

http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.5.249

JIIBC 2013-5-31

다중-인터페이스 애드-혹 무선 네트워크를 위한 MAC 인식 다중-채널 라우팅 프로토콜

MAC Aware Multi-Channel Routing Protocol for Multi-Interface Ad-Hoc Wireless Networks

임헌주*, 정수경**, 이성화***, 박인갑****

Hunju Lim, Sookyoung Joung, Sungwha Lee, Inkap Park

요 약 다중-홉 애드 혹 네트워크(multi-hop ad hoc networks)에서 실효 대역폭과 단-대-단 처리량을 높이기 위한 방법으로 다중-인터페이스 다중-채널 구조가 주목을 받고 있다. 그러나 단일 인터페이스 기반 네트워크를 위해서 설계된 기존의 라우팅 메트릭들은 다중-인터페이스 다중-채널 기반 네트워크의 특성을 정확히 반영할 수 없으므로, 처리량 개선의 효과를 기대할 수 없다. 따라서 채널 다양성, 인터페이스 전환 비용과 같은 메트릭들을 사용하여 높은 처리량을 갖는 경로를 발견하는 MCR이 제안되었다. 하지만 MCR은 트래픽 부하의 영향을 반영하지 않기 때문에 혼잡한 네트워크에서 성능이 저하되는 문제점이 있다. 본 논문에서는 MCR에 채널 접근 시간 메트릭을 결합하여 혼잡한 조건에서도 높은 처리량을 갖는 경로를 선택하는 MAMCR 메트릭을 제안하고, ns-2 시뮬레이션을 통해 성능 개선 효과를 확인한다.

Abstract In multi-hop ad hoc networks, multi-interface multi-channel architecture is being noticing as methodology to improve the effective bandwidth and end-to-end throughput, But since existing routing metrics designed for networks based on single-interface exactly can not reflects the nature of networks based on multi-interface multi-channel, we are not expected the effect of throughput improvement. there had been proposal of MCR that discover high throughput by using metrics such as channel diversity and interface switching cost. however, MCR have an problem that is degraded it's performance in congested networks, because it not reflects the impact of traffic load. in this paper, we propose MAMCR metric, which select high throughput paths under congested conditions by combination MCR with channel access time metric, and conform it's the effect of performance improvement by ns-2 simulation.

Key Words : multi-interface, multi-channel, channel diversity, interface switching, channel access time

1. 서 론

자율-구성, 자율-복구와 같은 기능을 갖고 있기 때문에 복잡한 설치와 유지보수가 필요 없고, 유선 기간망(wired

애드 혹 무선 네트워크(ad-hoc wireless networks)는

*정회원, 대은전자(주) 통신기술개발팀

**정회원, 건국대학교 전자공학부

***중신회원, 한라대학교 정보통신과

****정회원, 건국대학교 전자공학부

접수일자 : 2013년 9월 12일, 수정완료 2013년 10월 8일

게재확정일자 : 2013년 10월 11일

Received: 12 September, 2013 / Revised: 8 October, 2013

Accepted: 11 October, 2013

*Corresponding Author: hylim12@hanafos.com

Dept.of.Telecommunication Technology R&D Team,

Daceun Eletronic Inc.

