

네트워크 코딩을 쓰는 언더레이 인지 무선 네트워크에서의 주파수 할당과 경로 선택 기법

이도행*, 이원형*, 강성민**, 황호영°

Frequency Allocation and Path Selection Scheme in Underlay Cognitive Radio Networks Using Network Coding

Do-Haeng Lee*, Won Hyoung Lee*, Sung-Min Kang**, Ho Young Hwang°

요약

본 논문에서는 네트워크 코딩을 쓰는 언더레이 인지 무선 네트워크에서의 주파수 할당과 경로 선택 기법을 제안한다. 네트워크 코딩 기법과 언더레이 인지 무선을 같이 고려하여 경로를 선택하고, 선택한 경로로 통신하는 SU들의 전체 시스템 처리율을 최대화 하는 최적화 문제를 제안한다. 제안한 최적화 문제를 다중 차원 다중 선택 배낭 문제로 변환한 후, 선형 계획 완화를 적용하여 전체 시스템 처리율에 대한 이론적인 상한 값을 제시하고, 주어진 환경에 대해서 SU들의 전체 시스템 처리율을 BFS를 통해 구한다. 성능 비교를 위해 링크 품질 기반의 LQF 기법에 대한 SU들의 전체 시스템 처리율을 구하고, BFS를 사용한 경우의 SU들의 시스템 처리율과 비교 분석한다. 시뮬레이션을 통해, 네트워크 코딩 적용 시 네트워크 코딩을 적용하지 않는 경우보다 성능이 개선됨을 보이고, 언더레이 인지 무선 네트워크에서 제안한 기법에 대한 BFS를 사용한 SU들의 시스템 처리율이 LQF를 사용한 SU들의 시스템 처리율보다 더 높음을 보인다.

Key Words : Frequency Allocation, Path Selection, Underlay, Cognitive Radio, Network Coding

ABSTRACT

In this paper, we propose frequency allocation and path selection scheme in underlay cognitive radio (CR) networks using network coding. In the proposed scheme, we choose the path with consideration of network coding and interference temperature in underlay CR networks and propose an optimization problem to maximize the system throughput of secondary users (SUs). Then, we represent the proposed optimization problem as the multi-dimensional multiple-choice knapsack problem and give the theoretical upper bound for the system throughput of SUs by using linear programming. Finally, we compute the system throughput of SUs by using brute-force search (BFS) and link quality first (LQF) scheme in underlay CR networks. Simulation results show that the system throughput of SUs with BFS is higher than that with LQF in underlay CR networks with and without application of network coding, respectively.

※ 본 논문은 2014년 한국통신학회 추계 종합 학술 발표회 최장 추천 논문으로 [16]를 확장한 논문임.

※ This research was supported in part by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (NRF-2012R1A1A1041835) and in part by the Research Grant of Kwangwoon University in 2014.

• First Author : Department of Computer Engineering, Kwangwoon University, jydhle@kw.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Department of Computer Engineering, Kwangwoon University, hyhwang@kw.ac.kr, 정회원

* Department of Computer Engineering, Kwangwoon University, lwh1121@kw.ac.kr

** Department of Computer Engineering, Kwangwoon University, smkang@kw.ac.kr

논문번호 : KICS2015-04-123, Received April 14, 2015; Revised July 4, 2015; Accepted July 6, 2015

I. 서 론

최근에 스마트폰과 같은 모바일 기기의 보급이 확산되면서 이동 통신 네트워크에서 텍스트, 음성, 영상 등 데이터 전송이 많아지고 있다. 이로 인해, 이동 통신 네트워크에서 유한한 자원을 효율적으로 사용하는 것이 보다 중요시 되고 있다. 3GPP(Third Generation Partnership Project)의 LTE(Long Term Evolution) 시스템과 WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access) 시스템에서 효율적인 자원 관리를 위해 직교 주파수 분할 다중 접속(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 방식이 사용되고 있다. OFDMA 방식에서 자원 할당은 주파수 도메인과 시간 도메인에서 모두 가능하며, 시간 도메인의 OFDMA 심볼과 주파수 도메인의 부반송파로 이루어지는 슬롯을 단위로 자원을 할당할 수 있다. OFDMA 시스템은 주파수 분할 방식(Frequency Division Duplex, FDD)이나 시간 분할 방식(Time Division Duplex, TDD)을 이용하여 상향 링크와 하향 링크의 자원을 분할 할 수 있다^[1].

네트워크 코딩(Network Coding)은 다중-홉 방식에서 통신의 처리율(Throughput)을 높일 수 있는 기술이다. 기존의 라우터에서는 수신한 정보를 전달 방향으로 송신하는 역할만 수행했다. 반면에, 네트워크 코딩은 기지국(Base Station, BS)과 사용자(Mobile Station, MS) 사이에 중계기(Relay Station, RS)를 배치하고 수신된 정보들을 인코딩하여 방송(broadcast)하고, RS가 방송한 정보를 받은 수신자들이 디코딩을 통해 정보를 해석하는 기법이다. 그림 1은 네트워크 코딩 기반 통신을 도식화한 그림이다.

