

다중홉 릴레이 시스템에서 간섭의 영향과 비용의 효과를 고려한 셀 커버리지 확장 방법에 관한 연구

김 용 철*, 임 원 태*, 조 성 환*

Interference Aware Cost Effective Coverage Extension in Multihop Relay Networks

Yongchul Kim*, Won-taek Lim*, Sung-hwan Cho*

요 약

케이블과 DSL의 대안으로서 라스트 마일(last mile)의 광역 접근을 무선으로 가능하게 해주며 고속 인터넷 서비스를 제공할 수 있는 표준 기술로 알려진 WiMAX에 셀 용량의 증대와 셀 커버리지를 확장하기 위하여 Mobile Multihop Relay 기술이 추가적으로 제안 되면서 많은 관심을 모으고 있다. 본 논문에서는 셀 커버리지를 확장하기 위하여 릴레이 노드(RS)를 운영하는 방법에 초점을 맞추고 사용자 노드(SS)들에 대한 형평성을 고려한 자원할당 알고리즘을 사용하여 다중홉 릴레이 네트워크의 성능을 분석하였으며, 특히 주파수 재사용 기법을 적용할 때에 릴레이 노드들 간의 간섭 현상이 셀 용량에 미치는 영향을 구체적으로 분석하여 비용 효과를 고려한 셀 커버리지 확장 방법을 제안한다.

Key Words : Multihop Relay Networks, WiMAX, 802.16j, Coverage extension, Resource allocation

ABSTRACT

IEEE standard 802.16, often referred to as WiMAX, is considered a "last mile" broadband wireless access alternative to conventional DSL and Cable Internet. One extension that is recently receiving great attention is the IEEE 802.16j Mobile Multihop Relay (MMR) amendment. The focus of this amendment is the development of simple and lower cost relay stations (RSs) that can enhance network coverage and capacity. We use our proposed simple scheduling scheme for serving the SSs in a fair manner and evaluate the performance of WiMAX networks with relays, especially we analyze the impact of interference between RSs on cell throughput. Through simulations and numerical analysis, we make several fundamental observations about interference aware cost effective coverage extension in such networks.

I. 서 론

IEEE 802.16의 최초 표준화 작업은 기지국(BS)을 중심으로 싱글 홉 내의 사용자들에게 서비스를 제공하는데 중점을 두고 진행되었으나, 2006년 3월

부터 IEEE 802.16j TG(Task Group)를 결성하여 셀 용량(capacity) 증대와 서비스 영역(coverage) 확장을 위해 릴레이 노드(RS)를 사용하는 방안에 대한 표준화 작업을 시작하여 2009년에 표준안이 발표되었다. IEEE 802.16j^[1]의 핵심적인 내용은 기존

* 주저자 겸 교신저자 : 육군사관학교 전자정보학과, kyc6454@kma.ac.kr, 정희원

* 육군사관학교 전자정보학과, lwt@kma.ac.kr, scho@kma.ac.kr

논문번호 : KICS2012-07-321, 접수일자 : 2012년 7월 17일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 20일

의 BS에 비하여 간소화된 기능과 저렴한 비용으로 구현이 가능한 RS를 활용하여 네트워크의 성능을 증대시키고 커버리지를 확장 할 수 있다는 내용이다.

발표된 표준안에 따르면 RS는 두 가지의 모드로 나누어지는데 하나는 transparent 모드이고 다른 하나는 non-transparent 모드이다. Non-transparent RS는 연결된 사용자 노드(SS)들로부터 BS와 같은 역할을 수행하게 된다. 즉, RS는 BS와 SS사이의 모든 데이터정보 뿐만 아니라 제어 정보까지도 릴레이 한다. 반면에 transparent RS는 연결된 SS들에게 오직 데이터정보만을 전달하고 제어 정보는 전달하지 않는다. 그리하여 transparent RS에 연결된 SS는 모든 제어 정보를 BS로부터 직접 받기 때문에 RS의 존재 자체를 인식하지 못하게 된다. 이러한 이유로 transparent RS는 셀 내부의 용량을 증대시키기 위한 목적에 적합하고, non-transparent RS는 셀 용량의 증대 뿐만 아니라 셀 커버리지를 확장시키기 위한 목적으로도 사용될 수 있다. 본 논문에서는 non-transparent RS를 사용하여 커버리지를 확장하는 방안에 관하여 알아보려고 한다.

셀 커버리지를 확장하는데 있어서 RS를 사용하는 것이 어떠한 장점이 있는지를 분석하기 위해서는 확장된 커버리지 뿐만 아니라 비용과 셀 용량에도 어떠한 영향을 미치는지 동시에 분석해 보아야 한다. 셀 용량에 관한 분석을 위해 우리는 각각의 SS가 동일한 프레임 내에서 BS나 RS로부터 서비스를 받을 때 셀 내부의 현재 위치에 관계없이 동일한 throughput을 얻을 수 있도록 형평성에 근거하여 자원이 할당되어야 한다고 가정한다. 본 논문에서는 이러한 형평성을 달성함과 동시에 셀 용량의 증대에 기여할 수 있는 주파수 재사용(frequency reuse) 기법을 적용할 수 있는 자원 할당 방식(scheduling scheme)을 제안한다. 제안된 자원 할당 방식을 이용하면 셀 내부에 서비스를 요구하는 SS의 수와 RS의 수, 그리고 RS들의 위치를 변화시켜가면서 그에 따른 셀 용량을 분석해 낼 수 있다.

본 논문에서 고려되는 WiMAX 시스템은 광대역 데이터 전송에 적합한 직교주파수분할다중(OFDM) 방식을 사용하며 무선 데이터 링크의 상태에 따라 변조지수를 변화시키는 적응변조코딩(AMC)기술을 적용하여 데이터의 전송 효율을 증대시킨다. WiMAX 표준안은 시간분할다중(TDD) 방식과 주파수분할다중(FDD) 방식을 모두 지원하는데 TDD 방식이 업링크(UL)와 다운링크(DL)의 비율을 융통성

있게 조절 할 수 있다는 장점으로 인해 멀티미디어 서비스와 고속 인터넷 서비스에 많이 사용되므로 본 논문에서도 TDD방식을 적용한다.