infrastructure) 없이 다중 홉(multi hop) 통신을 통해서 신속하게 망을 구성할 수 있는 장점이 있어 주로 군사용 통신에서 많이 사용되어 왔다. 그러나 애드 혹 네트워크 기술의 응용 분야가 센서 네트워크(sensor networks), 홈 컴퓨팅(home computing), 공공 무선 랜(public wireless LAN), 무선 메쉬 네트워크(wireless mesh network)와 같은 상업적인 분야로 확산되어 가면서 네트워크의 용량(capacity)과 처리량(throughput) 증가의 요구는 지속적으로 증대되고 있다. 또한, 기술의 발전으로 인하여 IEEE 802.11 무선 인터페이스 카드의 성능이 향상되고, 가격이 하락하면서 상용 무선 인터페이스 카드를 사용하여 넓은 지역에 저비용의 무선 커버리지(Coverage)와 높은 처리량을 제공할 수 있는 다중-홉 애드 혹 네트워크를 구축하려는 시도가 증가하고 있다. 그러나 IEEE 802.11 표준과 같이 하나의 매체(medium)를 공유하여 사용하는 무선 통신 방식에서는 동시에 데이터를 송수신 할 수 없으며, 하나의 노드가 데이터를 전송하는 동안 반송과 감지 범위 내에 있는 다른 노드들은 전송하지 못하고 대기해야 하므로 실효 대역폭(effective bandwidth)이 감소된다. 더욱이 데이터가 여러 홉을 거쳐 전달되는 다중-홉 애드 혹 네트워크의 경우 지연 시간이 증가하여 단-대-단 처리량(end-to-end throughput)이 더 감소하게 된다. 따라서 하나의 노드에 서로 다른 채널이 할당된 다수의 무선 인터페이스 카드를 장착하여 동시에 데이터 송수신을 가능하게 하고, 하나의 경로 상에 있는 홉들이 서로 다른 채널을 사용하도록 경로를 선택하여 실효 대역폭과 단-대-단 처리량을 높이는 다중-인터페이스 다중-채널 해법이 주목을 받고 있다. 그러나 단일 인터페이스 기반 네트워크를 위해서 설계된 기존의 라우팅 메트릭들^[1-2]은 다중-인터페이스 다중-채널 기반 네트워크의 특성을 정확히 반영할 수 없으므로, 처리량 개선을 기대할 수 없다. 따라서 채널 다양성^[3], 인터페이스 전환 비용^[4]과 같은 메트릭들을 사용하여 높은 처리량을 갖는 경로를 선택하는 라우팅 구조에 대한 연구가 수행되었다. ^[3]은 인터페이스의 수가 채널의 수와 동등한 네트워크에서 환경에서 채널 다양성 경로를 선택하므로 처리량 개선이 제한적이다. ^[4]는 인터페이스 전환을 통하여 이용 가능한 채널들 모두를 활용할 수 있으므로, ^[3]보다 크게 처리량을 개선할 수 있다. 그러나 ^[3]과 ^[4]에서 모두 핵심 메트릭으로 사용하고 있는 ETT는 링크의 패킷 손실률과 대역폭의 크기는 고려하고 있으나 경쟁 영역 범위 안에 있는 노드들 간의 전

송으로 인한 채널 경쟁의 영향을 고려하지 않는다. 매체를 공유하는 무선 통신 네트워크에서는 다른 노드들의 패킷 전송과 패킷 충돌로 인하여 매체가 점유되는 시간이 증가하면 각 노드에서 이용할 수 있는 대역폭(available bandwidth)은 감소된다. 따라서 라우팅 계층에서 경로를 선택할 때 전송 경쟁이 적은 경로를 선택하면 단-대-단 처리량을 높이고 네트워크 전체에 부하를 고르게 분산하는 효과를 얻을 수 있다. 하지만, [4]에서 제안된 MCR (Multi-Channel Routing)은 ETT를 사용하여 단-대-단 전송 지연(transmission delay)과 플로우 내부(intra-flow)의 간섭(interference)을 평가하고 있으나, 경쟁 영역 안의 노드들 간의 채널 사용권 획득을 위한 채널 접근 지연(channel access delay)의 영향은 고려하지 않고 있다. 하지만, 전송 지연과 채널 접근 지연은 양쪽 다 네트워크의 성능에 큰 영향을 주는 중요한 메트릭이므로 라우팅 프로토콜에서 경로를 결정할 때 동시에 고려되어야만 한다.

본 논문에서는 링크 손실을 측정을 기반으로 전송 지연이 최소화될 수 있는 링크를 선택하는 ETT에 매체에 부과된 부하와 노드간의 매체 경쟁을 반영하는 채널 접근 시간(channel Access time) 메트릭을 결합하여 플로우 내부와 플로우간(inter-flow)의 간섭 양쪽 모두를 고려하는 MAMCR(MAC Aware Multi-Channel Routing) 메트릭을 제안한다. 또한, 백오프 타이머(backoff timer)의 혼잡 시간 단편(busy time fraction)의 측정을 통하여 채널 이용률(utilization channel)을 평가하는 방법을 제안하고, 채널 접근 시간 메트릭이 각 노드에서 지역적으로 측정된 MAC 계층 정보를 기반으로 평가되었음에도 불구하고 라우팅 프로토콜에 적용되었을 때 네트워크의 전역적인 용량과 처리량을 개선할 수 있다는 것을 시물레이션을 통하여 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 진다. II장에서는 관련 연구 동향에 관하여 설명한다. III장에서는 기존 MCR 메트릭의 구조, 링크 비용 평가 방법, 문제점에 대하여 상세히 설명한다. IV장에서는 제안된 MAMCR 메트릭의 특성, 추가된 링크 비용 평가 방법에 대해서 상세히 설명한다. V장에서는 시물레이션 방법을 설명하고, 시물레이션 결과에 대하여 상세히 고찰한다. 마지막으로 VI장에서는 논문을 결론짓는다.