인지 무선(Cognitive Radio, CR) 시스템은 유한한 스펙트럼 자원의 효율성을 높이기 위해 고안되었다^[2].

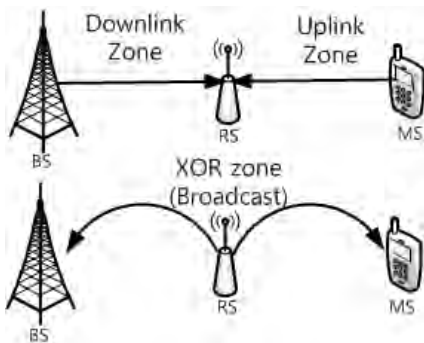


그림 1. 네트워크 코딩 기반 통신
Fig. 1. Network coding-based communications

부차적인 사용자(Secondary User, SU)는 주 사용자(Primary User, PU)가 사용하는 스펙트럼의 상태를 감지하고, 감지된 스펙트럼을 사용하는 방식에 따라, 언더레이(Underlay), 오버레이(Overlay), 인터위브(Interweave) 모드로 나뉜다. 언더레이 모드는 SU들이 송신하는 전력으로 생기는 간섭이 허용 가능한 간섭 한계치(Interference Temperature)를 넘지 않아야 한다. 이를 위해, SU들의 간섭에 대한 지속적인 측정이 필요하다. 오버레이 모드는 SU와 PU가 동시에 송신이 가능한 모드로, SU가 PU의 인코딩 기법을 알고 이를 이용한 PU와의 협력 통신이 가능하다. 협력 통신을 하기 때문에, 전송 데이터에 대한 인코딩과 디코딩 복잡도가 존재한다. 인터위브 모드는 기회주의적 통신모드로, PU가 사용하고 남긴 스펙트럼 홀을 SU가 사용하는 모드이다^[3]. 각 모드에 대한 도식화는 그림 2와 같다.

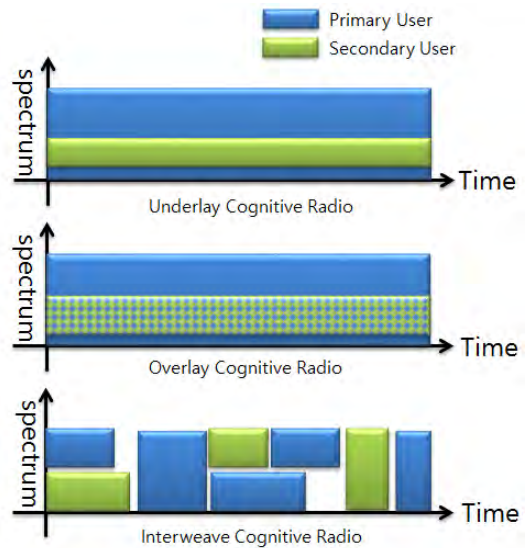


그림 2. 인지 무선 네트워크의 모드들
Fig. 2. Modes of Cognitive Radio

II. 관련 연구

OFDMA 시스템은 다중 경로 처리와 사용자별 다양한 대역폭 제공 등 여러 장점을 가진다. 이런 장점을 활용해 4G의 대표적인 두 통신 시스템인 LTE 시스템과 WiMAX 시스템은 모두 OFDMA 방식을 사용한다^[4]. OFDMA 시스템에서의 유한한 자원을 효율적으로 사용하고 시스템 성능을 향상시키기 위한 기존 연구들이 수행되어 왔는데, ^[5]에서는 TDD와 FDD

기반의 OFDMA 중계 시스템에서 네트워크 코딩을 적용할 때와 그렇지 않을 때에 대하여 전체 시스템 처리율을 최대화하는 문제에 대해 연구하였다.^[6]에서는 OFDMA 기반의 통신 환경에서 협력 중계를 고려한 상향 링크에서의 자원 할당 및 경로 선택 문제에 대해 연구하고 성능을 분석하였다.^[7]에서는 다중 전송률 다중 홉 무선 네트워크의 처리율을 향상시키기 위한 세션내에서 동일한 소스 노드와 목적지 노드를 갖는 인트라세션 네트워크 코딩을 사용하였고, 전송 속도를 선택하는 방법을 제안하고, 동시 전송 집합을 선택한 후 처리율 계산을 위해 선형 계획법(Linear Programming)을 이용하였다.^[8]에서는 OFDMA 시스템에서 페드 셀을 가정하고, 사용자들의 QoS(Quality of Service) 요구와 채널 상태에 따른 서브채널에 대한 송신 전력에 차등을 두는 전력 최소화에 기반한 자원 할당 알고리즘을 제시하였다.

