

다중 홉 무선 인지 시스템에서 효과적인 무선 자원 할당

정회원 신 정 채*, 준회원 민 승 화**, 종신회원 조 호 신***, 장 윤 선**

Efficient Radio Resource Allocation for Cognitive Radio Based Multi-hop Systems

Jung-Chae Shin* *Regular Member*, Seung-Hwa Min** *Associate Member*
Ho-Shin Cho***, Youn-Seon Jang** *Lifelong Members*

요 약

본 논문에서는 무선 인지(Cognitive Radio, CR) 기반의 다중 홉 릴레이 전송 환경에서 링크별 가용 주파수 자원을 할당하는 문제를 다룬다. 경로 탐색, 채널 센싱 및 판단, 자원 할당의 3단계 시나리오를 제시하고 컬러 다중 그래프 모델과 시분할 된 프레임 구조를 토대로 서비스 받는 사용자의 수를 최대화하는 최적화 문제로 수학적 모델링을 한다. 이에 대한 해법으로 단말 선택, 릴레이 및 경로 선택 그리고 각 홉별 주파수 자원 선택의 3단계로 구성되는 부 최적화된 종합적 자원관리 방안을 제시한다. 모의실험에서는 홉별 시분할 된 프레임 구조를 가지는 셀룰러 기반 2차 시스템을 고려하였으며, 다중 홉 통신과 단일 홉 통신 간의 성능을 비교를 통해 무선 인지 시스템에서 다중 홉 통신의 필요성을 보였다. 또한 다중 홉 통신 가운데 가장 우수한 홉 수와 그 환경에 대해 살펴보았다.

Key Words : Cognitive Radio System, Multi-hop Relay System, Spectrum Management, Resource Management

ABSTRACT

In this paper, a radio resource allocation scheme for a multi-hop relay transmission in cognitive radio (CR) system is proposed to support the employment of relay nodes in IEEE 802.22 standard for wireless regional area network (WRAN). An optimization problem is formulated to maximize the number of serving secondary users (SUs) under system constraints such as time-divided frame structure for multiplexing and a single resource-unit to every relay-hop. However, due to mathematical complexity, the optimization problem is solved with a sub-optimal manner instead, which takes three steps in the order of user selection, relay/path selection, and frequency selection. In the numerical analysis, this proposed solution is evaluated in terms of service rate denoting as the ratio of the number of serving SUs to the number of service-requesting SUs. Simulation results show the condition of adopting multi-hop relay and the optimum number of relaying hops by comparing with the performance of 1-hop system.

※ 이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2011-0003735)

* (주)한화/화약 구미사업장 개발부(jcshin@hanwha.co.kr),

** 충남대학교 전자공학과 차세대통신시스템 연구실(shmin88, jangys@cnu.ac.kr),

*** 경북대학교 전자공학부 이동통신 연구실(hscho@ee.knu.ac.kr)

논문번호 : KICS2012-02-053, 접수일자 : 2012년 2월 8일, 최종논문접수일자 : 2012년 4월 24일

I. 서 론

전파 자원의 이용 효율을 극대화하는 방안으로 무선 인지 (Cognitive radio, CR) 기술이 주목 받고 있다¹⁻³⁾. CR 기술은 소프트웨어 정의 라디오 (Software defined radio, SDR)⁴⁾ 기술을 기반으로 비면허 사용자인 2차 사용자 (Secondary user, SU or Cognitive user, CU)가 주파수 스펙트럼을 시간적, 공간적으로 측정하여 사용하지 않는 주파수를 감지한 후, 이를 바탕으로 면허 사용자인 1차 사용자 (Primary user, PU or Incumbent user, IU)에 장애를 유발하지 않는 범위에서 통신 할 수 있는 기술이다. 무선 인지 기술에 관한 연구로는 1차 사용자의 보호를 위한 2차 사용자의 주기적 스펙트럼 센싱 (Spectrum sensing) 과정, 2차 사용자가 점유 중인 대역에 1차 사용자가 사용을 개시하는 경우 운용 대역을 타 주파수로 옮기는 스펙트럼 핸드오버 (Spectrum handover, SH)과정 등이 활발히 진행 중에 있다^{5,6)}.

한편, 릴레이 혹은 중계국 (Relay station, RS)을 활용한 다중홉 전송 기술은 데이터 처리율 향상과 기지국의 서비스 영역 (Service coverage) 확대를 위해 이동통신 시스템에 도입된 기술이다. 다수의 지능화된 릴레이를 거쳐 통신하는 이른바 다중 홉 (Multi-hop) 릴레이 기술은 서비스 품질뿐만 아니라 기지국 증설 비용도 낮출 수 있어 차세대 이동통신 시스템의 빠른 구축에도 도움을 줄 것으로 기대된다. 릴레이 관련 기술로 릴레이 채널에 대한 분석, 릴레이 프레임 구조, 협력형 릴레이 사용 그리고 직교 주파수 분할 다중 접속 (Orthogonal frequency division multiple access, OFDMA) 환경에서 릴레이 도입 시 자원 할당 등이 있으며 현재 많은 연구가 진행되고 있다⁷⁻¹⁵⁾.

릴레이 통신의 장점 중 하나는 장거리 통신을 위해 고전력으로 전송했던 단일 홉 통신에 비해 각 홉마다 단거리를 저전력으로 전송할 수 있다는 점이다. 이 점을 이용하여 다중 홉 릴레이 전송이 CR 기술에 접목된다면 1차 사용자에게 주는 간섭을 줄임으로써 더 많은 2차 시스템이 1차 시스템과 공존할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 릴레이 도입으로 저전력 통신이 가능한 경우 1차 사용자에게 할당되었으나 사용치 않은 스펙트럼 홀 (Spectrum hole)¹¹⁾의 지역별 편차도 더욱 커지게 되므로 각 링크별 가용 주파수 자원을 할당하는 문제는 다중 홉 무선 인지 시스템에서 더욱 중요하다. 그럼에도 불

구하고, CR 기반의 다중 홉 릴레이 전송 환경에 대한 연구가 국내외적으로 미흡한 상황이다^{[16]-[22]}.

본 논문에서는 CR 기반의 다중 홉 릴레이 전송 환경에서 링크별 가용 주파수 자원을 할당하는 문제를 다룬다. 경로 탐색, 채널 센싱 및 판단, 자원 할당의 3단계 시나리오를 제시하고 컬러 다중 그래프 모델과 시분할된 프레임 구조를 토대로 서비스 받는 사용자의 수를 최대화하는 최적화 문제로 수학적 모델링을 한다. 이에 대한 해법으로 단말 선택, 릴레이 및 경로 선택 그리고 각 홉별 주파수 자원 선택의 3단계로 구성되는 부 최적화된 종합적 자원관리 방안을 제시한다. 모의실험에서는 홉별 시분할된 프레임 구조를 가지는 셀룰러 기반 2차 시스템을 고려하였으며, 다중 홉 통신과 단일 홉 통신 간의 성능을 비교를 통해 무선 인지 시스템에서 다중 홉 통신의 필요성을 보였다. 또한 다중 홉 통신 가운데 가장 우수한 홉 수와 그 환경에 대해 살펴보았다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 2차 시스템은 기지국과 릴레이 그리고 다수의 단말이 <그림1>과 같이 구성되며 고정된 위치를 가진다. 기지국을 중심으로 동심원 상에 다수의 릴레이가 등간격으로 배치된다. 셀을 편의상 기지국으로부터의 동일 거리 영역인 티어 (Tier)로 구분하고 각 티어간 거리는 $D(=D_R/H)$ 로 동일하다. 여기서 D_R 과 H 는 각각 셀 반경과 셀 내 티어 개수를 나타낸다. 기지국을 포함한 릴레이 집합을 R 이라고 하고, 셀 중심에서부터 시작하여 h 번째 티어에 속한 릴레이 집합을 R_h 라 하며 ($h=0,1,\dots,H$) 이 중 j 번째 릴레이를 $R_{h,j}$ 라고 정의한다($j=1,\dots,|R_h$). 특히, $R_{0,1}$ 은 기지국을 나타낸다. 셀 내에 균일하게 분포된 단말의 집합 M 중 i 번째 단말을 M_i 라 하고 M_i 가 필요로 하는 홉의 수는 다음과 같이 정의한다.

$$H_i = \left\lceil \frac{D_{M_i}^{R_{0,1}}}{D} \right\rceil, i=1,\dots,|M| \quad (1)$$

여기서 D_Y^X 는 노드 X 와 노드 Y 간의 거리를 나타내며 $\lceil x \rceil$ 는 x 보다 크거나 같은 최소의 정수를 나타낸다. 단말의 위치에 따라 홉 수는 H_i 로 고정되어 있으며 $H_i=1$ 의 경우 기지국과 직접 통신한다. 그 외의 단말은 반드시 1개의 경로로 이루어

진 $H-1$ 개의 릴레이 링크와 1개의 접속 링크를 통해 통신한다. 또한, 동일 티어 상의 릴레이 간 전송은 없으며 단말 간에는 직접 통신을 할 수 없고 필요한 경우 기지국을 통해서만 통신하는 중앙 집중형을 가정한다^[32].

