

Cognitive Radio 시스템 환경에서의 다중 홉 릴레이 전송 기법

준회원 이 동 규*, 신 정 채**, 정회원 임 은 택***, 이 현 우***, 종신회원 조 호 신**

A Multi-hop Relaying Transmission Scheme in Cognitive Radio System

Dong-Kyu Lee*, Jungchae Shin** *Associate Members*,
Euntaek Lim***, Hyeonwoo Lee*** *Regular Members*, Ho-Shin Cho** *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 IEEE 802.22 기반의 인지라디오 시스템에서 다중 홉 릴레이 방식의 적용 방안을 제안한다. 먼저, 중계기를 통한 전송 시나리오를 가정하고 이를 지원하기 위한 물리 채널 프레임 구조를 제시한다. 다음으로, 분산 감지 (distributed sensing) 방식을 이용한 가용 채널 결정 방식을 제안하고 이를 토대로, 기지국 중심의 중앙 집중형 (centralized) 채널 할당 기법 및 릴레이 전송을 위한 중계기 선택 알고리즘을 개발하였다. 그리고 수학적 해석과 시뮬레이션을 통한 성능 분석 결과는 제안한 다중 홉 릴레이 방식이 중계기를 사용하지 않은 기존의 인지라디오 시스템에 비해 스펙트럼 이용효율과 시스템 수율 측면에서 성능 향상이 있음을 보여준다.

Key Words : Multi-hop relay, Cognitive Radio, IEEE 802.22

ABSTRACT

In this paper, a multi-hop relaying transmission scheme is analyzed regarding its feasibility and potentiality in the IEEE 802.22-based cognitive radio (CR) environment. Shortly, basic design issues are addressed such as relay station (RS) deployment and a frame structure of physical channel to escape inter-hop interference. This paper mainly develops a radio resource management scheme based on spectrum sensing results aggregated from CR secondary nodes and improves the opportunistic spectrum sharing efficiency. In particular, a decision rule about a channel availability is made using a distributed sensing method. Subsequently, spectrum allocation and routing path decision procedures are proposed to establish a link from source to destination with a hop-by-hop manner. Simulation results show that the proposed multi-hop relaying scheme is substantially profitable in CR environments if the number of hops and RS deployment are designed in such a way that the spectrum sharing gain is larger than spectrum division loss which is inherently induced in multi-hop relaying systems.

I. 서 론

무선 통신 서비스에 대한 사용자 수의 증가와 새로

운 서비스들의 출현으로 인한 주파수 자원에 대한 수요가 증가됨에 따라 주파수 자원의 희소성 또한 높아지고 있다. 한편 FCC (Federal Communications

* 본 연구는 2007년 (주)삼성전자의 지원에 의해 수행되었음.

* Innwireless (libertaire@innwireless.co.kr), ** 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (jshin@ee.knu.ac.kr, hscho@ee.knu.ac.kr)

*** 삼성전자(주) 통신연구소 (et.lim@samsung.com, woojaa@samsung.com)

논문번호 : KICS2008-04-192, 접수일자 : 2008년 4월 28일, 최종논문접수일자 : 2008년 8월 8일

Commission)의 주파수 이용 효율에 대한 연구 결과는 기존의 할당된 주파수 대역에서의 주파수 이용 효율이 약 30% 이하로 낮음을 보여주는데^[1], 이는 주파수 자원의 부족 현상이 주파수 자원 자체의 고갈로 인한 것이 아니라 기존의 주파수 배분 방식의 문제에서 발생한 것임을 나타낸다^[2]. 기존의 주파수 배분 방식 하에서는 시간이나 공간에 따라 사용되지 않는 유휴 주파수가 발생되고 이로 인해 주파수 이용 효율이 낮아지게 되는 것이다. 따라서 특정 서비스 용도로 할당은 되어 있지만 이용되고 있지 않는 주파수 대역을 감지하여 이를 공유하여 사용함으로써 기존 주파수 자원의 낮은 이용 효율을 증대시킬 수 있는 인지 라디오 (Cognitive Radio: CR) 기술이 주파수 자원 부족 문제의 해결책으로써 주목받고 있다^[3].

현재 개발되고 있는 인지라디오 기반의 시스템 중에서 가장 대표적이며 활발하게 논의되고 있는 것이 바로 IEEE 802.22 WRANs (Wireless Regional Area Networks)이다^[4]. IEEE 802.22 WG (Working Group)에서는 VHF/UHF TV 방송용 주파수 밴드에서 동작하는 고정형 (fixed) 지점 대 지점 (point-to-multipoint) WRAN 시스템을 위한 인지라디오 기반의 물리 계층 및 매체접속 계층 규격에 대한 표준화를 진행하고 있다. IEEE 802.22 표준에서는 기존 TV 대역에서의 사용권을 가지고 있는 TV 방송 장비 또는 무선 마이크 (Part 74 장치)와 같은 1차 사용자 (Primary or Incumbent User: IU)에게 간섭의 영향을 주지 않는 조건 하에서 2차 사용자 (Secondary User)인 WRAN 기지국과 CPE (Consumer Premise Equipment)로 하여금 유휴 주파수 대역을 공유하여 사용할 수 있도록 하고 있다.

인지 라디오 환경에서 2차 사용자는 관심 주파수 대역의 현재 사용 전력을 측정하고 자신의 송신 전력을 고려하여 해당 주파수 대역의 사용가능 여부를 판단하게 된다. 이 때 판단의 가장 중요한 기준은 1차 사용자에게 간섭의 영향을 주지 않아야 한다는 것이다. 따라서 2차 사용자가 다중 홉 릴레이 전송을 이용하여 작은 송신전력을 사용하면 더 많은 가용 주파수 대역을 확보할 수 있게 된다.

IEEE 802.22 시스템에서는 중계기 (Relay Station: RS)의 사용을 선택적으로 (optionally) 지원하고 있다^[5]. 그러나 IEEE 802.22 표준에서는 아직까지 구체적인 중계기의 동작에 대해서는 정의하고 있지 않다. 다중 홉 릴레이 방식은 지금까지 주로

기존의 셀룰러 (cellular) 기반의 네트워크에서 시스템 용량 증대 또는 커버리지 (coverage) 확장 등의 목적으로 개발되어 왔다. 단일 홉 시스템과 비교했을 때 다중 홉 릴레이 시스템에서의 이러한 성능 향상은 주로 경로 손실의 감소로 인해 생겨난 것이다^[6,7]. 그러나 다중 홉 릴레이 시스템에서는 동일한 데이터가 서로 다른 홉을 통해 여러 번 전송되어야 하기 때문에 중복 전송으로 인한 무선 자원의 소모가 발생한다. 또한 기지국과 중계기가 동시에 동일한 주파수를 사용하여 전송할 경우 홉 간 간섭 현상이 발생하기 때문에 기지국의 무선 자원을 홉 별로 나누어서 사용하거나 추가적인 무선 자원을 필요로 하는 단점이 있다. 게다가 다중 홉 릴레이 전송을 인지라디오 시스템에 적용하는 경우, 각 중계기 별로 사용가능한 채널의 수가 다를 뿐만 아니라 시간에 따라 변하기 때문에, 기존의 전통적인 셀룰러 네트워크에서의 무선 자원 관리 기법을 이용한 채널 할당이 불가능하다^[8]. 또한 IEEE 802.22 표준에서는 동시에 여러 개의 가용 채널을 결합 (bonding)하여 사용할 수 있도록 규정하고 있고 또한 이 채널들이 주파수 대역에서 인접할 필요가 없으므로^[4] 다중 홉 릴레이 전송을 위한 채널의 할당이 더욱 복잡해진다.

본 논문에서는 IEEE 802.22 기반의 인지라디오 시스템에서 다중 홉 릴레이 방식의 적용 방안을 제안한다. 먼저, 중계기를 통한 전송 시나리오를 가정하고 이를 지원하기 위한 물리 채널 프레임 구조를 제시한다. 다음으로, 분산 감지 (distributed sensing) 방식을 이용한 가용 채널 결정 방식을 제안하고 이를 토대로, 기지국 중심의 중앙 집중형 (centralized) 채널 할당 기법 및 릴레이 전송을 위한 중계기 선택 알고리즘을 개발하였다. 그리고 수학적 해석과 시뮬레이션을 통한 성능 분석 결과는 제안한 다중 홉 릴레이 방식이 중계기를 사용하지 않은 기존의 인지라디오 시스템에 비해 스펙트럼 이용효율 (spectrum utilization)과 시스템 수율 (system throughput) 측면에서 성능 향상이 있음을 보여준다.