네트워크 코딩은 서로 다른 노드로부터 수신된 정보를 혼합하여 전송 효율을 늘리기 위하여 제안되었다.^[9]에서는 XOR 연산을 이용해 수신된 정보를 혼합하고 방송하는 방식으로 네트워크 코딩을 제안하였다. 하지만, 방송 방식으로 통신하는 무선 네트워크에서는 여러 노드에서 송신되는 정보들이 서로 간섭으로 작용하여 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 물리 계층 네트워크 코딩(Physical Layer Network Coding, PNC)이 제안되었다^[10]. 기존의 네트워크 코딩은 송신, 수신 노드로부터 정보를 받아 데이터의 비트 스트림을 산술 연산하는 방식으로 동작하였다. 반면에 PNC는 네트워크 코딩 연산을 하기 위해 전자장치의 가산성을 이용한다. PNC는 물리 계층에서 신호를 인코딩, 디코딩 할 때 다수의 노드로부터 발생하는 간섭을 이용하여 네트워크 코딩 효과를 만듦으로써, 간섭에 의한 데이터 통신 시의 장애를 줄일 수 있다. 데이터와 간섭의 혼합 신호를 만들고 변조·복조 방식에 변화를 줌으로써 물리 계층에서의 네트워크 코딩 연산을 할 수 있다.

일반적인 네트워크 코딩 기법은 실재하는 시스템에 맞춰 설계된 알고리즘으로 동작한다. 그러나 동적으로 변동하는 네트워크나 구조가 큰 네트워크에서는 알고리즘 설계가 어려울 뿐만 아니라 효과적이지 못하다. 이러한 문제 해결을 위해 다중 노드 멀티캐스트 네트워크에서 랜덤 선형 네트워크 코딩(RLNC)이 제안되었다^[11]. RLNC는 노드들이 수신한 정보들을 독립적이고 랜덤하게 선형적으로 인코딩하여 전송하는 방식으로 동작한다. 이는 네트워크 코딩을 분산적으로 동작시키고 링크 손실과 네트워크 구조 변화에 유동적

으로 대처할 수 있다.

네트워크 코딩 시스템에 적용 시 현실적인 오버헤드가 존재한다. 한정된 네트워크 구조 및 패킷 엿들음으로 인한 전력 소모가 있다^[17]. 또한 네트워크 코딩을 위해 중계기에서 XOR 연산 등의 인코딩에 따른 오버헤드 발생 및 수신 노드에서 디코딩에 따른 오버헤드 발생이 있다^[18]. 네트워크 코딩을 위해서는 체인이나 X형태의 네트워크 구조가 필요하다. 이러한 네트워크 구조에서 패킷 엿들음을 통해 부하량 측면에서 이득이 있는 네트워크 코딩 적용이 가능하고, 패킷 엿들음시 전력 소모가 발생한다.

네트워크 코딩을 적용하여 자원 할당을 연구한 사례는 다음과 같다.^[12]은 중계기 기반 OFDMA 시스템에서 효율적인 자원 할당을 위한 기회주의적 네트워크 코딩 기법을 제시하였다. 제안한 기법은 기지국, 중계기, 사용자를 고려하여 시간 슬롯을 3분할하고 이를 동적으로 할당하는 동적 TDD를 사용하였다. 사용자의 통신 품질을 유지하면서 상·하향 통신의 전송률들의 가중치 합을 최대화하기 위한 최적화 문제를 제시하였다. 인지 무선 시스템에서 SU들의 수율 효율을 최대화하기 위해^[13]는 기회주의적 스케줄링 알고리즘을 개발하였다. 또한 리아푸노프 최적화 기법을 사용하여 흐름 제어, 스케줄링, 자원 할당 알고리즘을 제안하였다. 인지 무선 시스템에서는 PU와 SU 사이의 주파수 공유를 위한 자원 할당 문제가 발생하는데,^[14]은 언더레이 무선 인지 시스템에서 주파수 자원을 할당하는 수락 제어 알고리즘을 제시하였다. 이는 PU가 수용할 수 있는 범위 내에서 SU가 PU에 미치는 간섭을 제한하고 SU에게 서비스 되는 신호 품질이 QoS를 보장할 수 있는 수준 이상이 되도록 한다.^[14]에서는 max-min 공정성과 비율적 공정성을 이용하여 통합 전력 및 전송률 할당 최적화 문제를 제안하고, 이를 convex 문제로 변환하여 최적 값들을 얻었다.

III. 네트워크 코딩을 쓰는 언더레이 인지 무선 네트워크에서의 주파수 할당과 경로 선택 기법

본 논문에서는 네트워크 코딩을 쓰는 언더레이 인지 무선 네트워크에서의 주파수 할당과 경로 선택 기법을 제안한다. 본 시스템 모델에서는 TDD 기반 OFDMA를 사용한다. 하나의 슬롯은 하나의 OFDMA 심볼과 하나의 부반송파로 구성되어있고, 사용자는 중계기를 거치는 통신을 하거나, 기지국과 직접 통신할 수 있다. 고려하는 언더레이 인지 무선 네트워크에서 PU들은 송신 PU와 수신 PU로 PU 한 쌍이 존재하며,

SU들은 하나의 BS와 N 개의 MS, $M-1$ 개의 RS가 존재한다. PU는 SU와 같은 스펙트럼으로 OFDMA 프레임 전체를 사용하고 있으며, SU는 PU가 사용하는 프레임을 언더레이 모드로 함께 사용한다^{15,16}.