II. 관련 연구

DSDV^[5], DSR^[6], AODV^[7]와 같은 대부분의 애드-혹 라우팅 프로토콜들에서 경로 결정을 위해서 가장 널리 사용되어온 최소 홉 카운트 메트릭(MH: Minimum Hop-count metric)은 단순히 최대의 도달 거리를 갖는 링크들로 구성된 최소 홉 경로를 선택하는 경향이 있다. 긴 도달 거리를 갖는 링크들은 낮은 신호 레벨로 인하여 가장 낮은 링크 속도(link speed)로 데이터를 전송하므로, MH 메트릭에 의해서 발견된 경로는 낮은 실효 처리량을 갖는다^[8]. MH 메트릭의 단점을 개선하고, 높은 처리량을 갖는 경로들을 발견하기 위한 몇 가지의 링크-비용(link-cost) 라우팅 메트릭들이 제안되어 졌다.^[1]에서 제안된 ETX(Expected Transmission Count) 메트릭은 하나의 패킷을 성공적으로 전송하기 위해서 요구되는 총 전송 횟수(total transmission count)가 최소화되는 경로를 선택한다. ETX 메트릭은 손실률(loss rate)이 적은 링크를 선택하므로, MH 메트릭과 비교해서 높은 실효 처리량을 갖는 경로를 발견한다. 하지만, ETX 메트릭은 MH 메트릭과 마찬가지로 링크 속도의 차이를 구별할 수 없고, 최단 경로상의 손실률이 의미 있게 높지 않는 한 더 긴 경로보다는 최단 경로에 우선권을 주도록 설계되어졌기 때문에 높은 처리량을 갖는 경로의 발견에는 한계가 있다.^[2]에서 제안된 MTM(Medium Time Metric) 메트릭은 총 전송 시간(total transmission time)이 최소화되는 경로를 선택한다. MTM은 링크 비용을 계산할 때 링크 속도(link rate)의 영향만을 고려하고, 링크 신뢰성(link reliability)의 영향은 고려하고 있지 않다. 따라서 물리 채널의 품질이 좋지 않은 네트워크에서는 낮은 처리량을 갖는 경로를 발견할 수도 있다.^[3]에서 제안된 ETT((Expected Transmission Time) 메트릭은 하나의 패킷을 성공적으로 전송하기 위해서 요구되는 총 전송 시간이 최소화되는 경로를 선택한다. ETT 메트릭은 ETX 메트릭에 패킷 당 전송 지연(MTM)을 결합하여 패킷 크기와 전송 속도에 따른 전송 시간의 변화를 반영하고 있어 ETX나 MTM보다 높은 처리량을 갖는 경로를 발견한다. 하지만, ETT 메트릭은 매체 접근 지연의 영향을 고려하지 않아 낮은 처리량을 갖는 혼잡한 경로를 선택할 수도 있다.^[9]에서 제안된 PARMA(A PHY/MAC Aware Routing Metric for Ad-Hoc Wireless Network with Multi-Rate Radios) 메트릭은 패킷의 단-대-단 지