최근들어 WiMAX 릴레이 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, Hoymann^[2]등은 셀 커버리지 확장을 위해 RS들을 BS의 전송가능거리 끝부분에 고정적으로 위치시키고 네트워크의 성능과 커버리지 확장에 대한 분석을 실시하였으나 자원 할당 기법에 대해서는 언급되지 않았다. Deb^[3]등은 RS를 이용하여 셀 커버리지는 향상시킬 수 있으나 동시에 셀 평균 용량이 크게 감소한다는 것을 보였다. 커버리지 확장에 따른 셀 평균 용량의 감소는 필연적이며, RS를 운용하는데 있어서 가장 큰 단점으로 인식되고 있다. 왜냐하면 BS로부터 SS에게 전달되는 데이터가 RS를 거쳐 가면서 무선 자원을 추가적으로 더 사용하기 때문이다. 이러한 단점을 최소화하기 위하여 주파수 재사용 기법이 고려 될 수 있으며, Li^[4]등은 셀 용량을 증가시키기 위해 주파수를 효과적으로 분할하는 방안을 제시하였고, Park^[5]등은 주파수 재사용 지수(frequency reuse factor)의 개념을 소개하고 셀 용량을 증가시키는 방안을 제시하였다. 802.16j 표준안에 제시된 non-transparent 모드의 프레임 구조를 살펴보면 다운링크와 업링크 각각의 구조가 access zone과 relay zone으로 구성되어 있는데 access zone에서 BS와 RS가 동시에 SS들에게 데이터 전송이 가능하다는 것을 알 수 있다. 즉, 주파수 재사용 기법이 access zone 구간에서 사용이 가능하다는 것이다. 우리의 이전 논문^[6]에서는 이러한 주파수 재사용 기법을 사용하였을 뿐만 아니라 종전 연구들과는 달리 RS들의 위치를 BS와 SS의 전송거리를 초과하여 배치함으로써 커버리지의 확장을 극대화 하였으며 비용측면에서도 효과적인 RS의 운용방안을 연구하였다. 하지만 RS들 간의 간섭이 전체적인 시스템에 어떠한 영향을 미치는지는 고려되지 않았다. 그러므로 본 논문에서는 주파수 재사용 기법이 셀 용량에 미치는 긍정적인 영향뿐만 아니라 릴레이 노드들 간의 간섭으로 인하여 셀 용량에 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 보이고 주파수 재사용과 릴레이 노드들 간의 간섭 중 어느 것이 더 지배적인 영향을 미치는지 분석하였으며, 또한 실제 환경과 유사한 상황을 조성하기 위하여 모든 채널의 신호 대 간섭 및 잡음비(SINR) 값을 평균값이 아닌 실시간의 랜덤 변수값을 적용하여 사용자 노드들의 서비스 불능(Outage) 현상

지도 고려한 상황에서 셀 용량의 감소를 최소화 하면서 비용을 절감할 수 있는 커버리지 확장 시나리오를 분석하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 시스템 모델에 대하여 살펴보고, III장에서는 SS들의 형평성을 달성하기 위한 자원 할당 방식을 제안하며 그에 따른 셀 평균 용량을 계산하는 식을 제시한다. IV장에서는 시뮬레이션 결과와 수치해석을 통해 주파수 재사용 기법과 RS들 간의 간섭이 셀 용량에 미치는 영향을 분석하고 비용절감 측면에서 효과적인 릴레이 운용 방안을 제시한 뒤 V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려되는 WiMAX 네트워크는 여러 셀들로 구성되며, 각각의 셀에는 하나의 BS와 다수의 RS 및 SS들로 이루어져 있다. 셀 내부의 모든 노드들은 하나의 전방향성(omni-directional) 안테나를 사용하는 것으로 가정하여 데이터를 전송하거나 수신하는 것은 동시에 한 노드에서 이루어질 수 없다. BS는 SS들에게 서비스를 제공하는 역할을 하며 유일하게 백홀(backhaul) 네트워크에 연결되어 있다. RS는 BS와 SS 사이에 데이터를 전달해 주는 역할을 수행한다. 전송거리에 따른 전파신호의 경로손실(path loss)을 구현하기 위해 사용된 경로손실 모델은 Erceg-Greenstein 모델로서 자세한 수식과 지형 타입에 따른 경로손실 지수에 관한 사항은 Erceg의 기술보고서^[7]에 제시되어 있다.

무선 데이터 링크의 상태에 따라 변조 및 코딩 방식(MCS)을 다양하게 적용하는 AMC기술을 사용하므로 표 1에 제시된 바와 같이 각각의 MCS방식에 따라 달성 가능한 데이터의 전송속도도 다르다. 또한 M-QAM방식에 사용되는 비트 에러율(BER) 공식^[8]을 이용하면 각각의 데이터 전송속도를 달성하기 위해 필요한 SINR의 최소 임계값을 구할 수 있으며 표 1의 마지막 열에 제시되어 있다. 수신된 신호의 SINR 값은 수신 신호의 파워를 잡음과 간섭들의 합으로 나누어 준 값으로써 다음과 같이 표현된다.

$$SINR = \frac{P_r}{P_N + \beta P_I + \sum_{i=1}^R P_{R_i}} \quad (1)$$

식 (1)에서 P_r 은 수신된 신호의 파워, P_N 은 노

이즈 파워, P_r 은 인접 셀로부터의 간섭 파워, β 는 인접 셀의 수, P_{R_i} ($i = 1, \dots, R$)는 최대 R개의 RS들이 동일 셀 내에 존재할 때 릴레이 노드 RS_i 로부터의 간섭 파워를 나타낸다. 동일 셀 내에서 동시에 데이터를 전송하는 RS들이 존재할 때만 P_{R_i} 값이 유효하다.

