http://dx.doi.org/10.7840/kics.2014.39B.4.216

데이터 운송 중계기를 운용하는 무선 선형 네트워크에서의 전송률 성능 분석

진 현 보◆, 민 병 윤*, 서 정 욱**, 김 동 구°

Network Throughput Analysis of Mechanical Relay Assisted Transmission in Wireless Line Networks

Hyun Bo Jin◆, Byung-Yoon Min*, Jeongwook Seo**, Dong Ku Kim°

요 약

데이터-운송 중계기(mechanical relay: McR)는 운송 지연 및 간헐적 접속단절을 반영하는 중계기법 중에 하나다. 기존의 비이동성 중계기법과 달리, 데이터-운송 중계기법은 다양한 종류의 차량 및 교통기반시설의 이동성을 이용하여 근거리의 송수신이 가능하게 하는 점에서 잠재적인 이득이 존재한다. 본 논문에서는 McR을 운용하는 무선 선형 네트워크(wireless line networks: WLN)를 고려하고, 각 사용자간의 다중 홉 무선전송 기법과 데이터-운송 중계기법을 비교하고, 에르고딕 네트워크 전송률의 관점에서 분석한다. 또한 Vehicle SISO(Ve-SISO) 뿐만 아니라 Vehicle SIMO/MISO(Ve-SIMO/MISO)의 경우에 대해서도 McR의 사용을 고려한다. 에르고딕 네트워크 전송률에 대한 실험 결과로부터 McR의 속도, 사용자와 McR의 밀도, 그리고 McR의 사용방식에 따라서 나타나는 트레이드-오프관계를 살펴본다.

Key Words : Mechanical Relay, Vehicular ad hoc networks, Delay tolerant network, Ergodic network throughput

ABSTRACT

Mechanical Relay (McR) is a relaying architecture to enable data communications, where it can endure the transportation delay and intermittent disconnection. Every kind of vehicular infrastructures can be readily utilized for the mechanical relaying in the manner of moving natures, which brings the most significant consequences compared to conventional relaying schemes. In this paper, we analyze the ergodic network throughput of McR in wireless line networks (WLN) to compare the results between employing McRs and direct multi-hopping through the users without McRs. We demonstrate the McR scheme that are not only Ve-SISO but also Ve-SIMO/MISO. The numerical results of ergodic network throughputs contribute to the trade-off relation depending on the speed v of McRs, intensity factors λ_u and λ_r, and the methods of how McRs are utilized.

※ 본 연구는 한국연구재단의 지원(5세대 계층적 이기종 셀룰러 네트워크와 도시교통 네트워크를 연동시키는 데이터-운송 중계기 그린 라디오 무선접속 기술개발, 과제번호:2012R1A2A2A01047554)으로 수행되었습니다.
◆ First Author : Yonsei university 전기전자공학과 이동통신 연구실, jinhb@yonsei.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : Yonsei university 전기전자공학과 이동통신 연구실, dkkim@yonsei.ac.kr, 종신회원
* 연세대학교 전기전자공학과 이동통신 연구실, minby33@yonsei.ac.kr, 학생회원
** 남서울대학교 정보통신공학과, jwseo@nsu.ac.kr
논문번호 : KICS2013-12-528, Received December 10, 2013; Revised January 14, 2014; Accepted March 25, 2014

Ⅰ. 서 론

"가까이 있는 것이 먼저 서비스 된다"는 개념은 물리계층과 여러 상위계층에서 지속적으로 정보이론적 접근을 통한 연구, 그리고 확률적인 기회와 이득을 보이기 위한 구현 이슈를 파생하였다. 특히, 네트워크 내 노드의 이동성을 고려하는 이동성 중계기법은 위의 개념을 직접적으로 적용하는 대표적인 예가 될 수 있다. 이와 더불어 다중 홉(multi-hop) 중계기법과 가상의 다중-입력 다중-출력(Virtual multiple-input-multiple-output: V-MIMO)을 적용한 기법은 네트워크 내 노드 수에 비례하여 선형적인 전송용량 증가를 달성할 수 있는 주목할 만한 전송 기술로 알려져 있다. 그러나 목표 노드까지 중계하여 연결하기까지 기다리는 시간과 중계노드가 움직이는 시간에 의한 전송지연이 불가피하게 발생한다. 이러한 전송지연, 데이터 전송률 그리고 전송노드 간의 간섭 사이에 트레이드오프 관계를 파악하고, 이에 대한 최적의 해법을 찾는 것은 아직 풀리지 않고 있다. 특히 모바일 애드 혹 네트워크(MANET), 차량 애드 혹 네트워크(VANET), 그리고 지연 감내 네트워크(DTN) 등과 같이 전송지연이 존재하는 네트워크 환경은 여전히 많은 이론적인 연구를 필요로 한다.

노드의 이동성과 데이터 전송용량의 관계를 도출하기 위한 연구는 지속적으로 진행되어왔다. Grossglauser와 Tse는 애드 혹 네트워크에 독립적이고 균일한 분포의 이동성 모델(independent and identically distributed: I.I.D.)을 적용하여 선형적으로 증가하는 전송용량을 달성할 수 있는 노드 간 이동성 중계기법을 제안하였고[1], 이후로 애드 혹 네트워크에서의 전송지연과 전송률의 관계가 좀 더 구체화 되었다. 이에 대한 후속 연구에서는[2,3] 임의의 MANET에서 노드의 이동성에 제한이 있는 경우의 네트워크 전송률 증감비와 그에 상응하는 지연시간의 증감비의 관계를 도출하였고, 이동성에 어느 정도 제한이 있어도 전송용량의 선형적 증가에 영향을 미치지 않는다는 점을 보여준다.

그러나 위의 선행연구가 노드의 이동성을 이용하여 전송용량의 선형증가를 달성하지만, 데이터가 정확히 전송되기까지 무한대 값의 전송지연이 발생하는 것은 불가피하다. I.I.D. 이동성 모델의 경우 확률적인 전송모델을 분석하는데 용이한 전형적인 모델이지만, 시간에 따른 이동패턴의 상호 상관성과 실제 움직임이 공간적으로 변화하는데 존재하는 상관성을 전혀 반영하지 못한다. 이를 반영한 랜덤워크 이동성 모델[4-6], 마코비안 이동성 모델[7], 브라운 이동성 모델[4,5,8], 랜덤 웨이포인트(way-point) 이동성 모델[5,8]등의 이동성 모델을 적용한 후속 연구들은 네트워크 전송률과 전송지연의 트레이드오프를 큐잉 이론 및 확률적 분석을 이용하여 제시한다.

두 노드를 연결하는데 전송지연이 존재하는 상황으로 DTN 구조 역시 많이 고려되고 있다. DTN은 군사서비스, 긴급/응급상황 발견 및 전파, 그리고 VANET 등에서의 다양한 응용 가능성을 가지며, 즉시 사용할 수는 없지만 데이터 저장 및 운송노드의 버퍼(buffer)를 이용하는 상황에서 주로 활용된다. 본 논문의 기반인 DTN과 VANET을 적용한 차량 DTN은 현재 구체적인 프로젝트가 진행 중이며[9], 관련 선행연구로 저장/운반 및 전달 중계기법, 라우팅 기법을 통한 송수신 성공 확률[10-12], VANET을 위한 현실적인 이동성 모델과 통신 패턴[13-15] 등이 있다.

