

협력 중계를 이용한 IEEE 802.16j 네트워크를 위한 상향 링크에서의 통합 대역 할당 및 경로 선택 기법

황 호 영*, 이 혁 준°, 정 인 건*, 정 인 성**, 노 봉 수***, 박 귀 순***

Joint Bandwidth Allocation and Path Selection Scheme for Uplink Transmission in IEEE 802.16j Networks with Cooperative Relays

Ho-Young Hwang*, Hyuk-Joon Lee°, In-Gun Jeong*, In-Sung Jung**, Bong-Soo Roh***, Gui-Soon Park***

요 약

본 논문에서는 요구되는 통신 거리가 길고 LOS 확보가 쉽지 않은 산악 지형이 보편적인 군 전술 통신 환경에서 커버리지 확장과 음영 지역 제거를 위한 협력 중계 기반의 IEEE 802.16j 네트워크를 고려한다. 이를 통해 IEEE 802.16j 네트워크의 상향 링크(UL)에서 협력 중계 전송을 위한 대역 할당과 경로 선택을 통합적으로 수행하는 기법을 제안한다. 이를 위해 OFDMA 프레임 구조에서 협력 중계에 의한 처리율 증가량과 UL 접속 구간 및 UL 중계 구간의 대역 제한폭을 고려하여 전체 시스템의 데이터 처리율을 최대화하는 최적화 문제를 정의하고, 다중 차원 다중 선택 배낭 문제(MMKP)로 변환 후, 전역 탐색 알고리즘을 이용하여 최적해를 구한다. 협력 중계를 이용하지 않는 경우에 대해서도 최적화 문제를 정의하고, MMKP 기반 기법을 제안한다. 성능 비교를 위해 링크 품질 기반 (LQB) 기법의 전체 시스템 처리율도 평가한다. 군 전술 통신 환경 중 LOS 확보가 쉽지 않은 산악 지형 환경에서 OPNET 기반 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법들의 전체 시스템 처리율을 비교 분석하고, 제안하는 MMKP 기반 기법들이 LQB 기법들에 비해 좋은 성능을 나타냄을 보이고, 협력 중계를 사용하는 기법들이 그렇지 않은 기법들보다 더 높은 전체 시스템 처리율을 제공함을 보인다.

Key Words : IEEE 802.16j networks, cooperative relaying, bandwidth allocation, path selection, MMKP

ABSTRACT

In this paper, we propose a joint bandwidth allocation and path selection scheme for IEEE 802.16j networks in uplink with cooperative relaying, and we evaluate the performance of the proposed scheme by using OPNET based simulation in hilly terrain with heavy tree density. The proposed scheme maximizes the system throughput in uplink with cooperative relaying in IEEE 802.16j networks. Then, we transform the proposed scheme into multi-dimensional multiple choice knapsack problem (MMKP) based scheme. We also propose uplink throughput maximization scheme and MMKP based scheme without cooperative relaying. We show that the system throughput of the proposed MMKP based scheme is higher than that of link quality based scheme, and cooperative relaying provides higher system throughput than the conventional case without cooperative relaying in uplink.

※ This work was supported by Dual Use Technology Program and Agency for Defense Development(ADD)(10-DU-IC-01).

• 주저자 : 광운대학교 컴퓨터공학과 교수, hyhwang@kw.ac.kr, 정회원

° 교신저자 : 광운대학교 컴퓨터공학과 교수, hlee@kw.ac.kr, 종신회원

* 광운대학교 컴퓨터공학과 석사과정, ingun@daum.net,

** 광운대학교 임베디드SW공학과 석사과정, gjgis@nate.com

*** 국방과학연구소 연구원, saintroh@add.re.kr, gpark@add.re.kr

논문번호 : KICS2012-09-446, 접수일자 : 2012년 9월 19일, 최종논문접수일자 : 2013년 1월 17일

I. 서 론

최근 들어 무선 이동 통신 기술의 눈부신 발전에 힘입어 민수용 기술을 군수용 통신 시스템 개발에 도입하려는 시도가 다양하게 진행되고 있다. WiBro는 글로벌 표준 기술인 IEEE 802.16e/WiMax를 기반으로 국내 상용화를 목적으로 개발된 표준 기술로서 주로 대도시 영역(Metropolitan Area)에서의 광대역 무선 통신 서비스 제공을 위해 개발되었으나, 최근에는 네트워크 중심의 전술 운용 체계의 필요성이 강조되면서 군 전술 환경에서의 적용에 대한 관심도 높아지고 있다. 특히, WiMax 표준은 셀 커버리지 내의 대역폭의 효율성을 극대화시켜 높은 전송률과 일정 수준의 QoS(Quality of Service)를 보장해 주기 위한 기술 중 하나로 다중홉 릴레이(Multi-hop Relay, MR) 기술을 채택하고 있는데, 이 기술이 민수용 시스템에 비하여 통신 거리가 길고 LOS(Line-of-Sight) 확보가 쉽지 않은 산악 지형이 일반적인 전술 통신 환경에서의 커버리지 확장과 음영 지역 제거에 효과적일 것으로 평가되고 있다. 다중 홉 릴레이 시스템은 IEEE 802.16j MR(Multi-hop Relay) 표준 규격으로 정의하고 있으며, 차세대 이동 통신 시스템인 3GPP-LTE(Long-Term Evolution), IEEE의 802.16m, 802.20의 표준에서도 고속 통신을 위한 기술로 포함되어 있다^[16]. 다중홉 릴레이 시스템은 단순히 신호 증폭의 기능을 뛰어 넘어 기지국과 단말 간에 다중홉 데이터 전송기능을 포함하는 중계기로, 고가의 기지국 장비 및 설치 비용 없이 최소의 비용으로 기지국의 셀 커버리지를 확장시키고 네트워크 전체의 수용 용량을 높일 수 있는 효과적인 대안으로 인식되고 있다^[7].

IEEE 802.16j MR 표준 규격은 하향 링크에서 BS 또는 RS를 이용하여 협력 통신을 함으로써 다이버시티 이득(Diversity Gain)을 얻는 협력 중계(Cooperative Relay) 기능을 정의하고 있어, 이를 기반으로 하는 협력 통신 관련 연구들도 활발히 진행되어 왔다. 주요 연구 주제로는 MR 기반의 협력 통신 적용에 따른 링크 또는 시스템 레벨에서의 성능분석, MR 기반의 협력 통신 적용을 위한 코딩 기법, 스케줄링 및 자원 할당 기법, 협력 노드 선택 기법, 경로 설정 기법 등이 있다^[8-11]. Fakhri 등은 WiMAX 환경에서의 비협력 통신과 중계 기술을 이용한 협력 통신의 Outdoor to Indoor link의 효율을 비교하였다^[12]. 협력 통신의 경우, 이동 단말에 별도의

의 추가 안테나 없이 이동 단말들이 가상 안테나들을 형성하여 협력 통신을 함으로써 비협력 통신 보다 더 높은 전송률을 나타냄을 보였다. ^[13]에서는 IEEE 802.16j 기반의 하향 링크에서 전송률을 기준으로 RS 기반의 협력 통신과 직접 통신을 선택하는 기법을 제안하고, 협력 송신 다이버시티, 협력 수신 다이버시티, 협력 선택 다이버시티, 적응적 협력 다이버시티 기법을 적용하였을 때의 성능을 비교하였다. ^[14]에서는 인지 무선 기반의 팜토셀 환경에서의 WiMAX 구조를 제안하였으며, 추계적 Lyapunov 최적화를 이용하여 협력 자원 관리 기법을 제안하였고, 협력하는 이동 단말의 수를 점진적으로 증가시키는 실험을 통하여 channel utilization이 가장 높은 이동 단말 수를 분석하였다. ^[15]에서는 PHY 계층에서의 채널 상태와 MAC 계층에서의 오버헤드를 고려하여 cross-layer 관점에서 협력 노드 선택 방법을 제안하였다. 또한 WiMAX 시스템에서의 협력 통신을 위한 MAC Layer를 설계하는 연구도 활발히 진행 중인데, ^[16]에서는 PHY 계층에 DSTC(Distributed Space-Time Coding)를 적용한 WiMAX 시스템에서의 협력 통신을 위한 MAC Layer 설계를 연구하였으며, DSTC를 사용함으로써 분산된 이동 단말들이 가상 다중 입출력(Virtual MIMO)을 형성하여 멀티 홉 환경에서 협력 통신을 가능하게 하였다. ^[17]에서는 협력 노드간의 STC를 랜덤하게 부여하여 DSTC보다 협력 노드 선택의 유연성을 높인 R-DSTC(Randomized Distributed Space-Time Coding)를 제안하였다. 제안한 R-DSTC를 사용하는 경우 단일홉 방식, 2홉 단일중계 방식과 비교시 제안한 R-DSTC가 상향 링크에서 수율이 향상되고, 평균 지연이 감소됨을 보였다.