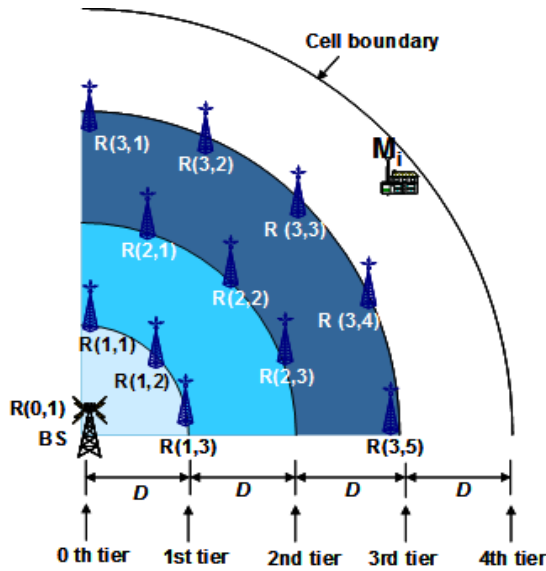


그림 1. 다중 홉 기반의 2차 시스템의 셀 구성 (H=4)
Fig. 1. Configuration of secondary system based on multi-hop (H=4)

<그림2>와 같이 각 주파수 채널별 하나의 프레임은 T 개의 타임슬롯 (Timeslot)으로 구성된다. 홉간 무선 자원은 타임슬롯을 단위로 시분할된다고 가정하며 각 홉에 할당된 타임슬롯의 개수를 $T_h (h=1, \dots, H, T = \sum_{h=1}^H T_h)$ 라 부르기로 한다. 각 단말에게 자원 할당 시 1개의 주파수 채널과 1개의 타임슬롯으로 이루어진 자원 단위(Resource unit, RU)를 단위로 할당하며 각 사용자 당 1개씩의 자원 단위를 필요로 한다고 가정한다. <그림2>에서처럼 3홉이 필요한 사용자($H_i=3$)의 경우 각 구간마다 1개의 자원 단위를 할당해야한다. 자원 단위를 시간 축과 주파수 채널을 인덱스로 하여 나타내면 임의의 프레임 내의 (t,k) 는 t 번째 타임슬롯($t=1, \dots, T$)과 k 번째 주파수 채널($k=1, \dots, K$)의 조합으로 구성된 자원 단위를 말한다.

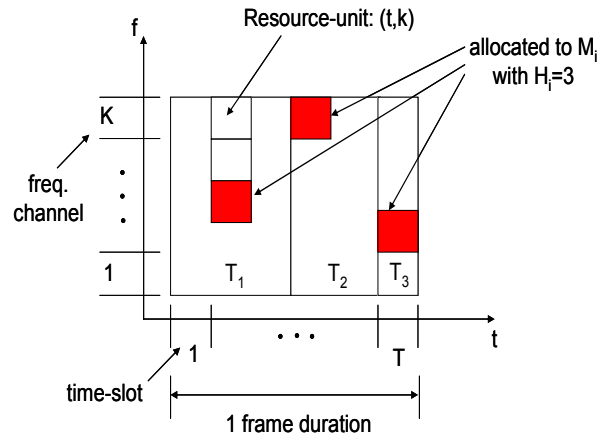


그림 2. 타임슬롯을 단위로 시분할된 프레임 구조와 자원 단위
Fig. 2. Frame structure and resource unit per time slot

III. 문제 정의

3.1. 경로 탐색

단말 M_i 로부터 기지국 $R_{0,1}$ 로의 경로 탐색 시, 각 홉별 R_h 와 가용 주파수 자원을 모두 고려하게 되면 그 경우의 수가 많아져 탐색 시간이 매우 커질 수 있다. 이를 해결하기 위해 탐색의 대상이 되는 경로 수를 사전에 줄이는 과정이 필요하다. 여기에서는 모바일 애드-hoc 네트워크 (Mobile ad-hoc network, MANET)에서 사용하는 거리 기반 플루딩 (Distance-based flooding) 방식^[23]을 이용한다. <그림3>처럼 먼저, 단말 M_i 가 경로 탐색용 프로브 (Probe) 패킷을 전송하면 단말로부터 거리 임계치 (D_{th}) 내에 존재하는 릴레이들이 수신된 프로브를 플루딩 방식으로 전달한다. 이때 프로브 패킷에는 릴레이 자신의 정보를 추가하여 다음 노드에게 전달한다. 기지국에 도착될 때까지 여러 홉을 거쳐 전달된 프로브 패킷들을 모아 이들 가운데 최소 홉수로 전달된 경로만을 후보 경로에 포함시킨다. 셀 전체에 프로브 패킷이 영구히 떠도는 것을 막기 위해 본 예제에서는 TTL (Time to live) 값을 3으로 지정하고 재전송될 때마다 1씩 감소시킨다. 기지국이 수신한 프로브 패킷 중 TTL=1인 프로브 패킷을 최초로 수신했기 때문에 TTL이 1보다 작은 프로브 패킷은 기지국이 수신하더라도 모두 폐기한다.

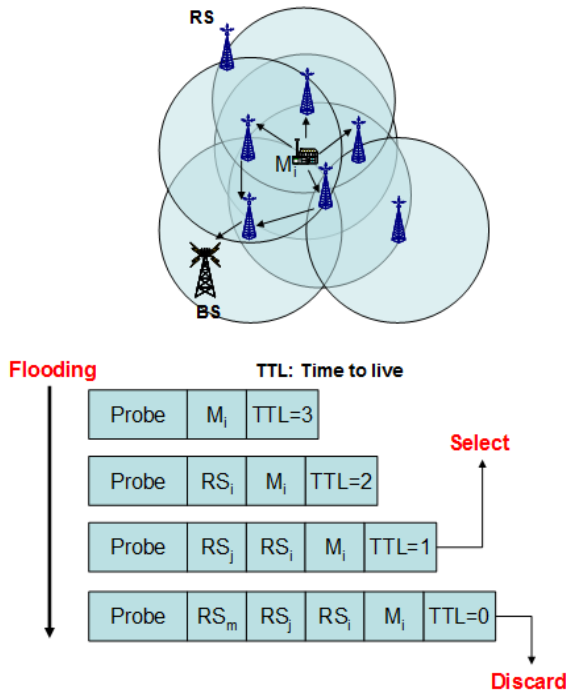


그림 3. 경로 탐색을 위한 거리 기반 플로딩 방식의 예
Fig. 3. Flooding scheme for path navigation based on distance

또한 TTL이 0보다 작은 프로브 패킷을 수신한 경우 노드들은 이를 플루딩하지 않고 폐기한다. 이러한 경로 탐색 과정은 주기적 혹은 비주기적으로 일어날 수 있다.

3.2. 채널 센싱 및 판단

1차 사용자의 채널 점유 상태에 따라 2차 사용자의 채널 가용 여부가 결정되므로 2차 시스템은 1차 사용자의 주파수 대역별 사용 유무를 판단할 수 있어야 하며 이를 위해 채널 센싱을 수행한다. 기지국을 포함하여 모든 릴레이와 단말은 동기화된 채널 센싱을 수행하며 채널 센싱은 휴지 구간 (Quiet period) 동안 이루어진다^[26]. 이 구간에서 모든 노드들은 데이터 전송을 중단하며 현재 사용 중이던 주파수 대역뿐만 아니라 후보 주파수 전체에 대해 센싱하는 것으로 가정한다. 채널 센싱에 사용되는 방법^[5]은 정합필터 거출 방식, 에너지 검출 방식, cyclostationary 방식 등 여러 가지가 있을 수 있으나, 본 논문에서는 계산의 복잡도가 낮고 가장 간단한 형태인 에너지 검출 방식을 사용하며 채널 센싱의 결과 측정된 에너지 크기가 임계치(γ) 이하인 경우에만 사용 가능한 것으로 가정한다.