연(end-to-end delay)이 최소화되는 경로를 선택한다. PARMA는 링크 비용을 계산할 때 링크 속도와 매체 접근 지연 양쪽의 영향을 고려하고 있기 때문에 네트워크 내에서 혼잡한 지역을 회피하면서 높은 처리량을 갖는 경로를 발견할 수 있다. 그러나 링크 신뢰성의 영향은 고려하고 있지 않으므로 물리 채널의 품질이 좋지 않은 네트워크에서는 낮은 처리량을 갖는 경로를 발견할 수도 있다. ETX, MTM, ETT 메트릭은 링크 신뢰성과 링크 속도의 차이를 구별할 수 있지만, 링크들이 서로 다른 채널을 사용하고 있는지는 구별하지 못한다. 그러나 다중-채널 다중-인터페이스 구조의 이점을 최대한 활용하기 위해서는 라우팅 프로토콜에서 링크의 채널을 식별할 수 있는 능력을 갖는 것이 꼭 필요하다. 따라서 ETT에 채널 다양성(channel diverse) 비용을 결합한 몇 가지 라우팅 메트릭들이 제안되었다.^[3]에서 제안된 WCETT (Weighted Cumulative ETT) 메트릭은 ETT를 사용하여 경로의 단-대-단 지연과 경로 상의 병목 홉들(bottleneck hops)에서의 지연을 가중치 평균(weighted average)한 경로 메트릭(path metric)으로, 총 자원 소모가 적고 채널 다양성을 갖는 경로의 선택을 보장한다. 그러나 WCETT는 인터페이스의 채널이 고정되어 있는 네트워크 환경에서 사용되도록 설계되었기 때문에 인터페이스들의 수가 채널들의 수보다 작은 환경에서 사용될 때 경로 비용을 정확히 계산할 수 없다.^[4]에서 제안된 MCR 메트릭은 이용 가능한 인터페이스의 수가 이용 가능한 채널의 수보다 작은 네트워크 환경에서 사용될 수 있도록 WCETT에 인터페이스 전환 비용을 추가한 메트릭으로, 인터페이스 전환에 의해서 모든 채널들을 활용하는 네트워크 구조에서 경로 비용을 정확히 계산할 수 있다. 그러나 MCR은 매체 혼잡 비용을 평가하지 않기 때문에 혼잡한 네트워크에서 낮은 처리량을 갖는 경로를 발견할 수 있다.

III. 다중-채널 라우팅 프로토콜

MAMCR에서는 MCR^[4]과 MR-LQSR^[3]에서 제안된 기법을 사용하여 인터페이스 전환 비용과 링크 비용을 계산한다. 따라서 본 절에서는 MCR이 동작하는 네트워크 구조, 인터페이스 전환 비용과 링크 비용의 계산 기법, MCR의 문제점 등에 대해서 기술한다.

1. 네트워크 구조

MCR은 노드에 다수의 인터페이스가 장착되어 있는 다중-인터페이스와 다중-채널을 사용하는 다중-홉 네트워크 구조에서 동작하는데, 일부 인터페이스는 데이터를 수신하기 위한 고정 인터페이스(fixed interface)로 사용하고, 나머지 인터페이스는 데이터를 송신하기 위한 전환가능 인터페이스(switchable interface)로 사용한다. 고정 인터페이스에는 네트워크 내에서 이용 가능한 채널 가운데 하나인 고정 채널(fixed channel)이 할당되는데, 헬로우 패킷에 포함되어 송신되는 이웃 노드들의 고정 채널 사용량에 따라 주기적으로 고정 채널을 변경함으로써 네트워크 내의 채널 분산을 이루고 처리량을 증가시키는 기능을 수행한다. 전환가능 인터페이스는 데이터 송신이 필요할 때마다 수신하는 노드의 고정 채널로 전환됨으로써 네트워크의 연결성을 확보하고, 이용 가능한 채널들 모두를 활용하는 기능을 수행한다.

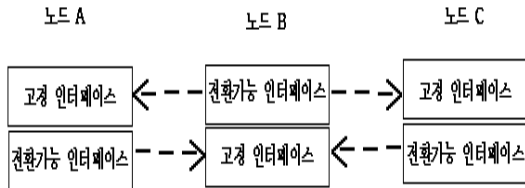


그림 1. 네트워크 구조
Fig. 1. Architecture of network

2. 인터페이스 전환 비용의 측정

이용 가능한 인터페이스들의 수가 이용 가능한 채널들의 수보다 작은 네트워크 환경에서 라우팅 프로토콜이 동작할 때, 이용 가능한 채널들 모두를 활용하기 위해서 인터페이스들은 지정된 채널들로 전환되어야 하므로, 라우팅 메트릭에는 전환 비용(switching cost)이 포함되어야 한다. 전환 비용에 대한 고려는 빈번한 전환을 요구하는 경로들이 선택 되지 않도록 보장한다. 인터페이스 전환 비용은 하나의 패킷이 인터페이스의 채널 전환 때문에 경험하는 지연 시간을 측정해야만 한다. 따라서 하나의 패킷이 채널 j 상에서 송신되어야만 할 때, 전환가능 인터페이스가 다른 채널 상에 있을 가능성을 각 전환가능 채널 i 대해서 측정한다. 이것을 평가하기 위하여 하나의 전환 가능 인터페이스가 채널 j 상에서 전송하고 있는 시간의 단편(fraction of the time)을 1 초 간격 동안 측정