위에서 언급한 이전 연구 결과들은 특정 협력 통신 기법을 적용할 경우의 성능 향상 효과에 대한 분석에 초점을 맞추고 있어 실용성이 높지 않다는 데 문제점이 있다. 예를 들면, RS를 이용한 협력 통신의 경우, 후보 협력 RS가 다수 존재한다면 최적의 협력 RS 대수를 결정할 뿐만 아니라 사용자 또는 시스템 차원에서 최적의 전송률 이득을 얻을 수 있는 RS를 선택하기 위한 협력 RS 선택 기법이 필요하다. 또한, 협력 통신 관련 기법들은 일반적으로 상호 의존적인 속성을 갖고 있어, 통합되어 다루어져야 하는 경우가 많다. 예를 들면, 협력 노드 선택 시 BS 또는 RS의 가용 무선 자원이 고려되어야 하며, 그 결과에 따라 경로 선택 및 자원 할당 문제도 함께 다루어져야 한다. 그러나 지금까지의 대부분의

연구는 상호 의존적인 특성을 고려하지 않았거나 특정 파라미터 값들을 고정하는 방법을 통하여 문제를 단순화하여 해결하고 있다. 반면에, IEEE 802.16j MR 시스템에서의 상호 의존적인 문제를 해결하기 위한 방법으로 통합 최적화 기법을 제안한 이전 연구가 일부 존재하기도 한다. 예를 들면, [7]에서 Lee 등은 단일 셀 내에서 MR 시스템의 하향 링크 처리율을 최대화하기 위해 통합 자원 할당-라우팅 문제를 다중 차원 다중 선택 배낭 문제(MMKP)로 변환하고 라그랑지 승수 기반의 heuristic 알고리즘을 통해 근사해를 구하였으며, 시뮬레이션을 통한 heuristic 알고리즘의 성능 평가를 연구하였다. 그러나 이 연구에서는 협력 통신을 고려하지 않았다.

본 논문에서는 협력 중계 기반의 IEEE 802.16j transparent 모드 MR 시스템에서 상향 링크 처리율을 극대화하기 위한 통합 대역 할당 및 경로 선택 최적화 문제를 정의하고, 이를 다중차원 다중선택 배낭 문제(Multi-Dimensional Multiple Choice Knapsack Problem)로 변환한 후, 전역 탐색 기법을 사용하여 최적해를 구하는 기법을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 연구와 관련된 IEEE 802.16j MR 시스템 중 논문에서 논의하고자 하는 특징들에 대해 기술하며, 3장에서는 IEEE 802.16j 기반 네트워크에서의 상향 링크 처리율을 최대화하는 통합 대역 할당 및 경로 선택 기법을 제안하고, 제안하는 기법을 MMKP 기반 기법으로 변환하여 제안한다. 4장에서는 3장에서 제안한 기법들을 산악 지형 환경에서 OPNET 기반 시뮬레이션을 통해 실험하고, 성능 비교를 위해 링크 품질을 기반으로 하는 기법의 전체 시스템 처리율도 평가한다. 다양한 환경에서의 실험 결과들을 토대로 제안하는 통합 대역 할당 및 경로 선택 기법의 성능을 분석하고, 5장에서 본 연구의 결론을 맺는다.

II. IEEE 802.16j 기반 멀티홉 릴레이(MR) 네트워크 및 협력 중계(Cooperative Relay)

2.1. IEEE 802.16j 기반 멀티홉 릴레이(MR) 네트워크

이동 통신망에서는 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)의 저하로 인하여 기지국이 전송하는 신호의 도달 거리가 셀 영역 이내로 제한되며 음영 지역도 발생한다. 또한 기지국으로부터의 신호 수신이 가능하더라도 셀 경계 지역에서는 데이터 전송률이 급격히 감소하게 된다. 이러한 문제를 해결하

기 위해 기지국과 이동 단말 사이에 하나 또는 다수의 중계기를 배치하여 송신 신호를 중계하도록 함으로써 기존 링크보다 SINR을 향상시켜 데이터 전송률을 높여줄 뿐만 아니라 음영 지역을 해소하고 셀 커버리지를 확장하는 방법이 사용될 수 있다. 이와 같이 셀 커버리지의 확장, 음영 지역의 해소, 경로 손실 감소, 데이터 전송률 증가를 위해 고안된 시스템이 IEEE 802.16j MR 시스템이다. IEEE 802.16j MR 시스템은 기지국의 신호가 도달하지 못하는 음영 지역이나 셀 경계 지역, 또는 신호 감쇠 정도가 심하여 데이터 전송률이 낮은 지역에 중계기(RS)를 배치하여 적정 신호 레벨을 확보하거나 SINR를 증가시킴으로써 커버리지 확장 및 전송률 증대 효과를 얻기 위해 표준 규격으로 채택된 기술이다. 기지국(BS)과 이동 단말(MS) 사이에는 하나 이상의 중계기를 거치는 다중홉 전송이 가능하다^[7-11].

IEEE 802.16j MR 시스템 표준 규격은 RS가 자체 프리앰블, 프레임 제어 헤더(Frame Control Header, FCH), MAP 등을 생성하고 전송할 수 있는 non-transparent 모드와 이들 정보를 기지국이 MS에게 직접 전송하는 transparent 모드를 정의하고 있다. Non-transparent 모드 RS는 독립적인 프레임 제어 헤더 및 MAP 전송이 가능하므로 셀 경계 외부의 MS들에게 서비스를 제공하는 셀 확장 목적으로 주로 사용되며, transparent 모드는 기지국 신호 도달 범위 내에서 SINR 증가를 통한 전송률 향상을 목적으로 주로 사용된다. Transparent 모드 RS의 무선 자원 할당과 경로 설정은 기지국이 결정한다. 그림 1은 IEEE 802.16j 표준 문서에 정의된 transparent RS를 포함하는 OFDMA-TDD 방식의 BS 및 RS의 프레임 구조를 보여주고 있다^[2]. 하나의 프레임은 하향 링크(DL) 서브프레임과 상향 링크(UL) 서브프레임으로 나뉘며, DL 서브프레임은 다시 DL 액세스 영역과 DL transparent 영역으로 나뉘고 UL 서브프레임은 다시 UL 액세스 영역과 UL 릴레이 영역으로 나뉜다. DL 액세스 영역은 기지국으로부터 RS 및 MS로 전송되는 데이터 블록들에게 할당되며, RS와 MS는 수신모드에서 기지국이 송신한 데이터 블록들을 수신한다. DL transparent 영역은 RS가 하위 RS 또는 MS에게 전송하는 데이터 블록들에게 할당된다. Transparent 영역에서 기지국은 협력 통신을 위한 데이터를 제외한 일반 데이터를 전송할 수 없으며, 이는 transparent 모드에서 기지국 전송 범위 내에서 동작하는 RS의 신호와 기지국의 신호 간의 상호 간섭을 배제하기 위한 것이

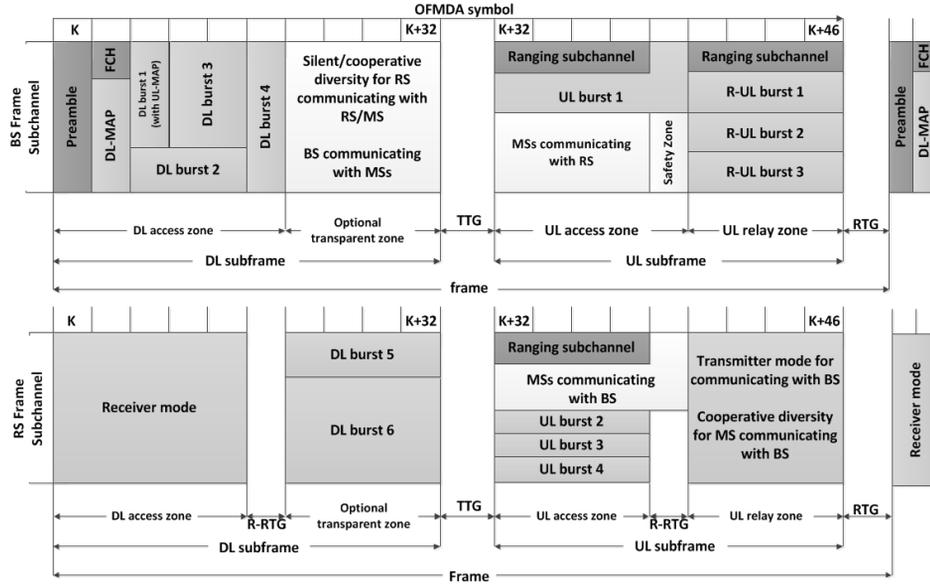


그림 1. IEEE 802.16j 기반 네트워크에서 상향 링크 협력 중계를 고려한 OFDMA 프레임 구조[2]
Fig. 1. OFDMA frame structure in IEEE 802.16j based networks with uplink cooperative relaying[2]

다. UL 액세스 영역에서는 MS만이 BS 또는 RS에 게 송신할 수 있으며, UL 릴레이 영역에서는 RS들이 BS에게 데이터를 전송할 수 있다. OFDMA 프레임에서의 하나의 슬롯은 하나의 OFDMA 심볼과 부채널로 정의되며 데이터 버스트는 연속된 다수의 슬롯들의 그룹이다. 각 슬롯에서 전송되는 데이터의 양은 각 링크의 MCS (Modulation and Coding Scheme) 수준 값에 의해 결정된다^[1-6].