해당 노드의 각 주파수별 사용 가능 여부를 주파

수 가용 행렬로 다음과 같이 정의하면

$$Y = \{y(i, k)\}, i \in M+R, k=1, \dots, K \quad (2)$$

로 쓸 수 있고 여기에서

$$y(i, k) = \begin{cases} 1, & \text{노드 } i \text{가 주파수 채널 } k \text{를 사용할 수 있는 경우} \\ 0, & \text{노드 } i \text{가 주파수 채널 } k \text{를 사용할 수 없는 경우} \end{cases}$$

이다.

3.3. 자원 할당

<그림2>의 2차원 프레임 구조에서 자원 할당 지시자 행렬 (Indicator matrix)을 다음과 같이 정의하면

$$Z = \{z(i, t, k)\}, M_i \in M, t=1, \dots, T, k=1, \dots, K \quad (3)$$

로 쓸 수 있고 여기에서

$$z(i, t, k) = \begin{cases} 1, & \text{자원단위 } (t, k) \text{가 } M_i \text{에게 할당된 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$$

이다. 무선 자원의 사용율을 최대화하기 위해서는 릴레이 및 단말 배치, 링크 가용 여부, 주파수 가용 여부 그리고 타임슬롯을 단위로 홉 간 (Inter-hop) 시분할된 프레임 등을 종합적으로 고려하여 다음 식을 만족하도록 해야 한다.

$$\text{maximize } \sum_{i=1}^{|M|} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z(i, t, k) \quad (4)$$

본 문제는 다음의 제약 조건으로 인해 가장 많은 수의 경로 즉 end-to-end 링크의 수를 찾는 것과 같은 문제가 된다.

- C1) 주어진 경로 그래프 P_i 에서 하나의 경로만 선택 가능하다. 여기서 P_i 는 M_i 의 경로 탐색 결과인 가용 경로 집합을 나타낸다.
- C2) 각 M_i 에 대해 각 홉 당 단지 1개의 자원 단위만 필요하며 이를 만족 시 성공적인 통신 서비스를 받는다고 가정한다. 따라서, 단말 M_i 에게 서비스하기 위해서는 반드시 H_i 개의 자원이 필요하므로 다음을 만족시켜야 한다.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z(i, t, k) \in \{0, H_i\}, \quad (5)$$

여기서 '0'인 경우는 자원 할당이 불가능한 경우를 나타낸다.

C3) 사용자는 셀 내에 균일하게 분포하며 시분할된 홉간 무선 자원의 구분은 사용자 분포를 따른다.

이러한 자원할당에 관한 문제는 NP-Hard 임이 알려져 있으므로 최적의 알고리즘을 찾기는 매우 어렵다^[16,24,25]. 따라서, 본 논문에서는 부최적화(Sub-optimal) 방법으로 자원할당 방식을 제안한다.

IV. 제안하는 자원할당 방식

식 (4)에서 알 수 있듯이 자원 할당이 완성되기 위해서는 다음 3개 항목, 즉 단말 노드와 릴레이로 이루어진 경로 그리고 각 홉 당 주파수의 조합이 결정되어야 한다. 본 조합 문제는 모든 경우를 고려하여 최적 조합을 찾아야하나 많은 시간과 노력이 필요하다. 제안 방식에서는 자원 이용율을 높이기 위해 먼저 단말 노드를 찾고 나머지 릴레이 및 경로 그리고 주파수를 선택하는 순차적(Sequential) 문제 해결 방식으로 접근한다.

4.1. 단말 선택

단말 선택은 가능한 경로 수가 가장 적은 단말을 우선시한다. 가장 간단한 예로 $H_i=1$ 인 단말 M_1 과 M_2 에 있어서 가능한 주파수가 각각 $\{F_1\}$ 과 $\{F_1, F_2\}$ 인 경우를 들어본다. M_1, M_2 의 순으로 자원을 할당하면 $\{F_1\}, \{F_2\}$ 를 각각 선택하므로 두 단말 모두 자원을 할당받게 된다. 하지만 M_2, M_1 의 순으로 자원을 선택하는 경우 $\{F_2\}, \{F_1\}$ 혹은 $\{F_1\}, \emptyset$ 의 경우가 발생할 수 있다. 첫 번째 경우에도 두 단말 모두 자원할당이 이루어지므로 문제가 없으나 두 번째 경우에는 M_1 이 할당 받을 수 없게 된다. 이와 같은 경우의 발생을 줄이고자 가능한 자원이 적은 단말부터 선택하는 방식이 필요하다.

4.2. 릴레이 및 경로 선택

선택된 노드 M_i 에 대해 다수의 경로가 존재할 수 있다. 경로 선택을 위해 먼저 각 링크마다 가능한 주파수 채널의 합을 구한다. 이렇게 구한 값 가운데 최소값을 각 경로의 대표값으로 선택하며 다른 경로에 대해서도 동일한 방법으로 최소값들을 조사하여 대표값으로 선택한다. 이렇게 선택된 각 경로의 대표값들 가운데 최대값을 가진 경로를 선택한다. 경로가 선택되면 이를 구성하고 있는 릴레이 또한 결정된다.

4.3. 주파수 채널 선택

각각 선택된 M_i 와 경로에 대해서 각 링크에 사용될 주파수 채널은 남아 있는 자원 단위의 수가 가장 큰 주파수 채널을 선택한다. 이와 같이 주파수 채널을 선택함으로써 다음 단말의 주파수 채널 선택폭을 넓혀줄 수 있다.

4.4. 업데이트

단말 노드, 릴레이 및 경로 그리고 주파수 할당이 모두 끝나면 자원 할당 지지자 행렬을 업데이트한다. 업데이트된 자원 할당 가능 행렬을 토대로 자원 할당 과정을 수행한다. 홉 간 자원 구분이 시분할로 엄격하게 되어 있기 때문에 셀 가장자리에서 부터 혹은 셀 중심으로부터 등의 필요 홉 수에 다른 단말 구분은 하지 않는다. 모든 단말에 대한 자원 할당 혹은 모든 자원 단위의 할당이 완료되면 본 할당 과정을 종료한다.

4.5. 실시 예

본 절에서는 제안한 자원 할당 방식의 실시 예를 보여준다. 우선 <그림4>는 단말 노드 M_1, M_2 가 릴레이 R_1, R_2, R_3 을 통해 기지국 R_0 로의 경로 탐색의 결과를 보여준다. M_1 에 대해 총 3개의 경로 $P_{1,1}, P_{1,2}, P_{1,3}$ 가 가능하며 M_2 에 대해 총 2개의 경로 $P_{2,1}, P_{2,2}$ 가 각각 가능하다. 여기서 P_{ij} 는 M_i 의 가능 경로 집합 (P_i) 중 j 번째 경로를 나타낸다. 그리고 P_{ij}^* 는 P_{ij} 에서 가능한 주파수 채널을 고려한 집합이며 $P_{i,j,k}^*$ 는 P_{ij}^* 에서 k 번째 링크의 가능한 주파수 채널 집합을 나타낸다.

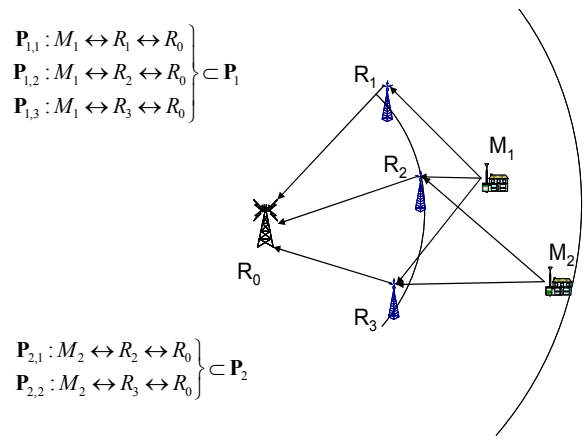


그림 4. 자원 할당 방식의 실시 예 - 경로 선택
Fig. 4. Resource allocation scheme - path selection

주파수 3개에 대해 가능 여부를 조사한 결과

<그림5>와 같이 링크 $R_0 \leftrightarrow R_1$ 에 대해 3개, $R_0 \leftrightarrow R_2$ 에 대해 2개, $R_0 \leftrightarrow R_3$ 에 대해 2개의 주파수가 각각 가능한 것으로 조사되었다. 각 릴레이와 단말 사이의 경우 M_1 에 대해서는 $M_1 \leftrightarrow R_1$, $M_1 \leftrightarrow R_2$, $M_1 \leftrightarrow R_3$ 링크에서 각각 1, 2, 1개의 주파수가 가능하므로 $\text{num}(P_{1,1}^*)$ 는 3 ($=1 \cdot 3$)개, $\text{num}(P_{1,2}^*)$ 는 4 ($=2 \cdot 2$)개, $\text{num}(P_{1,3}^*)$ 는 2 ($=1 \cdot 2$)개로 $\text{num}(P_1^*)$ 는 총 9개 ($=1 \cdot 3 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 2$)의 경로가 조사되었다. M_2 에 대해서는 $M_2 \leftrightarrow R_2$, $M_2 \leftrightarrow R_3$ 와의 링크에서 각각 1, 2개의 주파수가 가능하므로 $\text{num}(P_{2,1}^*)$ 에 대해 2 ($=1 \cdot 2$)개, $\text{num}(P_{2,2}^*)$ 는 4 ($=2 \cdot 2$)개로 $\text{num}(P_2^*)$ 는 총 6개 ($=1 \cdot 2 + 2 \cdot 2$)의 가능한 경로가 조사되었다.