본 논문은 다음과 같은 구성을 가진다. II장에서 IEEE 802.22 WRAN을 위한 다중 홉 릴레이 시스템 모델에 대해 설명한다. III장에서는 II장에서 제안한 다중 홉 인지라디오 시스템을 위한 다중 홉 릴레이 방법을 제안한다. IV장에서는 성능 분석 모델과 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 방식의 성능을 고찰한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 다중 홉 릴레이 시스템 모델

2.1 다중 홉 릴레이 시스템 구조

본 논문에서는 중계기와 CPE의 이동성이 없는 고정형 다중 홉 릴레이 시스템을 고려한다. 중계기는 [그림 1]과 같이 기지국을 중심으로 각 계층(tier) 별로 동심원 상에 위치하고 있으며, 각 계층 사이의 거리는 서로 동일하다. 중계기를 배치하는 계층의 수는 조절이 가능하고, [그림 1]은 세 개의 계층까지 배치시킨 예이다. 중계기를 배치시킨 계층의 수, T 에 따라 최대 홉 수가 정해지는데 최대 홉 수, n 은 $T+1$ 이 된다. [그림 1]에서 중계기와 CPE에 사용된 인덱스 (i, j)는 각각 기지국으로부터의 홉 수 i 와 각 노드가 속해 있는 영역 내에서의 구별을 위한 식별자 j 를 나타낸다. 기지국으로부터 각 CPE까지의 전송이 이루어지는 홉 수 i 는 고정되어 있으며, 이는 CPE의 위치에 의해서 결정된다. i 홉 CPE까지의 데이터 전송은 $i-1$ 개의 중계기를 거쳐서 이루어지며, 여기서 동일 계층의 중계기 사이의 전송은 없다고 가정한다. 예를 들어 [그림 1]에서 CPE(3,1)은 둘째 계층 중계기 그룹과 셋째 계층 중계기 그룹 사이에 위치하고 있기 때문에 3홉 CPE에 해당되며, 기지국이 CPE(3,1)로의 전송을 위해서는 첫째 계층과 둘째 계층에서 한 개씩 모두 2개의 중계기를 거쳐야 한다. 본 논문에서 고려하는 중계기는 디코딩 후 전달 (decode-and-forward)과 난-트랜스패런트 (non-transparent) 형태의 중계기이다^{9,10)}. 디코딩 후 전달 특성에 따라 중계기는 전달할 사용자 데이터를 수신하여 이를

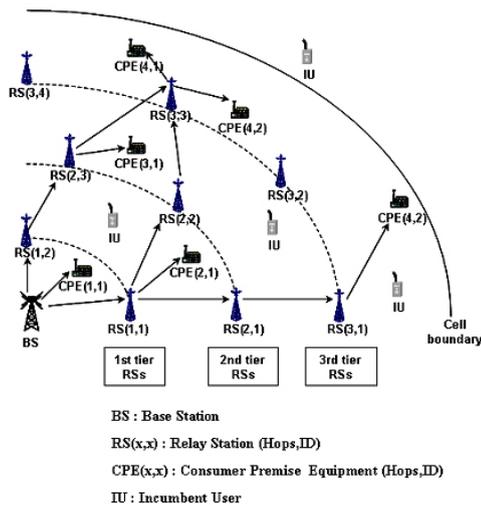


그림 1. 다중 홉 릴레이 IEEE 802.22 WRAN 네트워크

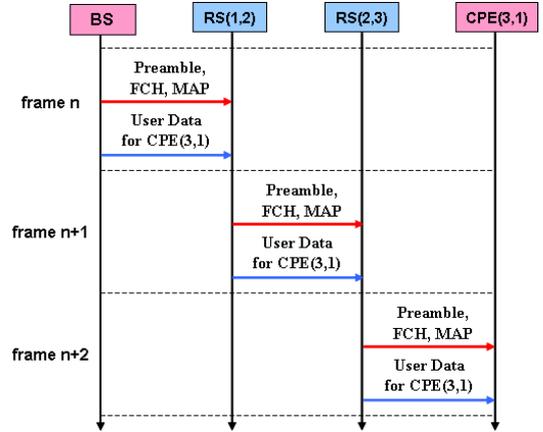


그림 2. 하향 스트림에서의 다중 홉 전송의 예

디코딩한 후 다시 인코딩하여 전송하며, 프리앰블 (Preamble), FCH (Frame Control Header), DS/US MAP (Downstream/Upstream Map)과 같은 프레임 제어 정보들을 기지국이 하는 것처럼 방송한 후 사용자 데이터를 전송하는 난-트랜스패런트 릴레이 전송을 수행한다.

[그림 1]에 나타나있는 기지국으로부터 CPE(3,1)까지 하향 스트림 (downstream)에서의 사용자 데이터와 제어 정보의 전송이 이루어지는 과정의 예를 [그림 2]에서 나타내었다. 여기서 한 홉 동안의 지연 시간은 한 프레임 구간과 같다고 가정한다. 기지국은 중계기가 다음 프레임에서 방송하게 될 MAP 정보를 미리 생성한 뒤 이를 중계기에 전달하는데, 중계기가 수신할 이 MAP 정보들은 기지국이 방송하는 MAP 내에 포함해서 전달하거나 사용자 데이터가 전달되는 데이터 버스트(burst)를 통해 전달할 수가 있다. RS(1,2)는 기지국이 방송한 MAP을 수신한 후 자신이 수신해야하는 데이터 버스트의 위치를 알 수 있다. RS(1,2)는 전달할 데이터들을 수신하여 디코딩하고 이를 다시 인코딩한 뒤, 다음 프레임에서 프레임 제어 정보들을 방송한 후 전달할 사용자 데이터를 RS(2,3)에게 전송한다. RS(2,3)도 RS(1,2)와 동일한 과정의 작업을 거쳐 CPE(3,1)에게 데이터를 전달하게 된다.

2.2 다중 홉 전송을 위한 프레임 구조

제안한 다중 홉 릴레이 시스템 구조에서 기지국 또는 서로 다른 계층에 위치한 중계기들이 동일한 주파수 밴드를 사용하여 동시에 전송을 하는 경우 간섭 현상이 발생하게 된다. 일반적으로 다중 홉 시스템에서는 이러한 홉 간 간섭을 방지하기 위하여 각 홉 별

로 자원을 분할해서 사용하는데, 본 논문에서는 기지국과 각 계층의 중계기들이 스펙트럼을 서로 공유하여 사용하되 시간 축에서 자원을 분할해서 사용하는 시분할 다중 통신 (Time Division Multiplexing: TDM) 방식을 고려한다. IEEE 802.22 표준의 MAC 프레임 구조를 기본으로 하여 TDM 기반의 프레임 구조를 제안하였다. 각 홉에서 사용하게 되는 무선 자원들은 시간 축 상에서 서로 직교하는(orthogonal) 특성을 가진다. [그림 3]은 둘째 계층까지 중계기를 배치한 3 홉 시스템의 프레임 구조이며, [그림 2]와 같은 예의 전송 상황에서 발생하는 하향 스트림 버스트의 할당 예를 나타내었다.

최대 홉 수가 n 홉인 다중 홉 릴레이 시스템에서 하향 스트림 부프레임 (subframe)은 n 개의 부분으로 나뉘지고, 각각은 기지국 하향 스트림 전송 영역 (BS downstream zone), 첫째 계층 중계기 하향 스트림 전송 영역 (1st tier RSs downstream zone), ..., 그리고 $[n-1]$ 번째 계층 중계기 하향 스트림 전송 영역 ($[n-1]$ th tier RSs downstream zone)으로 이름 붙여진다. 이때 각 하향 스트림 전송 영역의 크기는 일정한 수의 OFDMA 심볼로 고정된다. 기지국 하향 스트림 전송 영역은 기지국에서 첫째 계층 중계기들, 즉 RS(1, x) 또는 1 홉 거리에 있는 CPE, 즉 CPE(1, x)로의 전송을 위한 영역이다. 여기서 x 는 각 계층에 속해있는 중계기 또는 CPE의 수보다 작은 임의의 정수이다. i 번째 ($i=1, \dots, n-1$)계층 중계기 하향 스트림 전송 영역은 RS(i, x)에서 RS($i+1, x$) 또는 CPE($i+1, x$)로의 전송을 위한 영역이다. 각 프레임의 시작 부분에서 기지국과 중계기들은 동기화를 위해서 동일한 프리앰블을 방송한다. 각각의 RS 프레임에서 중계기들은 프리앰블에 이어 FCH와 DS/US MAP과 같은 제어 신호들을 자신이

해당되는 중계기 하향 스트림 전송 영역에서 방송한다. 다음 홉에 위치한 중계기들과 해당 홉에 위치한 CPE들은 이 제어 신호들을 수신하여 자신이 수신해야할 데이터 버스트의 위치를 파악할 수 있다.