본 장에서는 네트워크 코딩을 쓰는 언더레이 인지 무선 네트워크에서의 주파수 할당과 경로 선택 기법을 제안한다. 네트워크 코딩을 쓰는 네트워크에서 각 구간은 상향 링크, 하향 링크, XOR 링크 구간으로 이루어지며, 각 구간의 OFDMA 심볼 수는 S_u , S_d , S_{xor} 로 표기한다. 식 (1)은 최적화하고자 하는 문제의 목적 함수로 전체 시스템의 처리율을 최대화하는 것을 나타낸다.

$$(P) \max_{x_{ij}} \sum_{j=1}^M \sum_{i=M+1}^{M+N} x_{ij} (R_i^d + R_i^u) \quad (1)$$

식 (1)에서 R_i^u 와 R_i^d 는 각각 MS i 에 대한 상향 링크와 하향 링크의 요구 전송 속도(Required Rate)이고, x_{ij} 는 중단 간 통신경로를 결정하는 이진변수로 BS와의 직접 통신경로를 이용할지, RS를 거치는 중계 통신경로를 이용할지 결정한다. i 는 MS의 인덱스를 나타내고 N 은 MS의 개수이다. j 는 BS와 RS의 인덱스를 나타내고 1개의 BS와 $M-1$ 개의 RS를 고려한다. x_{ij} 의 값이 1이면 MS i 가 경로 j 로 통신하고 TDD 기반 통신을 고려하므로 상향 링크와 하향 링크의 중단 간 경로를 동일하게 가정한다. 경로 j 가 1이면 MS i 는 BS와 직접 통신을 하고 j 가 2 이상이면 $j-1$ 번째 RS와 중계 통신을 한다. 반대로 x_{ij} 가 0이면 MS i 가 경로 j 로 통신하지 않는 것을 의미한다.

식 (2)-(6)은 최적화 문제의 제약 조건들을 나타낸다. 식 (2)는 MS i 가 통신할 때, 1개의 직접 경로와 $M-1$ 개의 중계 경로들 중 하나의 경로만을 선택해서 통신하는 것을 나타낸다.

$$\begin{aligned} x_{ij} &\in \{0, 1\} \\ j &\in [1, M], i \in [M+1, M+N] \\ \sum_{j=1}^M x_{ij} &\leq 1, i \in [M+1, M+N] \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 $[m,n]$ 은 양의 정수 m 보다 큰 양의 정수 n 에 대하여 $\{m, m+1, \dots, n\}$ 집합을 의미한다. MS i 가 선택하는 경로의 수의 합이 항상 1보다 작거나 같다는 것은 MS i 가 유일한 경로를 선택하거나, 경로를 아예 선택하지 않는 것을 나타낸다. 식 (3)-(5)

는 상향 링크, 하향 링크, XOR 링크에 사용할 수 있는 슬롯의 수를 제한한다. 각 제한은 링크 구간별로 존재하며, MS i 가 경로 j 를 선택하려할 때 필요한 슬롯의 수에 의해 아래의 제약식 중 하나라도 위반되면 MS i 는 경로 j 를 선택할 수 없다.

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=M+1}^{M+N} s_{ij} x_{ij} \leq S_u C \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=2}^M \sum_{i=M+1}^{M+N} \frac{s_{ji} D_{ji}}{D_{1j}} x_{ij} \\ + \sum_{i=M+1}^{M+N} s_{1i} x_{i1} \leq S_d C \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sum_{j=2}^M \sum_{i=M+1}^{M+N} \max\left(\frac{s_{ij} D_{ij}}{D_{j1}}, s_{ji}\right) x_{ij} \leq S_{xor} C \quad (5)$$

C 는 OFDMA의 부반송파 개수이고, D_{ij} 는 노드 i 에서 노드 j 로의 전송률이고, s_{ij} 는 노드 i 에서 노드 j 로 가는데 필요한 슬롯 수이다. 식 (3)에서 $S_u C$ 는 상향 링크 구간에서 한 프레임이 수용 가능한 슬롯 수를 나타내며, MS i 가 선택한 경로에서 요구되는 슬롯 수들의 합이 한 프레임이 수용 가능한 슬롯의 수보다 항상 작거나 같다는 것을 의미한다. 식 (4)는 하향 링크 구간에서 한 프레임이 수용 가능한 슬롯 수($S_d C$)보다 MS i 가 선택한 경로에서 요구되는 슬롯 수들의 합이 항상 작거나 같다는 것을 의미한다. 식 (5)는 RS가 MS와 BS에게 받은 데이터를 XOR 인코딩한 후 방송할 때 요구되는 슬롯 수의 합이 XOR 링크 구간에서 한 프레임이 수용 가능한 슬롯 수($S_{xor} C$)를 초과할 수 없다는 것을 의미한다. RS가 방송할 때 요구되는 슬롯 수는 RS j 가 MS i 에게 보낼 때 필요한 슬롯 수(s_{ji})와 RS j 가 BS에게 보낼 때 필요한 슬롯 수 중 큰 수로 정한다. 이는 RS가 BS와 MS i 둘 다에게 XOR 인코딩된 데이터를 방송하기 때문이다.