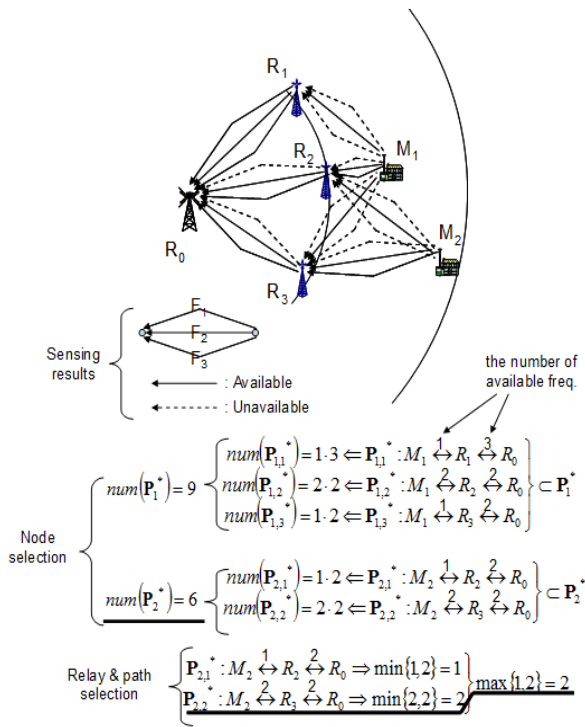


그림 5. 자원 할당 방식의 실시 예 - 노드 선택과 릴레이 및 경로 선택
Fig. 5. Resource allocation scheme - node, relay and path selection

본 환경에서 제안한 자원 할당 방식을 적용해 보면 조사한 총 경로 수가 최소인 단말을 선택한다. 단말 M_1 에 대해 9개, M_2 에 대해 6개의 경로가 각각 가능하므로 가능한 경로의 수가 적은 단말 M_2 를 선택한다. 다음 단계로 단말 M_2 에 대해 릴레이를 선택한다. 제안한 방식에 의하면 주어진 경로에서 링크 간 가능한 주파수 채널의 합을 조사한다. $P_{2,1}^*$ 의 $\text{num}(P_{2,1,1}^*)$ 은 1, $\text{num}(P_{2,1,2}^*)$ 는 2의 결과가,

$P_{2,2}^*$ 의 $\text{num}(P_{2,2,1}^*)$ 은 2, $\text{num}(P_{2,2,2}^*)$ 는 2의 결과가 각각 조사되었다. 이에 대해 각 경로에 대해 조사된 주파수 채널의 합의 최소값을 구하고 이 값이 최대인 경로를 선택한다. $P_{2,1}^*$ 의 경우 1 ($=\min\{1,2\}$), $P_{2,2}^*$ 의 경우 2 ($=\min\{2,2\}$)이므로 $P_{2,2}^*$ 의 경로를 선택한다.

마지막 단계로 각 링크에서 주파수는 가용한 자원 단위의 수가 가장 많은 주파수를 선택한다. <그림6>와 같은 프레임 구조에서 경로 $P_{2,2}^*$ 를 선택한 경우 각 링크 당 가용한 자원 단위는 링크 $M_2 \leftrightarrow R_3$ 에서 F_2 에 대해 2개, F_3 에 대해서 1개이다. 따라서, 가용한 자원 단위가 가장 많은 주파수 F_2 를 선택한다. 동일한 방법으로 다음 링크 $R_0 \leftrightarrow R_3$ 에서 F_2 에 대해 1개, F_3 에 대해서 2개이므로 주파수 F_3 를 선택한다. 이와 같이 단말 M_2 에 대한 자원 할당이 끝나면 자원 할당 지시자 행렬을 먼저 업데이트 후 다음 사용자인 M_1 에 대한 자원 할당을 시작한다.

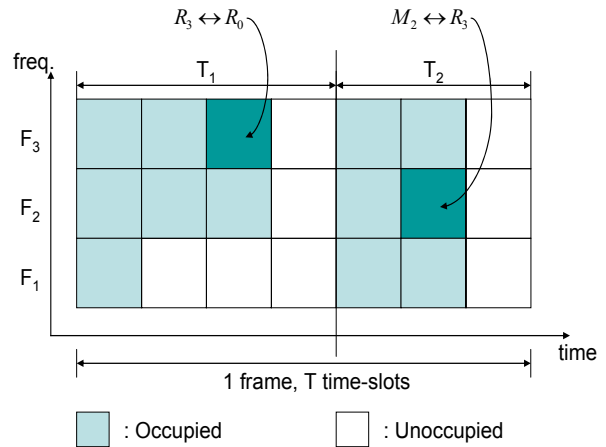


그림 6. 자원 할당 방식의 실시 예 - 각 링크 당 주파수 선택
Fig. 6. Resource allocation scheme - Frequency selection per each link

V. 모의실험 및 결과

모의 실험 환경은 무선 인지 시스템의 세계 최초 표준인 IEEE 802.22 WRAN (Wireless regional area network) 시스템을 기본 모델로 한다^[26]. 2차 사용자의 배치는 앞서 살펴본 <그림1>과 같이 셀룰러 기반의 노드 배치 환경을 고려하며 1차 사용자 환경은 서비스 영역이 매우 좁은 무선 마이크 사용자와 매우 넓은 DTV 사용자를 발생시켜 다양한 환경에서 제안 자원할당 방식의 성능을 평가한다^[4,26].

5.1. 모의 실험 환경

5.1.1. 노드 배치

시스템 모델에서 살펴본 것과 같이 릴레이는 기지국을 중심으로 동심원 상에 등간격으로 배치된다. 이때 각 홉에 배치되는 릴레이의 수는 동심원의 길이에 비례하도록 하여 <표1>과 같이 정의하였다^[27]. 또한 2차 사용자 노드의 위치 발생은 셀 내 균일 분포를 따른다고 가정한다.

표 1. 다중 홉 시스템에서 배치된 각 홉별 릴레이의 수
Table 1. The number of each subcarrier per hop be placed in multi-hop system

릴레이 시스템	$ R_1 $	$ R_2 $	$ R_3 $
이중홉 시스템	12	-	-
삼중홉 시스템	8	16	-
사중홉 시스템	6	12	18

5.1.2. 타임슬롯 할당

셀 내 사용자 발생은 균일 분포를 따르므로 사용자 간 서비스 공정도를 고려하여 시분할 한다면 T_h 간의 비는 각 티어 간 넓이의 누적 비가 되며 다음을 만족해야 한다.

$$T_1 : \dots : T_H = \sum_{h=1}^H |U_h| : \dots : \sum_{h=H}^H |U_h| \quad (6)$$

여기서 U_h 는 h 개의 홉 전송이 필요한 사용자 집합을 나타낸다. 다중 홉 시스템간의 성능 비교 시 본 조건을 만족하기 위한 T_h 의 조합은 <표2>와 같다. 하지만, 이를 실험에 그대로 적용 시 다중 홉 시스템 간의 성능 평가가 힘들어지며 타임슬롯의 합 T 간의 최소공배수를 적용한다 할지라도 자원의 양이 매우 커져 실제 무선 자원 환경과는 상당히 많은 차이가 벌어지게 된다.