위와 같은 연계적인 선행연구에 더불어, 본 논문에서 우리는 "차량의 이동성을 적용한 효율적인 데이터-운송 중계 프로토콜이 무엇인지, 그리고 전송지연이라는 성능 열화를 포함하더라도 이동성 중계기법이 여전히 유용할 것인가"라는 문제를 제기한다. 특히, 이와 관련된 주제로서 데이터-운송 중계기(mechanical relay: McR)는 셀룰러 네트워크에서 전송전력 효율 증가, 셀 전송률 증가, 동일대역 채널 간 간섭 감소, 그리고 셀 내 트래픽 관리 및 오프로딩을 위해서 처음 제안되었다[16]. McR은 애드 혹 네트워크에서도 이동성을 이용하여 근거리 통신을 하기 때문에, 큰 간섭을 유발하는 장거리 통신에 비해 노드 간 간섭을 줄이고 전력효율 이득을 얻을 수 있다. McR은 모든 종류의 차량시스템에 적용될 수 있고, 현재 반도체 기술이 충분히 발달하였기 때문에 차량에 대용량의 저장매체를 싣고 실제의 도로 상황에 맞추어 구현하는 것이 가능하다[17]. McR을 이용하여 위의 질문에 답을 구하기 위해서는 우선 전송지연을 포함한 제한된 Shannon 용량을 고려하고, 사용자와 McR들의 밀집도에 따른 McR 기법의 이득을 살펴봐야한다.

본 논문은 컨베이어 벨트 방식의 사물 전달과 유사하게, 사용자와 McR들이 무한히 긴 무선 선형 네트워크(WLN)에 균일하게 분포하고 McR은 일정한 속도로 움직일 때, 두 홉의 근거리 중계기법을 고려한다. 본 연구진의 선행연구에서 단일 사용자간 통신에서 단일 McR 기법의 근본적인 이득을 보였고[18], 이에 대한 확장으로 본 논문은 다중 사용자간 통신에서 다중 McR 기법과 사용자간 다중 홉 통신방식을 비교하고 이득을 살펴본다. WLN 내 모든 사용자들은 첫 단계에 보내고자 하는 데이터를 인접한 McR에 업로드

하고(데이터-업로딩), 그리고 두 번째 단계에서 McR이 원하는 유저에게 수집된 정보를 전파하게 된다(데이터-다운로딩). 본 논문은 복잡한 프리코딩 알고리즘이나 최적화 문제를 고려하지 않은 채 McR 기법의 근본적인 이득을 파악하고, McR 기법과 사용자간 다중 홉 전송법의 에르고딕 네트워크 전송률 분석을 통해 성능을 비교한다. 수식을 통한 해석 및 시뮬레이션 결과를 통해, McR의 이동성, 사용자/McR들의 밀집도를 달리한 WLN 상황에서 제안하는 McR 기법의 향상된 성능을 기대할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서 네트워크 구조, McR의 통신 모델 그리고 그들의 성능 지표를 제공한다. Ⅲ장에서 McR을 위한 프로토콜과 알고리즘을 소개한다. Ⅳ장에서 Ve-SISO 전송을 통한 에르고딕 네트워크 전송률을 분석하고, 비교를 위해서 유저들 사이의 다중 홉 방식을 결정한다. Ⅴ장에서 밀집된 McR의 Ve-SIMO/MISO 전송으로 확장한다. Ⅵ장에서 모든 수치 및 실험 결과를 살펴본다. 마지막으로 Ⅶ장에서 결론을 내리고 향후 연구를 고려한다.

Ⅱ. 네트워크 모델

2.1 네트워크 구조

본 논문에서는 고속도로와 같은 한 방향의 일차원 무선 선형 네트워크(wireless line networks: WLN)를 고려한다. 이 WLN에는 두 개의 선이 있다. 하나는 사용들을 위한 것이고 다른 하나는 McR들을 위한 것이다. 그림 1은 데이터를 앞과 뒤로 전달하는 양방향의 데이터-운송 중계 통신을 고려하는 두 선 네트워크를 시각화한 것이다. 이 구조에서 양방향 중계는 데이터-업로딩/다운로드 두 단계로 분류한다. 무한한 고정된 사용자들은 동일하게 거리 ℓ_u만큼 떨어져 분포하고, McR들은 속도 v로 한 방향으로 이동하며, 동일하게 거리 ℓ_r만큼 떨어져 분포한다. 사용자의 밀도 λ_u와 McR의 밀도 λ_r 는 다음과 같이 간격을 통해 정의할 수 있다.

$$\lambda_u = \frac{1}{\ell_u},\ \lambda_r = \frac{1}{\ell_r} \tag{1}$$

목표로 하는 네트워크는 두 가지의 조건으로 분류된다고 가정하자. 하나는 희박한 McR ($\lambda_u > \lambda_r$) 그리고 나머지는 밀집된 McR ($\lambda_u \le \lambda_r$)로 분류된다. WLN에서 McR의 중요한 역할을 파악하기 위해 고정된 λ_u와 변하는 λ_r을 고려한다. 여기서 반경 R을 가지는 전송 범위는 물리적인 의미에서 중요한 개념이다. 각 사용자들이 업로딩과 다운로딩을 위해 McR들과 링크로 연결할 수 있는지를 설명해주는 범위이기 때문이다. 또한 넓은 전송 범위는 동시에 더 많은 McR들을 활용할 수 있는 기회일 수 있다. 그리고 사용자들 간의 전송 범위가 겹치지 않는다고 가정하자. 즉 모든 사용자들의 전송 범위는 분리되어있다. 또한 모든 전송 범위의 합집합은 무한의 WLN이다. 따라서 $R=\ell_u/2$로 표현된다. 다음으로 모든 McR들은 두 단계의 중계에서 선입선출(FIFO) 큐잉 방식을 따르고, 무한의 저장 용량을 가지고 있는 것으로 고려하자.

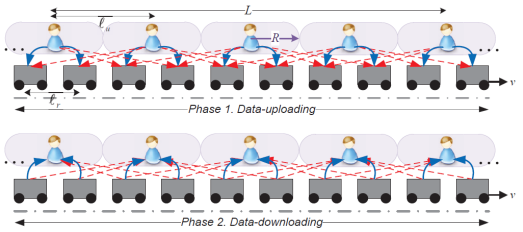


그림 1. 양방향 McR 네트워크의 데이터-업로딩/다운로딩단계
Fig. 1. Two-way McR networks with data-uploading /downloading phases.

정의 1 (FIFO 큐잉). 사용자의 전송 범위에서 적어도 하나의 McR이 있을 경우, 사용자는 데이터를 업로딩하며 McR들은 연속적으로 사용자들의 데이터를 저장한다. 전달목표 사용자의 전송범위에 McR이 위치하면, McR은 데이터 스텍의 첫 진입에서부터 순서대로 데이터를 전달한다. 이 두 과정이 연속적으로 반복된다. 또한 데이터를 받는 과정과 데이터를 전달하는 과정이 동시에 일어날 수 없다.

2.2 채널 모델링

본 절에서는 McR 네트워크에서 고려하는 채널을 살펴본다. 네트워크 구조로 근거리 두 홉 전송을 고려하므로, 스몰-스케일 페이딩 혹은 셰도잉보다 경로감쇄 채널을 고려한다. 두 선 사이의 최소 거리를 단위 거리[1]로 하자. 원점에서의 경로감쇄 법칙의 특이성을 피하기 위해서 이러한 가정이 도움을 준다. 그리고 각 사용자는 L 거리만큼 떨어진 다른 사용자에게 메시지를 보낸다. 여기서 통신을 위한 두 가지 방법이 있다[2]. 첫 번째로 사용자와 사용자를 통한 다중 홉 전달, 그

1) 임의의 상수를 선택할 수 있지만 간략화하기 위해서 단위 거리를 잡음. 다중 홉 기술에서의 특이성 문제 제거를 위해, 채널 모델 $h(\ell_{ij}) = \min(1, \ell_{ij}^{-\alpha})$ 사용하였다.