표 1. 변조 및 코딩 방식에 따른 데이터 전송속도, 주파수 효율 및 SINR 임계값
Table 1. Data rate, spectral efficiency, and SINR threshold set according to MCS

MCS	Downlink Data rate d_m [Mbps]	Spectral Efficiency [bps/Hz]	SINR Threshold $\overline{\gamma}_m$ [dB]
QPSK 1/2	5.25	1.0	9.1
QPSK 3/4	7.87	1.5	11.73
16 QAM 1/2	10.49	2.0	13.87
16 QAM 3/4	15.74	3.0	17.55
64 QAM 2/3	20.99	4.0	20.86
64 QAM 3/4	23.61	4.5	22.45
64 QAM 5/6	26.23	5.0	24.02

우리는 또한 다중 경로에 의한 신호의 페이딩 현상을 고려하기 위해 Rayleigh 페이딩 채널을 가정하였으며 그로 인하여 수신된 신호의 SINR 값은 지수 확률 변수로 표현된다^[9]. 그러므로 송신노드와 수신노드간의 무선 데이터 링크의 평균 SINR 값이 주어진다면 데이터 전송속도들의 각각의 확률을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p(d_m) = \int_{\overline{\gamma}_m}^{\overline{\gamma}_{m+1}} \frac{1}{\overline{\gamma}_m^*} \exp\left(-\frac{\gamma}{\overline{\gamma}_m^*}\right) d\gamma \quad (2)$$

여기서 d_m 는 데이터 전송속도이고 $\overline{\gamma}_m^*$ 는 평균 SINR 값이다. 그러므로 사용자 노드 SS가 송신노드로부터 달성 가능한 평균 데이터 전송속도를 d_s 라 표시하면 식 (2)에서 계산된 확률 값을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$d_s = \sum_{m=1}^7 d_m \cdot p(d_m) \quad (3)$$

싱글홉에서의 평균 데이터 전송속도는 위와 같이 계산할 수 있으나 RS를 거쳐서 서비스를 받는 SS의 평균 데이터 전송속도는 두 개의 링크, 즉

BS-RS 와 RS-SS를 모두 고려하여야 한다. RS에서의 자원의 손실이나 데이터 오버플로우(overflow)가 없다고 가정하면 RS로 수신되는 데이터의 양과 RS에서 송신되는 데이터의 양은 같아야 한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$d_{BS-RS} \cdot t_A = d_{RS-SS} \cdot t_B \quad (4)$$

여기서 d_{BS-RS} 와 d_{RS-SS} 는 각각의 링크에 대한 평균 데이터 전송속도를 나타내며 t_A 와 t_B 는 링크가 활성화되어 실제 사용되어지는 시간을 나타낸다. 그러므로 RS를 거쳐 수신되는 SS의 평균 데이터 전송속도는 다음과 같이 실제 수신된 데이터의 양을 소요된 시간으로 나누면 구할 수 있다.

$$d_{BS-SS} = \frac{d_{BS-RS} \cdot t_A}{t_A + t_B} \quad (5)$$

식 (4)을 이용하면 식 (5)는 다음과 같이 간소화될 수 있다.

$$\frac{1}{d_{BS-SS}} = \frac{1}{d_{BS-RS}} + \frac{1}{d_{RS-SS}} \quad (6)$$

RS사용 이전의 셀 크기를 결정하는 방법으로 우리의 이전 논문[6]에서 사용했던 것은 셀 가장자리에 위치한 SS의 평균 SINR값이 최소 SINR 임계값 (9.1dB)을 초과해야 한다는 조건이었다. 그러나 본

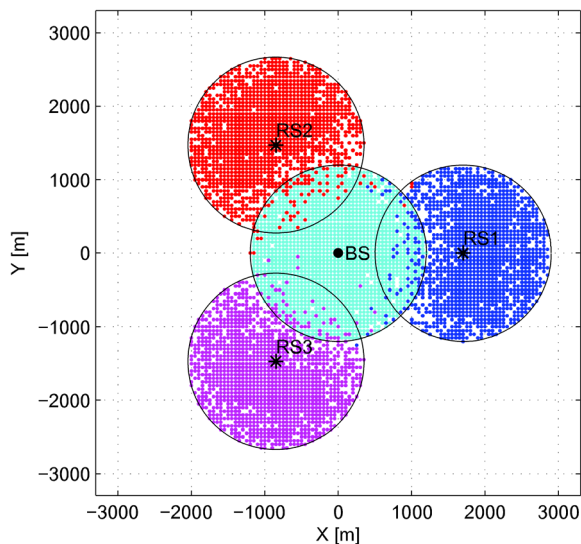


그림 1. RS 세 개를 이용한 커버리지 확장 시나리오
Fig. 1. A coverage extension scenario with three RSs

논문에서는 실제 상황과 유사한 환경을 조성하기 위해 모든 채널의 SINR 랜덤 변수값을 그대로 사용하여 사용자 노드들의 Outage 현상을 고려하였으므로 셀 크기를 결정하는 조건으로 셀 내부 사용자 노드의 90% 이상은 페이딩 채널 하에서도 항상 서비스를 유지할 수 있어야 한다는 것을 이용하였다. 이러한 조건으로 결정된 셀 크기는 반경 1200m이다.

그림 1은 세 개의 RS를 이용하여 커버리지를 확장시키는 시나리오를 보여주고 있다. BS는 셀의 중앙에 위치하고 있으며 RS들은 기존 셀 가장자리보다 바깥쪽에 위치시켜 셀 커버리지를 더욱 확장시키는 경우이다. 이처럼 RS가 1200m보다 더 먼 거리에 위치할 수 있는 이유는 SS보다 더 높은 안테나 이득과 출력 파워를 가지고 있기 때문이다. 본 논문에서는 RS의 안테나 이득과 출력 파워는 BS와 동일한 수준으로 가정하였으며 기타 시뮬레이션에 사용된 파라미터들은 이전 논문[6]에 제시되어 있다. 셀 내부의 BS와 RS들은 SS에게 서비스를 제공해주는 노드들이므로 BS와 RS를 일컬어 서비스 노드라고 한다.