표 2. 다중 홉 시스템의 각 홉에 할당된 타임슬롯의 개수
Table 2. The number of time slot per hop be placed in multi-hop system

릴레이 시스템	T_1	T_2	T_3	T_4	$T = \sum_{h=1}^H T_h$
이중홉 시스템	4	3	-	-	7
삼중홉 시스템	9	8	5	-	22
사중홉 시스템	16	15	12	7	50

이를 보완하기 위해 다중 홉 시스템의 각 홉에

할당된 타임슬롯의 개수는 <표3>으로 수정하여 적용한다. 이와 같은 환경에서 각 주파수에 대해 서비스할 수 있는 최대 사용자의 수는 단일 홉 시스템

표 3. 수정된 다중 홉 시스템의 각 홉에 할당된 타임슬롯의 개수

Table 3. The number of time slot per hop be placed in multi-hop system - modified

릴레이 시스템	T_1	T_2	T_3	T_4	$T = \sum_{h=1}^H T_h$
이중홉 시스템	18	12	-	-	30
삼중홉 시스템	13	11	6	-	30
사중홉 시스템	10	9	7	4	30

의 경우 30명, 이중 홉의 경우 18, 삼중 홉의 경우 13, 그리고 사중 홉의 경우 10명에 각각 이른다.

5.1.3. 전송 전력 결정

무선 인지 시스템에서 2차 사용자는 주기적인 센싱을 통해 1차 사용자를 보호할 수 있다. 즉, 센싱 후 측정된 전력 수준이 임계치 이상이면 해당 스펙트럼을 사용할 수 없다. 예를 들어, IEEE 802.22 시스템에서 규정하는 센싱 임계치는 DTV의 경우 -116 dBm, NTSC 방식 TV의 경우 -94dBm 으로 규정하고 있고 해당 수준 이하의 전력을 수신한 경우에만 해당 스펙트럼을 사용할 수 있다^{[28][29]}. 이러한 센싱 기능과 함께 1차 사용자를 보호하기 위한 중요한 개념이 간섭 온도 (Interference Temperature) 이다. 간섭 온도는 미국 연방 통신 위원회 (Federal communications commission, FCC)에서 도입한 개념으로 1차 사용자의 수신기가 겪는 간섭 및 잡음의 양을 정량화 한 것이다^{[3][4]}. 간섭 온도의 개념을 따르면 2차 시스템이 1차 시스템과 공존하기 위해서는 1차 수신기가 겪는 간섭의 양이 임계치 이하가 되도록 2차 시스템은 송신 전력을 조절해야 한다. 이러한 전송 전력을 간섭 온도의 개념을 도입하여 도출하고 1차 시스템이 고출력 시스템인 경우와 저출력 시스템인 경우로 나누어 1차 시스템 보호 방안을 제시한다.

먼저 고출력 1차 시스템의 경우를 살펴본다. <그림7>에서 $P_{P,T}$ 와 $P_{S,T}$ 의 전력을 각각 사용하는 1차 시스템 송신기와 2차 시스템 송신기로부터 각각 d_1 과 d_2 만큼 떨어져 위치한 1차 시스템 수신기의 신호 대 간섭 비 (Signal to interference ratio, SIR)[dB]는

$$SIR = 10 \log_{10} \frac{P_{P,R}}{P_{P,I}} \quad (7)$$

로 나타내며 $P_{P,R}$ 과 $P_{P,I}$ 는 각각

$$P_{P,R} = P_{P,T} \cdot d_1^{-\alpha} \quad (8)$$

$$P_{P,I} = P_{S,T} \cdot d_2^{-\alpha} \quad (9)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 α 는 경로 손실 지수 (Path loss exponent)이다^[30]. 1차 시스템의 원활한 서비스를 보장하기 위해 서비스영역의 경계에 있는 1차 수신기의 SIR이

$$SIR_{req} \leq SIR \quad (10)$$

를 만족해야 한다. 여기서 SIR_{req} 는 최소 필요 SIR (Minimum required SIR)을 나타내며 주어진 통신 환경에서 등호가 성립하는 경우, 거리 d_1 과 d_2 를 1차 시스템의 서비스 영역 거리 (Service coverage distance)와 간섭 제한 구역 거리 (Keep-out region distance)로 각각 부른다^[17]. 이때 1차 시스템 수신기로부터 간섭 제한 구역 거리 내에 있는 부분을 간섭 제한 구역 (Keep-out region)이라 부른다. 식 (7)~(10)로부터 간섭 제한 구역 거리 d_2 는

$$d_2 = \left(\frac{P_{S,T}}{P_{P,T}} \cdot d_1^\alpha \cdot 10^{\frac{SIR_{req}}{10}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (11)$$

로 정리된다. 식 (11)로부터, 1차 시스템의 전송 전력이 높고, 1차 시스템의 서비스 영역이 좁을수록 그리고 2차 시스템의 전송 전력이 낮을수록 간섭 제한 구역 거리는 감소함을 알 수 있다.

i -hop 시스템에서 홉 전송 거리를 d_{i-hop} 라 하면, d_{i-hop} 를 티어간 거리 $D(=D/i)$ 로 설정하는 경우 <그림8>에서 어두운 부분과 같이 서비스 할 수 없는 영역이 발생한다. 이러한 서비스 불가 지역을 줄이기 위해 너무 크게 하면 i -홉 시스템의 필요한 전송전력이 높아져 간섭 제한 거리 구역도 커지므로 최적의 d_{i-hop} 선택이 필요하다.

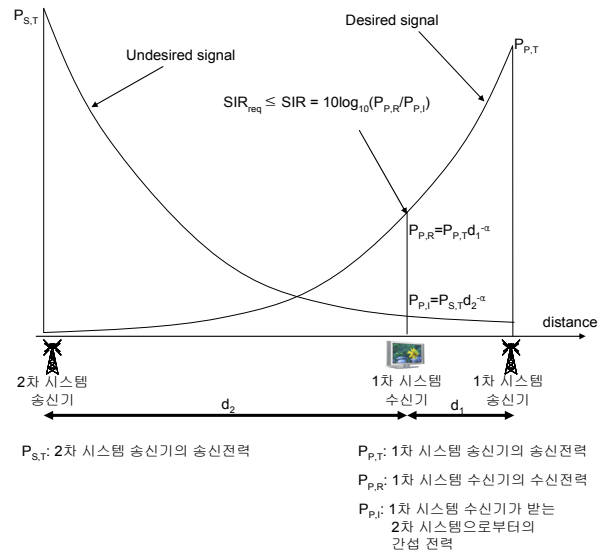


그림 7. 거리에 따른 경로 손실과 최소 필요 SIR에 의한 간섭 제한
Fig. 7. Path loss depending on the distance and interference limited due to the minimum required SIR

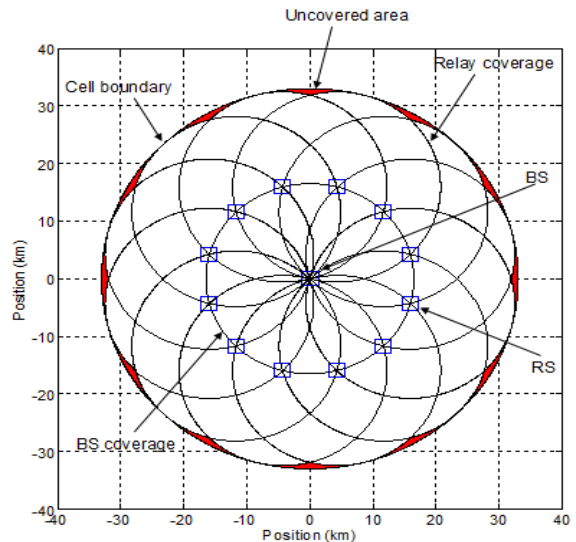


그림 8. 이중 홉 시스템에서 작은 홉 전송거리로 인한 서비스 불가 지역
Fig. 8. Not service area due to small hop in a two hop system

최적의 d_{i-hop} 선택을 위해 <그림9>과 같이 이중 홉 시스템의 예로써 최적의 d_{i-hop} 선택 과정을 설명한다. 릴레이는 동일 티어 상에 있고 서로 인접한 노드 간 직선(l_1)을 그을 수 있다. 기지국으로부터 l_1 을 수직 이등분하는 직선(l_2)과 셀 경계의 교차점에 위치하는 단말을 서비스함으로써 서비스 불가 지역을 해소할 수 있다. 따라서 필요한 최소 d_{2-hop} 는

$$d_{2-hop} = \sqrt{\left(\frac{D_R}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_R}{2} + \frac{D_R}{2}\right)^2 - 2 \cdot \frac{D_R}{2} \cdot \left(\frac{D_R}{2} + \frac{D_R}{2}\right) \cos\theta} \quad (12)$$

$$= D_R \sqrt{\frac{5}{4} - \cos\theta}$$

와 같이 구하며, 여기서 θ 는 $\frac{2\pi}{2|R_1|}$ 로 주어진다. 동일한 방법으로 삼중 홉과 사중 홉 시스템에 대해 d_{i-hop} 는

$$d_{3-hop} = D_R \sqrt{\frac{5}{9} - \frac{4}{9} \cos\theta} \quad (13)$$

$$d_{4-hop} = D_R \sqrt{\frac{5}{16} - \frac{1}{4} \cos\theta} \quad (14)$$

로 각각 구해진다.

