. 이로 인해 주파수 효율이 감소하게 된다. 반이중 릴레이의 주파수 효율을 개선하기 위해 전송 단계를 줄인 two-way 릴레이가 제안되었다^{7,8}. 기존의 릴레이에서 소스 노드와 릴레이 노드가 통신하는 동안 도착 노드는 대기 상태에 있는 반면 two-way 릴레이에서는 소스 노드에서 릴레이 노드로 신호를 전송 시 도착 노드도 동시에 릴레이 노드로 신호를 전송한다. 이후 릴레이 노드에서는 네트워크 부호화 (network coding) 등의 방법을 통해 수신한 양 신호를 소스 노드와 도착 노드로 동시 전송한다. 이와 같이 two-way 릴레이 통신 방식은 직접 통신 방식과 같이 두 시간 슬롯 내에 소스 노드와 도착 노드가 신호를 주고받을 수 있다. Two-way 릴레이와 OFDMA를 결합하여 하나의 송수신 쌍과 하나의 two-way 릴레이가 존재하는 네트워크에서 부반송파

치환 기법을 적용하여 성능을 최적화시키는 자원 할당 방법이 제안되었다. 그리고 two-way 릴레이 기반 OFDMA 시스템에서의 최적의 자원 할당 기법 또한 제안되었다⁹⁻¹¹.

Two-way 릴레이 기반 OFDMA 시스템에서의 자원 할당 기법은 OFDMA 시스템 자체의 채널 추정 또는 파일럿 (pilot) 배치는 고려하지 않는다. 이로 인해 WiBro와 같은 레거시 (legacy) OFDMA 시스템에 two-way 릴레이를 적용하는 경우 자원 할당을 위한 채널 추정 시 동일 부반송파로의 파일럿 배치로 인한 자가 간섭 (self interference) 문제가 발생한다. 이러한 자가 간섭을 회피하기 위해 새로운 혼련 신호 전송 프로토콜을 규정하거나 파일럿을 재배치 하는 것은 기존 시스템과의 하위 호환 (backward compatibility) 문제로 인해 적합하지 않다. 본 논문에서는 이러한 문제를 보완하기 위해 two-way 릴레이 기반 레거시 OFDMA 시스템에서의 자원 할당 기법을 제안한다. 제안하는 자원 할당 기법은 릴레이와 연결된 노드를 기지국과 연결된 독립적인 직접 통신 노드로 간주하고 릴레이와 서로 다른 부반송파를 할당한다. 이때 각 노드에 할당된 부반송파 수는 상대적으로 감소하여 각 링크의 전송률이 감소한다. 이를 보완하기 위해 각 노드 별로 사용하지 않는 부반송파를 중첩 할당함으로써 주파수 영역에서의 다중화 이득을 얻고 시스템 전송률을 향상시킨다. 그리고 전산모의실험을 통해 제안된 자원 할당 기법의 성능을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II에서는 시스템 모델을 보이고 III에서는 two-way DF 릴레이 기반 레거시 OFDMA 시스템에서의 자원 할당 기법을 제안한다. IV에서는 전산모의실험을 통해 제안된 방법의 성능을 검증하고 마지막으로 V에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 MABC 프로토콜 기반의 two-way DF 릴레이 OFDMA 시스템을 고려한다. 고려하는 시스템은 그림 1과 같이 하나의 기지국 노드 A와 두 개의 도착 노드 B와 C, 하나의 릴레이 노드 R을 가정한다. 도착 노드 B는 기지국 노드와 직접 통신을 하며 도착 노드 C는 릴레이 노드 R을 거쳐서 기지국 노드와 통신을 한다. 릴레이 노드 R과 연결된 도착 노드 C는 기지국 노드와의 직접 통신이 불가능하며 양 도착 노드 사이는 경로 손실과 새도잉으로 약한 간섭을 미친다고 가정한다. 노드 B와 노드 R은 서로 영향을 전혀 미치지 않는다고 가정한다. 릴레이 노드 R은 신