III. 자원 할당 기법

자원 할당 기법이란 네트워크내의 무선 링크들에게 어떠한 방식으로 전송 기회를 부여할 것인가에 관한 사항으로서 자원 할당 기법 따라 네트워크의 성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 특히 802.16j 표준안에 자원 할당 기법에 대해서는 구체화되어 있지 않으므로 최근들어 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 사용자 노드들이 동일한 서비스를 제공받을 수 있는 형평성을 달성함과 동시에 주파수 재사용 기법을 적용할 수 있는 자원 할당 방식을 제안한다. 자원을 할당하는데 있어서 주파수와 시간의 2차원을 고려한 알고리즘은 NP-hard 문제라고 알려져 있으므로[3] 우리는 한 채널 내에서 주파수 스펙트럼은 분할되어 할당되지 않으며, 시간영역에서 타임슬롯을 이용하여 자원을 할당하는 것으로 가정하였다.

단일 셀 내에 R개의 RS들이 커버리지 확장을 위해 사용되고 N개의 SS들이 기지국으로부터 서비스를 요구한다고 가정하면, SS들의 위치와 무선 링크의 상태에 따라 각각의 SS에게 데이터를 전달해 줄 수 있는 서비스 노드(BS 또는 RS)가 선택되어진다. 예를 들어, BS에 가까이 위치한 SS들은 BS로

부터 직접 서비스를 받게 될 가능성이 높고 멀리 떨어진 SS들은 BS보다 근거리에 있는 RS를 통해서 서비스를 받게 되므로 RS가 그들의 서비스 노드가 된다. 그리하여 서비스 노드 BS, RS₁, ..., RS_R로부터 서비스를 받는 사용자 노드들의 집합을 각각 S₀, S₁, ..., S_R라 하고 집합 S_i (i=0, ..., R)에 속한 SS들의 개수를 n_i라 하면, 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$n_0 + n_1 + \dots + n_R \leq N \quad (7)$$

셀 내부에 서비스를 요구하는 SS들 중에 Outage 현상이 발생하지 않을 경우에는 식 (7)이 등식으로 표현될 수 있다. 하나의 데이터 프레임에서 하향 링크에 초점을 맞추어 자원 할당 기법을 설명하기 위하여 access zone에 할당된 시간 비율을 λ₀라 하고, relay zone에서 BS가 RS₁, ..., RS_R로 데이터를 전송할 때 할당되는 시간 비율들을 각각 λ_{R₁}, ..., λ_{R_R}라 하면, 하향 링크 프레임안에서의 최대 사용 효율을 위해 모든 시간 비율의 합은 다음과 같이 1과 같아야 한다.

$$\lambda_0 + \lambda_{R_1} + \dots + \lambda_{R_R} = 1 \quad (8)$$

서비스를 요구하는 SS들의 집합 S_i에 속한 노드들 중에 j번째 (j = 1, ..., n_i) SS의 서비스 노드로부터의 데이터 전송속도와 access zone내에서 할당되는 시간 비율을 각각 d_jⁱ와 λ_jⁱ라 하면, 동일한 서비스 노드로부터 데이터를 전송받는 SS들의 할당되는 시간 비율들의 합은 λ₀보다 같거나 작다.

$$\lambda_1^i + \lambda_2^i + \dots + \lambda_{n_i}^i \leq \lambda_0 \quad (9)$$

사용자 노드들의 형평성을 위하여 동일한 throughput을 달성하기 위해서는 다음과 같이 SS의 데이터 전송속도에 따라 각기 다른 시간 비율들이 할당 되어야 한다.

$$d_1^i \lambda_1^i = d_2^i \lambda_2^i = \dots = d_{n_i}^i \lambda_{n_i}^i, \quad i \in \{0, 1, \dots, R\} \quad (10)$$

집합 S_i에 속한 노드들의 throughput을 모두 더하고 할당된 시간 비율들의 총 합으로 나누면 각 집합의 평균 데이터 전송속도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_i = \frac{n_i d_1^i \lambda_1^i}{\lambda_1^i + \lambda_2^i + \dots + \lambda_{n_i}^i}, \quad i \in \{0, 1, \dots, R\} \quad (11)$$

H_i는 집합 S_i의 평균 데이터 전송속도를 나타내며, 식 (10)를 이용하여 시간 비율에 해당하는 변수들을 제거하면 다음 식으로 표현된다.

$$H_i = \frac{n_i}{\frac{1}{d_1^i} + \frac{1}{d_2^i} + \dots + \frac{1}{d_{n_i}^i}}, \quad i \in \{0, 1, \dots, R\} \quad (12)$$

그러므로 H_i는 집합 S_i에 속해있는 노드의 데이터 전송속도 값들의 조화평균으로 해석되어 질 수 있다. H_i를 이용하여 노드 하나의 throughput을 표현하면 H_iλ₀/n_i과 같으며 이 값은 집합 S_i에 따라 다른 값을 가질 수 있다. 즉, 집합 S_i에 속해있는 SS들의 개수와 링크 상태들에 따라 노드 하나당 달성할 수 있는 throughput의 값은 달라진다. 이를 조정하여 모든 사용자 노드들이 동일한 throughput을 달성하게 하기 위해서는 BS로부터 RS들로 전송되는 데이터의 양을 조절해야 한다. BS로부터 RS₁, ..., RS_R로 각각 전송되는 데이터의 전송속도를 d_{R₁}, ..., d_{R_R}라 하면 전송되는 데이터의 양은 d_{R_i}λ_{R_i} (i = 1, ..., R)으로 표현될 수 있다. SS의 집합들 중에 노드 하나당 throughput이 가장 낮은 집합을 S_x라 하고 그 집합의 평균 데이터 전송속도와 SS들의 개수를 각각 H_x와 n_x로 나타내면, 셀 내에 모든 SS들이 동일한 throughput을 달성하기 위해 다음과 같은 관계식이 성립되어야 한다.