2) 한 홉 통신은 L이 충분히 클 때, 경로감쇄에 의한 성능이 심각하게 저하되어 배제하였다.

리고 두 번째로 두 홉을 포함하는 McR의 이용이다.

모든 사용자들과 McR들이 하나의 안테나만 설치되었다고 고려하면, McR들의 경로감쇄 채널은 다음과 같이 표현된다.

$$h(\ell_{ij}) = \sqrt{(1+\ell_{ij}^2)^{-\alpha}} \tag{2}$$

여기서 ℓ_{ij}는 i번째 사용자(McR)과 j번째 McR(사용자) 사이의 수평 거리를 나타내고, α는 일반적으로 $2 \le \alpha \le 4$를 가지는 경로감쇄 지수를 나타낸다. 그림 2는 $\ell_u = \ell_r$ 인 경우의 경로감쇄 채널 값을 위한 기본적인 거리 측정을 나타내었다. 대상과 간섭 채널은 다음과 같이 정의된다.

$$h(r) = (1+r^2)^{-\frac{\alpha}{2}} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} g_i(r) &= (1+(i\ell_u - r)^2)^{-\frac{\alpha}{2}} \\ &+ (1+(i\ell_u + r)^2)^{-\frac{\alpha}{2}} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $r \in [-R, R)$은 사용하는 McR의 현재 위치고, g_i는 i번째 간섭대상의 좌우측 사이의 간섭 합을 의미한다.

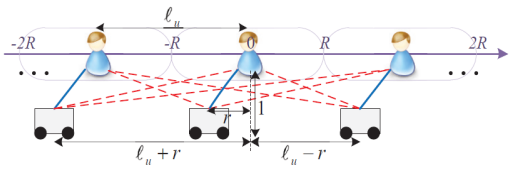


그림 2. 경로감쇄 채널에서의 대상과 간섭의 거리 계산 ($\ell_u = \ell_r$)
Fig. 2. Distance measures for desired and interfering path-loss channels($\ell_u = \ell_r$)

2.3 성능 지표

데이터가 출발지로부터 McR을 통해 목적지에 도착하는데 걸리는 시간을 중계 지연(d_r)으로 정의하자.

정의 2 (중계 지연). 만약 데이터 전송 사용자와 중계대상 사용자의 거리가 L, McR의 속도가 v 라면, 중계 지연은 다음과 같이 정의된다.

$$d_r = \frac{L+2r}{v} \tag{5}$$

여기서 r은 전송범위의 McR과 사용자의 수평거리다. 전송과 중계대상 사용자 2명이 있으므로 2r로 나타낼 수 있다. 따라서 분자부분은 전송 사용자가 McR에게 데이터-업로딩을 시작할 때부터 중계 받을 사용자가 McR로부터 완전히 다운로딩할 때까지의 McR의 물리적인 총 이동 길이다. 이 길이를 중계기의 속도로 나눠주면 중계하는 동안의 시간, 즉 중계 지연 시간 d_r이 된다. 본 논문에서는 McR과 사용자들 간의 데이터 전송 시에 걸리는 시간을 고려하지 않는다. 따라서 중계 지연은 데이터-운송 중계기 네트워크에서 전송에 걸린 총 시간이다.

네트워크 전송률은 전체 네트워크에서 다양한 사용자의 성능을 공정히 비교할 수 있는 중요한 측정방식 중에 하나다. 중계 지연의 관점에서, 이 네트워크 전송률은 단위 시간당 한 사용자가 McR을 통해 전달할 수 있는 전송률을 나타낸다. 그러므로 데이터-운송 중계기의 사용자 당 네트워크 전송률은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} T_N(r) &= \frac{1}{2d_r}\log_2(1+\mathrm{SINR_N(r)}) \\ &= \frac{v}{2(L+2r)}\log_2(1+\mathrm{SINR_N(r)}) \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 N 은 한 전송 범위에 설치된 McR들의 수이고, $\mathrm{SINR_N}$ 은 전송 프로토콜과 중계 방법에 의해 결정된다. 또한, 분모의 2는 McR들이 중계에 두 홉이 소요되므로 나누어주었다.

비고: 본 논문에서는 McR의 물리적인 이동시간을 고려하여, 사용자 당 네트워크 전송률로 나타내었다. $\log_2(1+\mathrm{SINR_N(r)})$[bps/hz]이 사용자와 McR 간의 전송률이지만, McR 네트워크 관점에서 보면 중계지연(d_r)시간만큼 걸려야 전송이 완료가 된다. 그래서 실제적으로 중계지연 시간동안 전송된 데이터의 양은 $\log_2(1+\mathrm{SINR_N(r)})$[bit/hz]가 된다. 즉 한 사용자가 다른 사용자에게 데이터를 보낼 때 $\log_2(1+\mathrm{SINR_N(r)})$ [bit/hz] 만큼 보냈고, 이때 중계지연(d_r)만큼 시간이 걸린 것이다. 전송에 두 홉이 소요되었으므로 받은 데이터의 양을 중계지연과 홉 수로 나누어주면, 최종적으로 데이터-운송중계기 사용에 따른 네트워크 전송률은 식 (6)과 같다.

에르고딕 네트워크 전송률은 한 사용자의 전송범위 $r \in [-R, R)$에서의 네트워크 전송률에 의해서 결정된다. McR과 연결될 때의 확률과 사용자당 네트워크 전송률의 곱으로 수식화 된다.

$$\mathbb{E}[I]=\sum_{k=0}^{N_{\max}}\Pr(N=k)\int_{-R}^{R}T_k(r)dr \tag{7}$$

여기서 $k=0$일 때, 전송 범위에 연결된 McR이 없으므로 작동하지 않는다. 그러므로 $T_0(r)$은 모든 $r\in[-R,R)$에서 0 이다.

Ⅲ. 데이터-운송 중계 기반 전송 프로토콜과 알고리즘

3.1 데이터-운송 중계 기반 전송 프로토콜

본 장에서 Vehicle maximal ratio combining/transmission(Ve-MRC/MRT) 기술을 사용하는 프로토콜과 알고리즘을 소개한다. 참고로 어두 Vehicle은 일반적인 다중안테나에서 MRC/MRT의 사용을 McR에서 가상의 다중안테나 형태로 사용하기 위해서 붙인 단어이다. 그러므로 각 사용자의 전송 범위에서 McR들은 1 단계에서 서로 협력을 통해 Ve-MRC를 사용하고, 2 단계에서 McR들은 다른 대상 사용자에게 전송하기 위해서 Ve-MRT을 사용한다.

페이즈 1 단계(데이터-업로딩). 이 단계에서 모든 사용자들이 동시에 대상 McR N개에게 데이터를 보낸다. $N=\lfloor 2R/\ell_r \rfloor$ 는 전송 범위안의 McR들의 수를 나타낸다. 한 사용자가 각 McR에게 한 번에 한 개의 데이터를 보낸다고 가정한다. 각 McR은 정보 수송을 위해서 무한의 저장장치를 가지고 있고, 인접한 대상 사용자에게 데이터를 완벽히 전달할 수 있다고 하자.