2.2. 협력 중계(Cooperative Relay)

IEEE 802.16j 표준 규격에서는 하향 링크에서 세 가지 방식의 협력 중계 기법을 제시하고 있다. 동일한 신호를 동일한 무선 자원에 대해 동시에 서로 다른 신호원에서 전송하고, 전송된 신호들의 결합을 통하여 다이버시티 이득을 얻는 기법인 협력 신호원 다이버시티(Cooperative Source Diversity, CSD), 서로 다른 신호원에서 시공간 부호화(STC-encoded)를 수행함으로써 다이버시티 이득을 얻는 협력 송신 다이버시티(Cooperative Transmit Diversity, CTD), 협력 신호원 다이버시티와 협력 송신 다이버시티를 복합적으로 적용하는 협력 복합 다이버시티(Cooperative Hybrid Diversity, CHD)를 제시하고 있다^[2,9].

IEEE 802.16j 표준 규격에서는 상향 링크 구간에서의 협력 중계를 명시하고 있지 않지만, 그림 1의 프레임 구조의 UL 릴레이 영역에서 RS가 BS로 데

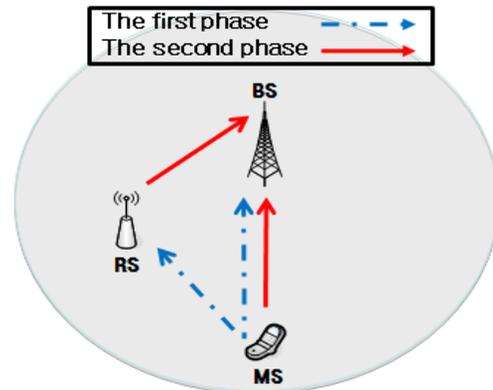


그림 2. IEEE 802.16j 기반 네트워크에서의 상향 링크 협력 중계
Fig. 2. Cooperative relaying for uplink transmission in IEEE 802.16j networks

이터를 전송시 MS가 협력하여 BS로 데이터를 전송하도록 스케줄링 함으로써 상향 링크 구간에서의 협력 중계가 가능하다. 그림 2는 IEEE 802.16j 기반 네트워크에서의 상향 링크 협력 중계의 예로서, 기지국이 MS의 데이터를 직접 또는 RS의 중계를 거쳐 수신할 수 있는 상황에서 RS와 MS가 협력하여 송신한 데이터를 BS가 수신하는 경우를 도식화한 것이다. 즉, 제1송신 단계에서 MS가 전송한 데이터를 BS와 RS가 수신하고, 제2송신 단계에서 RS가 MS로부터 중계된 데이터를 BS로 전송할 때, MS가 동일 데이터에 대한 협력 신호를 BS에게 전송함으로써 공간적으로 분산 배치된 노드들에 의한 다이버시

티 효과를 얻을 수 있게 된다^[8-11].

Ⅲ. 협력 중계를 이용한 IEEE 802.16j 네트워크의 상향 링크를 위한 통합 대역 할당 및 경로 선택 기법

IEEE 802.16j 기반 네트워크에서 그림 1과 같은 OFDMA 프레임 구조를 고려한다. OFDMA 프레임에서 1개의 슬롯을 시간축에서의 1개의 OFDMA 심볼과 주파수축에서의 1개의 OFDMA 부반송파에 의해 이루어진 자원 단위로 정의한다. N 개의 MS와 1개의 BS, $M-1$ 개의 RS를 고려한다. UL 접속 구간에서 1개의 OFDMA 슬롯은 송신 노드 j 와 수신 노드 i 에 의해 사용되는데, 송신 노드 j 는 MS에 해당하고 $j = M+1, \dots, M+N$ 이고, 수신 노드 i 는 BS($i=1$) 또는 RS($i=2, \dots, M$)에 해당한다. UL 중계 구간에서 협력 중계를 사용하지 않을 경우, 송신 노드는 RS i ($i=2, \dots, M$)이고, 수신 노드는 BS($i=1$)이다. UL 중계 구간에서 협력 중계를 사용할 경우, OFDMA 슬롯은 송신 MS j ($j = M+1, \dots, M+N$)와 송신 RS i ($i=2, \dots, M$)와 수신 BS($i=1$)에 의해 사용된다.

UL 접속 구간에서 송신 단말 j 가 수신 중계기 또는 기지국 i 에게 데이터 전송시, 데이터 전송량은 단위 OFDMA 슬롯당 B_{ji} (bits/slot)라고 한다. B_{ji} 는 송신 단말 j 와 수신 중계기 또는 기지국 i 간의 거리 및 채널 환경에 따라 변할 수 있으며, MCS 레벨에 의해 결정된다. 한 OFDMA 프레임내에서는 B_{ji} 는 변하지 않는다고 가정한다. UL 중계 구간에서 협력 중계를 이용하지 않을 경우, 송신 중계기 i 가 수신 기지국에게 데이터 전송시, 데이터 전송량은 단위 OFDMA 슬롯당 B_{i1} (bits/slot)라고 한다. UL 중계 구간에서 협력 중계를 이용할 경우, 송신 중계기 i 가 송신 단말 j 와 협력하여 수신 기지국에게 데이터를 동시에 협력 중계시, 데이터 전송량은 협력 다이버시티(Cooperative Diversity) 효과에 의해 단위 OFDMA 슬롯당 $B_{i1,j}$ (bits/slot)라고 한다. B_{i1} 과 $B_{i1,j}$ 역시 송신 단말 j , 송신 중계기 i 와 수신 기지국의 거리 및 채널 환경에 따라 변할 수 있으며, MCS 레벨에 의해 결정되는데, 같은 OFDMA 프레임내에서는 B_{i1} 과 $B_{i1,j}$ 는 변하지 않는다고 가정한다.

IEEE 802.16j 기반 네트워크에서 상향 링크에 대해 각 MS j 가 요구하는 평균 데이터 전송률을

R_j (bits/sec) 라고 한다면, UL 접속 구간에서 R_j 를 보장하기 위해 송신 단말 j 가 수신 중계기 또는 기지국 i 에게 데이터 전송시 필요한 한 프레임내 OFDMA 슬롯수를 s_{ji} 라고 하면, $s_{ji} = \frac{R_j T}{B_{ji}}$ 이다.

여기서 T 는 프레임 주기이다. UL 중계 구간에서 협력 중계를 사용하지 않을 경우, R_j 를 보장하기 위해 RS i 가 BS에게 데이터 전송시 필요한 한 프레임내 OFDMA 슬롯수를 s_{i1} 라고 하면,

$$s_{i1} = \sum_{j=M+1}^{M+N} \frac{s_{ji} B_{ji} x_{ji}}{B_{i1}}$$

이다. 이는 UL 접속 구간에서 각 MS j 들로부터 RS i 가 수신한 데이터를 UL 중계 구간에서 RS i 가 BS로 중계하기 때문이다. 여기서, x_{ji} 는 MS j 가 중계 경로(relay path)를 이용하여 RS i 를 거치면 1, 아니면 0인 2진 변수(binary variable)이다. 중계기를 거치지 않고, 직접 경로(direct path)를 이용하여 BS에게 데이터 전송시, $x_{j1} = 1$ 이 되고, 아니면 $x_{j1} = 0$ 이 된다. UL 중계 구간에서 협력 중계를 사용할 경우는, R_j 를 보장하기 위해 RS i 가 MS j 와 협력하여 BS ($i=1$)에게 데이터를 협력 중계시 필요한 한 프레임내

OFDMA 슬롯수를 $s_{i1,j}$ 라고 하면, $s_{i1,j} = \frac{s_{ji} B_{ji}}{B_{i1,j}}$ 이다.

IEEE 802.16j 기반 네트워크에서 협력 중계를 이용하여 상향 링크 처리율을 최대화하는 문제는, UL 접속 구간에서 사용할 수 있는 OFDMA 슬롯수를 w_{access} , UL 중계 구간에서 사용할 수 있는 OFDMA 슬롯수를 w_{relay} 라고 할때, 식 (1)-(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\max_{x_{jk}} \sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{k=1}^{M+1} x_{jk} R_{jk} \tag{1}$$

s.t.

$$x_{jk} \in \{0,1\}, j = M+1, \dots, M+N, k = 1, \dots, M+1 \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^{M+1} x_{jk} = 1, j = M+1, \dots, M+N \tag{3}$$

$$\sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{i=1}^M s_{ji} x_{ji} \leq w_{access} \tag{4}$$

$$\sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{i=2}^M \frac{s_{ji} B_{ji}}{B_{i1,j}} x_{ji} \leq w_{relay} \tag{5}$$

식 (1)은 상향 링크에서 성공적으로 전송되는 총 데이터 전송률을 최대화 하는 문제를 나타낸 식이다.