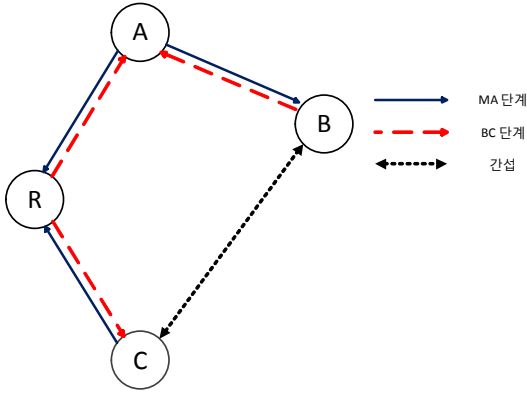


그림 1. 시스템 모델.
Fig. 1. System model.

호 전달 역할 뿐만 아니라 자체적으로 기지국 노드 A와 데이터를 주고 받는다고 가정한다. OFDMA를 위한 부반송파 수는 N 을 가정한다. 각 노드의 송신 전력은 P 이며, 본 논문에서는 최적 전력 할당에 대해 고려하지 않는다. 따라서 각 부반송파의 송신 전력은 $p = P/N$ 으로 고정한다. 각 노드는 단일 안테나를 가지며 송신과 수신을 동시에 할 수 없다.

MABC (multiple access broadcast) DF 프로토콜 기반 two-way 릴레이 시스템^[10]에서 각 노드는 두 단계를 거쳐 정보를 주고 받는다. 첫 번째 단계는 다중 접속 (MA) 단계이고 두 번째 단계는 브로드캐스트 (BC) 단계이다. 첫 번째 단계인 MA 단계에서는 기지국 노드 A가 모든 도착 노드에 데이터를 전송하기 위해 데이터 신호를 브로드캐스트한다. 이때 기지국 노드 A와 직접 통신을 하는 도착 노드 B는 기지국 노드의 전송이 완료될 때 까지 대기한다. 반면 릴레이와 연결된 도착 노드 C는 기지국 노드의 전송이 완료될 때 까지 대기하지 않고 기지국 노드로 전송할 데이터를 릴레이 노드로 전송한다. 이때 부반송파 n 에 대한 노드 B와 릴레이의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_B^{(n)} = \sqrt{p} h^{(n)} x_A^{(n)} \pi_B^{(n)} + \sqrt{p_I} t^{(n)} x_C^{(n)} \pi_C^{(n)} + z_B^{(n)}, \quad (1)$$

$$y_R^{(n)} = \sqrt{p} g^{(n)} x_A^{(n)} \pi_R^{(n)} + \sqrt{p} f^{(n)} x_C^{(n)} \pi_C^{(n)} + z_R^{(n)}. \quad (2)$$

여기서 $x_k^{(n)}$ 은 부반송파 n 에 대한 노드 k 의 전송 심볼을 의미한다. $h^{(n)}$ 은 부반송파 n 에 대한 노드 A와 B 사이의 채널 계수, $g^{(n)}$ 은 노드 A와 R 사이의 채널 계수, $f^{(n)}$ 은 노드 R과 C 사이의 채널 계수, $t^{(n)}$ 은 노드 B와 C 사이의 채널 계수를 의미한다. p_I 는 노드 B

와 C 사이의 경로 손실 및 새도잉을 고려한 수신 신호 전력이다. $z_k^{(n)}$ 은 노드 k 에서의 부가 가우시안 잡음이며, 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 분포를 따른다. $\pi_k^{(n)}$ 은 부반송파 n 에 대해서 노드 k 에 자원 할당 여부를 지시하는 지시자 변수로 0과 1의 값을 갖는다. 기지국 노드 A는 프레임 헤더 부분의 제어 신호를 통해 모든 채널 계수를 알고 있다고 가정한다.