페이즈 2 단계(데이터-다운로딩). 비록 McR을 통해 전달되는 전체의 정보가 이용자들에게 검색될 수 있지만, McR들은 적합한 대상에게 적합한 정보만 전달해야만 한다. 그러기위해서는 전송범위 안의 McR들 사이에 협력 전송기술이 필요하다. 예를 들면 채널 상태 정보(CSI), 트래픽 조절 정보(TCI), McR의 저장장치의 데이터 공유가 협력을 통해서 해결된다고 가정하자. 이 단계에서의 실제적인 문제 중의 하나인 데이터 동기화는 지능적인 데이터 검색 방법에 의해서 정확하게 해결된다고 가정한다. 그러므로 이동하는 McR들은 멀리 떨어진 대상 사용자에게 데이터를 배출하고 다른 사용자들의 데이터를 받아 중계하는 데이터 컨베이어 벨트처럼 기능을 수행할 수 있다.

3.2 데이터-운송 중계 기반 전송 알고리즘

본 절에서 McR에서의 구체적인 전송 기술을 소개한다. 처음에 McR들과 사용자들은 제한된 평균 전송 전력 P를 가진다. 어떠한 전력 조절이 없는 사용자와 McR들의 전송전력은 $\mathbb{E}[P_u]=\mathbb{E}[P_r]=P$ 라고 가정한다.

각 McR은 하나의 대상 사용자들에 연결되어 있고 무한한 수의 다른 사용자들로부터의 간섭을 받는다. 모든 McR들은 모든 전송 범위 안의 다른 McR들의 채널상태정보(CSI)를 얻을 수 있고, 상호-차량 협력을 한다고 가정하자. 여기서 대상 사용자들의 전송 범위 안에 존재하는 각 McR들은 데이터-업로딩 시간동안 Ve-MRC를 수행하고, 데이터-다운로딩 시간동안 Ve-MRT를 수행한다. 우선 1 단계에서 대상 사용자로부터 수신된 벡터 $\mathbf{y}_d$은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{y}_d=\mathbf{h}x_d+\sum_i \mathbf{g}_i x_i+\mathbf{n} \tag{8}$$

여기서 $\mathbf{y}_d$, $\mathbf{h}$, $\mathbf{g}_i$, $\mathbf{n}\in\mathbb{C}^{N\times 1}$는 각각 수신된 신호, 대상 채널, 간섭 채널 그리고 정규 분포 $\mathbf{n}\sim CN(0,\sigma_n^2\mathbf{I})$을 따르는 백색 잡음 벡터다. 그리고 x_d와 x_i는 대상 사용자와 i-번째 간섭 사용자로부터의 데이터를 나타낸다. 각 채널 벡터는 경로감쇄만 고려한다. (8)에 Ve-MRC를 적용하여 McR들이 복조한 신호 $\hat{x}_d$는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\hat{x}_d&=\frac{\boldsymbol{h}^H\boldsymbol{y}_d}{\|\boldsymbol{h}\|^2}\\&=x_d+\sum_i\frac{\boldsymbol{h}^H\boldsymbol{g}_i}{\|\boldsymbol{h}\|^2}x_i+\frac{\boldsymbol{h}^H n}{\|\boldsymbol{h}\|^2}\end{aligned} \tag{9}$$

페이즈 1단계에서 움직이는 McR이 $r\in[-R,R)$일 때의 순간적인 신호 대 간섭잡음 비는 아래와 같다.

$$\overline{\mathrm{SINR}}(r)=\frac{\|\boldsymbol{h}(r)\|^2P}{\sum_i\frac{|\boldsymbol{h}^H(r)\boldsymbol{g}_i(r)|^2}{\|\boldsymbol{h}(r)\|^2}P+\sigma_n^2} \tag{10}$$

다음으로 페이즈 2단계에서 각 McR들은 Ve-MRT를 사용하여 대상 데이터를 전달한다. $\bar{\boldsymbol{h}}$, $\bar{\boldsymbol{g}}_i$, $\bar{\boldsymbol{h}}_i\in\mathbb{C}^{1\times N}$는 각각 대상 채널, 간섭 채널 그리고 간섭 McR들의 대상 채널이다. $\bar{n}$은 정규 분포 $\bar{n}\sim CN(0,\sigma_n^2)$을 따르는 백색 잡음이다. 대상 채널에 Ve-MRT를 적용하면, McR의 전송 신호 벡터 $\mathbf{x}_d$와 사용자가 수신한 신호 $\bar{y}_d$는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_d &= \frac{\overline{\boldsymbol{h}}^{\boldsymbol{H}}}{\|\overline{\boldsymbol{h}}\|}\hat{x}_d,\\ \bar{y}_d &= \overline{\boldsymbol{h}}\mathbf{x}_d + \sum_i \bar{\boldsymbol{g}}_i \mathbf{x}_i + \bar{n}\\ &= \|\overline{\boldsymbol{h}}\|\hat{x}_d + \sum_i \bar{\boldsymbol{g}}_i \frac{\overline{\boldsymbol{h}}_i^H}{\|\overline{\boldsymbol{h}}_i\|}\hat{x}_i + \bar{n}\end{aligned} \tag{11}$$

따라서 페이즈 2단계에서 r에 따른 SINR은 아래와 같다.

$$\underline{\mathrm{SINR}}(r) = \frac{\|\overline{\boldsymbol{h}}(r)\|^2 P}{\sum_i \frac{|\overline{\boldsymbol{g}_i}(r)\overline{\boldsymbol{h}_i}^{\boldsymbol{H}}(r)|^2}{\|\overline{\boldsymbol{h}}_i(r)\|^2} P + \sigma^{2_n}} \tag{12}$$

중계기의 중계방식에는 Amplify-and-forward (AF)와 Decode-and-forward(DF) 등의 여러 가지 방식이 있지만, 본 논문에서는 각 링크의 최소 채널용량을 설정하지 않고 각 유저 및 McR들이 완벽히 데이터를 복조가능하다고 가정하자. 이때 중계방식으로 DF방식을 적용한 데이터-운송중계기를 고려하겠다[19]. DF 중계기 사용에 따른 수신 SINR은 아래와 같다.

$$\mathrm{SINR}_N^{df} = \min[\overline{\mathrm{SINR}}(r), \underline{\mathrm{SINR}}(r)] \tag{13}$$

Ⅳ. Vehicle-SISO 기반의 데이터-운송 중계 기술

4.1 Vehicle-SISO 전송의 에르고딕 네트워크 전송률

본 장에서는 다중 홉 전송 방식과의 비교를 위해서, Vehicle-SISO(Ve-SISO) 데이터-운송 중계방식 자체에 대한 분석에 집중한다. McR이 적어도 하나 존재할 때, 사용자가 전송 범위 안의 가장 가까운 하나의 McR을 선택하여 전송하는 방식을 고려하자. 모든 채널이 스칼라가 되기 때문에, (10)와 (12)는 다음과 같이 간략화 된다.

$$\begin{aligned}\overline{\mathrm{SINR}}(r) &= \frac{|h(r)|^2 P}{\sum_{i'} |g_{i'}(r)|^2 P + \sigma_n^2}\\ \underline{\mathrm{SINR}}(r) &= \frac{|\bar{h}(r)|^2 P}{\sum_{i'} |\bar{g}_{i'}(r)|^2 P + \sigma_n^2}\end{aligned} \tag{14}$$

간섭 시퀀스 g와 $\bar{g}$는 밀도 λ_u와 λ_r에 의존한다. 아래에 다른 네트워크 상황에서 이들의 관계에 따라 어떻게 McR이 작동하는지 설명한다.