하여 각 채널 j 에 대한 인터페이스 사용량 변수 $InterfaceUsage(j)$ 에 저장한다. $InterfaceUsage(j)$ 는 하나의 지수적인 가중치 평균(exponentially weighted average)으로서 유지되므로 모든 채널들에 걸친 $InterfaceUsage$ 값들은 합은 1 초보다 적거나 동등하다. 만일 하나의 경로가 어떤 채널 j 를 선택하고, 하나의 패킷이 채널 j 상에 도착했을 때 전환가능 인터페이스가 다른 채널($i \neq j$) 상에 있을 확률 $ps(j)$ 는 다음과 같이 평가된다.

$$p_s(j) = \sum_{\forall i \neq j} InterfaceUsage(i) \quad (1)$$

그때, 채널 j 를 사용하기 위한 스위칭 비용은 다음과 같이 계산된다.

$$SC(j) = p_s(j) * switchingDelay \quad (2)$$

여기서 $switchingDeley$ 는 IEEE 802.11 하드웨어에 대한 인터페이스 전환 지연 값이다.

3. 링크 비용의 측정

링크 비용은 하나의 링크에 대해서 ETT를 측정하여 계산된다. 하나의 링크에 대한 ETT는 ETX , 평균 패킷 크기 S , 링크의 데이터 속도 B 에 의해서 다음과 같이 정의된다.

$$ETT = ETX * \frac{S}{B} \quad (3)$$

MCR에서는 ETX 를 계산하기 위해서 탐침 패킷들을 사용하여 손실률(loss rate)을 측정하는 기법^[3] 대신 헬로우 패킷들을 사용하여 손실률을 측정하는 수정된 기법^[4]을 사용한다. 802.11 MAC 프로토콜에서 하나의 데이터 전송은 패킷이 성공적으로 수신 확인(ACK)되었을 때만 성공적으로 간주된다. 따라서 채널 j 상에 있는 노드 X 와 노드 Y 간의 링크 손실 확률(link loss probability) p 는 X 에서 Y 까지의 순방향 패킷 손실 확률(forward packet loss probability) pf 와 Y 에서 X 까지의 역방향 패킷 손실 확률(reverse packet loss probability) pr 이 측정되면 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$p = 1 - (1 - pf) * (1 - pr) \quad (4)$$

이때, ETX는 p 를 사용하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$ETX = \frac{1}{1-p} \quad (5)$$

인터페이스들의 수가 채널들의 수보다 더 작은 네트워크 환경에서 각 노드는 모든 채널 상에서 항상 수신하고 있는 인터페이스들을 가질 수 없으므로, 노드 X와 Y 간의 모든 채널들 상에서의 패킷 손실 확률을 측정하는 것은 어렵다. 따라서 노드 Y는 X에 의해서 송신된 패킷들을 항상 수신하고 있어서 패킷들의 수를 정확히 카운트할 수 있는 자신의 고정 채널 j 상에서만 이웃 X로부터의 패킷 손실 확률을 측정한다. 경로 발견 절차(route discovery procedure)동안 노드 Y가 노드 X로부터 하나의 경로 요구 패킷(route request packet)을 Y의 고정 채널 j 상에서 수신했을 때, 채널 j 상에서 X에서 Y까지의 순방향 손실 확률은 앞에서의 측정들을 근거로 계산될 수 있다. 그러나 X는 고정 채널로서 j가 아닌 다른 채널을 사용하므로 Y에서 X까지의 역방향 손실 확률은 계산될 수 없다. 따라서 ETX를 계산하기 위해서 역방향 손실 확률이 순방향 손실 확률과 동등하다고 가정한다.