$$\frac{H_x \lambda_0}{n_x} = \frac{d_{R_1} \lambda_{R_1}}{n_1} = \frac{d_{R_2} \lambda_{R_2}}{n_2} = \dots = \frac{d_{R_R} \lambda_{R_R}}{n_R} \quad (13)$$

집합 S_1, \dots, S_R 들에 속한 SS들은 위 식으로부터 항상 형평성을 달성할 수 있으며 어떠한 SS도 다른 SS들의 throughput에 영향을 주지 않고 더 많은 양의 throughput을 달성할 수 없다. 그러나 집합 S_0 에 속한 SS들은 BS로부터 직접 서비스를 받으므로 access zone 기간 동안 충분히 자원을 활용할 수 있어 다른 SS들의 throughput에 영향을 미치지 않고도 좀 더 많은 양의 throughput을 달성할 수 있다. 식 (13)를 이용하여 식 (8)에 relay zone에서의 시간 비율 값들을 대입하면 access zone에 할당된 시간 비율 λ_0 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_0 = \frac{1}{\frac{n_1}{n_x} \frac{H_x}{d_{R_1}} + \frac{n_2}{n_x} \frac{H_x}{d_{R_2}} + \dots + \frac{n_R}{n_x} \frac{H_x}{d_{R_R}} + 1} \quad (14)$$

결국 셀 내부의 모든 링크들의 실시간 데이터 전송속도를 파악할 수 있고 사용자 노드들이 어떤 서비스 노드로부터 서비스를 받는지 결정된다면, 식 (14)으로부터 λ_0 를 구하고 식 (13)로부터 $\lambda_{R_1}, \dots, \lambda_{R_R}$ 들의 값을 쉽게 구할 수 있다. 그리하여, 모든 SS들의 throughput을 더한 셀 용량은 다음 식으로 쉽게 계산될 수 있다.

$$Cell\ Throughput = H_0 \lambda_0 + \sum_{i=1}^R d_{R_i} \lambda_{R_i} \quad (15)$$

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

RS를 사용하여 셀 커버리지를 확장시키고자 할 때 비용효과 측면에서 이를 분석하기 위하여 RS들의 운용 위치와 개수를 변화시켜가며 시나리오를 구성하였고, 이전 논문에서 제안된 자원 할당 기법을 사용하여 셀 용량에 미치는 RS의 영향을 분석하였으며, 특히 주파수 재사용 기법을 적용할 때 RS들 간의 발생하는 간섭 현상이 셀 용량에 미치는 영향을 구체적으로 분석하기 위하여 자원 할당 알고리즘의 수정은 불필요하나 사용자 노드들의 수신된 신호의 SINR을 계산할 때에 수식 (1)과 같이 동시에 데이터를 전송하는 RS들로부터의 간섭 파워를 모두 적용하여 계산하고, 계산된 SINR을 평균값으로 하는 지수 확률분포를 이용하여 실시간대의 랜덤한 SINR 값을 발생시켜 시뮬레이션을 수행하

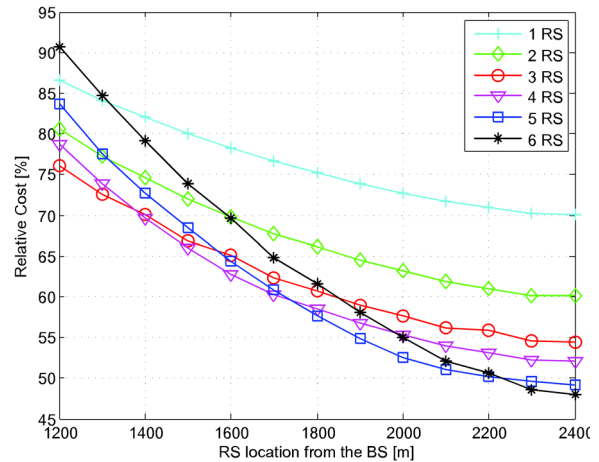


그림 2. RS의 위치와 개수의 변화에 따른 상대 비용
Fig. 2. Relative cost as a function of the RS location for different number of RSs per each cell

였다.

하나의 셀에 사용되는 최대 RS의 개수는 여섯 개로 가정하였으며 RS들의 위치는 BS로부터 일정한 거리의 동심원상에 균등하게 배치되어 있다고 가정하였다. RS를 운용하는데 소요되는 비용을 구체적으로 분석하는데는 많은 제한 사항이 있으므로 BS와 비교하여 상대적인 비용으로 BS의 40% 수준으로 가정하였다. RS가 사용되지 않은 네트워크와 RS를 사용한 네트워크간의 효과적인 비교를 위해 다음과 같이 상대 비용(relative cost)이란 파라미터를 정의한다.

$$\text{상대 비용 [\%]} = \frac{\text{network cost with RS}}{\text{network cost without RS}} \times 100 \quad (16)$$

예를 들어, 고려되는 네트워크의 서비스 면적이 100km^2 이고 RS를 사용하지 않았을 경우에 필요한 셀의 개수를 100개라고 한다면, BS의 개수도 100개이며 셀 한 개의 면적은 대략 1km^2 라고 할 수 있다. 만약, 동일한 네트워크 안에서 각 셀에 두 개의 RS를 사용하여 셀의 커버리지를 2km^2 로 확장시켰다면 전체 필요한 셀의 개수는 50개이며 BS의 개수는 50개, RS의 개수는 100개가 된다. 그러므로 상대 비용을 계산해 보면 90% ($50 + 100 \times 0.4$)이다. 즉, RS를 사용할 때 전체 비용의 10%를 절감할 수 있다는 것이다. 그림 2는 RS를 사용하여 커버리지를 확장하였을 때 상대 비용 값들을 보여준다. RS들의 위치가 BS로부터 멀

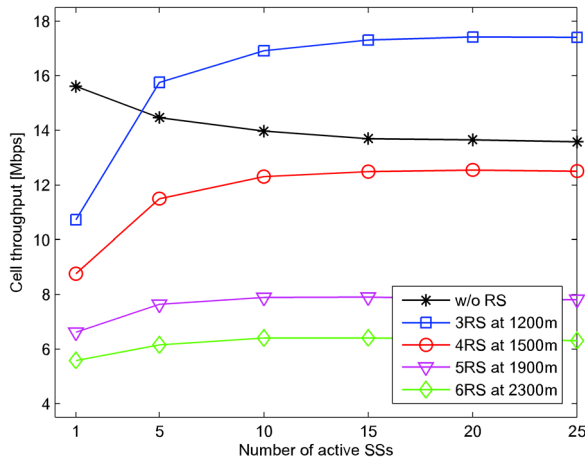


그림 3. RS의 위치와 개수의 변화에 따른 SS의 개수와 셀 용량의 관계
Fig. 3. Cell throughput as a function of the number of active SSs for different locations of RS.