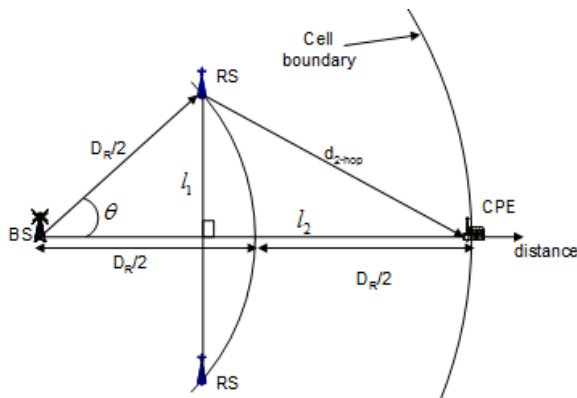


그림 9. 이중 홉 시스템에서 필요한 최소 홉 전송 거리 (CPE: Customer premise equipment)
 Fig. 9. The minimum required hop transmission distance in a two hop system (CPE: Customer premise equipment)

DTV 시스템과 같이 고출력 시스템의 경우 앞서 살펴본 간섭 제한 구역 개념을 사용하여 주파수 가용 여부를 판단하였다. 즉, 간섭 제한 구역 내에 2차 시스템의 송신기가 존재하면 해당 주파수를 사용할 수 없고 그렇지 않은 경우 해당 주파수를 사용할 수 있게 된다. 하지만 무선 마이크 등과 같이 저출력 시스템의 경우 간섭 제한 영역 개념만을 이용하게 되면 1차 시스템 보호에 취약할 수 있다. 고출력 시스템의 경우에서와 같이 2차 시스템이 간섭 제한 영역 밖에서 해당 주파수를 사용할 수 있도록 허용하게 되면 2차 시스템의 송수신기 사이에 1차 시스템이 존재하는 경우가 발생하게 된다. 즉, 1차

시스템을 2차 시스템의 간섭으로부터 보호할 수 없게 된다. 따라서 이러한 저출력 시스템을 보호하기 위해 본 논문에서는 2차 송신기와 1차 시스템 사이의 거리가 임계치 이상인 경우 해당 주파수를 사용할 수 있다고 가정한다. 이때 임계치는 앞에서 구한 d_{i-hop} 를 이용하기로 한다.

5.1.4. 기타 실험 환경

실험에 사용된 주요 파라미터는 <표4>와 <표5>에 정리하였다. 경로 손실 지수 α 가 4인 경우에 대해 실험했으며 간섭 제한 구역은 1차 시스템의 서비스 영역과 전송 전력 그리고 필요 SIR 등을 이용해 식 (11)로부터 구한 것이다. 한 변의 길이가 d 이고 중심이 (0,0)인 정사각형을 모의실험 영역으로 정의하고 이 영역 내에 1차 시스템의 송신기를 균일분포로 발생시킨다^[31]. 1차 시스템의 수신기를 각 1차 시스템의 서비스영역에만 존재한다고 가정한다. 따라서, 1차 시스템의 수신기는 서비스영역과 간섭 제한 구역의 조건을 통해 항상 보호된다. 저출력 시스템의 발생은 모의실험 영역의 길이를 2차 시스템의 셀 반경과 동일하게 하기로 한다. 고출력 시스템과 저출력 시스템이 차지하는 각각의 대역폭은 서로 동일하며 1차 시스템이 사용하는 주파수는 1차 시스템 간에 서로 재사용된다고 가정한다.

5.2. 모의실험 결과

무선 인지 환경에서 다중 홉 시스템 도입 시, 저전력 통신을 통해 얻을 수 있는 주파수 공유 이득 (Spectrum sharing gain)과 다중 홉 전송 시 요구되는 홉 간 주파수 분할 손실 (Spectrum division loss)이 동시에 발생하므로 이들 간의 득실을 고려해야 한다. 이를 통해, 다양한 조건 하에서 단일 홉 시스템과 다중 홉 시스템의 비교 우수성이 판단되어야 한다. 성능 지수로 2차 사용자의 서비스율 (Served secondary users ratio)을 사용하고 이는 서비스 요청 2차 사용자 수에 대해 서비스 받은 사용자 수의 비로 정의된다.

표 4. 실험에 사용된 1차 시스템의 주요 파라미터
Table 4. Parameters of a primary system

	고출력 시스템				저출력 시스템			
송신기 위치발생	모의 실험 영역 내 균일 분포				모의 실험 영역 내 균일 분포			
전송전력 (W)	1,000				0.04			
서비스 영역 거리 d_l (km)	100				0.2			
필요 SIR (dB)	20				20			
간섭제한구역 거리 d_2 (m)	단일홉	이중홉	삼중홉	사중홉	단일홉	이중홉	삼중홉	사중홉
	141,420	75,830	53,840	43,810	3,757	2,096	1,554	1,302

표 5. 실험에 사용된 2차 시스템의 주요 파라미터
Table 5. Parameters of a secondary system

	단일홉 시스템	이중홉 시스템	삼중홉 시스템	사중홉 시스템
셀 반경 D_R (m)	33,000	33,000	33,000	33,000
티어 간 거리 D (m)	33,000	16,500	11,000	8,250
홉 전송 거리 d_{i-hop} (m)	33,000	17,589	12,564	10,224
전송전력 (W)	40	3.230	0.840	0.370
서비스 요청 2차 사용자 수	100	100	100	100

5.2.1. 고출력 1차 시스템

먼저 고출력 1차 사용자 환경에서 단일 홉 시스템과 다중 홉 시스템 간의 성능을 비교한다. <그림 10>은 1차 사용자 수의 변화에 따른 2차 사용자의 서비스율을 나타낸다. 여기서 1차 사용자란 1차 시스템의 송신기를 나타낸다. 1차 사용자가 적어 가용한 주파수 자원이 많을 때는 단일 홉 시스템이 비교적 우수한 성능을 보인다. 특히 1차 사용자의 수가 4 이하인 경우, 가장 우수한 성능을 보였다. 하지만, 1차 사용자가 늘어나 2차 사용자의 가용 주파수 채널이 줄어들수록 다중 홉 시스템의 성능이 우수해짐을 볼 수 있다.

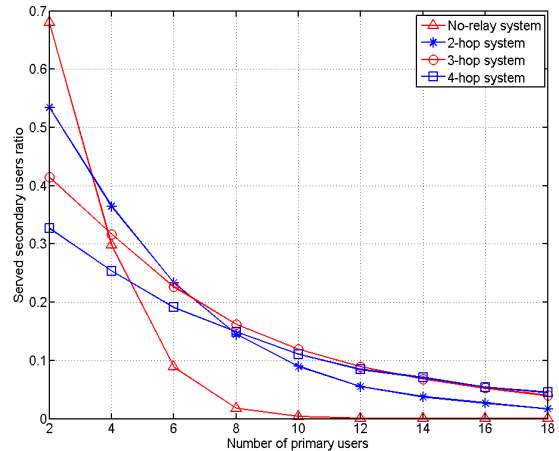


그림 10. 1차 사용자의 수에 따른 2차 사용자의 서비스율 - 고출력 시스템 (모의실험 영역 길이 : 200km, 주파수 채널 수 : 4)

Fig. 10. The service ratio of secondary users according to the number of primary users - high power system (distance : 200km, the number of frequency channel : 4)

즉, 제한된 영역과 주파수 환경에서 1차 사용자의 수가 적을 때는 높은 전력을 사용하는 단일 홉 시스템이 유리하며 1차 사용자의 수가 많을 때에는 다중 홉 시스템이 상대적으로 유리하다.