두 번째 단계인 BC 단계에서 노드 B는 수신 대기 모드에서 송신 모드로 전환하고 노드 A로 데이터를 전송한다. 노드 R은 이전 단계에서 수신한 $x_A^{(n)}$ 과 $x_C^{(n)}$ 을 복호한 후 노드 A와 C로 전달한다. 노드 C는 송신을 종료하고 노드 R의 신호를 수신한다. 이때 노드 A와 C의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_A^{(n)} = \sqrt{p} h^{(n)} x_B^{(n)} \pi_B^{(n)} + \sqrt{p} g^{(n)} x_R^{(n)} \pi_R^{(n)} + z_A^{(n)}, \quad (3)$$

$$y_C^{(n)} = \sqrt{p} g^{(n)} x_R^{(n)} \pi_C^{(n)} + \sqrt{p_I} t^{(n)} x_B^{(n)} \pi_B^{(n)} + z_C^{(n)}. \quad (4)$$

일반적인 two-way 릴레이 시스템을 가정하면 MA 단계와 BC 단계에서 노드 A와 노드 C가 릴레이 노드 R과 통신할 때 동일한 자원을 할당한다. 즉, 모든 n 에 대해서 $\pi_R^{(n)} = \pi_C^{(n)}$ 이다. 따라서 릴레이 노드 R에서 x_A 와 x_C 로 인한 자가 간섭 (self-interference)이 발생한다. AF 프로토콜의 경우 노드 R에서 단순히 $y_R^{(n)}$ 을 증폭시켜 브로드캐스트하기 때문에 네트워크 코딩 개념을 도입하여 노드 A와 노드 C에서 자가 간섭을 제거할 수 있다. DF 프로토콜에서는 모든 노드에서 알고 있는 임의의 코드북을 이용하여 노드 R에서 복호함으로써 자가 간섭을 제거할 수 있다. 이때 DF 프로토콜의 용량 영역 (capacity region)은 이론적으로 MAC 채널과 BC 채널의 capacity region의 교집합과 같다. 그러나 레거시 OFDMA 시스템에 two-way 릴레이를 적용하면 시변 채널에서의 채널 추정을 위한 파일럿 배치 문제로 인해 위의 이론적 용량 성능을 얻을 수 없다. 레거시 시스템에 그대로 two-way 릴레이를 적용 시 채널 추정 과정에서도 자가 간섭이 발생하기 때문에 수신 신호의 검출 및 복호가 불가능하다. 채널 추정의 자가 간섭 회피를 위해 새로운 혼련 신호 전송 프로토콜을 규정하는 것은 레거시 시스템과의 하위 호환 (backward compatibility) 문제로 인해 적합하지 않다. 본 논문에서는 이러한 문제를 보완하기 위해 two-way DF 릴레이 기반 레거시 OFDMA 시스템에서의 자원 할당 방법을 제안한다.

III. Two-way DF 릴레이 기반 레거시 OFDMA 시스템의 자원 할당

본 절에서는 two-way DF 릴레이 기반 레거시 OFDMA 시스템에서의 자원 할당 기법을 제안한다. II에서 기술한 바와 같이 일반적인 two-way 릴레이 OFDMA 시스템에서는 노드 A와 노드 C가 노드 R과 통신 시 동일한 자원을 할당하며, 이때 발생하는 자가 간섭을 완벽하게 제거 가능하다. 그러나 레거시 시스템의 경우 파일럿 배치 문제, 채널 추정 시 자가 간섭 문제, 자가 간섭 회피를 위한 새로운 혼련 신호 전송 프로토콜의 하위 호환성 문제 등으로 인해 two-way 릴레이 프로토콜을 적용시키는 것이 어렵다. 본 논문에서 제안하는 two-way DF 릴레이 기반 레거시 OFDMA 시스템에서의 자원 할당 기법은 각 릴레이와 연결되는 링크를 포함한 각각의 모든 링크를 독립적인 링크로 간주하여 자원을 할당한다. 즉, II절의 시스템 모델에서 A-B 링크와 A-R 링크, R-C 링크를 모두 독립적인 링크로 가정하여 하향링크 OFDMA 시스템에서의 자원 할당과 유사한 방법으로 접근한다. 본 논문에서 제안하는 자원 할당 기법은 해당 노드에서 사용하지 않는 부반송파 영역으로 자원을 중첩 할당함으로써 two-way 릴레이를 레거시 시스템에 적용 시 발생하는 대역폭 손실을 보완하고 주파수 영역에서의 다중화 이득을 얻는다.