IEEE 802.22 시스템의 프레임 구조에서 시간 축은 OFDMA 심볼(symbol)로 구성되어 있기 때문에, 각 홉의 프레임 영역에 분배되는 OFDMA 심볼의 개수를 결정하는 과정이 필요하다. CPE로 전송되는 모든 사용자 트래픽 (user traffic)은 기지국에서만 발생되고, 각 CPE 별로 요구되는 사용자 트래픽의 크기는 동일하다고 가정한다. 모두 C_{total} 개의 CPE들이 반지름이 R 인 기지국의 커버리지 내에 균일한 분포로 위치하고 있을 때 기지국을 중심으로 한 CPE의 극좌표 (r, θ)의 확률 밀도 함수는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} f_r(r) = \frac{2r}{R^2}, 0 < r \leq R \\ f_\theta(\theta) = \frac{1}{2\pi}, 0 \leq \theta \leq 2\pi. \end{cases} \quad (1)$$

각 홉 영역에 위치하고 있는 CPE 수의 합을 각각 C_i ($i=1, \dots, n$)라 정의하고, 중계기를 구성하는 계층 사이의 간격을 서로 같게 배치시켰을 때 C_i 는 식 (2)와 같이 나타내어진다.

$$\begin{cases} C_{total} = C_1 + C_2 + \dots + C_n, \\ C_i = \frac{(iR/n)^2 - \{(i-1)R/n\}^2}{R^2} C_{total} \end{cases} \quad (2)$$

최대 홉 수가 n 인 시스템에서 각 홉에 분배되는 OFDMA 심볼의 수(정수)를 S_i ($i=1, \dots, n$)로 정의하였을 때 각 홉 별로 발생하는 사용자 트래픽에 비례하여 OFDMA 심볼을 할당한다고 하면 식 (3)의 조건을 만족하여야 한다.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n S_i = S_{total} \\ S_1 : S_2 : \dots : S_n = \sum_{j=1}^n C_j : \sum_{j=2}^n C_j : \dots : C_n. \end{cases} \quad (3)$$

2.3 2차 노드의 최대 전송 전력 결정

제안한 다중 홉 릴레이 시스템에서 WRAN 기지국, 중계기, CPE와 같은 2차 노드 (secondary node)들은 기존의 단일 홉 IEEE 802.22 시스템의 전송 전력보다 낮은 전력을 이용함으로써 IU에게 간섭을 주지 않으면서 더 많은 주파수 밴드를 사용할 수가 있다. 전송 2차 노드가 IU 수신기에게 허

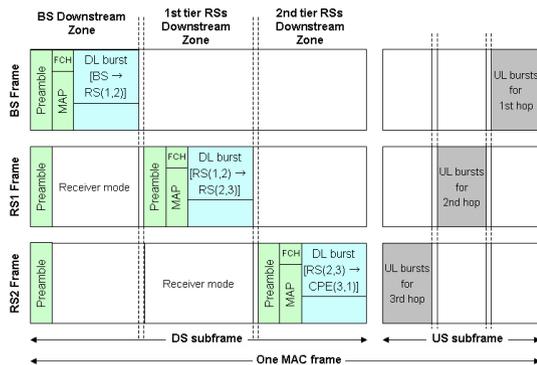


그림 3. 3홉 시스템에서 프레임 구조의 예

용 가능한 최대 크기의 간섭을 발생시킬 수 있는 [그림 4]와 같은 상황으로부터 2차 노드에게 허용되는 최대 전송 전력, P_{\max} 을 계산할 수 있다. 2차 노드들은 스펙트럼 감지 (spectrum sensing)를 통해 IDT (Incumbent Detection Threshold)^[5]보다 큰 IU의 신호가 측정되면 해당 주파수 대역에서 IU의 주파수 사용이 있는 것으로 판단한다. 2차 노드가 IU의 신호를 검출할 수 있는 최대 거리, d_{sensing} 은 IU의 신호의 크기가 IDT만큼 감소되는 지점이며 이는 경로 손실 (path loss)을 고려하였을 때 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 P_{IU} 는 IU의 전송 전력, α 는 경로 손실 지수 (path loss exponent)이다.

$$d_{\text{sensing}} = \left(\frac{1}{P_{IU}} 10^{\frac{IDT}{10}} \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (4)$$

임의의 한 주파수 밴드를 사용하는 IU 송신기로부터 d_{sensing} 거리 내에 존재하는 2차 노드들은 IDT보다 큰 전력 레벨을 감지하게 되어 해당 주파수 밴드에서의 IU의 주파수 사용이 있다는 로컬 감지 (local sensing) 결정을 내리게 되고, d_{sensing} 거리 밖에 존재하는 2차 노드들은 해당 주파수 밴드에서 IU에 의한 주파수 사용이 없다는 결정을 내리게 된다. 기존 IEEE 802.22 시스템에서와 마찬가지로 중계기를 사용하는 다중 홉 릴레이 WRAN 시스템에서도 분산 감지 방식을 사용하기 때문에 특정 주파수 밴드를 사용하는 IU로부터 d_{sensing} 거리 내에 적어도 한 개

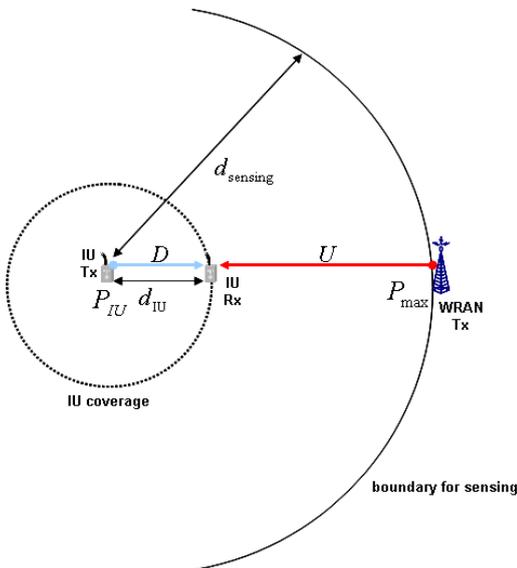


그림 4. 최대 전송 전력 결정 시나리오

의 2차 노드가 존재한다면 IU의 주파수 사용이 2차 노드의 로컬 감지 결과에 반영되고, 기지국은 해당 주파수 밴드에 대해 사용 불가의 결정을 내리게 된다. 하지만 최대 전송 전력 결정 시나리오에서는 d_{sensing} 거리 내에 존재하는 2차 노드가 존재하지 않아서 전송 2차 노드와 IU 수신기 사이의 거리가 최소가 되는 경우를 고려하였다. IU 수신기의 위치는 IU의 커버리지, d_{IU} 만큼 떨어진 지점에 위치하고 있으며, 따라서 IU 수신기와 동일 주파수 밴드를 사용하게 되는 2차 노드 사이의 최소 거리는 $d_{\text{sensing}} - d_{IU}$ 가 된다. 이러한 상황에서 2차 노드의 최대 전송 전력, P_{\max} 는 IU 수신기의 D/U (Desired-to-Undesired) ratio, SIR_{IU} [dB]를 만족시키는 범위 내에서 결정되어야 한다. IU 송신기로부터 IU 수신기가 수신하는 신호 크기, D 와 2차 노드로부터의 간섭 신호 크기, U 는 각각 식 (5)와 같다. 따라서 2차 노드의 최대 전송 전력, P_{\max} 는 식 (6)의 조건을 만족시키는 최대값으로 결정될 수 있다.

$$\begin{cases} D = 10 \log_{10} \{ P_{IU} (d_{IU})^{-\alpha} \}, \\ U = 10 \log_{10} \{ P_{\max} (d_{\text{sensing}} - d_{IU})^{-\alpha} \}. \end{cases} \quad (5)$$

$$D - U \geq SIR_{IU} \quad (6)$$

III. 제안하는 다중 홉 릴레이 방법

3.1 다중 홉 릴레이 WRAN 시스템에서의 분산 감지

IEEE 802.22 WRAN 시스템에서는 정확한 스펙트럼 감지 결과를 얻기 위해 분산 감지 (distributed sensing) 방식을 사용할 수 있으며^[5], 본 논문에서 제안하는 다중 홉 릴레이 WRAN 시스템 역시 분산 감지 방식이 적용된다. 분산 감지를 적용하지 않은 경우에는 [그림 5]의 경우처럼 히든 노드 (Hidden Node)에 의한 간섭 현상이 발생할 수 있기 때문이다. 분산 감지를 하지 않는 경우 [그림 5]

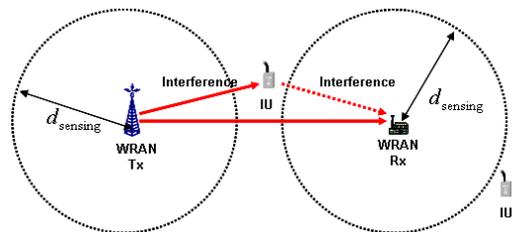


그림 5. 히든 노드 문제

에 나타나 있는 WRAN 송신기와 수신기 각각의 로컬 감지 결과에는 $d_{sensing}$ 거리 밖에 존재하는 IU에 의한 주파수 사용 유무가 포함되지 않게 되어 IU와의 동일 채널을 선택한 전송이 이뤄질 수 있다. 따라서 WRAN 송신기에 의해 IU 수신기가 받는 간섭과 IU 전송기에 의해 WRAN 수신기가 받는 두 종류의 간섭이 발생할 수 있다. 이 중에서 WRAN 송신기에 의한 IU 수신기가 받는 간섭은 II장에서 결정한 2차 노드의 최대 전송 전력을 따르면 IU 수신기의 최소 SIR을 만족시키므로 해결될 수 있다. 하지만 WRAN 수신기가 동일 채널을 사용하는 IU 전송기로부터 받는 간섭은 여전히 존재하므로 분산 감지를 통해 IU가 사용하는 주파수 밴드를 2차 노드의 선택 가능한 주파수 밴드에서 제외시키는 방법을 통해 해결하고자 한다. 이는 WRAN 시스템의 최우선적인 의무가 IU 보호이기 때문에 IU의 SIR (Signal to Interference Ratio)을 만족시킬 수 있는 전송 전력을 먼저 결정한 후에 2차 노드의 SIR을 보장할 수 있는 분산 감지 방식을 적용하는 것이다.