식 (6)은 언더레이 인지 무선에서 허용 가능한 간섭 한계치에 대한 제약 식을 의미한다. SU들은 BS, MS, RS 모두이며 이들이 송신하는 전력은 PU에게 간섭을 주게 되며 간섭 총합은 허용 가능한 간섭 한계치보다 항상 작아야 한다.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j=1}^M \sum_{i=M+1}^{M+N} \frac{W_i s_{ij} x_{ij}}{S_u} \\
 & + \sum_{i=M+1}^{M+N} \frac{W_1}{S_d} \left(s_{1i} x_{i1} + \sum_{j=2}^M \frac{s_{ji} D_{ji}}{D_{1j}} x_{ij} \right) \\
 & + \sum_{j=2}^M \sum_{i=M+1}^{M+N} \frac{W_j \max \left(\frac{s_{ij} D_{ij}}{D_{j1}}, s_{ji} \right) x_{ij}}{S_{xor}} \\
 & \leq I_{th}
 \end{aligned} \tag{6}$$

식 (6)에서 수신 PU가 SU i 로부터 받는 전력을 W_i 로 나타내며, 간섭의 총량을 계산하여 이 값이 간섭 한계치(I_{th})를 초과할 수 없도록 제한한다.

본 논문에서 제안하는 경로 선택 기법은 식 (2)에서 x_{ij} 가 0 또는 1의 정수 값만을 가질 수 있고, 식 (2)-(6)이 전부 선형 제약 조건들이며, 식 (1)에서 시스템의 처리율을 최대화하는 목적 함수가 선형이기 때문에, 0-1 정수 선형 계획법 (Integer Linear Programming) 문제에 해당한다. 0-1 정수 선형 계획법은 NP-hard 로 알려져 있어, 제안하는 경로 선택 기법에 대한 최적해를 구하는 것이 쉽지 않다. 하지만, x_{ij} 가 0 또는 1의 정수라는 제약 조건을 x_{ij} 가 0과 1 사이의 실수라는 제약 조건으로 완화하면, 0-1 정수 선형 계획법의 선형 계획 완화(Linear Programming Relaxation) 문제로 변환되어, 이를 통해 제안하는 최적화 문제의 시스템 처리율의 이론적인 상한 값을 구할 수 있다^[9]. IV 장에서 선형 계획 완화 문제를 통해 구한 이론적인 상한 값을 제안하는 알고리즘 이용시의 성능과 비교 분석할 것이다.

본 논문에서는 경로의 링크 품질을 우선적으로 고려하여 경로를 선택하는 링크 품질 우선 탐색(Link Quality First, LQF) 알고리즘을 제시한다. 제시하는 알고리즘은 탐욕 알고리즘으로 최적의 값을 보장하진 않지만 문제에 대한 비교 가능한 값을 허용 가능한 시간 안에 구할 수 있다. LQF에서 MS i 가 선택하는 경로의 종단 간 최대 전송률을 식 (7)과 같이 정의한다^[5,6].

$$D_i = \max(D_{1i}, \max_{j \neq 1} \min(D_{1j}, D_{j1}, D_{ij}, D_{ji})) \tag{7}$$

식 (7)에서 MS i 가 RS j 를 통해 네트워크 코딩시의 종단간 전송률은 MS i 와 RS j 간의 상향, 하향 링

크의 전송률과 RS j 와 BS간의 상향, 하향 링크의 전송률 중 최솟값으로 정의한다. MS i 별 종단 간 최대 전송률은 MS i 와 BS간의 전송률 D_{1i} 과 MS i 가 각 RS j 를 통해 네트워크 코딩시의 종단 간 전송률 중 최댓값으로 결정한다. MS i 가 선택하는 경로 p_i 는 D_i 를 종단 간 전송률로 갖는 노드에 대한 인덱스로 식 (8)과 같이 얻어진다. 이때 $p_i \in [1, M]$ 이고, $i \in [M+1, M+N]$ 이다.

$$p_i = \begin{cases} \arg D_i & \\ \text{if } D_i < \max_{j \neq 1} \min(D_{1j}, D_{j1}, D_{ij}, D_{ji}), & (8) \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

탐욕 알고리즘은 우선 각 MS i 에 대한 p_i 를 구하고, 모든 i 에 대해서 x_{ip_i} 를 1로 초기화한다. 그리고 식 (2) ~ (6)까지의 제약식들이 만족될 때까지 반복적으로 동작하면서 종단간 전송률이 가장 낮은 MS i 를 배제하고, 제약 식들이 만족되면 전체 시스템 처리율을 구한다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 장에서는 네트워크 코딩을 쓰는 언더레이 인지 무선 네트워크에서의 주파수 할당과 제안하는 경로 선택 기법에 대해 선형 계획 완화를 적용하여 전체 시스템 처리율에 대한 이론적인 상한 값을 제시하고, 제안한 LQF 알고리즘과 BFS(Brute-Force Search) 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 성능 평가 및 비교 분석한다. 시뮬레이션은 요구 전송 속도를 증가시키며 수행한 것과 인지 무선의 허용 가능한 간섭 한계치인 I_{th} 를 증가시키며 수행한 것으로 구성된다.