*$\lambda_u > \lambda_r$: 그림 3(a)에서 McR들의 수가 부족하기 때문에 일대일 연결이 가능하지 않다. 사용자와 McR들 사이의 연결이 간헐적으로 발생한다.

*$\lambda_u = \lambda_r$: 그림 3(b)에서 모든 사용자와 McR들은 페이즈 1 단계와 페이즈 2 단계에서 통신한다.

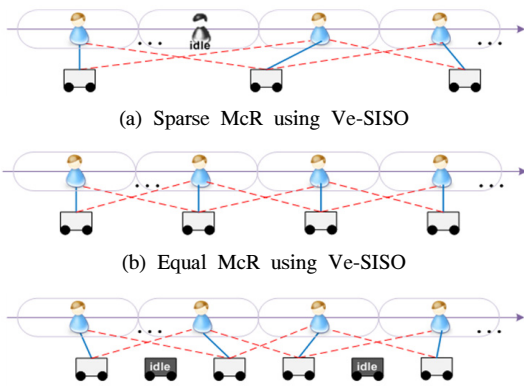
*$\lambda_u < \lambda_r$: 그림 3(c)에서 각 사용자가 전송 범위 안에서 한 개의 McR만 선택해야 하므로, 모든 사용자와 McR 간의 일대일 연결이 가능하지 않다. 사용자와 연결되는 McR이 전송 범위에 따라 바뀐다. 페이즈 1단계 연결되지 않은 McR들은 페이즈 2단계에서 작동하지 않다.

정리 1(Ve-SISO: 에르고딕 네트워크 전송률). 무한의 사용자와 McR들이 각각 동일하게 ℓ_u와 ℓ_r의 간격으로 떨어져있다고 가정하자. 만약 각 사용자가 가장 가까운 McR을 선택했을 때, 에르고딕 네트워크 전송률은

$$\mathbb{E}[T] = \Pr(N=1)\int_{-R}^{R} T_1(r)dr + \Pr(N=0)\int_{-R}^{R} T_0(r)dr \tag{15}$$

$$= \frac{\ell_u}{\ell_r}\int_{-\min(\frac{\ell_u}{2},\frac{\ell_r}{2})}^{\min(\frac{\ell_u}{2},\frac{\ell_r}{2})} \frac{v}{L+2r} log_2(1+\mathrm{SINR}_1(\mathrm{r}))\mathrm{dr} \tag{16}$$

$$= \begin{cases} \frac{v\ell_u}{\ell_r}\int_{-\ell_u/2}^{\ell_u/2} \frac{1}{L+2r}\log_2(1+\mathrm{SINR}_1(\mathrm{r}))\mathrm{dr}, \text{if}\,\lambda_u \geq \lambda_r \\ \frac{v\ell_u}{\ell_r}\int_{-\ell_r/2}^{\ell_r/2} \frac{1}{L+2r}\log_2(1+\mathrm{SINR}_1(\mathrm{r}))\mathrm{dr}, \text{if}\,\lambda_u < \lambda_r \end{cases} \tag{17}$$



(a) Sparse McR using Ve-SISO

(b) Equal McR using Ve-SISO

(c) Dense McR using Ve-SISO

그림 3. Ve-SISO에서 3가지 상태
Fig. 3. Three different states using Ve-SISO

비고: 위 식에서 $N=0$ 일 때, $T_0(r)=0$이다. ℓ_u가 주어졌을 때, 밀집된 McR들의 경우에서 성능 이득이 명확히 나타난다. 만약 McR들이 띄엄띄엄 분포해있다면 적분구간을 $\ell_u/2$로 사용한다. 반대로 밀집하게 분포된 McR에서는 적분구간을 $\ell_r/2$로 사용한다. SINR은 r에 대하여 단조 감소하기 때문에 log 앞부분의 이득은 적분 구간으로부터의 이득을 초과한다. 또한 언제나 높은 속도의 McR을 사용할 경우가 성능이 더 좋다.

4.2 사용자 다중 홉 전송의 에르고딕 네트워크 전송률

본 절에서는 제안한 McR 기법과 비교할 다중 홉 전송기법을 소개한다. 일반적으로 사용자들 사이의 다중 홉 전송의 지연은 McR에서의 중계지연보다 훨씬 작지만 숨겨진 단점이 존재한다. 예를 들면, 모든 사용자들이 전송 주기 동안에 한 데이터을 보내고자 한다면, 다중홉 전송에서 각 사용자들은 필요하지 않은 다른 사용자의 데이터도 중계해주어야만 한다. 따라서 각 사용자들은 전송 주기 동안에 홉수 분의 1 만큼의 자기 데이터만 사용가능하다. 즉, 많은 홉핑수가 WLN에서 큰 성능 저하를 발생시켜서, 이를 통해 McR을 사용하는 경우가 이득이 있음을 명확하게 설명해준다.

보조정리 1(사용자간 다중홉 통신). 모든 사용자가 L/ℓ_u 홉을 통해서 정보를 전달하려고 할 때, 무선 선형 네트워크 전송률은 아래와 같다.

$$\mathbb{E}[T_u]=\begin{cases}\dfrac{\ell_u}{2L}\log_2\left(1+\dfrac{P_u}{P_u\hat{\beta}_{2\alpha}+\ell_u^{2\alpha}\sigma_n^2}\right) \\ ,\text{if } \ell_u \geq 1 \\ \dfrac{\ell_u}{2L}\log_2\left(1+\dfrac{P_u\ell_u^{-2\alpha}}{P_u\left(1+2\left\lfloor\dfrac{\ell_u^{-1}+1}{2}\right\rfloor+\hat{\beta}_{2\alpha}^{'}\ell_u^{-2\alpha}\right)+\sigma_n^2}\right) \\ ,\text{if } \ell_u<1\end{cases} \tag{18}$$

여기서 $\hat{\beta}_{2\alpha}$,$\hat{\beta}_{2\alpha}^{'}$는 2α의 함수의 상수 값이다. 두 단계에 걸쳐서 전송하는 다중홉 전송을 고려하자. 두 단계는 각각 홀수 사용자들을 위한 전송과 짝수 사용자들을 위한 전송이다. 각 사용자들은 전송 주기 t_p 동안에 전송하거나 받는 역할을 번갈아가며 수행한다. 매 주기 동안 사용자들의 절반은 각각 이전 사용자의 데이터를 전달하고 나머지 절반은 한 개의 데이터를 받아서 복조한다고 가정하면, L/ℓ_u 홉 DF 중계기의 전송률을 T_u로 정의할 수 있다.

$$T_u=\frac{\ell_u}{2L}\log_2\left(1+\min\left(\mathrm{SINR}_1,\cdots,\mathrm{SINR}_{\frac{\mathrm{L}}{\ell_u}}\right)\right) \tag{19}$$

경로감쇄가 강한 무선 선형 네트워크에서 각 유저들이 받는 총 간섭의 양은 동일하며, 총 간섭량은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\sum_i I_i &= \min(1,\ell_u^{-2\alpha})+2(\min(1,(3\ell_u)^{-2\alpha}) \\ &\quad +\min(1,(5\ell_u)^{-2\alpha})+\cdots) \\ &=\begin{cases}\hat{\beta}_{2\alpha}\ell_u^{-2\alpha} & ,\text{if } \ell_u \geq 1 \\ 1+2\left\lfloor\dfrac{\ell_u^{-1}+1}{2}\right\rfloor+\hat{\beta}_{2\alpha}^{'}\ell_u^{-2\alpha} & ,\text{if } \ell_u<1\end{cases}\end{aligned} \tag{20}$$