각 링크에 대한 채널 추정이 완벽하다고 가정할 때 MA 단계와 BC 단계에서의 각 링크의 부반송파 n 에 대한 순시적 전송률은 다음과 같다.

$$R_{AB,MA}^{(n)} = R_{AB,BC}^{(n)} = \log_2(1 + ph^{(n)}), \quad (5)$$

$$R_{AR,MA}^{(n)} = R_{AR,BC}^{(n)} = \log_2(1 + pg^{(n)}), \quad (6)$$

$$R_{RC,MA}^{(n)} = R_{RC,BC}^{(n)} = \log_2(1 + pf^{(n)}), \quad (7)$$

이때 자가 간섭이 없이 합용량이 최대가 되는 부반송파 할당은 다음의 최적화 문제를 따른다.

$$\max \sum_{n=1}^N \pi_B^{(n)} R_{AB,MA}^{(n)} + \pi_R^{(n)} R_{AR,MA}^{(n)} + \pi_C^{(n)} R_{RC,MA}^{(n)} \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \pi_k^{(n)} \in \{0,1\}, \forall n \quad (9)$$

$$\sum_{k \in \{B,C,R\}} \pi_k^{(n)} = 1, \forall n \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^N \pi_k^{(n)} = N_{SC,k}, \forall k \in \{B,C,R\} \quad (11)$$

$$\sum_{k \in \{B,C,R\}} N_{SC,k} = N. \quad (12)$$

위의 최적화 문제는 모든 링크의 합용량이 최대가 되는 최적의 자원 할당, $\pi_k^{(n)}$ 을 도출하는 binary integer programming이다. 여기서 $N_{SC,k}$ 는 각 링크에 할당하는 부반송파의 수를 의미한다. $N_{SC,k}$ 는 시스템의 스케줄링 기법에 따라 달라질 수 있으나 본 논문에서는 스케줄링 기법에 대해서는 고려하지 않는다. 위의 최적화 문제에서 식 (10)은 각 링크에 할당되는 부반송파가 서로 중첩되지 않도록 하는 조건식이다. 일반적인 two-way 릴레이 시스템에서는 모든 n 에 대해 $\pi_R^{(n)} = \pi_C^{(n)}$ 이다. 그러나 레거시 OFDMA 시스템에서는 데이터 전송 시 노드 R에서의 자가 간섭으로 인해 $f^{(n)}$ 과 $g^{(n)}$ 을 동시에 추정하는 것이 불가능하다. 그러므로 먼저 모든 링크가 서로 직교 할당되도록 한다.

모든 $\pi_k^{(n)}$ 이 결정된 후 노드 R에서는 $\pi_R^{(n)} = 1$ 또는 $\pi_C^{(n)} = 1$ 을 만족하는 부반송파에서만 복호를 수행한다. 노드 B에서는 $\pi_B^{(n)} = 1$ 을 만족하는 부반송파에서만 복호를 수행한다. 이때 노드 R에서 $\pi_R^{(n)} = 1$ 인 부반송파는 유희상태로 대기한다. 마찬가지로 노드 B에서 $\pi_C^{(n)} = 1$ 인 부반송파 또한 유희상태로 대기한다. 이때 채널의 주파수 선택적 페이딩 특성으로 인해 유희상태인 부반송파에서도 충분히 복호 가능한 SINR을 갖는 부반송파가 존재할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 자원 할당 기법은 우선적으로 각 링크에 대해 자원을 직교 할당 후 SINR 임계값에 따라 부반송파를 중첩 할당함으로써 주파수 영역에서의 다중화 이득을 얻는다.

MA 단계에서 노드 A는 노드 B와 노드 R에 동시에 OFDM 심볼을 전송한다. 반대로 BC 단계에서는 노드 R과 노드 B로부터 전송된 OFDM 심볼을 중첩하여 수신한다. 사용자 간 간섭을 회피하기 위해 노드 B와 노드 R에 할당되는 부반송파는 서로 직교해야 하기 때문에 노드 B와 노드 C에 부반송파를 중첩시켜 할당한다. 각 노드의 복호 가능한 SINR을 γ_{TH} 로 가정할 때 제안된 중첩 할당 기법은 다음과 같다.