<그림 11>는 주파수 채널수의 변화에 따른 2차 사용자의 서비스율을 보여준다. 1차 사용자의 수를 고정한 상태에서 주파수 풀(Pool)이 커질수록 2차 시스템의 가용 주파수 역시 증가하게 된다. 이처럼 주파수 자원이 충분한 경우에는 높은 전력을 사용하는 단일 홉 시스템이 보다 많은 2차 사용자를 서비스할 수 있으며 반대로 가용 주파수 자원이 적어질 때에는 저전력 통신을 통해 부족한 가용 주파수 자원을 늘릴 수 있는 다중 홉 시스템이 상대적으로 유리하다는 것을 볼 수 있다. 한편, 2차 시스템의 서비스 요구 단말 수를 100으로 제한했기 때문에, 주파수 채널수가 충분히 증가함에 따라 서비스 받은 사용자의 수도 100에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 수렴 속도는 단일 홉, 이중 홉, 삼중 홉, 사중 홉 시스템 순이었으며 이는 스펙트럼 분할 손실이 작은 순서와 일치했다.

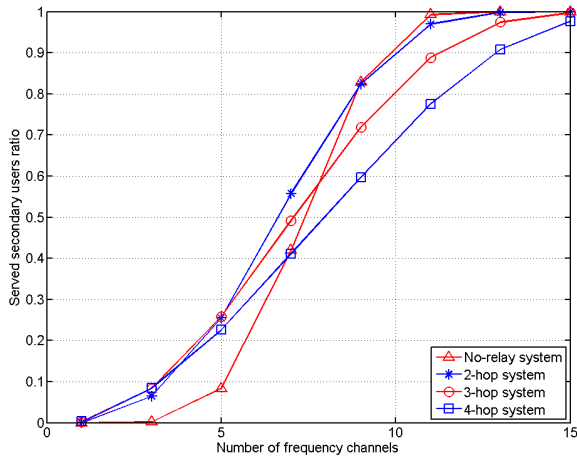


그림 11. 주파수 채널 수에 따른 2차 사용자의 서비스율 - 고출력 시스템 (모의실험 영역 길이 : 200km, 1차 사용자 수 : 8)

Fig. 11. The service ratio of secondary users according to the number of frequency channel - high power system (distance : 200 km, the number of primary user : 4)

5.2.2. 저출력 1차 시스템

<그림12>는 저출력 1차 사용자의 수에 따른 서비스 받은 2차 사용자의 서비스율을 보여준다. 1차 사용자의 수가 매우 적은 구간 (약 10 이하)에서는 단일 홉 시스템이 다중 홉 시스템보다 우수한 결과를 보였지만 그 외의 구간에서는 다중 홉 시스템이 우수한 성능을 보였다. 약 10~30인 구간에서는 이중 홉 시스템이, 약 30~80인 구간에서는 삼중 홉 시스템이, 그리고 약 80 이상인 구간에서는 사중 홉 시스템이 각각 가장 좋은 성능을 보였다. 1차 사용자의 수가 증가할수록 단일 홉 시스템의 성능이 급격히 저하되었으며 이에 비해 다중 홉 시스템은 상대적으로 적은 성능 감소를 보였다. 특히, 1차 사용자가 고출력 시스템인 경우에는 사중 홉 시스템이 유리한 구간이 거의 없었으나 저출력 시스템에서는 상대적으로 보다 넓은 구간에서 우수한 성능을 보였다. 사중 홉 시스템이 필요로 하는 홉 전송 거리와 이에 따른 전송 전력이 이중 홉/삼중 홉 시스템보다 적기 때문에 간섭 제한 영역의 거리도 짧아진다. 따라서, 1차 사용자를 지역적으로 보다 쉽게 회피할 수 있고 이를 통해 얻는 주파수 공유 이득이 분할 손실보다 커지기 때문이다. 이와 같이 1차 사용자의 주파수 점유 상태에 따라 최고의 성능을 보이는 홉 수가 달라지는 점을 이용하여 다중 홉 시스템을 선택적으로 운용한다면 무선 인지 시스템의 성능을 상당히 향상시킬 수 있다.

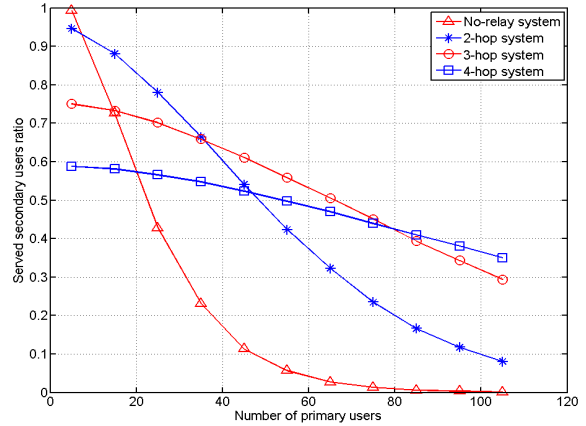


그림 12. 1차 사용자의 수에 따른 2차 사용자의 서비스율 변화 - 저출력 시스템 (주파수 채널 수 : 6)

Fig. 12. The service ratio of secondary users according to the number of primary users - low power system (the number of frequency channel : 6)

<그림13>은 저출력 1차 사용자 환경에서 주파수 채널 수의 변화에 따른 2차 사용자의 서비스율을 보여준다. 주파수 자원이 많을수록 2차 시스템이 사용할 수 있는 자원의 수도 증가하기 때문에 서비스 받은 사용자의 수가 점점 증가하였다. 가용한 주파수 자원이 매우 적은 (주파수 채널 수가 약 2보다 작은) 경우에는 사중 홉 시스템이, 그 반대로 주파수 자원이 매우 많은 (주파수 채널 수가 약 6보다 많은) 구간에서는 이중 홉 시스템이, 그리고 그 사이 구간에서는 삼중 홉 시스템이 각각 우수했다. 또한, 서비스 요청 사용자의 수를 100으로 제한하였기 때문에 주파수 자원이 상당히 많은 구간 즉, 약 10 이상인 구간에서는 서비스 받은 사용자의 수가 수렴하기 시작했다. 이때 수렴하는 속도는 이중 홉, 삼중 홉, 사중 홉 그리고 단일 홉 시스템의 순이었다. 앞선 결과와 달리 단일 홉 시스템이 다중 홉 시스템보다 우수한 구간이 없는 것은 1차 사용자의 수가 주파수 채널 수에 비해 많기 때문이며 1차 사용자의 수를 줄인다면 단일 홉 시스템의 성능이 가장 우수한 구간을 얻을 수 있다.

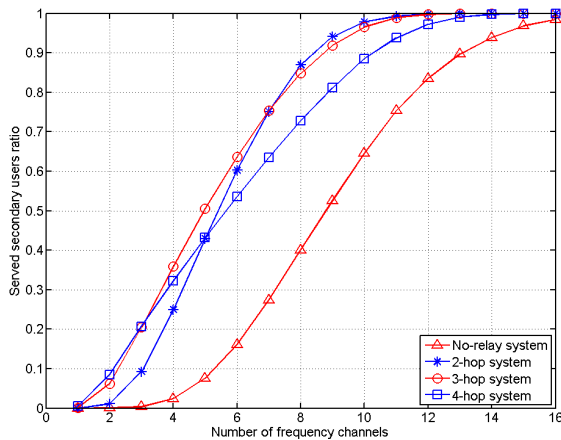


그림 13. 주파수 수의 변화에 따른 2차 사용자의 서비스율 변화 - 저출력 시스템 (1차 사용자 수 : 40)

Fig. 13. The service ratio of secondary users according to the number of frequency channel - high power system (the number of primary user : 40)

VI. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.22 WRAN 시스템을 모델로 무선 인지 환경에서 다중 홉 자원 할당 방식을 제시했다. 이를 통해 무선 인지 환경에서 셀룰러 기반의 다중 홉 전송 방식의 도입 이유와 효율적인 운용 방안을 제시했다. 시분할된 프레임 구조에서 서비스 받는 사용자의 수를 최대화하는 문제로 수학적 모델링을 하였으며, 사용자 선택, 경로 선택, 주파수 자원 선택의 3단계로 이루어지는 부최적화된 무선 자원 할당 방법을 제안했다. 모의실험에서 1차 사용자로 고출력 시스템과 저출력 시스템으로 구분하고 이를 고려하여 서비스율을 성능지수로 하여 단일 홉 시스템과 다중 홉 시스템에서 제안 방식을 분석하였다. 그 결과 1차 시스템이 저출력 시스템인 경우가 각 지역별 그리고 각 노드별 가용한 자원의 편차가 크게 발생하기 때문에 고출력 시스템의 경우보다 큰 성능 개선을 거둘 수 있었다.