4.1 시뮬레이션 환경

언더레이 인지 무선 네트워크에서의 시뮬레이션을 위해 PU들은 송신 PU와 수신 PU로 PU 한 쌍이 존재하고, SU들은 1개의 BS, 2개의 RS, 12개의 MS가 존재한다. 시뮬레이션 파라미터들은 표 1과 같고, MS와 통신하는 RS와 BS 사이의 데이터 전송률은 표 2와 같다. 수신 PU와 SU들 간의 거리는 표 3과 같고, PU와 SU들의 분포는 그림 3과 같다^[5,6,15,16].

4.2 시뮬레이션 및 분석

본 절에서는 본문에서 제안한 기법들을 시뮬레이션하고 결과를 분석한다. 시뮬레이션은 언더레이 인지 무선 네트워크 환경에서 이루어지며, 선형 계획 완화

표 1. 시뮬레이션 파라미터들
Table 1. Simulation parameters

Cell radius		1km
Number of subcarriers per symbol		1024
Number of data subcarriers per symbol (C)		768
Number of OFDMA symbols per frame		42
With network coding	Number of downlink OFDMA symbols per frame (S_d)	13
	Number of uplink OFDMA symbols per frames (S_u)	13
	Number of XOR-ed OFDMA symbols per frame (S_u)	16
Without network coding	Number of OFDMA symbols for downlink access zone (S_d^a)	16
	Number of OFDMA symbols for downlink relay zone (S_d^r)	10
	Number of OFDMA symbols for uplink access zone (S_u^a)	10
	Number of OFDMA symbols for uplink relay zone (S_u^r)	6
System bandwidth		10MHz
Power of BS		10 W
Power of RS and MS		1 W

표 2. 네트워크 노드들 간의 데이터 전송률
Table 2. Data rates of network nodes

D_{12}	5 [bits/slot]
D_{13}	3 [bits/slot]
$D_{1i} \ i = 4, 5, 6$	2 [bits/slot]
$D_{1i} \ i = 7, 8, 9$	3 [bits/slot]
$D_{1i} \ i = 10, \dots, 15$	4 [bits/slot]
$D_{i2} \ i = 4, 5, 6$	4 [bits/slot]
$D_{i2} \ i = 7, 8, 9$	5 [bits/slot]
$D_{i2} \ i = 10, 11, 12$	1 [bits/slot]
$D_{i2} \ i = 13, 14, 15$	1 [bits/slot]
$D_{i3} \ i = 4, 5, 6$	1 [bits/slot]
$D_{i3} \ i = 7, 8, 9$	1 [bits/slot]
$D_{i3} \ i = 10, 11, 12$	4 [bits/slot]
$D_{i3} \ i = 13, 14, 15$	5 [bits/slot]

를 이용하여 구한 전체 시스템 처리율의 이론적인 상한 값과 BFS 알고리즘, LQF 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 비교 분석한다. 성능 비교를 위해 대조군으로 네트워크 코딩을 사용하지 않은 환경에 대해서도 선형 계획 완화를 이용하여 구한 전체 시스템 처리

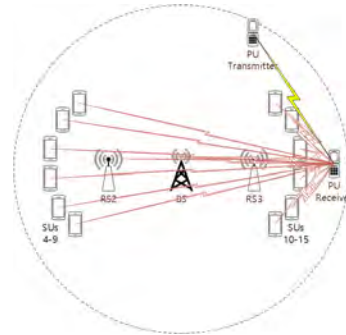


그림 3. PU와 SU들의 분포
Fig. 3. Distribution of PU and SUs

율의 이론적인 상한 값과 BFS와 LQF를 사용하여 경로 선택 기법을 시뮬레이션한 성능을 비교 분석한다.

그림 4는 요구 전송 속도를 0.5Mbps 부터 1.5Mbps 까지 증가시키며 시뮬레이션 한 결과이다. 시뮬레이션에 사용된 언더레이 간섭 한계치는 1.46nW 로 고정하였다. 전체 구간에서 네트워크 코딩을 사용하지 않았을 때보다 네트워크 코딩을 사용했을 때 더 좋은 성능을 보이며, 네트워크 환경에 대한 제약들을 고려하여 최적 값을 얻는 BFS의 성능이 LQF의 성능보다 항상 좋거나 같음을 보인다. 요구 전송 속도가 0.5Mbps 부터 1.5Mbps 까지 증가하는 동안에는 네트워크 코딩을 사용한 LQF가 네트워크 코딩을 사용하지 않은 BFS보다 더 좋은 성능을 보인다. 또한, 네트워크 코딩을 사용하는 경우 LQF와 BFS에서 요구 전송 속도가 0.8Mbps 부터 1.2Mbps 까지 증가하는 동안 성능 차이가 보인다. LQF는 탐욕 알고리즘이기 때문에 링크 품질이 좋은 경로를 우선적으로 택하게 된다. SU들의 증가되는 요구 전송 속도를 충족시키기 위해 SU들에 슬롯을 더 많이 할당하게 되고, 슬롯을 많이 할당할수록 PU에게 미치는 전체 간섭의 크기가 증가하게 된다. 이로 인해 LQF는 BFS와 달리 허용 가능한 간섭 한계치를 고려한 최적의 경로를 선택하지 못해 성능 차이가 발생한다.