알고리즘 1. 단방향 중첩 부반송파 할당

$$1) \mathbf{B} = \{n' | \pi_B^{(n')} = 1, \forall n'\},$$

- $$C = \{n' | \pi_C^{(n')} = 1, \forall n'\}.$$
- 2) for $n' \in B$
- $$\gamma_R^{(n')} = \frac{p|f^{(n')}|^2}{p|g^{(n')}|^2 + 1}, \quad \gamma_B^{(n')} = \frac{p|h^{(n')}|^2}{p_I|t^{(n')}|^2 + 1}.$$
- 3) if $\gamma_R^{(n')} \geq \gamma_{TH}$ and $\gamma_B^{(n')} \geq \gamma_{TH}$ then
- $$C = C \cup \{n'\}.$$

위의 알고리즘 1은 노드 R에서 MA 단계 시 유휴 상태로 대기 중인 $\pi_B^{(n)} = 1$ 에 해당하는 부반송파 중 γ_{TH} 이상의 SINR을 갖는 부반송파를 노드 C에 중첩 할당하는 알고리즘이다. 첫 번째 단계에서는 노드 B에 할당된 부반송파 인덱스를 임의로 정렬한다. 두 번째 단계에서는 이들 부반송파에 대해 노드 R에서 노드 C의 신호를 복호하기 위한 SINR, $\gamma_R^{(n')}$ 과 노드 B의 SINR, $\gamma_B^{(n')}$ 을 계산한다. 세 번째 단계에서는 계산된 $\gamma_R^{(n')}$ 과 $\gamma_B^{(n')}$ 가 모두 γ_{TH} 이상일 경우 노드 C에 중첩 할당한다. 알고리즘 1은 노드 R에서 복호 시 사용되지 않는 부반송파를 노드 C에 추가적으로 할당함으로써 R-C 링크 간 다중화 이득을 얻을 수 있다. 이때 노드 B는 자신에게 할당된 부반송파가 노드 C에서도 사용되기 때문에 이로 인한 간섭의 영향을 받을 수 있다. 그러나 γ_{TH} 이상의 SINR을 갖는 부반송파만이 중첩 할당되므로 성능 손실은 미비하다. 또한 노드 B와 노드 C 사이의 거리가 충분히 긴 경우, 경로 손실과 음영효과로 인해 간섭의 영향이 더욱 미비해진다. BC 단계에서의 중첩 할당은 $B = \{n' | \pi_C^{(n')} = 1\} = \{n_{C,1}, n_{C,2}, \dots, n_{C,N_{SC,C}}\}$ 로 대체

하고 $\gamma_R^{(n')}$ 과 $\gamma_B^{(n')}$ 는 각각

$$\gamma_A^{(n')} = p|g^{(n')}|^2 / (p|h^{(n')}|^2 + 1) \text{ 과}$$

$$\gamma_C^{(n')} = p|f^{(n')}|^2 / (p_I|t^{(n')}|^2 + 1) \text{ 로 대체한다.}$$

알고리즘 1은 MA 단계의 노드 C 또는 BC 단계의 노드 B에 대해 복호 가능한 부반송파로 유효 대역폭 확장을 통해 주파수 영역에서의 다중화 이득을 얻는다. 이때 희생되는 노드는 수신 신호를 복호 가능하지만 사용자 간 간섭에 의해 전송률이 저하된다. 이를 보완하기 위해 한 노드에서만 중첩 할당하지 않고 양 노드에서 모두 중첩 할당함으로써 양 노드에서 동시에 부반송파를 중첩 할당하는 방법을 고려할 수 있다. 다음 알고리즘은 위에서 제안된 알고리즘 1을 확장하여 하나의 노드가 아닌 양 노드에서 중첩 할당한다.