기존의 IEEE 802.22 WRAN 시스템에서 기지국은 높은 전송 전력으로 셀 전체를 커버해야 하기 때문에 분산 감지를 통한 최종적인 중앙 집중형 결정 (centralized decision)을 위하여 셀 내의 모든 CPE들로부터 수집된 로컬 감지 결과를 데이터 융합하여 채널 가용성 (channel availability)을 결정하였다. 이에 반해 다중 홉 릴레이 WRAN 시스템에서 2차 노드들은 전송 시 낮은 전송 전력을 이용하기 때문에 중계기를 사용하지 않는 단일 홉 시스템에 비해 IU에게 미칠 수 있는 간섭을 고려해야 하

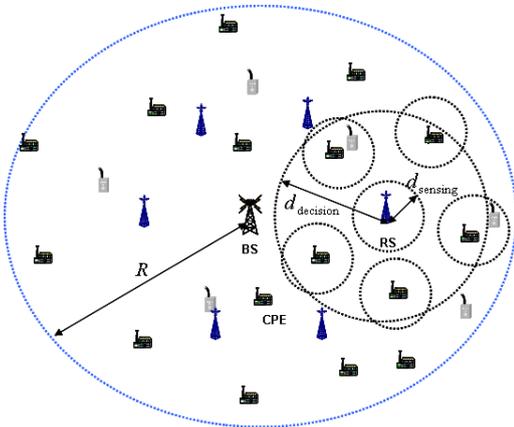


그림 6. 다중 홉 WRAN 시스템에서의 분산 감지 예

는 영역이 줄어들게 된다. 따라서 각 2차 노드의 위치를 중심으로 채널 가용성이 서로 다르게 결정되어야 한다. 각 2차 노드에서의 채널 가용성을 최종적으로 결정하기 위하여 기지국은 해당 2차 노드를 중심으로 일정 영역 내의 노드들로부터 수집된 로컬 감지 결과들만을 모아서 OR 방식으로 데이터 융합을 하는데, 여기서 데이터 융합에 포함할 2차 노드들은 채널 가용성을 결정할 해당 2차 노드로부터 채널 가용성 판단 거리, $d_{decision}$ 내에 위치한 모든 노드들에 해당한다. 중계기를 사용하지 않은 기존의 단일 홉 WRAN 시스템의 경우는 기지국의 커버리지, R 이 바로 $d_{decision}$ 값에 해당되는 것이다. [그림 6]에 다중 홉 WRAN 시스템에서의 분산 감지의 예를 나타내었다.

$d_{decision}$ 값이 클수록 IU와 2차 노드 상호 간에 발생하는 간섭의 영향은 줄어들지만, 사용 가능한 주파수 자원의 양은 줄어들게 된다. 따라서 히든 노드에 의한 영향을 피하면서 가용한 주파수 자원을 최대화할 수 있는 $d_{decision}$ 값을 결정하는 것이 필요하다. $d_{decision}$ 값의 결정을 위해 [그림 7]과 같은 시나리오를 고려한다. [그림 1]에서 제안한 다중 홉 릴레이 시스템에서 발생할 수 있는 한 홉 간 최대거리가 WRAN 송신기와 수신기 사이의 거리, $d_{WRAN,max}$ 이며 이 값은 중계기를 배치하는 계층의 수에 따라 달라진다. 각 CPE까지의 전송이 이루어지는 홉 수는 CPE의 위치에 따라 고정되며, 기지국과 CPE 사이의 거리 역시 고정된 값이므로 계층의 수가 증가하여 홉 수가 늘어날수록 발생할 수 있는 홉 간 최대거리인 $d_{WRAN,max}$ 는 짧아지게 된다. 송신 2차 노드와 수신 2차 노드 각각의 위치를 중심으로 $d_{decision}$ 내에 위치하는 2차 노드들이 감지한 IU의 사용 주파수 밴드는 사용 가능 채널에서 제외되고, 이 영역 내에서는 2차 노드와 IU의 동일 채널 사용은 발생하지 않는다고 가정한다. 따라서 송

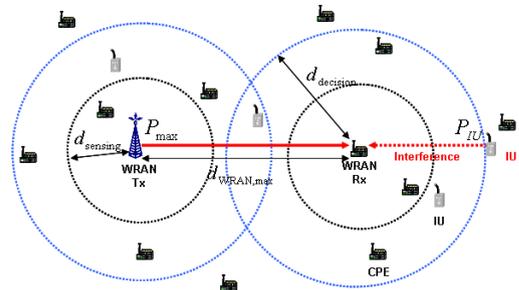


그림 7. 채널 가용성 판단 거리의 결정을 위한 시나리오

신 2차 노드의 전송 주파수와 동일한 주파수를 사용하는 IU와 수신 2차 노드의 최소 거리는 $d_{decision}$ 이 된다. 이러한 조건 하에서 수신 2차 노드에서의 SINR [dB]은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{WRAN} = 10 \log_{10} \frac{P_{\max}(d_{WRAN,\max})^{-\alpha}}{N_0 + cP_{IU}(d_{decision})^{-\alpha}} \quad (7)$$

여기서 N_0 는 수신 2차 노드에서의 잡음 전력 스펙트럼 밀도 (noise power spectrum density)이고, c 는 동일 채널을 사용하는 IU의 수이며 이 값은 IU의 발생 특성에 따라 달라지는데 본 논문에서는 $c=1$ 을 가정하였다. 수신 2차 노드로의 신뢰성 있는 전송을 위해서는 식 (8)의 조건을 만족해야 한다. 여기서 $\bar{\gamma}$ 는 수신 2차 노드의 최소 SINR 요구값 [dB] 이며 수신 노드의 물리적 특성에 따른 상수 값이다.

$$\gamma_{WRAN} \geq \bar{\gamma} \quad (8)$$

따라서 수신 2차 노드의 최소 SINR을 만족하는 최소 $d_{decision}$ 값은 $\gamma_{WRAN} = \bar{\gamma}$ 인 조건일 때 결정되는 값이 된다. [그림 1]과 같이 동심원 형태의 등간격으로 중계기를 배치한 시나리오에서 계층의 수와 각 계층에 속하는 중계기의 수가 고정되어 있을 때 $d_{WRAN,\max}$ 값은 이에 의존적으로 결정된다. $d_{WRAN,\max}$ 가 계층 수에 따른 변수이기 때문에 $d_{decision}$ 역시 계층의 수에 따라 다른 값을 가지게 되는데, 계층의 수가 커질수록 $d_{WRAN,\max}$ 가 줄어들기 때문에 $d_{decision}$ 도 감소하게 된다.

3.2 중계기와 전송 주파수 밴드의 선택 방법

각 CPE로의 데이터 전송에 사용될 중계기와 각 홉의 전송 주파수 밴드의 선택 과정은 채널 가용성 테이블 (channel availability table)의 구성, 라우팅 가능성 테이블 (routing availability table)을 이용한 라우팅 경로 결정, 그리고 홉 별 전송 주파수 밴드를 선택하는 순서로 이루어진다. 기존의 다중 홉 셀룰러 네트워크에서의 릴레이 노드 (relaying node)의 선택 기준으로는 홉 간의 물리적 거리, 경로 손실 등이 주로 사용되었다^[11]. 하지만 인지라디오 기반의 다중 홉 네트워크에서는 사용가능한 채널의 수가 고정되어 있지 않을 뿐만 아니라 시간과 위치에 따라 달라지기 때문에, 기존의 전통적인 셀룰러 네트워크와는 다른 사항들을 고려하여야 한다. 사용중이던 채널이 IU의 출현으로 인해 갑자기 사용이 불가능할 수 있으며, 각 중계기마다 사용 가능한 채널

의 수와 종류도 다르게 나타날 수 있다. 따라서 본 논문에서는 중계기와 전송 주파수 밴드의 선택을 각 홉 전송에서 사용가능한 주파수 밴드의 수에 따라 결정하는 방식을 제안한다.

3.2.1 채널 가용성 테이블의 구성

각 홉 별 전송 중계기와 전송 주파수 밴드의 선택을 위해 기지국은 가장 먼저 해당 CPE에 대하여 [그림 8]과 같은 채널 가용성 테이블을 구성한다. 채널 가용성 테이블에는 각 2차 노드들 (기지국과 해당 CPE의 후보 중계기, 그리고 CPE)의 채널 가용성 여부가 정리되어 있다. 하나의 CPE에 대한 각 계층의 후보 중계기 (candidate relay station)는 라우팅 경로의 수가 너무 커지는 것을 방지하기 위해서 기지국과 CPE를 이은 직선을 중심으로 좌우 일정 각도, θ 내에 위치하고 있는 중계기들로 제한된다. 여기에서 θ 는 한 개 계층 내에서 최대 몇 개까지의 후보 중계기를 허용할 지에 따라 적절한 값을 선택하면 된다. 기지국은 중계기와 CPE의 위치 정보를 바탕으로 결정한 각 CPE에 대한 후보 중계기 집합 정보를 미리 가지고 있다. 채널 가용성 테이블 상의 각 노드에서의 채널 가용성 여부는 각 노드의 로컬 감지 결과가 아니라 제안한 다중 홉 릴레이 WRAN 시스템에서의 분산 감지 방식을 적용하여 기지국이 최종적으로 가용성을 결정한 결과이다.