4. MCR의 문제점

MCR은 노드 당 인터페이스들의 수가 채널들의 수보다 작은 조건에서 이용 가능한 채널들 모두를 완전히 활용하기 위해서 인터페이스의 채널 전환 능력을 사용한다. 따라서 MCR은 인터페이스 전환 비용을 고려하면서 채널 다양성 경로들(channel diverse routes)을 선택함으로써 플로우 내 간섭의 영향을 반영하기 때문에 플로우 수가 적은 네트워크 조건에서는 높은 성능을 보인다. 그러나, 플로우들의 수가 증가하여 하나의 간섭 영역 내에 다수의 플로우가 통과하는 경우 이웃하는 플로우들이 통과하는 홉들 간에 간섭으로 인하여 성능이 저하되는 문제점이 있다. 경로 메트릭인 MCR은 ETX와 ETT와 같은 손실 기반 메트릭들(loss based metrics)로 구성되어 있으며, 매체의 혼잡을 직접적으로 평가할 수 있는 메트릭 성분은 포함되어 있지 않다. ETX와 ETT는 링크의 패킷 손실 확률을 측정하여 링크 비용을 계산하므로, 네트워크 내의 트래픽 부하나 경쟁하는 노드의 수가 증가하면 충돌로 인해 패킷 손실 확률이 커지고 링크 비용도 증가될 것이다. 따라서 ETX와 ETT 같은 손실 기반 라우팅

메트릭들은 트래픽 부하에 높게 민감하며, 패킷 손실 확률을 통하여 링크의 혼잡(congestion)을 간접적으로 검출할 수 있다^[10]. 하지만, 패킷 손실 확률은 노드들 간의 채널 경쟁으로 인한 손실과 페이딩(Fading), 섀도잉(Shadowing)등과 같은 채널 훼손(Channel Corruption)으로 인한 손실을 모두 포함하고 있기 때문에 채널의 혼잡에 관하여 항상 정확한 정보를 제공하지 않는다. 따라서 ETT를 기반으로 하는 MCR의 경우 네트워크의 트래픽 부하가 높은 환경에서 낮은 처리량을 갖는 혼잡한 경로(congested paths)를 선택할 수도 있다. 본 논문에서는 매체 전송 지연을 평가하는 ETT에 매체 혼잡 정도를 반영하는 채널 접속 시간 메트릭을 결합하여 혼잡한 네트워크 환경에서도 처리량이 높은 경로를 발견할 수 있는 능력을 갖도록 MCR을 확장했다.

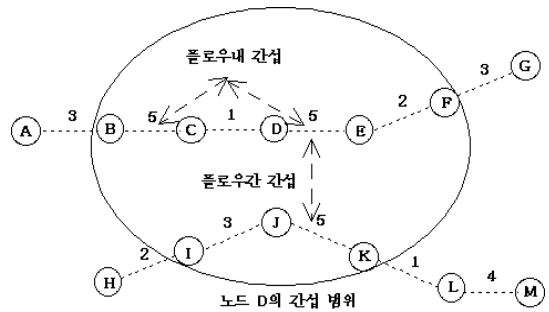


그림 2. 플로우내 간섭과 플로우간 간섭의 예
Fig. 2. Example of intra-flow and inter-flow interference

IV. 제안된 경로 메트릭

본 절에서는 MAMCR에서 링크 혼잡 비용을 계산하기 위해서 새롭게 제안된 채널 접근 시간 비용과 경로 비용의 계산 기법, MAMCR 메트릭이 적용된 라우팅 프로토콜의 구조에 대해서 기술한다.

1. 채널 이용률의 계산 및 교환

채널 이용률은 반송과 감지 범위 안에 있는 다른 노드들의 활동으로 인해 채널이 점유되는 시간의 양을 측정함으로써 평가될 수 있는데, 채널 이용률의 평가를 위한 몇 가지 기법들이 제안되었다. [9]에서는 물리 반송과 감지(physical carrier sensing)의 사용을 제안했다. 물리 반

송파의 경우 다른 노드의 의한 채널 점유 시간만을 반영할 수 있고, IFS(InterFrame Spacing), 백오프 간격(backoff interval)과 같은 802.11 MAC 동작에 의해서 도입되는 부가적인 지연을 반영하지 못하므로 채널 접속 지연을 과소평가하게 한다. [10]에서는 가상 반송파 감지(virtual carrier sensing)의 사용을 제안했다. 가상 반송파 경우 RTS(Request To Send)/CTS(Clear To Send) 기법이 적용되었을 때만 사용 가능하고, 전송 범위의 다른 노드의 전송으로 매체가 점유된 시간만을 반영할 수 있으며, RTS만의 전송으로도 설정될 수 있어 실제 전송이 이루어지지 않는 시간까지도 반영될 가능성이 있다.