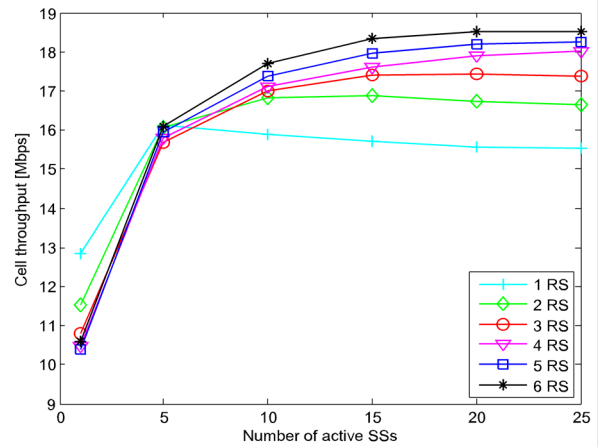


그림 5. RS들의 위치가 1200m 일때 SS의 개수와 셀 용량의 관계
Fig. 5. Cell throughput as a function of the number of active SSs when RSs are placed at 1200m

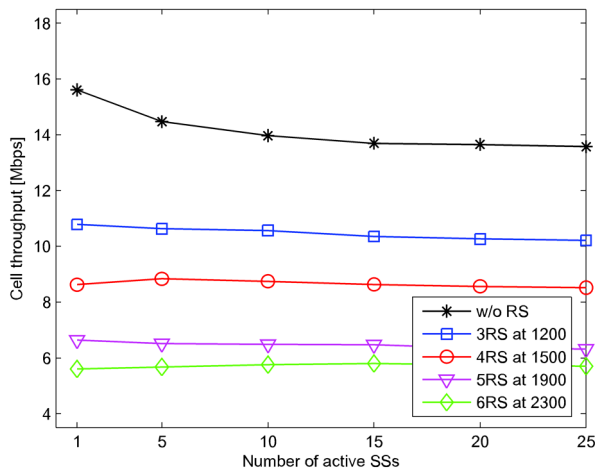


그림 4. 서비스 노드간의 간섭을 고려한 SS의 개수와 셀 용량의 관계
Fig. 4. Cell throughput as a function of the number of active SSs considering interferences between service nodes

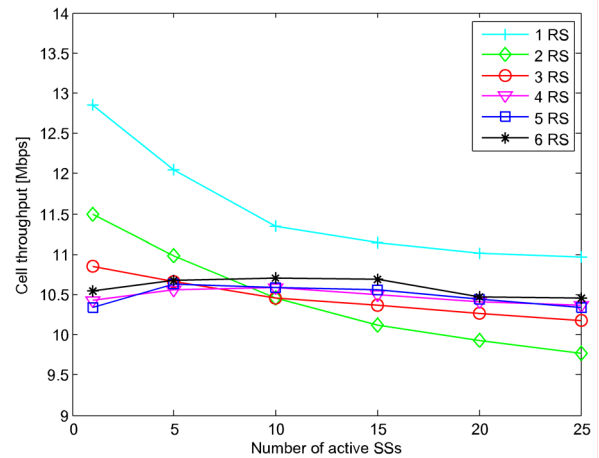


그림 6. RS들의 위치가 1200m 이고 노드간의 간섭을 고려한 SS의 개수와 셀 용량의 관계
Fig. 6. Cell throughput as a function of the number of active SSs when RSs are placed at 1200m and considering interferences between service nodes

어질수록 상대 비용 값이 현저하게 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 커버리지가 확장될수록 비용 측면에서 효과적이라는 것을 의미한다. 그러나 RS의 개수를 증가시키는 것은 비용 측면에서 항상 효과적이지는 않다. RS의 개수가 한 개에서 세 개까지는 RS의 위치에 관계없이 다수의 RS 경우가 비용 측면에서 더 효과적이었으나 RS의 개수가 네 개 이상일 때는 다수의 RS 경우가 오히려 상대 비용 값이 높을 수 있다는 것이다. 예를 들어 RS들의 위치가 1400m 이내일 경우에 최소 상대 비용 값은 RS 세 개가 사용된 경우이다. 즉, 네 개 이상의 RS를 1400m 이내에서 사용하게 되면 RS들 간의 중첩되는 영역들이 증가하면서 셀 전체 커버리지 확장에

크게 기여하지 못하게 된다. 그러므로 RS의 위치가 1400m부터 1700m까지는 네 개, 1800m부터 2200m까지는 다섯 개, 2300m이후는 여섯 개의 RS를 사용하는 것이 바람직하다.