[그림 8]은 F_1 에서 F_N 까지 모두 N 개의 주파수 밴드를 시스템이 사용하는 경우 3홉 CPE인 CPE(3,1)에 대한 채널 가용성 테이블의 예를 나타낸 것이다. [그림 8]의 채널 가용성 테이블에서 해당 채널의 사용 가능 여부는 각각 o (사용 가능)와 x (사용 불가)로 표시되어 있다.

3.2.2 전송 중계기 (라우팅 경로)의 선택

선택된 하나의 CPE에 대한 채널 가용성 테이블이 구성되면, 그 결과로부터 기지국에서 목적지 CPE 사이에 존재하는 각 링크들의 가용성 여부를 결정할 수 있다. 따라서 각 홉 별로 사용 가능한 링크를 결정함으로써 다중 홉 전송이 가능한 라우팅 경로를 구성할 수가 있다. [그림 9]는 [그림 8]의

Source	1st tier candidate RSs				2nd tier candidate RSs			Destination
	RS(1,1)	RS(1,2)	RS(2,1)	RS(2,2)	RS(2,3)	CPE(3,1)		
$F_1 \dots F_N$	$F_1 \dots F_N$	$F_1 \dots F_N$	$F_1 \dots F_N$	$F_1 \dots F_N$	$F_1 \dots F_N$	$F_1 \dots F_N$	$F_1 \dots F_N$	
o ... o	o ... o	o ... o	x ... o	o ... o	x ... x	x ... o	o ... o	

그림 8. 3홉 CPE를 위한 채널 가용성 테이블의 예

Receiver		Source	1st tier candidate RSs		2nd tier candidate RSs			Destination
Transmitter	Source	BS	RS(1,1)	RS(1,2)	RS(2,1)	RS(2,2)	RS(2,3)	CPE(3,1)
	Source	BS	*	5	3			
1st tier candidate RSs	RS(1,1)		*		4	3	0	
	RS(1,2)			*	3	0	3	
2nd tier candidate RSs	RS(2,1)				*			5
	RS(2,2)					*		2
	RS(2,3)						*	3
Destination	CPE(3,1)							*

그림 9. 라우팅 가능성 테이블 (MLAF 방식)

채널 가용성 테이블로부터 라우팅 가능성 테이블을 구성한 예이며, 각 링크에서의 사용 가능한 주파수 밴드의 수가 표시된다. [그림 9]에서 *표시는 전송 노드와 수신 노드가 동일한 경우를 나타낸다. 특정한 전송 (transmitter) 노드와 수신 (receiver) 노드 쌍에서 채널 가용성 테이블의 결과로부터 한 개 이상의 공통된 사용 가능 주파수 밴드가 존재하는 경우 두 노드 사이의 링크를 사용한 라우팅이 가능하다. 두 노드 사이의 링크에서 사용 가능한 주파수 밴드의 수는 채널 가용성 테이블로부터 선택된 두 노드에서 공통으로 사용 가능한 주파수 밴드의 수로 결정된다. 최대 홉 수가 n 인 네트워크에서 i 번째 계층에 있는 후보 중계기의 수를 R_i , ($i=1, \dots, n-1$)라고 하면 발생 가능한 모든 라우팅 경로의 개수, $|RP_{total}|$ 은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$|RP_{total}| = \prod_{i=1}^{n-1} R_i \quad (9)$$

모든 후보 라우팅 경로들 중에서 사용이 가능한 라우팅 경로 (0인 값이 없는 경로)의 수를 $|RP_d|$ 라고 하면, 이 $|RP_d|$ 개의 경로들 중 각 홉에서 사용 가능한 주파수 밴드 수의 최소값이 최대인 (Maximum Least Available Frequency: MLAF) 경로를 선택한다. [그림 10]의 3홉 CPE에 대한 라우팅 경로 선택의 예에서 사용 가능한 주파수 밴드 수의 최소값이 4로써 최대가 되는 경로 1이 선택되었다. 사용 가능한 후보 경로의 번호를 r 이라 하고, 각 후보 경로의 각 홉에서 사용 가능한 주파수 밴드의 수를 $a_{r,i}$ ($i=1, \dots, n$)라고 하면 MLAF 방식의 경로 선택 기준은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$r_{select} = \arg \max_{r \in RP_d} (\min(a_{r,1}, a_{r,2}, \dots, a_{r,n})) \quad (10)$$

Path1:	BS	5	→	RS(1,1)	4	→	RS(2,1)	5	→	CPE(3,1)
Path2:	BS	5	→	RS(1,1)	3	→	RS(2,2)	2	→	CPE(3,1)
Path3:	BS	5	→	RS(1,1)	0	→	RS(2,3)	3	→	CPE(3,1)
Path4:	BS	3	→	RS(1,2)	3	→	RS(2,1)	5	→	CPE(3,1)
Path5:	BS	3	→	RS(1,2)	0	→	RS(2,2)	2	→	CPE(3,1)
Path6:	BS	3	→	RS(1,2)	3	→	RS(2,3)	3	→	CPE(3,1)

그림 10. MLAF 방식 선택의 예

3.2.3 전송 주파수 밴드의 선택

각 홉의 전송에 사용될 주파수의 선택은 선택된 경로의 각 홉의 사용가능한 주파수 밴드 중에서 할당 가능한 서브밴드의 크기가 가장 큰 주파수 밴드를 선택한다. 전송 주파수 밴드의 선택이 종료되면 선택된 주파수 밴드 내에서 각 CPE에게 요구되는 하향 링크 자원의 양 (또는 일정 크기의 자원)만큼 OFDMA 부채널 (subchannel)을 할당하게 되는데, 본 논문에서는 라운드 로빈 (Round robin) 스케줄링 방식을 사용하였다. 라운드 로빈 방식 이외에 기존에 연구된 여러 가지 OFDMA 시스템에서의 스케줄링과 부반송파 (subcarrier) 할당 알고리즘들의 적용도 가능하다^[12].

IV. 성능 분석

4.1 스펙트럼 이용효율의 수학적 해석

성능 분석을 위하여 시스템에서 정의된 전체 사용 주파수 밴드의 수가 N 이고, 셀 반경이 R 인 하나의 WRAN 시스템을 고려한다. IU들은 반경이 r_{IU} ($R \leq r_{IU} < R + d_{sensing}$)인 원형 영역 내에 유니폼한 분포로 발생되며, 각 IU들은 WRAN 시스템에서 사용하는 N 개의 주파수 밴드를 공유하여 사용한다. 주파수 사용의 우선권은 IU들에게 있으며, 스펙트럼 감지 결과 IU가 사용하지 않는 것으로 결정된 주파수 밴드들은 WRAN 시스템에 의해 모두 사용이 가능하다. 시간 영역의 어떤 프레임에서도 주파수를 사용 중인 전체 IU 수는 I 로 동일하고, 이 I 개의 IU들은 N 개의 주파수 밴드 중 하나를 랜덤하게 선택하며 IU들 간에는 동일 주파수 밴드의 선택이 가능하다. 따라서 각 프레임 사이의 IU의 주파수 밴드 사용 특성은 독립적으로 볼 수 있다. 이와

같은 특성을 가진 IU를 가정할 때 한 프레임에서 2차 노드가 사용 가능한 평균 주파수 밴드의 수를 계산할 수 있다. N 개의 주파수 밴드와 I 개의 IU가 존재하는 경우 m 개의 주파수 밴드가 사용가능한 확률을 $p_m(I, N)$ 이라고 하면, 평균 사용가능한 주파수 밴드의 수는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\overline{AF} = \sum_{j=1}^{N-1} j p_j(I, N). \quad (11)$$

여기서 m 개의 주파수 밴드가 사용가능한 확률, $p_m(I, N)$ 은 I 개의 IU들을 N 개의 주파수 밴드에 위치시킬 때 정확히 m 개의 주파수 밴드가 남을 확률로 볼 수 있으며, 이는 Feller의 점유 정리 (occupancy theorem)^[13]을 적용하여 구할 수 있다. 따라서 $p_m(I, N)$ 은 식 (12)와 같이 구해진다.

$$p_m(I, N) = \binom{N}{m} \sum_{j=0}^{N-m} (-1)^j \binom{N-m}{j} \left(1 - \frac{m+j}{N}\right)^I. \quad (12)$$

스펙트럼 이용효율을 전체 시스템 주파수 밴드 중에서 한 프레임 구간동안 2차 노드에 의해 사용된 주파수 밴드의 수로 정의하면, 평균 스펙트럼 이용효율, \overline{U} 는 식 (13)과 같이 표현될 수 있다.