여기서 $\hat{\beta}_{2\alpha}$, $\hat{\beta}_{2\alpha}^{'}$는 아래와 같다.

$$\hat{\beta}_{2\alpha}=-1+\sum_{i=1}^{\infty}2(2i-1)^{-2\alpha}$$

$$\hat{\beta}_{2\alpha}^{'}=\sum_{i=\lfloor(\ell_u^{-1}+1)/2\rfloor}^{\infty}2(2i-1)^{-2\alpha}$$

이 상수들은 아래와 같은 성질 때문에 항상 수렴한다.

$$\sum_{i=1}^{\infty}2(2i-1)^{-2\alpha}=\frac{(2^{2\alpha}-1)\pi^{2\alpha}}{(2\alpha)!}|B_{2\alpha}|$$

여기서 $B_{2\alpha}$는 베르누이 상수이다. 모든 사용자들의 전송 전력은 동일하므로, 최소 SINR값은 아래와 같다.

$$\mathrm{SINR}_u=\frac{P_u\ell_u^{-2\alpha}}{P_u\sum_i I_i+\sigma_n^2} \tag{21}$$

그러므로 (19)는 (20)과 (21)에 의해서 (18)으로 나타난다.

V. Vehicle-SIMO/MISO 기반의 데이터-운송 중계 기술

5.1 에르고딕 네트워크 전송률

본 장에서는 Vehicle-SIMO/MISO (Ve-SIMO/MI-SO) 데이터-운송중계 기법을 고려한다. 3장에서 언급한바와 같이 각 사용자는 전송범위($N=\lfloor 2R/\ell_r \rfloor$) 안의 모든 McR들과 Ve-MRC/ MRT를 사용하여 연

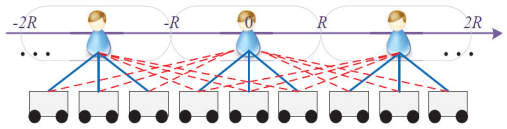


그림 4. Ve-SIMO/MISO 데이터-운송 중계기
Fig. 4. Mechanical relaying using Ve-SIMO/MISO

결된다(그림 4. 참고). 사용자와 McR들 사이의 채널은 크기 N혹은 $N+1$의 벡터로 표현할 수 있다. 그 이유는 한 사용자에 연결되는 McR들의 개수는 N 혹은 $N+1$개이기 때문이다. 여기서 유저 및 McR들이 각각 일정한 간격으로 위치하므로, Ve-SIMO/MISO로 연결되는 경우는 밀집된 McR의 경우($\lambda_u < \lambda_r$)밖에 없다. 또한 Ve-SISO의 경우와는 다르게, 연결되지 않는 McR은 존재할 수 없다.

정리 2(Ve-SIMO/MISO: 에르고딕 네트워크 전송률). 무한개수의 사용자와 무한개수의 밀집된 McR들이 각각 ℓ_u, ℓ_r의 간격으로 떨어져있다. 만약 각 사용자들에 대해서 모든 McR들이 중계에 사용될 때, 에르고딕 네트워크 전송률은 아래와 같다.

$$\mathbb{E}[T] = \Pr(N)\int_{-R}^{R} T_N(r)dr + \Pr(N+1)\int_{-R}^{R} T_{N+1}(r)dr \tag{22}$$

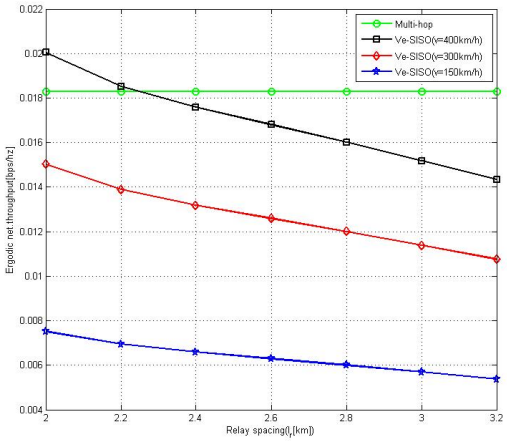
$$= \left(\left\lfloor \frac{\ell_u}{\ell_r} \right\rfloor + 1 - \frac{\ell_u}{\ell_r}\right)\int_{-\ell_u/2}^{\ell_u/2} \frac{v}{L+2r}\log_2(1+\mathrm{SINR}_N(r))dr + \left(\frac{\ell_u}{\ell_r} - \left\lfloor \frac{\ell_u}{\ell_r} \right\rfloor\right)\int_{-\ell_u/2}^{\ell_u/2} \frac{v}{L+2r}\log_2(1+\mathrm{SINR}_{N+1}(r))dr \tag{23}$$

비교: Ve-SIMO/MISO 경우에, 각 사용자들은 N 혹은 $N+1$의 McR들을 사용할 수 있다. 그리고 Ve-SISO와 비교하면 적분구간의 변화가 나타난다. Ve-SIMO/MISO의 경우 적분구간을 $\ell_u/2$로 사용한다. 게다가 SINR_N에서 다수의 McR을 반영하므로 채널의 구현 및 차원에서 변화가 나타난다. 이를 통해서 Ve-SIMO/MISO에서는 대상과의 연결에서 높은 차원의 채널 및 log앞 부분의 증가와 더 적은 경로감쇄를 통해서 더 큰 어레이 이득을 얻을 수 있다.

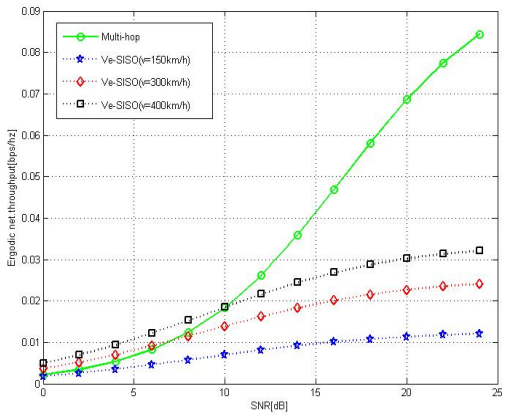
Ⅵ. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제안한 데이터-운송 중계기 방식과 기존의 다중 홉 중계기 방식의 성능을 비교한다. 실험환경은 경로감쇄 지수는 3, 전달 주기시간은 0.01 초(t_p=0.01), 데이터 전달 목적지부터 도착지까지의 거리는 10 km(L=10), 사용자들의 거리는 2 km(ℓ_u=2)씩 떨어져있다. 데이터-운용 중계기와 사용자들은 무한한 길이의 선형 네트워크에 존재한다고 가정한다.