커버리지 확장을 위한 RS의 사용이 셀 용량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 우리가 제안한 자원 할당 기법을 사용하여 셀 용량을 계산하였으며, 특히 SS의 데이터 전송속도를 계산할 때 이전 논문에서는 거리에 따른 평균 데이터 전송속도 값을 이용하였으나 본 논문에서는 실제 상황과 유사한 환경을 조성하기 위해 수신된 SINR의 랜덤변수 값을 직접 이용하여 서비스 노드 가까이 위치해 있어

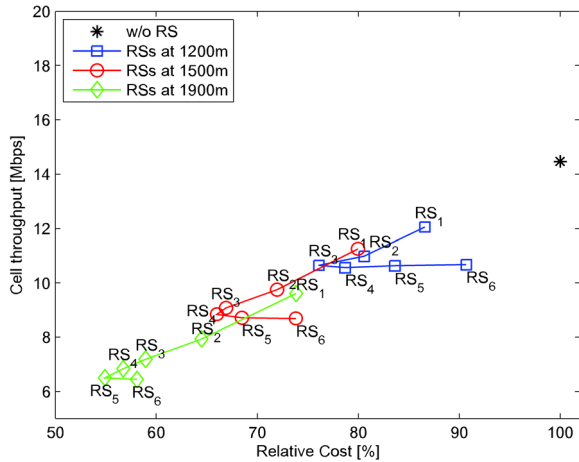


그림 7. SS의 개수가 5개일 때 평균 셀 용량과 상대 비용 값의 관계
Fig. 7. Cell throughput as a function of relative cost for 5 SSs

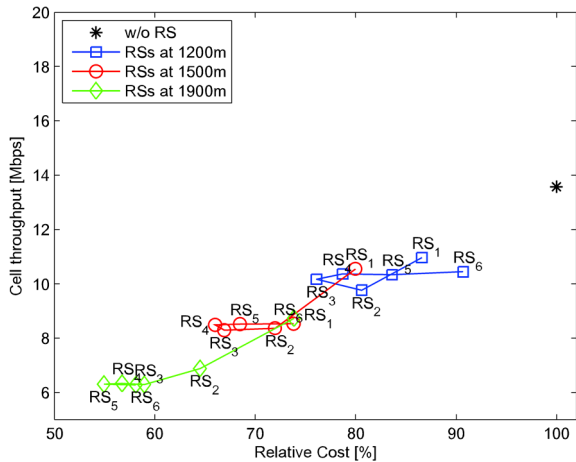


그림 8. SS의 개수가 25개일 때 평균 셀 용량과 상대 비용 값의 관계
Fig. 8. Cell throughput as a function of relative cost for 25 SSs

도 데이터 전송속도가 매우 낮을 수 있는 현상까지도 고려하였다.

그림 3은 커버리지 확장 시나리오에 따른 서비스를 요구하는 SS의 개수와 셀 용량의 관계를 보여준다. 평균 셀 용량의 값을 구하기 위해 하나의 시나리오마다 SS의 위치를 랜덤하게 발생시켜 10,000번의 시뮬레이션을 수행하였다. RS를 사용하지 않은 경우 셀 용량은 SS들이 증가할수록 감소하게 된다. 이는 SS들이 증가함에 따라 서비스 노드와의 링크 상태가 좋지 못해 많은 양의 자원을 할당 받아야 하는 노드들의 발생 확률이 높아지기 때문이다. 반면에, RS를 사용하는 경우에는 전반적으로 SS들이 증가할수록 셀 용량도 증가하는 현상을 보이는데, 이

는 주파수 재사용 기법으로 인하여 두 개 이상의 RS들이 동시에 자원을 할당 받을 수 있기 때문이다. 세 개의 RS가 BS로부터 1200m 떨어진 곳에 사용된 시나리오의 경우는 오히려 RS를 사용하지 않은 경우보다 더 높은 셀 용량을 달성하였다. 그러나 실제 환경에서는 주파수 재사용으로 인한 효과는 서비스 노드 간의 간섭현상으로 인해 그 효과가 감소된다.

그림 4는 서비스 노드 간의 간섭현상이 셀 용량에 미치는 영향을 분석하기 위해 동일한 조건의 시나리오에 간섭현상을 고려하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. SS들이 증가할수록 셀 용량이 증가하는 현상은 없으나 RS를 사용하지 않은 경우처럼 감소하는 현상도 나타나지 않았다. 결국 주파수 재사용 기법의 효과가 크게 감소했다는 것을 알 수 있다. 특히, 세 개의 RS가 1200m 지점에 사용된 시나리오의 경우 최대 41%의 셀 용량이 감소되었다.

그림 5와 6은 RS들이 1200m에 위치할 때 서비스노드들 간의 간섭현상을 고려했을 때와 하지 않았을 때 SS의 개수와 평균 셀 용량과의 관계를 보여준다. 간섭 현상이 고려되지 않았을 때는 RS들의 개수가 증가함에 따라 평균 셀 용량도 계속해서 증가하는 현상을 볼 수 있으며 셀 내부에 서비스를 요구하는 SS들의 개수가 증가함에 따라 평균 셀 용량이 더욱 증가하여 주파수 재사용의 효과가 뚜렷해짐을 알 수 있다. 그러나 서비스노드들 간의 간섭현상이 고려되면 평균 셀 용량이 급격하게 감소함을 알 수 있고 RS의 개수가 1개 일 때 평균 셀 용량의 값이 항상 최대값을 나타낸다. 즉, RS들이 증가할수록 셀 커버리지는 증가하나 평균 셀 용량은 감소하게 된다. 서비스 노드들 간의 간섭으로 인하여 주파수 재사용의 효과는 제한되나 RS들이 3개 이상이고 SS들이 10개 이상 증가하게 되면 평균 셀 용량이 다소 상승하게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 주파수 재사용의 효과는 인접 서비스 노드들의 간섭을 고려하더라도 평균 셀 용량의 향상에 기여한다는 것을 알 수 있다.