$$\overline{U} = \frac{\overline{AF}}{N}. \quad (13)$$

식 (13)에서 구한 스펙트럼 이용효율은 다중 홉 릴레이 전송을 고려하지 않은 기존 WRAN 시스템에 대한 값이며, 다중 홉 릴레이 시스템의 경우에는 평균 사용가능한 주파수 밴드의 확률인 식 (12)에서 I 값이 변경되어야 한다. 다중 홉 릴레이 시스템의 경우 분산 감지를 통한 주파수 사용 가능성의 결정은 한 2차 노드를 중심으로 $d_{decision}$ 거리 내에 있는 2차 노드들의 로컬 감지 결과들의 데이터 융합을 통해서 이뤄진다. 반경 $d_{decision}$ 영역 내에 충분히 많은 2차 노드들이 존재한다면 이 2차 노드들이 실제 센싱한 면적들의 합은 $\pi(d_{decision} + d_{sensing})^2$ 로 확장될 수 있다. IU의 분포가 균일하기 때문에 전체 면적 대비 센싱한 면적 내에 존재하는 IU의 수, I_M 은 식 (14)와 같이 나타내어진다. 다중 홉 릴레이 WRAN 시스템의 경우는 한 노드를 중심으로 $d_{decision} + d_{sensing}$ 거리 내에 있는 I_M 개의 IU들이 선택하지 않은 주파수 밴드의 이용이 가능한 것이다.

$$I_M = \frac{(d_{decision} + d_{sensing})^2}{r_{IU}^2} I. \quad (14)$$

따라서 다중 홉 릴레이 WRAN 시스템의 한 노드에서 사용 가능한 평균 주파수 밴드의 수, \overline{AF}_M 과 평균 스펙트럼 이용효율, \overline{U}_M 은 각각 식 (15), (16)과 같이 표현된다.

$$\overline{AF}_M = \sum_{j=1}^{N-1} j p_j(I_M, N). \quad (15)$$

$$\overline{U}_M = \frac{\overline{AF}_M}{N}. \quad (16)$$

4.2 시뮬레이션 모델

본 논문의 시뮬레이션에서는 반경이 35 km인 원형 영역을 고려한다. 이 영역의 중앙에 하나의 IEEE 802.22 WRAN 기지국이 위치하고 있으며 기지국은 반지름, R 이 33 km 크기인 원형 영역을 커버한다. CPE는 기지국의 커버리지 영역, R 내에서 균일한 분포로 위치하고 있다. 중계기는 II장에서 설명했던 것과 같이 기지국을 동심원으로 둘러싸고 있는 계층 구조로 배치된다. 계층의 수, T 는 1부터 3까지 변화를 두었으며 각 계층 사이의 거리는 $R/(T+1)$ 이다. T 의 값에 따른 각 계층에 위치한 중계기의 수를 [표 1]에 정리하였다.

모든 노드는 전송과 스펙트럼 감지를 수행할 때 전방향 (omni-directional) 안테나를 사용한다고 가정하고, 전송 방식은 IEEE 802.22 표준의 OFDMA/TDD 방식을 따른다^[4]. 경로 손실 모델로 log-distance 경로 손실 모델을 가정하였으며^[14], 경로 손실 지수로는 3.3을 사용하였다. 기존의 단일 홉 IEEE 802.22 시스템과 제안한 다중 홉 릴레이 시스템의 전송 전력은 각각 4 W와 870 mW이다. 여기서 다중 홉 릴레이 시스템의 전송 전력은 II장에서 설명한 최대 전송 전력 결정 기준에 의해 계산된 값이다. 시뮬레이션에서 사용된 나머지 파라미터들을 [표 2]에 정리하였다. [표 2]에서 홉 별로 할당된 OFDMA 심볼 수는 식 (3)의 기준을 따라 결정되었 다.

표 1. 계층 수에 따른 계층 별 중계기의 수

계층의 수, T	RS의 수
$T = 1$	16 (1st tier RS)
$T = 2$	12 (1st tier RS) 16 (2nd tier RS)
$T = 3$	8 (1st tier RS) 12 (2nd tier RS) 16 (3rd tier RS)

본 논문에서는 IEEE 802.22 표준에서 고려하고 있는 IU의 종류 중에서 무선 마이크와 같이 낮은 송신 전력을 사용하는 시스템을 고려하였다. 시뮬레이션에서 고려하고 있는 무선 마이크 송신기 형태의 IU는 20mW의 낮은 전송 전력을 사용하며, 서비스 영역은 100m이다. 무선 마이크 송신기가 사용하는 주파수 대역은 시스템에서 고려하는 전체 TV 밴드 중에서 한 개의 6MHz 주파수 밴드를 랜덤하게 선택하고, 실제로 무선 마이크가 사용하는 대역 폭은 6 MHz 중 200 kHz이다. 따라서 서로 다른 무선 마이크 사이에는 동일한 6 MHz 주파수 밴드를 선택하는 것이 가능하다. IU의 발생 위치는 반지름이 35km인 시뮬레이션 영역 내에서 균일한 분포를 따른다. 한번 발생된 IU의 주파수 밴드 점유 시간은 평균이 30초인 지수 분포를 따르는 랜덤 변수로 생성된다. 한 프레임 구간 내에 존재하는 IU의 수는 일정하며, 이는 전체 시뮬레이션 시간 동안의 모든 프레임에서도 일정하다. IU의 전체 수는 일정하지만 IU의 위치와 사용 주파수 밴드는 계속적으로 변화하는 환경이다.

본 논문의 시뮬레이션에는 송신 노드와 수신 노드의 거리에 따라 각각 다른 변조 및 코딩 방식을 적용하였다^[5]. [표 3]은 전송 전력이 4W인 단일 홉 시스템과 전송 전력이 870 mW인 다중 홉 릴레이 시스템의 경우의 거리에 따른 변조 및 코딩 레벨을 나타낸다.

4.3 선택 방식에 따른 성능 비교

III장에서 제안한 다중 홉 릴레이 방법에서는 라우팅 경로 및 전송 주파수 밴드의 선택은 스펙트럼 감지 결과로부터 얻은 정보 중에서 각 홉에서 사용 가능한 주파수 밴드의 수에 따라 결정되었다. 본 절

표 2. 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
시스템 대역폭	6 MHz
FFT 크기	2048
데이터용 부반송파의 수	1536
부채널의 수	32
프레임 길이	10 msec
OFDMA 심볼 길이	308 μsec
하향 링크 버스트에 할당된 전체 OFDMA 심볼 수	15
각 홉 별로 할당된 OFDMA 심볼 수	10:5 ($T = 1$ 인 경우) 7:5:3 ($T = 2$ 인 경우) 6:4:3:2 ($T = 3$ 인 경우)

표 3. 거리(d)에 따른 변조 및 코딩 레벨

레벨	단일홉 경우, 단위: km	다중홉 경우, 단위: km	변조 및 코딩율	심볼당 정보비트의 수
1	$29 < d \leq 33$	$22 < d \leq 24$	QPSK, 1/2	1
2	$27 < d \leq 29$	$20 < d \leq 20$	QPSK, 3/4	1.5
3	$25 < d \leq 27$	$18 < d \leq 20$	16QAM, 1/2	2
4	$23 < d \leq 25$	$16 < d \leq 18$	16QAM, 3/4	3
5	$21 < d \leq 23$	$15 < d \leq 16$	64QAM, 2/3	4
6	$20 < d \leq 21$	$14 < d \leq 15$	64QAM, 3/4	4.5
7	$d \leq 20$	$d \leq 14$	64QAM, 5/6	5

에서는 제안한 MLAF 선택 방식을 랜덤 방식, 그리고 홉 간 거리에 따른 선택을 하는 Minimum Longest Hop (MLH) 방식과 시스템 수율 측면에서 비교한다. [그림 11]과 [그림 12]는 각각 4홉 시스템 ($T=3$)에서의 IU 수와 전체 주파수 밴드 수의 변화에 따른 세 가지 선택 방식의 시스템 수율 성능을 나타낸다.

[그림 11]에서 세 가지 선택 방식에 따른 성능의 차이는 IU의 수가 적은 경우에는 MLH가 더 좋은 시스템 수율 성능을 보이며, IU의 수가 증가함에 따라 MLAF의 성능이 더 증가함을 확인할 수 있다. 이것은 IU의 수가 적은 환경에서는 사용가능한 주파수 밴드의 수가 많기 때문에 주파수 선택에 의한 영

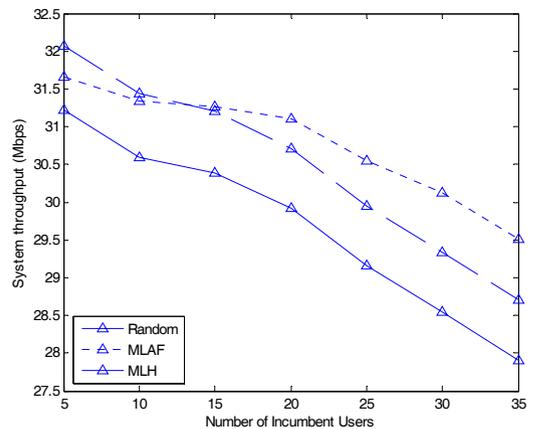


그림 11. IU 수의 변화에 따른 선택 방식별 시스템 수율 (전체 주파수 밴드 수 = 10)