그림 5는 언더레이 간섭 한계치 I_{th} 를 0.5nW부터 1.5nW까지 증가시키며 시뮬레이션 한 결과이다. 시뮬레이션에 사용된 요구 전송 속도는 0.6Mbps이다. 언더레이 간섭 한계치는 SU들로부터 간섭을 받는 수신 PU가 수용 가능한 간섭의 한계치이다. 간섭 한계치가 증가한다는 것은 SU들로부터 받는 간섭을 더 많이 허용할 수 있다는 것을 의미한다. 간섭 한계치가 증가하는 전 구간에서 그림 4와 마찬가지로 그림 5에서도 BFS가 LQF보다 성능이 좋거나 같음을 보인다.

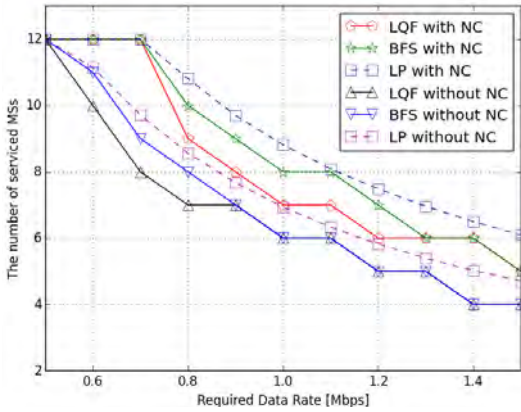


그림 4. 요구 전송 속도의 변화에 따른 서비스 받는 MS 수
Fig. 4. The number of serviced MSs with varying required data rate

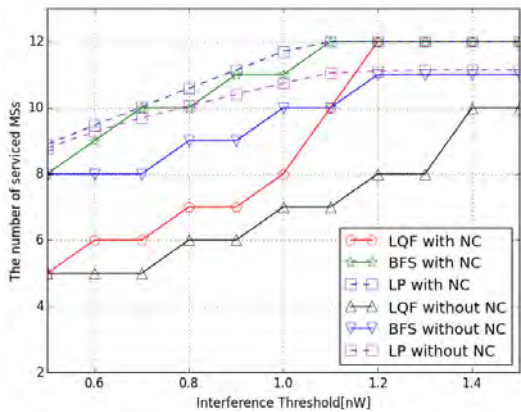


그림 5. 간섭 한계치의 변화에 따른 서비스 받는 MS 수
Fig. 5. The number of serviced MSs with varying interference threshold

또한 네트워크 코딩을 사용하는 경우가 네트워크 코딩을 사용하지 않는 경우보다 동일한 알고리즘에 대해 성능이 더 좋을음을 보인다. 시뮬레이션에서 언더레이 간섭 한계치가 $1.1nW$ 보다 큰 구간에서 네트워크 코딩을 사용하는 경우의 LQF가 네트워크 코딩을 사용하지 않는 경우의 BFS보다 더 좋은 성능을 보인다. 언더레이 간섭 한계치가 $1.2nW$ 보다 큰 구간에서는 언더레이 간섭 한계치 제약을 덜 받게 되어 네트워크 코딩을 사용하는 경우의 LQF의 성능이 BFS의 성능과 같게 나타난다.

V. 결 론

본 논문에서는 네트워크 코딩을 쓰는 언더레이 인지 무선 네트워크에서의 주파수 할당과 경로 선택 기

법을 제안하였다. 네트워크 코딩 기법과 언더레이 인지 무선을 같이 고려하여 경로를 선택하고, 선택한 경로로 통신하는 SU들의 전체 시스템 처리율을 최대화하는 최적화 문제를 제안하였다. 제안한 최적화 문제를 다중 차원 다중 선택 배낭 문제로 변환하고, 선형 계획 완화를 이용하여 구한 전체 시스템 처리율의 이론적인 상한 값과 함께 주어진 환경에 대해서 SU들의 전체 시스템 처리율을 BFS를 통해 구했다. 성능 비교를 위해 링크 품질 기반의 LQF 기법에 대한 SU들의 전체 시스템 처리율을 구하고, BFS를 사용한 경우의 SU들의 시스템 처리율과 비교 분석을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해, 네트워크 코딩 적용 시 네트워크 코딩을 적용하지 않는 경우보다 성능이 개선됨을 보였고, 언더레이 인지 무선 네트워크에서 제안한 기법에 대한 BFS를 사용한 SU들의 시스템 처리율이 LQF를 사용한 SU들의 시스템 처리율보다 더 높음을 보였다. 향후 연구로 네트워크 코딩에 의해 발생할 수 있는 추가적인 오버헤드를 고려하여 네트워크 코딩 적용시의 시스템 성능을 분석할 계획이다. 네트워크 코딩 적용에 따른 추가 오버헤드에 의한 전체 시스템의 성능 열화를 분석하고, 네트워크 코딩을 적용하기에 적합한 시스템 환경에 대한 연구를 추후 진행할 계획이다.