비용 측면에서 효과적인 커버리지 확장 시나리오를 판단하기 위해서는 RS의 사용이 비용과 셀 용량에 미치는 영향을 모두 고려해야 하므로 각 시나리오에 대한 상대 비용과 평균 셀 용량을 동시에 비교해 보면 그림 7, 8과 같은 결과를 얻을 수 있다. 서비스 노드 간의 간섭이 고려된 결과로서 셀 내부에 서비스를 요청하는 SS들의 개수가 5개와 25개인 경우를 비교하여 보여준다. 전반적으로 상대 비용

값들은 RS의 위치가 BS로부터 멀어지고 개수가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고, 평균 셀 용량의 값들도 동시에 감소하게 되는데, 결국 상대 비용을 감소시키기 위해 RS를 사용할 때는 셀 용량의 감소가 필연적이라는 것이다. 그러나 좀 더 구체적으로 각각의 시나리오를 살펴보면 RS의 위치와 개수에 따라 평균 셀 용량의 감소를 최소화 하면서 상대 비용값 역시 최소화 할 수 있는 조합을 찾을 수 있다. 예를 들어, 그림 8에서 RS의 위치가 1200m 이고 두 개에서 세 개로 증가할 때 상대 비용 값은 감소하지만 평균 셀 용량 값은 오히려 증가하는 모습을 보인다. 그러나 네 개 이후부터는 다시 상대 비용 값이 증가하게 되므로 1200m에서는 세 개의 RS를 사용하는 것이 최적의 효과를 나타내게 된다. 그러므로 우리가 제안한 자원 할당 기법과 실제와 유사한 환경을 구현하는 시스템 모델을 사용하면 셀 용량의 감소를 최소화 하면서 비용 절감을 할 수 있는 커버리지 확장 시나리오를 판단해 낼 수 있다.

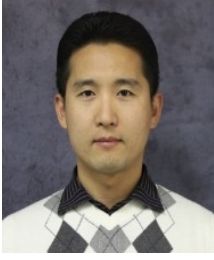
V. 결 론

본 논문에서는 WiMAX 릴레이 네트워크 환경하에서 비용의 효과를 고려한 셀 커버리지 확장 방법에 대하여 연구하였다. 특히, 실제 환경과 유사한 상황을 고려하기 위하여 SS들에게 데이터를 전송하는 서비스 노드들 간의 간섭 현상이 셀 용량에 미치는 영향을 파악하였으며, RS의 안테나 이득과 출력파워를 충분히 활용하여 BS로부터 셀 가장자리를 벗어난 지역에도 사용될 수 있음을 보였다. 시뮬레이션을 통하여 RS가 사용되는 위치에 최소 상대 비용을 달성할 수 있는 RS의 개수를 파악할 수 있었으며, 평균 셀 용량이 서비스를 요구하는 SS들의 수와 RS의 위치 및 개수에 따라 변화되는 현상을 파악할 수 있었다. RS를 통한 커버리지 확장시 주파수 재사용 기법을 적용하여 RS를 사용하지 않았을 경우보다도 더 높은 셀 용량을 달성 할 수 있는 모습을 볼 수 있었으나, 실제 환경에서 문제가 될 수 있는 서비스 노드간의 간섭을 적용하면 주파수 재사용의 효과는 큰 폭으로 감소된다는 것을 보였다. 그러나 상대 비용 값과 평균 셀 용량 값을 동시에 분석함으로써 셀 용량의 감소를 최소화 하면서 비용을 절감할 수 있는 커버리지 확장 시나리오를 판단해 낼 수 있음을 보였다.

References

- [1] *IEEE Std 802.16j, Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks*, Jun. 2009.
- [2] C. Hoymann, M. Dittrich, and S. Goebbels, "Dimensioning cellular multihop WiMAX networks," in *Proc. IEEE Mobile WiMAX Symposium*, pp. 150-157, Mar. 2007.
- [3] S. Deb, V. Mhatre, and V. Ramaiyan, "WiMAX relay networks: opportunistic scheduling to exploit multiuser diversity and frequency selectivity," in *Proc. ACM MOBICOM*, pp. 163 - 174, Sep. 2008.
- [4] P. Li, M. Rong, Y. Xue, and E. Schulz, "Reuse one frequency planning for two-hop cellular system with fixed relay nodes," in *Proc. IEEE WCNC*, pp. 2253 - 2258, Mar. 2007.
- [5] W. H.. Park and S. Bahk, "Resource management policies for fixed relays in cellular networks," *Computer Communications*, vol. 32, no. 4, pp. 703 - 711, Mar. 2009.
- [6] Y. Kim and M. L. Sichitiu, "Cost effective coverage extension in 802.16j mobile multihop relay networks," in *Proc. IEEE WCNC*, Apr. 2010.
- [7] V. Erceg and K. V. S. Hari, "Channel models for fixed wireless applications," in *IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group*. Technical Report, Jul. 2001.
- [8] G. J. Foschini and J. Salz, "Digital communications over fading radio channels," *Bell System Tech. J.*, vol. 62, no. 2, pp. 429 - 456, Feb. 1983.
- [9] Q. Zhang and S. Kassam, "Finite-state markov model for Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 11, pp. 1688 - 1692, Nov. 1999.

김 용 철 (Yongchul Kim)



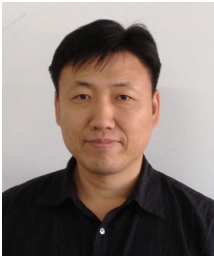
1998년 3월 육군사관학교 전자
공학과 학사

2001년 11월 University of
Surrey, UK 전자공학과 석사

2011년 12월 North Carolina
State University, USA 전기
컴퓨터 공학과 박사

2012년 2월~현재 육군사관학교 전자정보학과 조교수
<관심분야> WiMAX, Relay Networks, Ad-hoc
Networks

임 원 택 (Won-taek Lim)



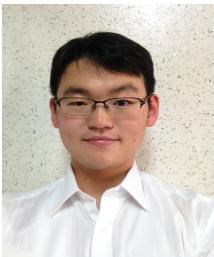
1993년 3월 육군사관학교 전산
학과 학사

1997년 2월 연세대학교 대학원
전자공학과 석사

2007년 7월 Purdue University,
USA 전기 컴퓨터 공학과
박사 수료

2007년 8월~현재 육군사관학교 전자정보학과 조교수
<관심분야> Ad-hoc Networks, Network
Optimization

조 성 환 (Sung-hwan Cho)



2007년 3월 육군사관학교 전자
공학과 졸업

2011년 12월 Georgia Insitutue
of Technology, USA 전자
컴퓨터 공학과 석사

2012년 2월~현재 육군사관학교
전자정보학과 강사

<관심분야> 시간동기화, MAC QoS