향보다는 거리에 따른 선택으로 인해 더 높은 변조 및 코딩 레벨의 선택이 가능해짐으로써 더 높은 시스템 수율을 보장받을 수 있기 때문이다. 하지만 IU의 수가 증가할수록 MLAF 방식의 성능이 더 증가함을 볼 수 있는데, 이는 사용 가능한 주파수 밴드의 수가 줄어들며 따라 특정 CPE로의 전송에 사용 가능한 주파수 밴드가 제한되는 상황이 발생되며, 사용 가능한 양이 가장 적게 남은 주파수 밴드를 피하여 선택함으로써 주파수 밴드의 선택이 제한되어 있는 CPE의 자원 할당을 보장해 줄 수가 있기 때문이다. MLH 방식의 경우 IU 수가 15이상으로 증가하여 사용 가능한 주파수 밴드의 수가 줄어든 환경에서 시스템 전체적으로 할당 가능한 주파수 밴드가 남아 있더라도 특정 중계기나 CPE에게는 사용 불가능한 주파수 밴드가 되기 때문에 결국에는 자원을 할당받지 못하는 경우가 발생한다. [그림 12]의 전체 주파수 밴드 수의 변화에 따른 결과에서도 IU 수에 따른 시스템 수율 성능 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 사용 가능한 주파수 밴드의 여유가 많을 때는 MLH가 더 좋은 성능을 보이며, 사용 가능한 주파수 밴드의 수가 적은 조건에서는 MLAF 선택 방식이 더 좋은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. [그림 12]에서 주파수 밴드 수가 14 이상인 경우 MLAF 방식의 시스템 수율이 MLH 방식에 비하여 떨어지는 이유는 사용 가능한 주파수 밴드의 수가 충분히 많은 환경일 때 두 방식에서 각각 할당되는 자원의 양은 동일하므로 결과적으로 시스템 수율에 영향을 주는 것은 이미 할당된 자원의 질(quality)인 변조 및 코딩 레벨이 되기 때문이다.

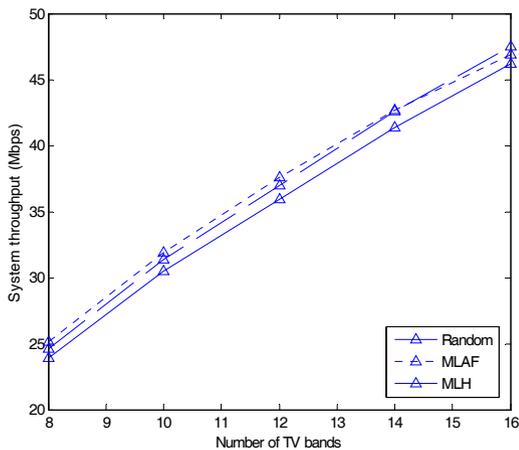


그림 12. 주파수 밴드 수의 변화에 따른 선택 방식별 시스템 수율 (전체 IU 수 = 20)

4.4 기존 방식과의 성능 비교

다중 홉 릴레이 방식에서는 낮은 전송 전력을 사용한 통신이 가능하고, 이 점은 인지라디오 환경에서 2차 사용자가 IU에게 줄 수 있는 해로운 간섭을 감소시킬 수 있다. 따라서 전송에 사용할 수 있는 주파수 밴드의 선택의 폭이 넓어지게 되어 주파수 사용의 효율을 더 높일 수 있는 것이다. 인지라디오 환경에서 다중 홉 릴레이 방식을 사용함으로써 얻을 수 있는 이득은 바로 이러한 특성으로부터 나오게 되는 것이다. 그러나 다중 홉 릴레이 방식은 홉 간 전송에 있어서 발생하는 간섭을 방지하기 위해 전체 주파수 자원을 각 홉 별로 분할하여 사용할 필요가 있다. 따라서 성능 분석에 있어서 주파수 공유로부터 얻는 이득과 주파수 자원을 분할함으로써 생기는 손실 사이의 교환 관계가 함께 고려되어야 한다. 본 절에서는 기존의 단일 홉 WRAN 시스템과 중계기를 도입한 다중 홉 릴레이 시스템을 스펙트럼 이용효율과 시스템 수율 측면에서 비교한다.

스펙트럼 이용효율을 WRAN 기지국이 한 프레임 당 전송에 사용한 주파수 밴드와 전체 주파수 밴드의 비로 정의하였고, 전체 시뮬레이션 시간 동안의 평균을 계산하였다. 시뮬레이션 조건으로 CPE의 수는 1000, 전체 주파수 밴드의 수는 10으로 설정하였다. IU 수의 증가에 따른 스펙트럼 이용효율 측면에서의 성능을 [그림 13]에 나타내었다. [그림 13]에서 실선은 시뮬레이션 결과를 점선은 각각 식 (13)과 식 (16)의 수학적 해석에 따른 결과이다. 중계기를 사용하지 않았을 때보다 중계기를 사용하였을 때의 스펙트럼 이용효율이 더 높으며, 중계기를 배치시키는 계층의 수, T 가 늘어남에 따라 스펙트

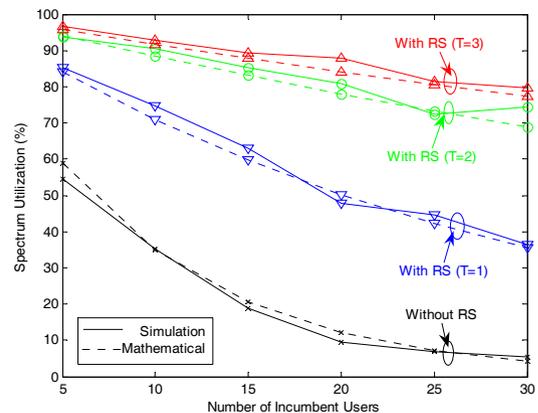


그림 13. IU 수의 변화에 따른 스펙트럼 이용효율

럼 이용효율도 높아지는 것을 확인할 수 있다. 계층의 수가 증가함에 따라 송수신 노드 사이의 최대 거리가 줄어들고, 따라서 $d_{decision}$ 값이 감소하기 때문에 사용 가능한 주파수 밴드의 수가 증가하게 되는 것이다. 스펙트럼 이용효율 측면에서 본 성능은 단순히 전송에 사용된 주파수 밴드의 수만 비교된 것이며, 다중 홉 방식에서의 홉 분배에 따른 자원 분할의 영향은 고려되지 않았다.

[그림 14]는 CPE 수의 변화에 따른 시스템 수율을 나타낸다. 이때의 IU의 수는 20, 전체 주파수 밴드의 수는 10이다. 다중 홉 릴레이 방식을 적용한 인지라디오 시스템의 수율이 중계기를 사용하지 않은 단일 홉 인지라디오 시스템보다 모두 높게 나온 것을 확인할 수 있다. 이것은 셀 내에서의 주파수 재사용이 가능함으로 인해 사용 가능 주파수 밴드의 수가 증가하였기 때문이며, 이로부터의 이득이 다중 홉 시스템에서의 주파수 자원 분할에서 생기는 손실보다 더 크음을 의미한다. CPE의 수가 많은 경우 (600개 이상) 3 홉 시스템 ($T=2$)이 4 홉 시스템 ($T=3$)에 비해 더 좋은 성능을 나타냄을 보여주는데, 이것은 시스템의 최대 홉 수가 증가함에 따라 사용 가능 주파수 밴드의 증가로부터 얻는 이득보다 홉 간 주파수 자원 분할로 인한 손실이 더 급격히 발생하기 때문이다. CPE의 수가 600 이하에서 3 홉 시스템과 4 홉 시스템의 시스템 수율이 동일하게 나타나는 것은 두 시스템 모두가 시뮬레이션 상에서 발생된 CPE로 전달할 트래픽을 모두 처리하였기 때문이다. 이 결과로부터 제안한 다중 홉 릴레이 시스템에서 최대의 시스템 수율 성능을 얻기 위한 적절한 최대 홉 수는 3임을 알 수 있다.

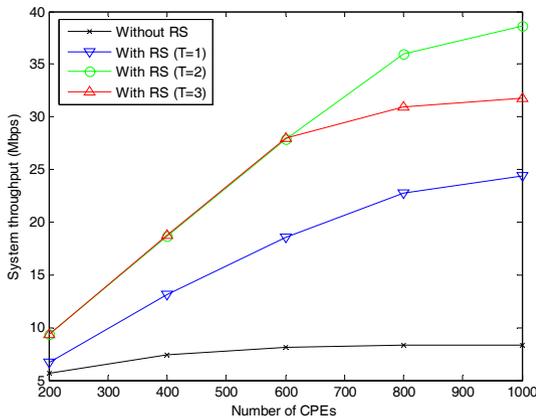


그림 14. CPE 수의 변화에 따른 시스템 수율

[그림 15]는 IU의 수에 따른 시스템 수율을 나타낸다. 이때의 시뮬레이션 조건은 CPE의 수는 1000, 전체 주파수 밴드의 수는 10이다. IU의 수가 증가함에 따라 중계기를 사용했을 때와 사용하지 않은 두 경우 모두 시스템 수율이 감소한다. IU 수의 증가는 간섭의 영향을 고려해야 하는 주파수 밴드의 수 역시 증가함을 의미하고, 따라서 사용 가능한 채널의 수가 감소하기 때문에 시스템 수율의 감소가 발생한다. 중계기를 사용하지 않은 경우의 시스템 수율이 중계기를 사용한 시스템들보다 IU의 증가에 따라 더 급격하게 감소하는 사실 또한 확인할 수 있는데, 이것은 중계기를 사용한 시스템의 경우 IU에게 간섭을 주지 않으면서 셀 내의 다른 영역에서 주파수의 재사용이 가능하기 때문이다. 반면에 IU의 수가 7 이하로 적은 환경일 때는 중계기를 사용하지 않은 시스템의 성능이 2홉 시스템 ($T=1$)보다 더 좋게 나타난다. 이것은 IU의 수가 사용 가능한 채널의 수보다 더 적은 경우