따라서 본 논문에서는 다른 노드들에 의한 채널 점유 시간뿐만 아니라, 일부 유휴 시간(idle time), RTS/CTS 기법 적용시의 일부 SIFS 등을 반영하는 MAC(Medium Access Control) 계층의 백오프 타이머를 채널 이용률 평가를 위해서 사용할 것을 제안한다. MAMCR에서 경로를 구성하는 링크의 혼잡 비용은 각 홉에서 수신전용으로 사용하는 고정 인터페이스의 채널 상에서 측정되어야만 한다. 그러나 MAC 계층에서 백오프 타이머는 데이터를 송신할 때만 작동되므로 각 노드에서는 고정 채널 상에서의 백오프 타이머의 작동 시간(pending time)을 측정할 수 없다. 따라서 각 노드에서는 각 채널 상에서 백오프 타이머가 작동중인 시간을 하나의 시간 구간(time duration)에 걸쳐서 평균함으로써, 채널별 채널 이용률을 평가한 후, 헬로우 패킷에 포함하여 주기적으로 이웃 노드들에게 송신한다. 이웃 노드들로부터 헬로우 패킷을 수신한 노드는 자신의 고정 채널에 해당하는 채널 이용률 값들만 합산한 후 평균하여 자신의 고정 채널 혼잡도를 계산한다.

2. 채널 접근 시간의 계산

IEEE802.11 표준과 같이 무선 채널을 공유하는 통신 방식에서 하나의 패킷이 채널에 즉시 접근할 수 있는지 여부는 링크 양 종단에 위치하고 있는 노드들의 상태뿐만 아니라 이웃하고 있는 모든 노드들의 상태에 의해서 결정된다. 따라서 어떤 시점에서 공유 채널에 접근하는 패킷들을 갖고 있는 하나의 이웃에 있는 노드들의 동작은 M/M/1 큐잉 시스템(queueing system)으로서 모델링될 수 있다[9]. 이때 하나의 패킷이 채널을 사용하기 위해서 대기하는 시간을 채널 접근 시간(channel access time) CAT로 정의하며, 큐잉 시스템의 성능 지수로서 다

음과 같이 표현될 수 있다.

$$CAT = T_p \frac{\rho}{1-\rho} \quad (6)$$

여기서 채널의 이용률(utilization of channel) ρ 는 전체 시간 중에서 채널이 실제로 사용되는 시간의 비율이며, 각 노드에서 감지되는 채널의 점유기간(occupancy of channel)을 사용하여 평가될 수 있다. 평균 패킷 처리 시간(average packet process time) T_p 는 하나의 패킷 전송을 위해서 채널이 사용되는 시간이며, 평균 패킷 크기와 평균 링크 속도를 사용하여 평가될 수 있다.

채널 접근 시간은 매체에 부과되는 트래픽의 영향을 반영하는 중요한 메트릭(metric)으로, 송신하는 노드 주변의 매체 혼잡 수준(media busy level)을 나타낸다. 따라서 채널 접근 시간을 라우팅 메트릭으로 사용하면 낮은 트래픽 부하(traffic load)를 갖는 경로를 선택할 수 있으므로, 네트워크 전체에 걸쳐서 트래픽을 분산시켜 부하 균형(load balance)을 이룰 수 있으며, 실패 대역폭을 증가시킨다. 또한, 매체가 혼잡할 때 하나의 패킷은 전송할 기회를 획득하기 위해서 비교적 오랜 시간을 인터페이스 큐(queue)에서 대기하게 되므로, 네트워크가 혼잡할 때 채널 접근 시간의 증가는 인터페이스 큐 길이의 증가를 반영한다.