여기서 R_{jk} 는 각 MS j 가 요구하는 평균 데이터 전송률을 R_j 라고 할때, x_{jk} 에 의해 경로 $k=1, \dots, M$ 로 결정되면, $R_{jk} = R_j, k=1, \dots, M$ 이 되고, 경로 $k=M+1$ 로 결정되는 경우에는, $R_{jk} = 0, k=M+1$ 이 된다. 본 논문에서는 relay path 사용시 RS i 와 MS j 와의 협력 중계를 고려하지만, 그 외에는 다중 경로를 동시에 사용하는 경우를 고려하지 않는다. 따라서, 식 (2), (3)과 같이, 각 MS j 는 BS로의 데이터 전송을 위해, direct path 또는 relay path 중 한 개의 경로만을 사용하게 된다. 각 MS j 가 direct path를 이용하여 BS에게 직접 전송시 $k=1$ 이고, relay path를 이용하여 RS i 를 거치면 $k=i$ 이다. 각 MS j 별로 $k=M+1$ 의 경우는 MS j 가 자원 할당을 받지 못한 경우를 표현하기 위해 보조 경로로 도입한다. 식 (4)는 UL 접속 구간에서 MS j 가 RS i 또는 BS로 데이터 전송시 사용하는 총 OFDMA 슬롯수는 UL 접속 구간에 할당된 OFDMA 슬롯수를 초과할 수 없음을 나타낸다. 식 (5)는 UL 중계 구간에서 RS i 가 MS j 와 협력 통신해서 BS로 데이터 전송시 사용하는 총 OFDMA 슬롯수는 UL 중계 구간에 할당된 OFDMA 슬롯수를 초과할 수 없음을 나타낸다.

IEEE 802.16j 기반 네트워크에서 협력 중계를 이용하지 않는 경우의 상향 링크 처리율을 최대화하는 문제는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 협력 다이버시티를 통한 협력 중계를 UL 중계 구간에서 사용하므로, UL 접속 구간에 해당하는 식은 협력 중계를 사용하는 경우의 식과 동일하게 나타내어진다. 협력 중계를 이용하는 경우와 비교시, 협력 중계를 이용하지 않는 경우의 상향 링크 처리율 최대화 문제는 식 (5)가 식 (6)으로 바뀌게 된다.

$$\begin{aligned}
 & \max_{x_{jk}} \sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{k=1}^{M+1} x_{jk} R_{jk} \\
 & \text{s.t} \\
 & x_{jk} \in \{0,1\}, j = M+1, \dots, M+N, k = 1, \dots, M+1 \\
 & \sum_{k=1}^{M+1} x_{jk} = 1, j = M+1, \dots, M+N \\
 & \sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{i=1}^M s_{ji} x_{ji} \leq w_{access} \\
 & \sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{i=2}^M \frac{s_{ji} B_{ji}}{B_{i1}} x_{ji} \leq w_{relay}
 \end{aligned} \tag{6}$$

협력 중계를 이용하는 경우의 식 (1)-(5)의 최적화

문제와, 협력 중계를 이용하지 않는 경우의 식 (1)-(4), (6)의 최적화 문제는, 각각 NP-hard 문제이다. 또한, 식 (4)-(6)의 제약식들에서 RS i 간에 의존성을 갖게 된다. 식 (4)-(6)에서 RS i 간의 의존성을 제거하여, 협력 중계를 이용하는 경우와 협력 중계를 이용하지 않는 경우의 최적화 문제를 각각 다중 차원 다중 선택 배낭 문제(MMKP)로 변환할 수 있다. 변환하는 MMKP 역시 NP-hard 문제이지만, MMKP의 근사해를 다항식 시간 (polynomial time)에 구하는 heuristic 알고리즘들이 제안되어왔다 [7,18,21,22]. MMKP로의 변환을 위해, 먼저 식 (4)을 다음과 같이 식 (7)과 식 (8)로 변환한다.

$$\sum_{j=M+1}^{M+N} s_{j1} x_{j1} \leq w_{access} - \sum_{i=2}^M k_i \tag{7}$$

$$\sum_{j=M+1}^{M+N} s_{ji} x_{ji} \leq k_i, i = 2, \dots, M \tag{8}$$

여기서 k_1 은 UL 접속 구간에서 MS j 가 direct path를 이용해서 BS로 직접 데이터 전송시 할당되는 최대 OFDMA 슬롯수이다. k_1 은 전송되는 데이터의 양에 따라 설정 가능하다. 식 (7)은 UL 접속 구간에서 direct path를 이용하는 MS j 들에 대한 제약식이고, 식 (8)은 UL 접속 구간에서 RS i 를 거쳐서 relay path를 이용하는 MS j 들에 대한 제약식이다. MMKP로의 변환을 위해 식 (5)도 다음과 같이 식 (9), (10)으로 변환한다.

$$\sum_{j=M+1}^{M+N} \frac{s_{j2} B_{j2}}{B_{21,j}} x_{j2} \leq w_{relay} - \sum_{i=3}^M k_i' \tag{9}$$

$$\sum_{j=M+1}^{M+N} \frac{s_{ji} B_{ji}}{B_{i1,j}} x_{ji} \leq k_i', i = 3, \dots, M \tag{10}$$

여기서 k_i' 는 UL 중계 구간에서 각 RS i 가 MS j 와 함께 협력 중계로 BS에게 데이터를 전송하기 위해 할당되는 최대 OFDMA 슬롯수이다. k_i' 는 전송되는 데이터의 양에 따라 설정 가능하다. 식 (9)는 UL 중계 구간에서 RS $i=3, \dots, M$ 에 할당된 k_i' OFDMA 슬롯들을 제외한 나머지 슬롯들을 RS $i=2$ 에 할당할 수 있음을 나타낸다. 식 (10)은 UL 중계 구간에서 각 RS $i=3, \dots, M$ 가 사용할 OFDMA 슬롯수는 각 중계기에 할당된 OFDMA 슬롯수 k_i' 를 초과할 수 없음을 나타낸다. 협력 중계

를 사용하지 않는 경우는, 식 (6)을 RS i 간의 의존성을 제거하여 식 (11)과 식 (12)로 변환할 수 있다.

$$\sum_{j=M+1}^{M+N} \frac{s_{j2}B_{j2}}{B_{21}}x_{j2} \leq w_{relay} - \sum_{i=3}^M k_i' \quad (11)$$

$$\sum_{j=M+1}^{M+N} \frac{s_{ji}B_{ji}}{B_{i1}}x_{ji} \leq k_i', \quad i=3, \dots, M \quad (12)$$

UL 접속 구간에서는, 식 (7)과 식 (8)을 통합하여 식 (13)로 나타낼 수 있다. 여기서, $w_{ji} = s_{ji}$, $i=1, \dots, M$, $j=N+1, \dots, N+M$ 이고, c_i , $i=1, \dots, M$ 는 식 (7), (8)의 우항들과 같다.

$$\sum_{j=M+1}^{M+N} w_{ji}x_{ji} \leq c_i, \quad i=1, \dots, M \quad (13)$$

UL 중계 구간에서 협력 중계를 사용하는 경우는, 식 (9)과 식 (10)을 통합하여 식 (14)로 나타낼 수 있다. 협력 중계를 사용하지 않는 경우도, 식 (11)와 식 (12)을 통합하여 식 (14)로 나타낼 수 있다. 여기서, 협력 중계를 사용하는 경우는, $w_{ji}' = \frac{s_{ji}B_{ji}}{B_{i1,j}}$, $i=2, \dots, M$, $j=N+1, \dots, N+M$ 이고, c_i' , $i=2, \dots, M$ 는 식 (9), (10)의 우항들과 같다. 협력 중계를 사용하지 않는 경우는, $w_{ji}' = \frac{s_{ji}B_{ji}}{B_{i1}}$, $i=2, \dots, M$, $j=N+1, \dots, N+M$ 이고, c_i' , $i=2, \dots, M$ 는 식 (11), (12)의 우항들과 같다.

$$\sum_{j=M+1}^{M+N} w_{ji}'x_{ji} \leq c_i', \quad i=2, \dots, M \quad (14)$$

RS i 간의 의존성을 제거한 식 (13)과 식 (14)로부터, 협력 중계를 이용하는 경우와 협력 중계를 이용하지 않는 경우의 최적화 문제는 각각 MMKP로 유도될 수 있다. 여기서 유도되는 MMKP는 $2M-1$ 차원의 배낭(knapsack) 문제로, 각 차원은 C_i , $i=1, \dots, 2M-1$ 크기의 배낭을 갖게 된다. 유도되는 MMKP의 그룹의 개수는 MS j 의 개수인 N 개이다. 각 그룹은 $M+1$ 개의 아이템을 갖게 되는데, 여기서 아이템은 각 MS j 가 이용하는 경로 $k=1, \dots, M+1$ 에 해당한다.