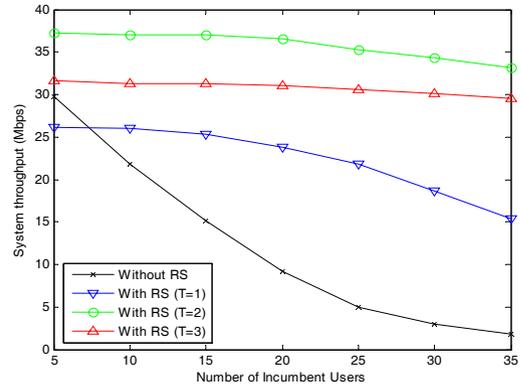


그림 15. IU 수의 변화에 따른 시스템 수율

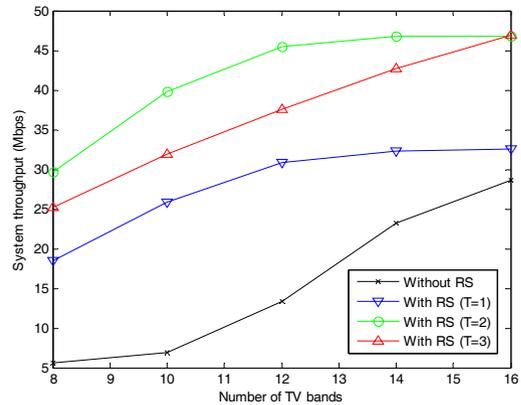


그림 16. 주파수 밴드 수의 변화에 따른 시스템 수율

중계기를 사용한 다중 홉 시스템을 중계기가 없는 단일 홉 시스템과 비교했을 때 주파수 재사용으로부터 얻을 수 있는 이득이 중계기를 사용했을 때 발생하는 주파수 자원 분할로 인한 손실을 충분히 보상해주지 못하기 때문이다.

[그림 16]은 전체 주파수 밴드 수에 따른 시스템 수율을 나타낸다. 이때의 시뮬레이션 조건은 CPE의 수는 1000, IU의 수는 20이다. 전체 주파수 밴드의 수가 증가함에 따라 사용가능 채널이 증가하기 때문에 기존 단일 홉 시스템과 다중 홉 릴레이 시스템 모두 시스템 수율이 증가하며, 홉 별 자원 분할의 성능 감소가 없는 기존 시스템의 증가율이 더 높게 나타난다. 그리고 홉 별 자원 분할로 인한 성능 감소의 영향은 전체 주파수 밴드의 수가 작을 때 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.22 기반의 Cognitive Radio 시스템에서 중계기의 활용을 위한 다중 홉 릴레이 방식을 제안하였다. 다중 홉 릴레이 시스템에서 분산 감지의 적용 시 데이터 융합에 포함시킬 2차 노드의 범위인 채널 가용성 판단 거리를 정의하였으며, 이를 계산할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 제안한 다중 홉 릴레이 시스템에서의 분산 감지 기반의 가용 채널 결정 방식을 활용하는 집중형 무선 자원 할당 방법을 제안하였으며, 이로부터 시스템 성능 향상을 가능케 하는 라우팅 경로 및 주파수 밴드 할당이 가능하였다. 성능 분석 결과로부터 다중 홉 릴레이 인지라디오 시스템에서 라우팅 경로와 주파수 밴드의 선택 시에 기존의 셀룰러 기반의 네트워크에서 주로 고려했던 거리 및 경로 손실과 같은 요소뿐만 아니라 스펙트럼 감지 결과로부터 얻을 수 있는 각 노드의 가용 채널의 수 또한 중요한 고려 사항이 되어야함을 알 수 있다. 또한 중계기를 활용한 다중 홉 릴레이 시스템이 기존의 단일 홉 인지라디오 시스템에 비해 스펙트럼 이용효율과 시스템 수율 측면에서 더 좋은 성능을 나타내는 것을 보였다. 이러한 결과는 셀 내 주파수 재사용으로부터 얻는 이득을 홉 간 주파수 자원 분할로 인한 손실보다 높도록 중계기의 배치와 시스템의 최대 홉 수를 적절하게 조절함으로써 인지라디오 환경에서 다중 홉 릴레이 전송 방식이 성능 향상을 위한 적합한 방식이 될 수 있음을 나타낸다.

참 고 문 헌

- [1] Federal Communications Commission (FCC), "Notice of proposed rule making and order," ET Docket No.03-222, December 2003.
- [2] 강희조, "4세대 통신을 위한 Cognitive Radio Spectrum 활용방안 연구," 정보통신연구진흥원, 2006.
- [3] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey," *Computer Networks*, Vol.50, No.13, May 2006.
- [4] IEEE P802.22/D0.2, *Draft Standard for Wireless Regional Area Networks Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands*, November 2006.
- [5] C. R. Stevenson, C. Corderio, and G. Chouinard, "Functional Requirements for the 802.22 WRAN Standard," *IEEE 802.22-05/0007r48*, November 2006.
- [6] IST-2003-507581 WINNER D3.2 ver. 1.1, "Description of identified new relay based radio network deployment concepts and first assessment by comparison against benchmarks of well known deployment concepts using enhanced radio interface technologies," February 2005.
- [7] J. Cho and Z. J. Haas, "On the throughput enhancement of the downstream channel in cellular radio networks through multihop relaying," *IEEE Journ. Select. Areas Commun.*, Vol.22, No.7, September 2004.
- [8] S. Krishnamurthy, M. Thoppian, S. Venkatesan and R. Prakash, "Control channel based MAC-layer configuration, routing and situation awareness for cognitive radio networks," in *Proc. IEEE MILCOM 2005*, October 2005.
- [9] R. Pabst, et al., "Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio," *IEEE Commun. Magn.*, Vol.42, No.9, September 2004.
- [10] M. Okuda, H. Fujita, and J. Suga, "Relaying methods proposal for 802.16j," *IEEE*

C802.16j-06/132, November 2006.

- [11] V. Steng, H. Yanikomeroglu, and D. D. Falconer, "Relayer Selection Strategies in Cellular Networks with Peer-to-Peer Relaying," in *Proc. IEEE VTC 2003-fall*, October 2006.
- [12] S. H. Hwang and H. S. Cho, "A novel channel allocation and scheduling algorithm in OFDMA system," in *Proc. IEEE VTC 2006-fall*, September 2006.
- [13] W. Feller, *An Introduction to Probability Theory and its Applications*, Vol.1, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc, 1957, pp. 101-102.
- [14] T. S. Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice Hall, 2002, pp. 138-139.
- [15] G. Chouinard, TPC and Adaptive Modulation Profile, *IEEE 80.22-04/0268r0*, Dec. 2006.

이 동 규 (Dong-Kyu Lee) 준회원



2006년 2월 경북대학교 전자
전기컴퓨터학부 공학사
2008년 2월 경북대학교 대학
원 전자공학과 공학석사
2008년 3월~현재 Innowireless
연구원
<관심분야> 이동통신시스템, C
ognitive radio, Mobile WiMAX

신 정 채 (Jungchae Shin) 준회원



2002년 8월 경북대학교 전자
전기공학부 공학사
2004년 8월 경북대학교 대학
원 정보통신학과 공학석사
2004년 9월~현재 경북대학교
대학원 전자공학과 박사과정
<관심분야> 무선인지 기술, 멀
티홉 릴레이, Mobile WiMAX

임 은 택 (Euntaek Lim) 정회원



1996년 한국과학기술원 공학사
1998년 한국과학기술원 산업
공학과 공학석사
2003년 한국과학기술원 산업공
학과 공학박사
2003년~현재 삼성전자 통신연
구소 책임연구원

<관심분야> Spectrum Engineering 및 Technology,
표준 전략 등

이 현 우 (Hyeonwoo Lee) 정회원



1985년 서울대학교 공학사
1989년 서강대학교 경영학석사
1994년 한국과학기술원 전자공
학석사
2003년 한국과학기술원 전기전
자공학박사
1984년~현재 삼성전자 통신연

구소 수석 연구원

2005년~현재 3GPP TSG-RAN 부의장

2008년~현재 TTA IMT-Adv. PG의장

<관심분야> 3GPP LTE, IEEE WiMAX, IMT-Adv.
국제 표준화

조 호 신 (Ho-Shin Cho) 중신회원



1992년 2월 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 졸업 공학사
1994년 2월 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 졸업 공학
석사

1999년 2월 한국과학기술원 전기
및 전자공학과 졸업 공학박사

1999년 3월~2001년 2월 한국전자통신연구원 선임
연구원

2001년 3월~2003년 2월 한국항공대학교 전자정보
통신컴퓨터공학부 전임강사

2003년 3월~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부
부교수

<관심분야> 이동통신시스템, 무선자원관리, 트래픽
제어, 수중음향센서네트웍