- 알고리즘 2. 양방향 중첩 부반송파 할당
- 1) $B = \{n' | \pi_B^{(n')} = 1, \forall n'\},$
 $C = \{n' | \pi_C^{(n')} = 1, \forall n'\}, \quad O = B \cup C.$
- 2) for $n' \in O$
- $$\gamma_R^{(n')} = \frac{p|f^{(n')}|^2}{p|g^{(n')}|^2 + 1}, \quad \gamma_B^{(n')} = \frac{p|h^{(n')}|^2}{p_I|t^{(n')}|^2 + 1}.$$
- 3) if $\gamma_R^{(n')} \geq \gamma_{TH}$ and $\gamma_B^{(n')} \geq \gamma_{TH}$ then
- $$B = B \cup \{n'\}, \quad C = C \cup \{n'\}.$$

알고리즘 2는 노드 B에 할당된 부반송파와 노드 C에 할당된 모든 부반송파에 대해서 양 노드의 SINR이 γ_{TH} 이상일 경우 해당 부반송파를 양 노드에 중첩 할당한다. 알고리즘 1이 한 노드만 더 많은 부반송파를 할당받고 다른 노드는 그에 따른 사용자 간 간섭에 의해 성능 불균형이 발생하는 반면 알고리즘 2는 양 노드 모두 복호 가능한 부반송파를 추가적으로 확보할 수 있다. 따라서 한 노드의 전송률만 증가하고 다른 노드는 저하되는 것이 아닌 양 노드가 모두 추가적인 다중화 이득에 의한 전송률 향상을 기대할 수 있다.

IV. 전산모의실험

본 절에서는 전산모의실험을 통해 two-way DF 릴레이 기반 레거시 OFDMA 시스템에서 제안된 자원 할당 기법의 전송률 성능을 비교 및 검증하기 위해 전산 모의실험을 수행하였다. 전산모의실험을 위해 모든 노드는 단일 안테나를 가정하였다. 주파수 선택적 페이딩 채널 모델을 위해 ITU-R M.1225 Veh. A를 가정하였으며 delay profile의 각 tap은 레일리 페이딩 (Rayleigh fading)을 가정하였다. OFDM 변·복조를 위한 FFT 크기는 간단한 실험을 위해 $N=128$ 를 가정하였고 $p/\sigma^2=10\text{dB}$ 와 $p_I/\sigma^2=3\text{dB}$ 를 가정하였다. 식 (8)~(12)를 이용한 직교 할당과의 비교를 극대화하기 위해 $N_{SC,k} = N/3$ 을 가정하였다. 복호 가능한 SINR인 γ_{TH} 를 변화시키면서 링크 별 전송률, 합용량, 중첩 할당되는 부반송파 수를 확인하였다.

그림 2는 MA 단계에서 자원 할당 방법에 따른 전송률을 보인다. 가로 축은 γ_{TH} 를 의미하며 세로축은 각 링크의 전송률을 나타낸다. 식 (8)~(12)를 이용한 직교 할당 방법은 모든 노드에 대해 $N_{SC,k}$ 가 동일하기 때문에 평균적으로 동일한 성능을 갖는다. 알고리즘 1은 노드 C에 할당된 부반송파만을 확장하여 주파수

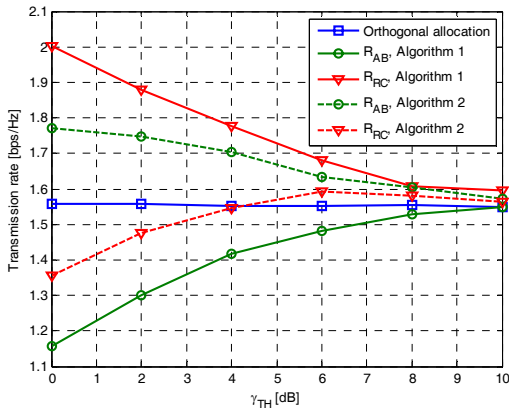


그림 2. 제안된 방법의 각 링크 별 전송률 비교
Fig. 2. Performance comparison of transmission rate of each link for the proposed schemes.