그림 5.(a)는 Ve-SISO McR의 간격 변화에 따른 에르고딕 네트워크 전송률을 비교한 그래프이다. x축은 데이터-운송 중계기의 간격이고 y축은 에르고딕 네트워크 전송률이다. McR 및 사용자의 실험 SNR은 10dB이고 사용자들이 데이터-운송 중계기 보다 밀집해 분포한 경우이다($\ell_u < \ell_r$). 검정색의 사각형 그래프는 McR의 속도가 400km/h 인 경우, 빨강색의 마름모 그래프는 속도가 300km/h인 경우 그리고 파랑색의 별표 그래프는 속도가 150km/h인 경우이다. 원형 초록 그래프는 다중 홉 중계기 그래프이다. 본 논문에서



(a) Ergodic network capacity according to McR spacing($\ell_u < \ell_r$)



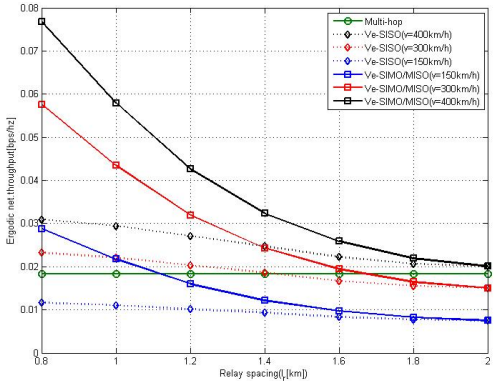
(b) Ergodic network capacity according to SNR

그림 5. Ve-SISO에서 에르고딕 네트워크 전송률
Fig. 5. Ergodic network capacity using Ve-SISO

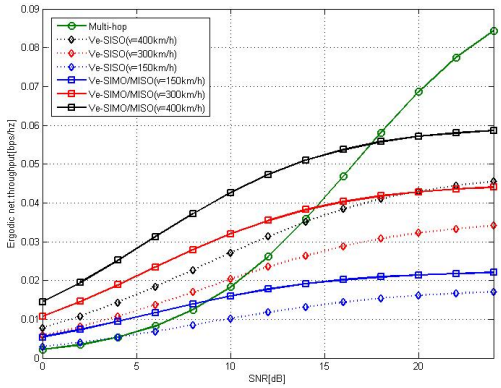
150km/h는 고속도로 환경, 300km/h는 철도 환경 그리고 400km/h는 고속의 이동체를 사용하는 환경으로 가정하여 실험하였다. McR의 경우 서로의 간격이 넓어질수록 에르고딕 네트워크 전송률이 감소하는 것을 확인할 수 있다. McR의 속도가 400km/h인 경우가 150km/h와 300km/h인 경우보다 에르고딕 네트워크 전송률이 큰 것으로 보아, McR의 속도가 클수록 에르고딕 네트워크 전송률이 증가한다는 것을 확인 할 수 있다. McR과 다중홉 중계기를 비교하면, McR의 속도가 400km/h의 경우 2~2.2km 릴레이 간격에서 다중홉 전송방식보다 에르고딕 네트워크 전송률이 더 크다는 것을 알 수 있다. 위의 결과를 통해서 속도와 중계기 간격에 따라서 McR 사용 환경과 다중홉 사용 환경의 네트워크 전송률의 우위가 달라진다는 것을 알 수 있다.

그림 5.(b)은 Ve-SISO McR 및 사용자의 SNR 변화에 따른 에르고딕 네트워크 전송률을 비교한 그래프이다. x축은 데이터-운송 중계기의 SNR이고 y축은 에르고딕 네트워크 전송률이다. 실험한 McR 간격은 2.2km이다. 이는 사용자들이 McR 보다 밀집해 분포한 경우이다($\ell_u < \ell_r$). 검정색의 사각형 그래프는 McR의 속도가 400km/h 인 경우, 빨강색의 마름모 그래프는 속도가 300km/h인 경우 그리고 파랑색의 별표 그래프는 속도가 150km/h인 경우이다. 원형 초록 그래프는 다중홉 중계기 그래프이다. McR의 경우 SNR이 커질수록 에르고딕 네트워크 전송률이 증가하다가, SNR이 계속 커지면 전송률이 수렴한다. 그리고 속도가 400km/h인 경우가 300km/h와 150km/h인 경우보다 에르고딕 네트워크 전송률이 큰 것을 알 수 있다. McR와 다중홉 중계기를 비교하면, McR의 속도가 400km/h의 경우는 SNR 10dB 이하에서 McR의 사용하는 경우가 다중홉 중계기보다 더 높은 에르고딕 네트워크 전송률을 갖는다. 이것으로 보아 낮은 SNR의 환경에서는 다중홉 중계기보다 McR의 사용이 에르고딕 네트워크 전송률의 이득을 가질 수 있다.

그림 6.(a)은 Ve-SISO와 Ve-SIMO/MISO McR의 간격 변화에 따른 에르고딕 네트워크 전송률을 비교한 그래프이다. x축은 McR의 간격이고 y축은 에르고딕 네트워크 전송률이다. McR 및 사용자의 실험 SNR은 10dB이고 사용자들보다 McR이 밀집해 분포한 경우이다($\ell_u > \ell_r$). 검정색 그래프는 McR의 속도가 400km/h 인 경우, 빨강색 그래프는 속도가 300km/h인 경우이고 파랑색 그래프는 속도가 150km/h인 경우이다. 사각형 실선 그래프는 Ve-SIMO/MISO McR



(a) Ergodic network capacity according to McR spacing($\ell_u > \ell_r$)



(b) Ergodic network capacity according to SNR

그림 6. Ve-SIMO/MISO와 Ve-SISO에서 에르고딕 네트워크 전송률
Fig. 6. Ergodic network capacity using Ve-SIMO/MISO and Ve-SISO

그래프이고, 마름모 점선 그래프는 Ve-SISO McR 그래프이다. 원형의 초록색 실선은 다중 홉 중계기 그래프이다. 같은 속도의 McR을 사용하는 경우에 대해서, 항상 Ve-SIMO/ MISO McR 경우가 Ve-SISO McR 경우보다 더 높은 에르고딕 네트워크 전송률을 얻었다. 그리고 McR의 간격이 점점 줄어들수록 Ve-SIMO/MISO McR의 경우가 Ve-SISO McR의 경우보다 더 가파른 기울기의 네트워크 전송률 증가를 보였다. 다중 홉 전송방식과 비교를 해보면, McR의 사용방식, 간격과 속도에 따라서 다중 홉 중계기와 McR의 에르고딕 네트워크 전송량의 우위가 결정된다. 그림 5. (a)에서의 결과와는 다르게 McR의 속도가 150km/h인 경우에도 Ve-SIMO/ MISO 전송 방식을 사용하면 다중홉 전송방식보다 더 높은 에르고딕 네트워크 전송률을 얻는 구간(0.8~1.1km)이 존재한다.