References

- [1] 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.
- [2] J. Mitola and G. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, 1999.
- [3] J. Mitola, "Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio," *Doctor of Technology, Royal Inst. Technol. (KTH)*, Stockholm, Sweden, 2000.
- [4] S. Srikanth, M. Pandian, and X. Fernando, "Orthogonal frequency division multiple access in WiMAX and LTE: a comparison," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 9, pp. 153-161, Sept. 2012.
- [5] E. Choi, D.-H. Lee, M. Chen, and H. Y. Hwang, "Joint resource allocation and path selection in network coding-based OFDMA

- relay networks,” in *Proc. ICUFN*, pp. 780-784, Da Nang, Vietnam, Jul. 2013.
- [6] H. Y. Hwang, H. Lee, I. G. Jeong, I. S. Jung, B. S. Roh, and G. S. Park, “Joint bandwidth allocation and path selection scheme for uplink transmission in IEEE 802.16j networks with cooperative relays,” *J. KICS*, vol. 38C, no. 1, pp. 64-77, Jan. 2013.
- [7] M. S. Park and W. S. Yoon, “Optimized multipath network coding in multirate multi-hop wireless network,” *J. KICS*, vol. 37B, no. 9, pp. 734-740, Sept. 2012.
- [8] D. Lopez-Perez, X. Chu, A. V. Vasilakos, and H. Claussen, “Power minimization based resource allocation for interference mitigation in OFDMA femtocell networks,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 32, no. 2, pp. 333-344, Feb. 2014.
- [9] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard, and J. Crowcroft, “XORs in the air: Practical wireless network coding,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 16, no. 3, pp. 497-510, Jun. 2008.
- [10] S. Zhang, S. C. Liew, and P. P. Lam, “Hot topic: physical-layer network coding,” in *Proc. MobiCom*, pp. 358-365, Los Angeles, USA, Sept. 2006.
- [11] T. Ho, M. Medard, R. Koetter, D. R. Karger, M. Effros, J. Shi, and B. Leong, “A random linear network coding approach to multicast,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 10, pp. 4413-4430, Oct. 2006.
- [12] B. G. Kim and J. W. Lee, “Opportunistic resource scheduling for OFDMA networks with network coding at relay stations,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 1, pp. 210-221, Jan. 2012.
- [13] R. Urgaonkar and M. J. Neely, “Opportunistic scheduling with reliability guarantees in cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 8, no. 6, pp. 766-777, Jun. 2009.
- [14] L. B. Le and E. Hossain, “Resource allocation for spectrum underlay in cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 7, no. 12, pp. 5306-5315, Dec. 2008.
- [15] D.-H. Lee, W. H. Lee, E. Choi, and H. Y. Hwang, “Subcarrier allocation and relay selection for uplink transmission in OFDMA-based cognitive radio systems,” in *Proc. ICTC*, pp. 485-487, Jeju, Korea, Oct. 2013.
- [16] D.-H. Lee, W. H. Lee, and H. Y. Hwang, “Network coding-based relay selection in underlay cognitive radio networks,” in *Proc. KICS Conf.*, pp. 352-353, Daejeon, Korea, Nov. 2014.
- [17] K. H. Lee, S. H. Cho, and J. H. Kim, “Feasibility analysis of network coding applied to IEEE 802.11s wireless mesh networks,” *J. KICS*, vol. 37B, no. 11, pp. 1014-1021, Nov. 2012.
- [18] Y. Lin, B. Liang, and B. Li, “Performance modeling of network coding in epidemic routing,” in *Proc. ACM MobiOpp*, pp. 67-74, San Juan, Puerto Rico, Jun. 2007.
- [19] R. Mansia, C. Alvesa, J. M. Valério de Carvalho, and S. Hanafi, “A hybrid heuristic for the multiple choice multidimensional knapsack problem,” *Engineering Optimization*, vol. 45, no. 8, pp. 983-1004, 2013.

이 도 행 (Do-Haeng Lee)



2008년~현재 : 광운대학교 컴퓨터공학과 재학
 <관심분야> 무선네트워크, 이동통신시스템, 사물인터넷

이 원 형 (Won Hyoung Lee)



2011년~현재: 광운대학교 컴퓨
터공학과 재학
<관심분야> 무선네트워크, 이
동통신시스템, 사물인터넷

황 호 영 (Ho Young Hwang)



2000년 2월: 한국과학기술원 전
자전산학과 졸업
2002년 2월: 한국과학기술원 전
자전산학과 석사
2008년 2월: 한국과학기술원 전
자전산학부 박사
2002년~2003년: 미국 국립표준
기술연구소 방문연구원
2008년~2010년: 캐나다 워털루대학교 박사후연구원
2010년~현재: 광운대학교 컴퓨터공학과 교수
<관심분야> 무선네트워크, 이동통신시스템, 사물인
터넷

강 성 민 (Sung-Min Kang)



2015년 2월: 광운대학교 컴퓨
터공학과 졸업
2015년 3월~현재: 광운대학교
컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 무선네트워크, 이
동통신시스템, 사물인터넷