IEEE 802.16j 기반 네트워크에서 협력 중계를 이용하여 상향 링크 처리율을 최대화하는 식 (1)-(5)의 최적화 문제는 다음과 같이 식

(15)-(18)의 MMKP로 변환된다.

$$\max_{x_{jk}} \sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{k=1}^{M+1} x_{jk}R_{jk} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{k=1}^{M+1} W_{ijk}x_{jk} \leq C_i, \quad i=1, \dots, 2M-1 \quad (16)$$

$$x_{jk} \in \{0, 1\}, \quad j=M+1, \dots, M+N, \quad k=1, \dots, M+1 \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^{M+1} x_{jk} = 1, \quad j=M+1, \dots, M+N \quad (18)$$

여기서 C_i , $i=1, \dots, M$ 는 식 (7), (8)의 우항들과 같고, C_i , $i=M+1, \dots, 2M-1$ 는 협력 중계를 사용하는 경우인 식 (9), (10)의 우항들과 같다. W_{ijk} 는 식 (19)와 같이 유도된다.

$$W_{ijk} = \begin{cases} w_{jk} = s_{jk}, & i=k, \\ & i=1, \dots, M, \\ & j=M+1, \dots, M+N, \\ & k=1, \dots, M \\ w_{jk}' = \frac{s_{jk}B_{jk}}{B_{k1,j}}, & i=k+M-1, \\ & i=M+1, \dots, 2M-1, \\ & j=M+1, \dots, M+N, \\ & k=2, \dots, M \\ 0, & o.w. \end{cases} \quad (19)$$

IEEE 802.16j 기반 네트워크에서 협력 중계를 사용하지 않는 경우, 상향 링크 처리율을 최대화하는 식 (1)-(4), (6)의 최적화 문제도 위의 식 (15)-(18)의 MMKP로 변환되는데, 이때의 C_i , $i=1, \dots, 2M-1$ 와 W_{ijk} 는 협력 중계를 사용하는 경우의 식들과 다르다. 협력 중계를 사용하지 않는 경우, C_i , $i=1, \dots, M$ 는 식 (7), (8)의 우항들과 같지만, C_i , $i=M+1, \dots, 2M-1$ 는 협력 중계를 사용하지 않는 경우인 식 (11), (12)의 우항들과 같고, W_{ijk} 는 식 (20)과 같이 유도된다.

$$W_{ijk} = \begin{cases} w_{jk} = s_{jk}, & i=k, \\ & i=1, \dots, M, \\ & j=M+1, \dots, M+N, \\ & k=1, \dots, M \\ w_{jk}' = \frac{s_{jk}B_{jk}}{B_{k1}}, & i=k+M-1, \\ & i=M+1, \dots, 2M-1, \\ & j=M+1, \dots, M+N, \\ & k=2, \dots, M \\ 0, & o.w. \end{cases} \quad (20)$$

식 (15)의 목적 함수인 상향 링크 총 처리율을 $\sum_{j=M+1}^{M+N} \sum_{k=1}^{M+1} x_{jk} R_{jk}$ 을 최대화하는 x_{jk} 들은 협력 중계를 사용하는 경우는 식 (16)-(19)의 제약식들을 만족하는 x_{jk} 들이고, 협력 중계를 사용하지 않는 경우는 식 (16)-(18), (20)의 제약식들을 만족하는 x_{jk} 들이다. x_{jk} 는 각각의 MS j 가 어떤 경로 k 를 거쳐서 상향 링크로 데이터를 전송하는지를 알려주는 변수로, RS k 를 거치는 relay path를 이용하면 $x_{jk}=1$, 아니면 $x_{jk}=0$ 이고, RS를 거치지 않고 direct path를 이용하여 BS에게 데이터를 전송하면 $x_{j1}=1$, 아니면 $x_{j1}=0$ 이 된다. 식 (15)에서 x_{jk} 에 의해 경로 $k=1, \dots, M$ 로 결정되면, $R_{jk}=R_j$, $k=1, \dots, M$ 이고, 경로 $k=M+1$ 로 결정되면, $R_{jk}=0$, $k=M+1$ 이다. 식 (15)-(19)로부터 상향 링크에서 협력 중계를 사용하는 경우 총 처리율을 최대화하는 각 MS j 별 경로 k 와 최대 처리율을 구할 수 있다. 식 (16)-(19)의 제약식을 만족하면, UL 접속 구간에서 MS j 가 RS k 또는 BS로 데이터 전송시 사용하는 총 OFDMA 슬롯수는 UL 접속 구간에 할당된 OFDMA 슬롯수인 w_{access} 를 초과하지 않게 되고, UL 중계 구간에서 RS k 가 MS j 와 협력 통신해서 BS로 데이터 전송시 사용하는 총 OFDMA 슬롯수는 UL 중계 구간에 할당된 OFDMA 슬롯수인 w_{relay} 를 초과하지 않게 된다. 식 (15)-(18), (20)으로부터는 상향 링크에서 협력 중계를 사용하지 않는 경우, UL 접속 구간과 UL 중계 구간에서 사용하는 총 OFDMA 슬롯수가 각각 w_{access} 와 w_{relay} 를 넘지 않는 범위에서, 상향 링크 총 처리율을 최대화하는 각 MS j 별 경로 k 와 협력 중계를 사용하지 않는 경우의 최대 처리율을 구할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

제안하는 협력 중계를 이용한 MMKP 기반 기법(협력 MMKP 기법)과 협력 중계를 이용하지 않은 MMKP 기반 기법(비협력 MMKP 기법)의 성능을 평가한다. 또한, 성능 비교를 위해 협력 중계 이용 시 링크 품질(link quality) 기반 기법(협력 LQB 기법), 협력 중계를 이용하지 않는 LQB 기법(비협력 LQB 기법)의 성능을 비교 평가한다. 이들 각 기법들은 시뮬레이션 시나리오에서 설정 가능한 모든 대

역 할당과 경로 집합에 대해 소모적 검색(exhaustive search)을 이용하여 각 기법 사용 시 전체 시스템에서의 상향 링크 최대 처리율을 계산한다. 3장에서 언급한 바와 같이 MMKP 기반 기법은 NP-hard 문제이긴 하나, MMKP의 근사해를 다항식 시간에 구하는 heuristic 알고리즘들이 제안되어왔다^[7,18,21,22]. 본 논문에서 제안하는 MMKP 기반 기법들인 협력 MMKP 기법과 비협력 MMKP 기법에 heuristic 알고리즘들을 적용하여 근사해를 구할 수 있는데, 이를 위해서는 제안하는 MMKP 기반 기법들에 적합한 heuristic 알고리즘들을 제안하고 적용하는 추후 연구가 필요하다.

링크 품질 기반 기법인 비협력 LQB 기법은 $\max\{B_{j1}, \max_i\{\min(B_{ji}, B_{i1})\}\}$ 를 고려하며, 협력 LQB 기법은 $\max\{B_{j1}, \max_i\{\min(B_{ji}, B_{i1,j})\}\}$ 을 고려하여, 각 MS j 에서 BS로의 전송 속도를 최대화 할 수 있는 경로를 선택 후 조합 가능한 모든 대역 할당 집합에 대해 소모적 검색을 사용하여 전체 시스템에서의 상향 링크 최대 처리율을 구한다^[7]. 링크 품질 기반 기법들인 비협력 LQB 기법과 협력 LQB 기법은 UL 접속 구간에서 사용할 수 있는 OFDMA 슬롯수인 w_{access} 와 UL 중계 구간에서 사용할 수 있는 OFDMA 슬롯수인 w_{relay} 를 고려하지 않을 시에는, 협력 중계를 이용하지 않을 경우와 협력 중계를 이용하는 각 경우에 전체 시스템의 상향 링크 처리율을 최대화하는 기법들이므로, 이들 링크 품질 기반 기법들과 MMKP 기반 기법들을 비교 분석한다.

그림 3과 같이 OPNET 기반 시뮬레이션에서 11개의 MS j 와 3개의 RS i 로 구성된 시나리오를 고려하였다. $MS_5 \sim MS_{15}$ 는 BS와의 거리가 약 365m이고, RS_2 와 $MS_5 \sim MS_9$ 의 각각의 거리는 약 125m, RS_3 과 $MS_{10} \sim MS_{12}$ 의 각각의 거리는 약 125m, RS_4 와 $MS_{13} \sim MS_{15}$ 의 각각의 거리는 약 125m이다. RS_2, RS_3, RS_4 와 BS의 거리는 약 245m이다. AMC(Adaptive Modulation and Coding)에 의해 MS j 에서 RS i 로의 통신에서는 MCS 레벨 64QAM 1/2을 사용하며, MS j 에서 BS로의 통신에서는 MCS 레벨 16QAM 1/2을 사용한다. RS i 에서 BS로의 통신에서는 협력 통신을 사용하지 않을 경우 MCS 레벨 64QAM 2/3, 협력 통신을 사용할 경우 MCS 레벨 64QAM 5/6를 사용한다. OPNET 기반 시뮬레이터에서는 Erceg 경로

감쇠 모델(path loss model)이 제공되고 3 가지 지형으로 구분된다. 지형 A(terrain A)는 언덕과 나무가 많은 산악 지형이고, 지형 C는 평평한 지형이고, 지형 B는 그 중간으로 나무가 비교적 적은 지형이다. 본 논문에서는 LOS 확보가 쉽지 않은 산악 지형이 보편적인 군 전술 통신 환경에 적합한 언덕과 나무가 많은 산악 지형에서의 시뮬레이션을 위해 OPNET 기반 시뮬레이터에서 지형 A를 사용한다. 지형 A는 경로 감쇠 지수(path loss exponent)가 4.6으로 상당히 경로 감쇠가 심한 지형이다. 따라서 지형 A에서는 신호 도달 거리가 비교적 짧으므로 작전 반경이 비교적 작은 부대 전술 통신에 적합할 수 있다. 작전 반경이 보다 큰 부대 전술 통신의 시뮬레이션을 위해서는 지형 C 환경에서 시뮬레이션 할 수 있다^{19,20}.