그림 6.(b)은 Ve-SISO와 Ve-SIMO/MISO McR 및

사용자의 SNR 변화에 따른 에르고딕 네트워크 전송률을 비교한 그래프이다. x축은 McR의 SNR이고 y축은 에르고딕 네트워크 전송률이다. 실험한 데이터-운송 중계기 간격은 1.2km이다. 이는 사용자들보다 McR이 밀집해 분포한 경우이다($\ell_u > \ell_r$). 검정색 그래프는 McR의 속도가 400km/h 인 경우, 빨강색 그래프는 속도가 300km/h인 경우이고 파랑색 그래프는 속도가 150km/h인 경우이다. 사각형 실선 그래프는 Ve-SIMO/MISO McR 그래프이고, 마름모 점선 그래프는 Ve-SISO McR 그래프이다. 원형의 초록색 실선은 다중홉 중계기 그래프이다. SNR이 증가할수록 Ve-SISO 및 Ve-SIMO/MISO McR 사용하는 경우의 에르고딕 네트워크 전송률이 점점 증가하다가 수렴하였다. 같은 McR 속도에 대해서 Ve-SIMO/MISO McR의 경우가 Ve-SISO McR의 경우보다 항상 더 높은 에르고딕 네트워크 전송률을 가진다. 다중 홉 방식과 McR 방식과 비교를 하면, 낮은 SNR일 때 McR이, 높은 SNR 일 때 다중 홉 방식이 더 높은 에르고딕 네트워크 전송률을 가졌다. 그리고 McR의 속도가 증가함에 따라 그 교차지점의 SNR 값이 점점 증가하였다. McR의 속도가 150km/h인 경우에 대해서 그림 5.(b)의 결과와 비교하면, 앞의 결과에서는 다중 홉 중계기 사용이 McR 사용보다 항상 더 높은 에르고딕 네트워크 전송률을 가졌다. 하지만 McR이 밀집된 경우에서 Ve-SIMO/MISO McR을 사용하면 다중 홉 방식보다 더 높은 에르고딕 네트워크 전송률을 얻을 수 있는 SNR값이 존재하였다. 다시 말하면, McR이 사용자들보다 밀집하게 분포한 경우에는 SNR 및 McR 사용방식에 따라 다중 홉 방식보다 McR 방식이 에르고딕 네트워크 전송률 관점에서 더 좋을 수 있다.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 무선 선형 네트워크에서 데이터-운송 중계기 사용을 고려하였고, 데이터-운송 중계기법에 수반되는 운송 지연, 간헐적 접속단절의 특성을 반영하는 통신 방법을 제시하고 성능을 분석하였다. 우선 다중 홉 중계기를 사용하는 경우와 데이터-운송 중계기를 사용하는 경우를 비교하여 에르고딕 네트워크 전송률 관점에서 성능을 살펴보았다. 또한 한 사용자가 한 개의 데이터-운송 중계기를 사용하는 Ve-SISO 환경뿐만 아니라, 여러 개의 데이터-운송 중계기를 사용하는 Ve-SIMO/MISO의 경우에 대해서도 성능을 살펴보았다. 본 연구에서 제안하는 데이터-운송 중계기법은 지연감내 데이터에 대해서 중계기간의 거리 및 속도를 고려하여 운용할 때, 채널 및 경로감쇄를 극복할 수 있기 때문에 전송지연에 의한 성능저하를 반영하는 에르고딕 네트워크 전송률 관점의 성능지표에서 다중 홉 전송에 비해 뒤처지지 않는 성능을 보였다. 특히 채널 및 경로감쇄를 극복하기 위해서 Ve-SIMO/MISO와 같이 도로망에 존재하는 다량의 교통수단을 이용한다면, 데이터-운송 중계기법의 성능을 극대화 할 수 있다. 또한 밀집된 중계기 분포 상황과 빠른 중계기 속도를 가질 때 더 높은 성능을 나타내었다. 본 실험환경보다 낮은 속도인 100km/h 내외의 현실적인 교통 환경 및 낮은 밀도의 중계기 분포 상황에서도 다중 홉 중계방식보다 더 높은 성능을 얻을 수 있는 데이터-운송 중계기법 연구가 진행 중이다. 또한 본 연구를 바탕으로 확장시켜 2차원의 셀룰러 네트워크 및 비균일 사용자 및 중계기 분포 환경에서도 연구를 진행하고 있으며, 다중안테나에 의한 공간자원을 보다 효율적으로 사용하는 데이터-운송 중계기법을 연구 중에 있다.

References

[1] M. Grossglauser and D. Tse, “Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 10, no. 4, pp. 477-486, Aug. 2002.

[2] S. N. Diggavi, M. Grossglauser, and D. Tse, “Even one-dimensional mobility increases the capacity of wireless networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 11, pp. 3947-3954, Nov. 2005.

[3] J. Mammen and D. Shah, “Throughput and delay in random wireless networks with restricted mobility,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 3, pp. 1108- 1116, Mar. 2007.

[4] A. Gamal, J. Mammen, B. Prabhakar, and D. Shah, “Throughput-delay trade-off in wireless networks,” in *IEEE INFOCOM*, vol. 1, Mar. 2004.

[5] G. Sharma and R. Mazumdar, “Delay and capacity trade-offs in mobile ad hoc networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 15, no. 5, Oct. 2007.

[6] X. Wang, Y. Bei, Q. Peng, and L. Fu, “Speed improves delay-capacity trade-off in motion cast,” *IEEE Trans. Parallel Distributed Syst.*,

vol. 22, no. 5, pp. 729-742, May 2011.

[7] M. J. Neely and E. Modiano, "Capacity and delay tradeoffs for ad hoc mobile networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 6, pp. 1917-1937, Jun. 2005.

[8] G. Sharma and R. Mazumdar, "Scaling laws for capacity and delay in wireless ad hoc networks with random mobility," *IEEE ICC*, vol. 7, pp. 3869-3873, Jun. 2004.

[9] P. Pereira, A. Casaca, J. Rodrigues, V. Soares, J. Triay, and C. Cervello-Pastor, "From delay-tolerant networks to vehicular delay-tolerant networks," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 4, pp. 1166-1182, Sept. 2011.

[10] J. Zhao, Y. Zhang, and G. Cao, "Data pouring and buffering on the road: A new data dissemination paradigm for vehicular ad hoc networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 6, pp. 3266-3277, Nov. 2007.

[11] J. Zhao and G. Cao, "VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 3, pp. 1910-1922, May 2008.

[12] D. Niyato and P. Wang, "Optimization of the Mobile Router and Traffic Sources in Vehicular Delay-Tolerant Network," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 9, pp. 5095-5104, Nov. 2009.

[13] J. Harri, F. Filali, and C. Bonnet, "Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 4, pp. 19-41, Dec. 2009.

[14] E. Schoch, F. Kargl, and M. Weber, "Communication patterns in VANETs," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 11, pp. 119-125, Nov. 2008.

[15] O. Tonguz, N. Wisitpongphan, and F. Bai, "DV-CAST: A distributed vehicular broadcast protocol for vehicular ad hoc networks," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 2, pp. 47-57, Apr. 2010.

[16] P. Kolios, V. Friderikos, and K. Papadaki, "Energy Consumption and Resource Utilization in Mechanical Relaying," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 6, no. 1, pp. 24-30, Mar. 2011.

[17] R. Woo, J. Lee, and D. S. Han, "Communication capacity of vehicular communication systems based on IEEE 802.11a," in *Proc. KICS*, pp. 306-307, Jun. 2009.

[18] J. Shim, B.-Y. Min, C.-H. An, Y.-J. Ryu, U. Pak and D. Kim, "Mechanical relaying transmission over point-to-point efficient low-power management," in *Proc. KONI*, pp 73, Jul. 2012.

[19] T. Wang, A. Cano, G. Giannakis, and J. Laneman, "High-performance cooperative demodulation with decode-and-forward relays," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 7, pp. 1427-1438, Jul. 2007.

진 현 보 (Hyun Bo Jin)

2012년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과 공학사

2012년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석사과정

<관심분야> 차량 중계 통신 기술, 소형셀 기술, 펨토-캐싱

민 병 윤 (Byoung-Yoon Min)

2010년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 공학사

2010년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정

<관심분야> MANET, VANET, 차량 중계 통신 기술, 5세대 간섭활용기술

서 정 욱 (Jeongwook Seo)

2010년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과 박사

2001년 1월~2014년 2월 : KETI 네트워크융합연구센터 책임연구원

2014년 3월~현재 : 남서울대학교 정보통신공학과 조교수

<관심분야> 통계신호처리, 통신소프트웨어, 차세대 방송통신시스템, M2M/IoT디바이스

김 동 구 (Dong Ku Kim)

1983년 2월 : 한국항공대학교 통신공학과 졸업

1985년 : U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 석사

1992년 : U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 박사

1994년~현재 : 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 교수

<관심분야> 5세대 이동통신 시스템, 협력 MIMO 기술, 무선 이동 Relay 기술, Compressed Sensing, 소형셀 기술