영역에서의 다중화 이득을 얻기 때문에 R_{RC} 는 직교 할당보다 높은 결과를 보인다. 반면 노드 B는 노드 C에 의해 사용자 간 간섭의 영향을 받기 때문에 R_{AB} 는 직교 할당에 비해 낮은 결과를 보인다. 알고리즘 2는 노드 C 뿐만 아니라 노드 B 또한 부반송파를 중첩 할당 받기 때문에 다중화 이득을 얻을 수 있다. 따라서 R_{AB} 또한 직교 할당보다 높은 전송률을 갖는다. 한편 낮은 γ_{TH} 영역에 한해서 R_{RC} 가 직교 할당에 비해 낮은 전송률을 갖는다. 노드 R에 할당된 부반송파에 미치는 간섭이 10dB인 반면 노드 B는 3dB만의 영향을 받기 때문이다. 그러나 일반적인 상용 시스템의 복고 가능한 SNR을 고려할 때 R_{RC} 또한 $\gamma_{TH} \geq 5\text{dB}$ 인 영역에서 직교 할당보다 높은 전송률을 얻는다.

그림 3은 MA 단계에서 자원 할당 방법에 따른 합

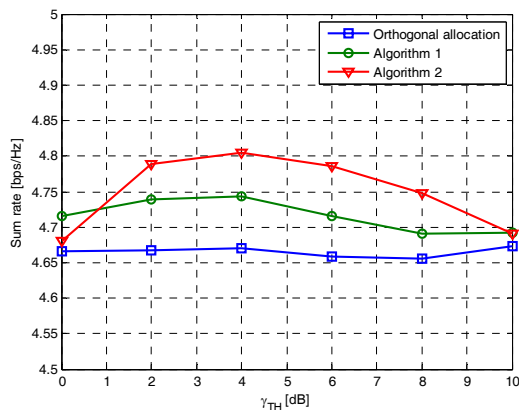


그림 3. 제안된 방법의 합용량 비교
Fig. 3. Performance comparison for sum rate of the proposed schemes.

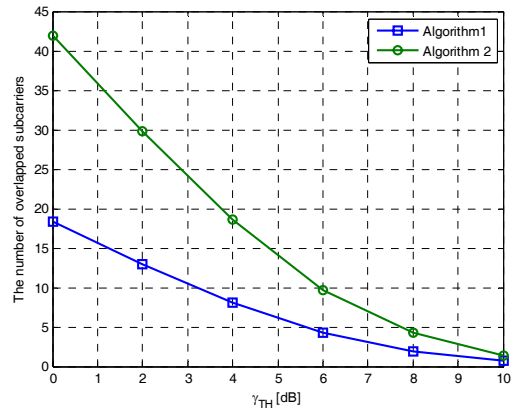


그림 4. 알고리즘 1과 2의 중첩 할당된 부반송파 수 비교
Fig. 4. Comparison of the number of overlapped subcarriers for the algorithm 1 and 2.

용량을 나타낸다. 알고리즘 1과 알고리즘 2는 모두 직교 할당에 비해 높은 합용량 성능을 갖는다. 그러나 그림 2의 결과에서 나타났듯이 알고리즘 1의 R_{AB} 가 항상 직교 할당에 비해 낮은 값을 가지므로 합용량 성능 측면에서 알고리즘 1의 성능 증가 폭은 크지 않다. 반면 알고리즘 2는 특정 γ_{TH} 구간에 한해 R_{RC} 의 성능이 열화될 뿐 나머지 구간에서는 직교 할당에 비해 항상 높은 전송률을 얻기 때문에 가장 높은 합용량 성능을 보인다. γ_{TH} 가 6dB일 때, 알고리즘 1이 1.3%의 성능 향상을 보이는 반면, 알고리즘 2는 2.6%의 성능 향상을 보인다.