표 1은 시뮬레이션 파라미터들을 나타낸다. N_S 는 프레임당OFDMA 심볼수이며, $N_{S,DL}$ 는 DL 구간에서의 심볼수, $N_{S,UL}$ 는 UL 구간에서의 심볼수, $N_{dd,UL}$ 는 UL 구간에서 사용되는 데이터 부반송파의 수, R_{access} 는 UL 구간에서의 접속 구간의 비율, R_{relay} 은 UL 구간에서의 중계 구간의 비율이고, R_j 는 각각의 MS j 가 요구하는 평균 데이터 전송률이다. 여기서 $N_S = N_{S,DL} + N_{S,UL}$ 이며, $R_{access} + R_{relay} = 1$ 이다. RS의 수는 $N_{RS} = 3$, MS의 수는 $N_{MS} = 11$ 이며, 각 MS j 는 $R_j = 0.5$ (Mbps)의 통신을 요구하는 시나리오이다. N_{RS2} 는 RS_2 를 사용할 수 있는 MS $j = 5, 6, 7, 8, 9$ 이어서 $N_{RS2} = 5$ 이고, N_{RS3} 은 RS_3 을 사용할 수 있는 MS $j = 10, 11, 12$ 이어서 $N_{RS3} = 3$ 이고, N_{RS4} 는 RS_4 를 사용할 수 있는 MS $j = 13, 14, 15$ 이어서 $N_{RS4} = 3$ 이다^{2,19,20}.

표 2는 MS j 와 RS i 별 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다. 프레임당 UL 구간에서 사용 가능한 슬롯수는 $N_{dd,UL} \cdot N_{S,UL} = 15680$, 프레임당 UL 접속 구간에서 사용 가능한 슬롯수는 $w_{access} = N_{dd,UL} \cdot N_{S,UL} \cdot R_{access} = 12320$, 프레임당 UL 중계 구간에서 사용 가능한 슬롯수는 $w_{relay} = N_{dd,UL} \cdot N_{S,UL} \cdot R_{relay} = 3360$ 이다. 각 MS j 가 선택한 경로에서 R_j 를 보장하기 위해 필요한 슬롯의 수는 direct path 선택시는 UL 접속 구간에서 $s_{j1} = 1250$ 이 필요하다. 반면, relay path 선택시는 UL 접속 구간에서 $s_{j2} = 833$, $s_{j3} = 833$, $s_{j4} = 833$ 이 필요하고, UL

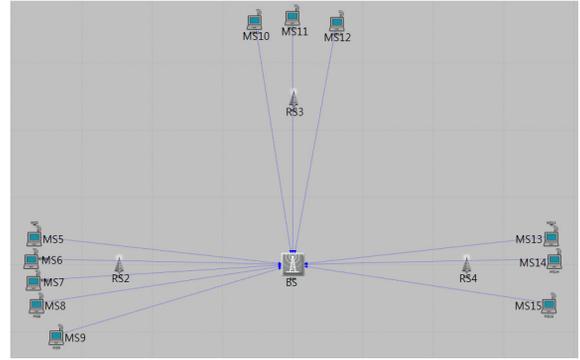


그림 3. OPNET 기반 시뮬레이션 시나리오
Fig. 3. OPNET-based simulation scenario

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Parameters	Values
Frame duration (T_F)	5 msec
Number of OFDMA symbols per frame (N_S)	47
Ratio of uplink access zone to uplink subframe (R_{access})	11/14
Ratio of uplink relay zone to uplink subframe (R_{relay})	3/14
Number of symbols per frame in uplink ($N_{S,UL}$)	14
Number of symbols per frame in downlink ($N_{S,DL}$)	33
Number of RSs (N_{RS})	3
Number of MSs (N_{MS})	11
Number of slots in uplink access zone (w_{access})	12320 slots
Number of slots in uplink relay zone (w_{relay})	3360 slots
Number of MSs covered by RS_2 (N_{RS2})	5
Number of MSs covered by RS_3 (N_{RS3})	3
Number of MSs covered by RS_4 (N_{RS4})	3
Number of uplink data subcarriers ($N_{dd,UL}$)	1120
Required average data rate for MS j ($R_j, \forall j$)	0.5 Mbps
Antenna gain of MS	-1 dBi
Maximum transmission power of MS	0.015 W
Antenna gain of RS	3 dBi
Maximum transmission power of RS	0.017 W
Antenna gain of BS	14 dBi

중계 구간에서 비협력 MMKP 기법은 $s_{21}/5 = 625$, $s_{31}/3 = 625$, $s_{41}/3 = 625$, 협력 MMKP 기법은 $s_{21,j} = 500$, $s_{31,j} = 500$, $s_{41,j} = 500$ 이 필요하다^[2,19,20].

비협력 LQB 기법을 사용하는 경우, $B_{j1} = 2$, $\max_i(\min(B_{ji}, B_{i1})) = \max(\min(3,4)) = 3$ 이 기 때문에 11개의 모든 MS j 들은 relay path를 선택 하게 되며, $1(s_{21}/5) + 2(s_{31}/3) + 2(s_{41}/3) (= 3125) < w_{relay} (= 3360) < 2(s_{21}/5) + 2(s_{31}/3) 2(s_{41}/3) (= 3750)$ 에 의해 5개의 MS j 가 통신이 가능하고, 6개의 MS j 가 통신이 거절되어, 비협력 LQB 기법의 전체 시스템 처리율은 $5R_j = 2.5$ Mbps가 얻어진다. 협력 LQB 기법을 사용하는 경우에, $B_{j1} = 2$, $\max_i(\min(B_{ji}, B_{i1,j})) = \max(\min(3,5)) = 3$ 이 기 때문에 비협력 LQB 기법과 같이 모든 MS j 들은 relay path를 선택하게 된다. 이때 RS i 와 BS의 통신의 MCS 레벨은 64QAM 2/3에서 64QAM 5/6로 향상되어, $2s_{21,j} + 2s_{31,j} + 2s_{41,j} (= 3000) < w_{relay} (= 3360) < 3s_{21,j} + 2s_{31,j} + 2s_{41,j} (= 3500)$ 에 의해 6개의 MS j 가 통신이 가능하고, 5개의 MS j 가 통신이 거절되어, 협력 LQB 기법의 전체 시스템 처리율은 $6R_j = 3.0$ Mbps가 얻어진다.

비협력 MMKP 기법을 사용하는 경우, $k_1 = 4620$ 일 때, 식 (8)에 의해 $k_2 \sim k_M$ 값은 $(w_{access} - k_1) / N_{RS} = 2566$ 이다. 식 (12)에 의해 $\sum_{j=M+1}^{M+N} \frac{s_{ji} B_{ji}}{B_{i1}} x_{ji} \leq k'_i$, $i = 3, 4$ 이며, RS_3 과의 통신이 가능한 3개의 단말이 모두 같은 R_j 값을 가지므로 $k'_3 = 3 \cdot (1250 \cdot 2/4) = 1875$ 가 필요하고, RS_4 도 RS_3 과 같이 모두 같은 R_j 값을 요구하는 단말이 3개이기 때문에 $k'_4 = 3 \cdot (1250 \cdot 2/4) = 1875$ 가 필요하나 $k'_3 + k'_4 = 3750$ 이 $w_{relay} (= 3360)$ 를 초과하기 때문에 $k'_4 = 2 \cdot (1250 \cdot 2/4) = 1250$ 이 된다. 식 (11)에 의해 $k'_2 = w_{relay} - (k'_3 + k'_4) = 3360 - (1875 + 1250) = 235$ 로 결정된다. $3s_{j1} (= 3750) < k_1 (= 4620) < 4s_{j1} (= 5000)$ 에 의해 3개의 MS j 가 direct path를 이용하여 BS와 통신하며, $N_{RS} \cdot s_{31}/3 (= 1875) \leq k'_3 (= 1875)$ 에 의해 RS_3 에 3개의 MS j 가 통신 가능하고, $(N_{RS} - 1) \cdot s_{41}/3 (= 1250) \leq k'_4 (= 1250)$ 에 의해 RS_4 에 2개의 MS

j 가 통신 가능하고, $(N_{RS} - 5) \cdot s_{21}/5 (= 0) \leq k'_2 (= 235)$ 에 의해 RS_2 에는 통신 가능한 MS j 가 존재하지 않아, relay path를 이용하는 MS j 는 5개이다. 결국 3개의 MS j 가 통신이 거절되어 통신 가능한 MS j 의 수는 총 8개로, 비협력 MMKP 기법