각 실험 환경에서 살펴본 결과를 통해 주파수 공유로 인해 얻는 이득과 주파수 분할로 인해 발생하는 손실이 고려된 최적의 홉 수를 찾아낼 수 있었다. 이러한 실험 결과를 토대로 무선 인지 시스템의 셀 계획 시 각 환경에 적합한 다중 홉 시스템을 선택하는데 도움이 될 것이다. 또한 실제 시스템 운용 시 자원 할당에 대한 방법으로 제안 방식을 도입한다면 무선 인지 시스템 성능 개선에 기여할 것이며

특히 1차 시스템으로 고출력 시스템이 다수 존재하는 환경보다는 저출력 시스템 환경에서 더욱 더 큰 효과를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김창주, “Cognitive Radio 기술 동향,” 한국전자통신연구원 전자통신동향분석, 제21권, 제4호, pp.62-69, 2006년 8월
- [2] J. Mitola, “Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications,” in *Proc. IEEE Workshop on Mobile Multimedia Comm.*, pp.3-10, Nov. 1999.
- [3] S. Haykin, “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, vol.23, no.2, pp.201-220, Feb. 2005.
- [4] 김진영, *인지 무선 통신*, 인터비전, 2008년.
- [5] 한정애, 정상수, 전화숙, “Cognitive Raio 네트워크의 개요,” *한국정보과학회 학술지*, 제22권, 제2호, 2008년 11월.
- [6] J. Heo, J. Shin, J. Nam, Y. Lee, J. G. Park, and H.-S. Cho, “Mathematical Analysis of Secondary User Traffic in Cognitive Radio System,” in *Proc. IEEE VTC 2008-Fall*, pp.1-5, Sept. 2008.
- [7] M. Herdin, “A Chunk Based OFDM Amplify-and-Forward Relaying Scheme for 4G Mobile Radio Systems,” in *Proc. IEEE ICC'06*, Vol. 10, pp. 4507-4512, June 2006.
- [8] W. Ying, Q. Xin-chun, W. Tong, and L. Bao-ling, “Power Allocation and Subcarrier Pairing Algorithm for Regenerative OFDM Relay Systems,” in *Proc. IEEE VTC2007-Spring*, pp. 2727-2731, Apr. 2007.
- [9] W. Wang, S. Yan and S. Yang, “Optimally Joint Subcarrier Matching and Power Allocation in OFDM Multihop System,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2008, pp. 1-8, Jan. 2008.
- [10] Z. Qi, Z. Jingmei, S. Chunju, W. Ying, and H. Rong, “Power Allocation for Regenerative Relay Channel with Rayleigh Fading,” in *Proc. IEEE VTC2004-Spring*, vol. 2, pp. 1167-1171, May 2004.

- [11] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "Optimal Power Allocation for Relayed Transmissions Over Rayleigh-Fading Channels," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 3, No. 6, pp. 1999-2004, Nov. 2004.
- [12] J. Shi, Z.-Y. Zhang, P.-L. Qiu, and G.-D. Yu, "Subcarrier and Power Allocation for OFDMA-Based Regenerative Multi-hop Links," in *Proc. IEEE WiCom 2005*, vol. 1, pp. 207-210, Sept. 2005.
- [13] Y. Li, W. Wang, J. Kong and M. Peng, "Subcarrier Pairing for Amplify-and-Forward and Decode-and-Forward OFDM Relay Links," *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 13, No. 4, Apr. 2009.
- [14] G.-D. Y, Z.-Y. Zhang, Y. Chen, S. Chen, and P.-L. Qiu, "Power Allocation for Non-regenerative OFDM Relaying Channels," in *Proc. IEEE WiCom 2005*, Vol. 1, pp. 185-188, Sept. 2005.
- [15] W. Wang, S. Yang, and L. Gao, "Comparison of Schemes for Joint Subcarrier Matching and Power Allocation in OFDM Decode-and-Forward Relay System," in *Proc. IEEE ICC 2008*, pp. 4983-4987, May 2008.
- [16] W. Wang and X. Liu, "List-Coloring Based Channel Allocation for Open-Spectrum Wireless Networks," in *Proc. IEEE VTC2005-Fall*, pp. 690-694, Sept. 2005.
- [17] Q. Wang and H. Zheng, "Route and Spectrum Selection in Dynamic Spectrum Networks," in *Proc. IEEE CCNC 2006*, vol. 1, pp. 625-629, Jan. 2006.
- [18] X. Zhou, L. Lin, J. Wang, and X. Zhang, "Cross-layer Routing Design in Cognitive Radio Networks by Colored Multigraph Model," *Wireless Personal Communications*, vol. 49, No. 1, pp. 123-131, Apr. 2009.
- [19] T. Peng, W. Wang, Q. Lu, and W. Wang, "Subcarrier Allocation Based on Water-filling Level in OFDMA-based Cognitive Radio Networks," in *Proc. IEEE WiCom 2007*, pp. 196-199, Sept. 2007.
- [20] T. Weiss, J. Hillenbrand, A. Krohn, and F. K. Jondral, "Mutual Interference in OFDM-based Spectrum Pooling Systems," in *Proc. IEEE VTC-2004 Spring*, vol. 4, pp. 1873-1877, May 2004.
- [21] G. Bansal, M. J. Hossain, and V. K. Bhargava, "Adaptive Power Loading for OFDM-based Cognitive Radio Systems," in *Proc. IEEE ICC 2007*, pp. 5137-5142, June 2007.
- [22] S. Yan and X. Wang, "Power Allocation for Cognitive Radio Systems Based on Nonregenerative OFDM Relay Transmission," in *Proc. IEEE WiCom 2009*, pp. 1-4, Sept. 2009.
- [23] S.-Y. Ni, Y.-C. Tseng, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu, "The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network," in *Proc. ACM MobiCom'99*, pp. 151-162, Seattle and Washington USA, Aug. 1999.
- [24] N. Garg, M. Papatriantafidou, and P. Tsigas, "Distributed Long-Lived List Colouring: How to Dynamically Allocate Frequencies in Cellular Networks," *Wireless Networks*, vol. 8, Issue 1, pp. 49-60, Jan. 2002.
- [25] M. Biró, M. Hujter, and Z. Tuza, "Precoloring extensions. I. Interval graphs," *Discrete Mathematics*, vol. 100, no. 1-3, pp. 267 - 279, 1992.
- [26] 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*, Nov. 2006.
- [27] 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*, Feb. 2005.
- [28] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, and S. S. Nandagopalan, "IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios," *Journal of Communications*, Vol. 1, No. 1, Apr. 2006.
- [29] IEEE 802.22-05/0007r48, *Functional Requirements for the 802.22 WRAN Standard*, Nov. 2006.

- [30] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*, 2nd, Prentice Hall, 2002.
- [31] H. Kang, H. Hong, and C. Kim, "Performance Evaluation of CR-based WRAN System using Spectrum Utilization Efficiency," in *Proc. IEEE WiCom 2008*, pp. 1-4, Oct. 2008.
- [32] IEEE 802.16j-2009, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 1: Multihop Relay Specification, June 2009.

신 정 채 (Jung-Chae Shin)

정회원



2002년 8월 경북대학교 전자
전기공학부 공학사
2004년 8월 경북대학교 대학
원 정보통신학과 공학석사
2010년 8월 경북대학교 대학
원 전자공학과 공학박사
2010년 7월~현재 (주)한화/화
약 구미사업장 개발부 선임

연구원

<관심분야> 무선인지 기술, 멀티홉 릴레이, Mobile WiMAX, 수중통신.

민 승 화 (Seung-Hwa Min)

준회원

2011년 2월 충남대학교 전자 공학과 졸업
2011년 3월~현재 충남대학교전자공학과 석사과정
<관심분야> 이동통신, 수중통신, 광통신 공학

조 호 신 (Ho-Shin Cho)

중신회원



1992년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학사
1994년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학석사
1999년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학박사
1999년 3월~2001년 2월 한국

전자통신연구원 선임연구원

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

2003년 3월~현재 경북대학교 IT대학 교수

2010년 1월~2011년 1월 미국 커네티컷 대학 방문
교수

<관심분야> 이동통신시스템, 무선자원관리, 트래픽
제어, 수중음향센서네트워크

장 윤 선 (Youn-Seon Jang)

중신회원



1992년 2월 경북대학교 전자
공학과 공학사
1994년 2월 한국과학기술원
전기및전자공학과 공학석사
1999년 2월 한국과학기술원
전기및전자공학과 공학박사
1999년 3월~2006년 2월 한국

전자통신연구원 선임연구원

2006년 3월~현재 충남대학교 전자공학과 부교수

<관심분야> 광통신 전송시스템, 무선인지 기술, 수
중통신망