그림 4는 각 알고리즘에 따른 중첩 할당된 부반송파 수를 나타낸다. 알고리즘 1은 노드 C에 할당된 부반송파만을 확장하는 반면 알고리즘 2는 노드 B와 노드 C에 할당된 부반송파를 모두 확장하기 때문에 동일 γ_{TH} 에서 더 높은 다중화 이득을 얻을 수 있음을 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 two-way DF 릴레이 기반 레거시 OFDMA 시스템에서의 자원 할당 기법을 제안하였다. 일반적인 two-way 릴레이 OFDMA 시스템에서 릴레이와 연결된 노드는 동일한 부반송파를 할당한다. 그러나 WiBro와 같은 레거시 OFDMA 시스템에 two-way DF 릴레이를 적용 시 파일럿 배치 및 자가 간섭 문제로 인해 릴레이 노드에서 신호를 복호 불가능하다. 본 논문에서는 이러한 문제를 보완하기 위해 우선 각 링크 별로 직교 할당하고, 이러한 직교 할당

으로 인한 대역폭 손실을 보완하기 위해 유희 부반송파를 대해 여러 노드에 중첩 할당함으로써 주파수 영역에서의 다중화 이득을 얻는 자원 할당 기법을 제안하였다. 특정 노드에 할당되는 부반송파만을 확장하는 단방향 중첩 자원 할당 알고리즘을 제안하였으며, 추가적으로 인접 노드에 미치는 간섭의 영향을 완화하기 위한 양방향 중첩 자원 할당 알고리즘을 제안하였다. 전산모의실험을 통해 제안된 자원 할당 기법은 two-way DF 릴레이 기반 레거시 OFDMA 시스템에서 자가 간섭 회피를 위한 직교 할당에 비해 높은 전송률을 가짐을 확인하였다.

References

[1] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, and R. D. Murch, "Multiuser OFDMA with adaptive subcarrier, bit and power allocation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 1747-1758, Oct. 1999.

[2] W. Rhee and J. M. Cioffi, "Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation," in *Proc. IEEE VTC*, May 2000.

[3] G. Li and H. Liu, "Resource allocation for OFDMA relay network with fairness constraints," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 11, pp. 2061-2069, Nov. 2006.

[4] T. M. Cover and A. A. El Gamal, "Capacity theorems for the relay channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-25, no. 5, pp. 572-584, Sept. 1979.

[5] 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.

[6] N. J. 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.

[7] B. Rankov and A. Wittneben, "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 379-389, Feb. 2007.

[8] S. J. Kim, P. Mitran, and V. Tarokh, "Performance

bounds for bidirectional coded cooperation protocols," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 11, pp. 5235-5241, Nov. 2008.

[9] C. K. Ho, R. Zhang, and Y. C. Liang, "Two-way relaying over OFDM: Optimized tone permutation and power allocation," in *Proc. IEEE ICC 2008*, pp. 3908-3912, May 2008.

[10] K. Jitvanichphaibool, R. Zhang and Y. C. Liang, "Optimal resource allocation for two-way relay-assisted OFDMA," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 58, no. 7, pp. 3311-3321, Sept. 2009.

[11] H. Ryu and C. Kang, "Modulation Scheme for Network-coded Bi-directional Relaying over an Asymmetric Channel," *J. KICS*, vol. 37-B, no. 2, pp. 97-109, Feb. 2012.

서 종 필 (Jongpil Seo)



2009년 2월 : 인하대학교 전자공학과 졸업
 2011년 2월 : 인하대학교 전자공학과 석사
 2011년 3월~현재 : 인하대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> OFDM, MIMO, LTE-Advanced

한 철 희 (Chulhee Han)



1997년 2월 : 중앙대학교 전자공학과 졸업
 1999년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사
 2007년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 박사
 2006년~2007년 : 삼성탈레스 선임연구원
 2007년~2013년 : 삼성탈레스 전문연구원
 2014년~현재 : 삼성탈레스 수석연구원
 <관심분야> 무선 통신 시스템 개발

박 성 호 (Seongho Park)



2013년 2월 : 인하대학교 전자
공학과 졸업
2013년 3월~현재 : 인하대학교
전자공학과 석사과정
<관심분야> 이동통신, 빔포밍,
Beyond 4G

정 재 학 (Jaehak Chung)



1988년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 졸업
1990년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 석사
2000년 : University of Texas at
Austin 전기전산학과 박사
2000년~2001년 : post doctoral
fellow, University of Texas at Austin
2001년~2005년 : 수석연구원, 삼성종합기술원
2005년~현재 : 인하대학교 부교수
<관심분야> Cognitive radio, 차세대 무선 이동 통
신, MIMO-OFDM, Cross layer 설계