표 2. MS j 와 RS i 별 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters for MS j and RS i

Parameters	Values
$B_{j1}, \forall j$	2 bits/slot (16QAM 1/2)
$s_{j1} = (R_j/B_{j1}) \cdot T_F, \forall j$	1250 slots/frame (16QAM 1/2)
$B_{j2}, j = 5, 6, 7, 8, 9$	3 bits/slot (64QAM 1/2)
$s_{j2} = (R_j/B_{j2}) \cdot T_F, j = 5, 6, 7, 8, 9$	833 slots/frame (64QAM 1/2)
$B_{j3}, j = 10, 11, 12$	3 bits/slot (64QAM 1/2)
$s_{j3} = (R_j/B_{j3}) \cdot T_F, j = 10, 11, 12$	833 slots/frame (64QAM 1/2)
$B_{j4}, j = 13, 14, 15$	3 bits/slot (64QAM 1/2)
$s_{j3} = (R_j/B_{j3}) \cdot T_F, j = 13, 14, 15$	833 slots/frame (64QAM 1/2)
$B_{21}, j = 5, 6, 7, 8, 9$	4 bits/slot (64QAM 2/3)
$s_{21} = \sum_{j=5}^9 (s_{j2} \cdot B_{j2}) / B_{21}$	3125 slots/frame (64QAM 2/3)
$B_{21,j}, j = 5, 6, 7, 8, 9$	5 bits/slot (64QAM 5/6)
$s_{21,j} = (s_{j2} \cdot B_{j2}) / B_{21,j}, j = 5, 6, 7, 8, 9$	500 slots/frame (64QAM 5/6)
$B_{31}, j = 10, 11, 12$	4 bits/slot (64QAM 2/3)
$s_{31} = \sum_{j=10}^{12} (s_{j3} \cdot B_{j3}) / B_{31}$	1875 slots/frame (64QAM 2/3)
$B_{31,j}, j = 10, 11, 12$	5 bits/slot (64QAM 5/6)
$s_{31,j} = (s_{j3} \cdot B_{j3}) / B_{31,j}, j = 10, 11, 12$	500 slots/frame (64QAM 5/6)
$B_{41}, j = 13, 14, 15$	4 bits/slot (64QAM 2/3)
$s_{41} = \sum_{j=13}^{15} (s_{j4} \cdot B_{j4}) / B_{41}$	1875 slots/frame (64QAM 2/3)
$B_{41,j}, j = 13, 14, 15$	5 bits/slot (64QAM 5/6)
$s_{41,j} = (s_{j4} \cdot B_{j4}) / B_{41,j}, j = 13, 14, 15$	500 slots/frame (64QAM 5/6)

의 전체 시스템 처리율은 $8R_j = 4.0$ Mbps가 얻어진다.

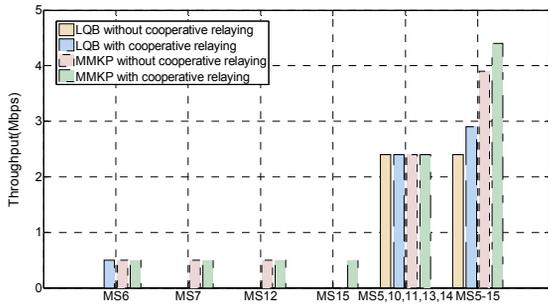


그림 4. 비협력 LQB 기법, 협력 LQB 기법, 비협력 MMKP 기법, 협력 MMKP 기법에 따른 MS별 수율
Fig. 4. Throughput of MSs when MMKP and LQB schemes are used with or without cooperative relaying

협력 MMKP 기법을 사용하는 경우, RS i 에서 BS로의 통신의 MCS 레벨은 64QAM 2/3에서 64QAM 5/6로 향상된다. $k_1 = 4620$ 일 경우, 식 (8)에 의해 $k_2 \sim k_M$ 값은 $(w_{access} - k_1) / N_{RS} = 2566$ 이다. 식 (10)에 의해 $\sum_{j=M+1}^{M+N} \frac{s_{ji} B_{ji}}{B_{i1,j}} x_{ji} \leq k'_i$, $i = 3, 4$ 이며, RS_3 과 RS_4 는 각각 통신이 가능한 3개의 단말이 모두 같은 R_j 값을 가지므로 $k'_3 = k'_4 = 3 \cdot (1250 \cdot 2/5) = 1500$ 이 필요하고, 식 (9)에 의해 $k'_2 = w_{relay} - (k'_3 + k'_4) = 3360 - (1500 + 1500) = 360$ 으로 결정된다. $3s_{j1} (= 3750) < k_1 (= 4620) < 4s_{j1} (= 5000)$ 에 의해 3개의 MS j 가 direct path를 이용하여 BS와 통신하며, $N_{RS} \cdot s_{31,j} (= 1500) \leq k'_3 (= 1500)$ 에 의해 RS_3 에 3개의 MS j 가 통신 가능하고, $N_{RS} \cdot s_{41,j} (= 1500) \leq k'_4 (= 1500)$ 에 의해 RS_4 에 3개의 MS j 가 통신 가능하고, $(N_{RS} - 5) \cdot s_{21,j} (= 0) \leq k'_2 (= 360)$ 에 의해 RS_2 에는 통신 가능한 MS j 가 존재하지 않아, relay path를 이용하는 MS j 는 6개이다. 결국 2개의 MS j 가 통신이 거절되어 통신 가능한 MS j 의 수는 총 9개로, 비협력 MMKP 기법의 전체 시스템 처리율은 $9R_j = 4.5$ Mbps가 얻어진다.

그림 4는 그림 3의 OPNET 기반 시뮬레이션 시나리오에서 비협력 LQB 기법, 협력 LQB 기법, 비협력 MMKP 기법, 협력 MMKP 기법의 단말 MS j 별 수율(throughput)을 나타낸다. 여기서 throughput은 OPNET 기반 시뮬레이션에서 control plane과 data plane의 오버헤드가 고려된 시스템 처리율이다. 비협력 LQB 기법은 MS j 에서 BS로의 통신 경로보다 MS j 에서 RS i 로의 통신 경로가 더 높은 MCS 레벨을 사용하게 되어, RS i 로의 relay

path를 선택하여, 모든 MS j 들은 relay path로 통신하게 된다. 이때 UL 중계 구간의 허용 가능한 슬롯수의 제약으로 인해, $MS_6, MS_7, MS_8, MS_9, MS_{12}, MS_{15}$ 의 통신이 거절되고, 나머지 5개의 MS j 들만 통신이 가능해진다. 따라서 비협력 LQB 기법의 전체 시스템 처리율은 오버헤드를 고려하지 않을 경우 $5R_j = 2.5$ Mbps이고, OPNET 기반 시뮬레이션에서 control plane과 data plane의 오버헤드를 고려할 경우의 전체 시스템 throughput은 약 2.4 Mbps가 얻어진다. 협력 LQB 기법의 경우 RS i 에서 BS로의 MCS 레벨이 64QAM 2/3에서 64QAM 5/6으로 향상되어 비협력 LQB 기법에서 통신이 거절되었던 MS_6 의 통신이 가능하여, 협력 LQB 기법의 전체 시스템 처리율은 오버헤드를 고려하지 않을 경우 $6R_j = 3.0$ Mbps이고, OPNET 기반 시뮬레이션에서 오버헤드 고려시 전체 시스템 throughput은 약 2.9 Mbps가 얻어진다.

비협력 MMKP 기법은, $MS_{10}, MS_{11}, MS_{12}$ 는 RS_3, MS_{13}, MS_{14} 는 RS_4 가 중계하는 relay path로 설정되고, MS_5, MS_6, MS_7 이 direct path로 설정되어, 데이터 전송량이 RS_3, RS_4 와 BS로 분산되어 MS_8, MS_9, MS_{15} 가 통신이 거절되고, 나머지 8개의 MS j 들은 통신이 가능해진다. 이 경우 전체 시스템 처리율은 $8R_j = 4.0$ Mbps이고, OPNET 기반 시뮬레이션에서 오버헤드 고려시의 전체 시스템 throughput은 약 3.9 Mbps가 얻어진다. 협력 MMKP 기법은 협력 중계를 통해 RS i 에서 BS로의 MCS 레벨이 64QAM 2/3에서 64QAM 5/6으로 향상되어, 비협력 MMKP 기법에서 통신이 거절되었던 MS_{15} 의 통신이 가능해진다. 그 결과, 전체 시스템에서 9개의 MS j 들은 통신이 가능해진다. 이 경우 전체 시스템 처리율은 $9R_j = 4.5$ Mbps이고, OPNET 기반 시뮬레이션에서 오버헤드 고려시의 전체 시스템 throughput은 약 4.4 Mbps가 얻어진다. 따라서 제안하는 협력 MMKP 기법이 전체 시스템 throughput이 가장 높게 얻어졌고, 그 다음이 비협력 MMKP 기법, 협력 LQB 기법, 비협력 LQB 기법 순으로 얻어졌다.

V. 결론

요구되는 통신 거리가 길고 LOS 확보가 쉽지 않은 산악 지형이 일반적인 군 전술 통신 환경에서 커

버리지 확장과 음영 지역 제거를 위해 다중홉 중계 기술인 IEEE 802.16j 네트워크를 고려하였다. 본 논문에서는 IEEE 802.16j 네트워크의 상향 링크에서 협력 중계를 이용하여 대역 할당과 경로 선택을 통합적으로 수행하는 기법을 제안하였다. 이를 위해 OFDMA 프레임 구조에서 UL 접속 구간과 UL 중계 구간의 대역 제약을 고려하여 전체 시스템의 데이터 처리율을 최대화하는 최적화 문제를 정의하였다. 정의한 최적화 문제를 MMKP로 변환하여 통합 대역 할당 및 경로 선택 기법을 제안하였다. 협력 중계를 이용하지 않는 경우에 대해서도 최적화 문제를 정의하고 MMKP 기반 기법을 제안하였다. 성능 비교를 위해 LQB 기법의 전체 시스템 처리율도 평가하였다. 군 전술 통신 환경 중 LOS 확보가 쉽지 않은 산악 지형 환경에서 OPNET 기반 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법들의 전체 시스템 처리율을 비교 분석하고, 제안하는 MMKP 기반 기법들이 LQB 기법들에 비해 좋은 성능을 나타냄을 보였고, 협력 중계를 사용하는 기법들이 그렇지 않은 기법들보다 더 높은 전체 시스템 처리율을 제공함을 보였다.

References

- [1] IEEE Standard 802.16e-2005, IEEE standard for local and metropolitan area networks, Part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems, Amendment 2: Physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in licensed bands, and Corrigendum 1, 2006.
- [2] IEEE Standard 802.16j-2009, IEEE standard for local and metropolitan area networks, Part 16: Air interface for broadband wireless access systems, Amendment 1: Multiple relay specification, 2009.
- [3] IEEE Standard 802.16m-2011, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 3: Advanced Air Interface, 2011.
- [4] K. J. Lim, C. S. Yoon, "Standardization Activity on IEEE 802.16m for IMT-Advanced Systems," *Electronics and Telecommunications Trends(ETRI)*, vol. 23, no. 3, pp. 10-18, 2008.6.
- [5] P. J. Song, Y. J. Ko, S. B. Lim, "Standardization Activities on LTE-Advanced Technologies," *The Magazine of the IEK*, vol. 36, no. 1, pp. 52-63, 2009.1. (송평중, 고영조, 임선배, "LTE-Advanced 표준 기술 동향," 전자공학회지, 제36권, 제1호, 52-63쪽, 2009.1.)
- [6] Y. W. Yoon, "Standardization Activities on LTE-Advanced Technologies (REL-10 and REL-11)," *Information and Communications Magazine*, vol. 28, no. 6, pp. 61-83, 2011.6. (윤영우, "LTE-Advanced 표준 기술 (REL-10 동향 및 REL-11 전망)," 한국통신학회지 (정보와통신), 제28권, 제6호, 61-83쪽, 2011.6.)
- [7] K. J. Lee, H. J. Lee, "A Joint Resource Allocation and Routing Scheme for the IEEE 802.16j Multi-hop Relay Networks," *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems(ITS)*, vol. 8, no. 1, pp. 82-91, 2009.2.
- [8] D. H. Kwak, J. H. Mo, "Cooperative MAC Protocols," *Information Network Review*, vol. 23, no. 2, pp. 1-14, 2009.9.
- [9] B. U. Ryu, K. H. Lee, U. W. Park, H. D. Kim, C. Y. Lee, "Multi-hop Relay based Cooperative Communication Technologies," *Information and Communications Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 84-97, 2007.5. (유병욱, 이규하, 박원우, 김현도, 이충용, "Multi-hop Relay 기반 협력 통신 기술," 한국통신학회지 (정보와통신), 제24권, 제5호, 84-97쪽, 2007.5.)
- [10] H. S. Ryu, C. G. Kang, H. S. Lee, J. Y. Ahn, H. K. Chung, "Selective Cooperative Relay Scheme for the Multi-hop Relay-enhanced Cellular OFDMA-TDD System," *Telecommunications Review*, vol. 17, no. 6, pp. 1022-1040, 2007.12.
- [11] H. S. Ryu, C. G. Kang, "Bandwidth-Efficient Transmission Protocol for Cooperative MIMO: Design and Analysis," *The Journal of Korea Information and Communications Society (KISC)*, vol. 33, no.

4, pp. 418-425, 2008.4.

[12] K. Fakih, A. Belhouji, M. Mouhammadou, C. Decroze, and D. Carsenat, "On the Cooperative and Non-cooperative Relaying in WiMAX Communication Systems," in *Proc. IEEE VTC 2010 Spring*, pp. 1-5, 2010.

[13] B. Can, H. Yanikomeroglu, F. A. Onat, E. D. Carvalho, H. Yomo, "Efficient Cooperative Diversity Schemes and Radio Resource Allocation for IEEE 802.16j," in *Proc. IEEE WCNC 2008*, pp. 36-41, 2008.

[14] J. Jin, B. Li, "Cooperative Resource Management in Cognitive WiMAX with Femto Cells," in *Proc. IEEE INFOCOM 2010*, pp.1-9, 2010.

[15] Y. Li, Y. Huang, C. Wang, X. You, and A. Daneshmand, "A Cross-Layer Cooperative Method for IEEE 802.16 Mesh Networks," in *Proc. IEEE NOMS 2010*, pp. 17-23, 2010.

[16] P. Liu, C. Nie, T. Korakis, and S. Panwar, "A Cooperative MAC for Distributed Space-Time Coding in an IEEE 802.16 Network," in *Proc. BROADNETS 2008*, pp. 25-31, 2008.

[17] P. Liu, C. Nie, T. Korakis, and S. Panwar, "CoopMAX : A Cooperative MAC with Randomized Distributed Space Time Coding for an IEEE 802.16 Network," in *Proc. IEEE ICC 2009* pp. 1-6, 2009.

[18] M. Shabany, E. S. Sousa, "Joint Rate Allocation and Routing Scheme in Multihop Cellular CDMA Networks," in *Proc. ISCC*, vol. 1, pp. 442-447, 2004.

[19] V. Erceg, "An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17. no. 7, pp. 1205-1211, July 1999.

[20] OPNET Modeler, <http://www.opnet.com>

[21] M. M. Akbar, E. G. Manning, G. C. Shoja and S. Khan, "Heuristic Solutions for the Multiple-Choice Multi-Dimension Knapsack Problem", in *Proc. International Conference*

on Computational Science (ICCS) 2001, LNCS 2074, pp. 659-668, 2001.

[22] M. M. Akbar, M. S. Rahman, M. Kaykobad, E. G. Manning, and G. C. Shoja, "Solving the Multidimensional Multiple-Choice Knapsack Problem by Constructing Convex Hulls," *Computers & Operations Research*, vol. 33, no. 5, pp. 1259-1273, May 2006.

황 호 영 (Ho-Young Hwang)



2000년 2월 한국과학기술원
전자전산학과 졸업
2002년 2월 한국과학기술원
전자전산학과 석사
2008년 2월 한국과학기술원
전자전산학부 박사
2002년~2003년 미국 국립표

준기술연구소 방문연구원

2008년~2010년 캐나다 워털루대학교 박사후연구원
2010년~현재 광운대학교 컴퓨터공학과 교수
<관심분야> 무선네트워크, 이동통신, 인터넷

이 혁 준 (Hyuk-Joon Lee)



1987년 University of Michigan,
Computer Science 졸업
1989년 Syracuse University,
Computer Science 석사
1993년 Syracuse University,
Computer Science 박사
1994년~1996년 삼성전자(주)

멀티미디어 연구소 선임연구원

1996년~현재 광운대학교 컴퓨터공학과 교수
<관심분야> 무선네트워크, 이동통신, 인터넷, 모바일
일컴퓨팅

정 인 건 (In-Gun Jeong)



2012년 2월 광운대학교 컴퓨터
공학과 졸업
2012년 3월~현재 광운대학교
컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 무선네트워크, 이
동통신, 인터넷

정 인 성 (In-Sung Jung)



2011년 2월 상명대학교 컴퓨터
과학과 졸업
2011년 3월~현재 광운대학교
임베디드 SW공학과 석사과
정
<관심분야> 무선네트워크, 이동
통신, 인터넷, 모바일컴퓨팅

노 봉 수 (Bong-Soo Roh)



2002년 2월 한양대학교 전자
전기공학부 졸업
2006년 2월 포항공과대학교
컴퓨터공학과 석사
2006년~현재 국방과학연구소
재직
<관심분야> Adhoc, WiMAX,

Bio-inspired Networking

박 귀 순 (Gui-Soon Park)



1986년 2월 부산대학교 계산
통계학과 졸업
1988년 2월 부산대학교 전자
계산학과 석사
1992년~현재 국방과학연구소
재직
<관심분야> 전술이동통신, 통

신체계, Bio-inspired Networking