3. 경로 메트릭

MAMCR은 MCR 메트릭에 채널 접근 시간 성분을 결합한 경로 메트릭으로 다음과 같이 정의된다.

$$MAMCR = (1-\beta) * \sum_{i=1}^n (ETT_i + SC(c_i) + CAT(c_i)) + \beta * \max_{1 \leq j \leq c} X_j \quad (7)$$

MAMCR 메트릭은 MCR 메트릭과 마찬가지로 단-대-단 지연 성분과 병목 채널 지연(bottleneck channel delay) 성분의 가중치 평균(weighted average)으로 구성된다. 하지만 MAMCR에서는 단-대-단 지연 비용 계산에 채널 접근 시간(CAT: Channel Access Time)을 추가한다. CAT는 매체 사용권 획득을 위한 노드들 간의 채널 경쟁과 매체에 부과된 트래픽 부하가 처리량에 미치는 영향을 반영하는 성분으로, 네트워크 내의 병목 지역을

회피하면서 처리량이 높은 경로의 발견을 가능하게 한다. 여기서 β 는 0과 1사이의 가중치이고, n 은 경로 상에서의 홉의 수이며, c 는 아용 가능한 채널들의 총수이다. ETT_i 는 하나의 경로에서 i 번째 홉에 대한 ETT 비용이고, $SC(c_i)$ 는 i 번째 홉에 대한 전환 비용(switching cost)이며, $CAT(c_i)$ 는 i 번째 홉에 대한 채널 접근 시간 비용이다. 여기서 c_i 는 i 번째 홉 상에서 사용된 채널이다. X_j 는 채널 j 상에서의 총 ETT 비용으로 다음과 같이 정의된다.

$$X_j = \sum_{\forall i, \text{ such that } c_i=j} ETT_i \quad (8)$$

MCR 매트릭은 2가지 성분들의 가중치 합이다. 첫 번째 성분은 경로를 따라서 전송되는 하나의 패킷에 의해서 경험되어지는 단-대-단 지연(end-to-end delay) 비용으로, 경로상의 모든 홉에서의 ETT와 전환 비용, 채널 접근 지연 값들의 합을 측정함으로써 평가된다. 평가된 단-대-단 지연 비용은 링크 이용률(link utilizations)이 낮으면서 총 자원 소모(total resource consumption)가 최소화되는 경로가 선택되도록 보장한다. 두 번째 성분은 경로를 따라서 전송되는 하나의 패킷이 특정 채널 상에 있는 홉들에서 경험하는 병목 채널 지연 비용(the cost of the bottleneck channel)으로, 특정 채널 상에 있는 홉들의 ETT 값의 합을 측정하고 그 가운데 가장 큰 값을 취함으로써 평가된다. 평가된 병목 채널 지연 비용은 채널 다양성 경로들이 선택되도록 보장한다. 따라서 MAMCR 매트릭은 경로 지연(path delay)이 작으면서 경로 처리량(path throughput)이 높은 경로를 선택한다.

4. 라우팅 프로토콜의 구현

본 논문에서는 MAMCR 경로 매트릭을 DSR (Dynamic Source Routing) 프로토콜에 적용하기 위해서 MCR에서와 마찬가지로 몇 가지 사항을 수정했다. 패킷 손실 확률과 채널 이용률과 같이 네트워크의 상태에 따라서 변하는 동적인 정보를 매트릭 계산에 사용하는 라우팅 프로토콜은 이웃 노드들 간에 주기적으로 매트릭을 교환하고 비용이 낮은 새로운 경로로 전환하는 라우팅 업데이트(routing update)절차가 반드시 필요하다. 그러나 DSR과 같은 온-디맨드(on-demand) 라우팅 프로토콜에서 한번 설정된 경로들은 단절(broken)될 때까지 계속 사용된다. 따라서 MAR에서는 경로들이 단절되지 않은 경우에도 주기적으로 새로운 경로 발견 절차를 개시

함으로써 경로들의 비용을 갱신하는 경로 갱신(route refresh)절차를 DSR에 추가하였다. 또한, 가장 작은 비용의 새로운 경로들이 발견될 수 있도록 보장하기 위해서 더 낮은 비용의 RREQ가 더 높은 비용의 RREQ보다 늦게 중간 노드에 도달한 경우에도 재방송하는 기능을 추가하였다. 경로 비용의 계산을 위해서 RREQ 패킷에는 자신이 송신된 채널의 전환 비용과 채널 접근 시간뿐만 아니라, 모든 이전의 홉들 상에서 사용된 채널들과 전환 비용들, 채널 접근 시간들, 그리고 ETT들이 포함된다. RREQ를 수신한 노드는 이전에 측정된 링크 손실률(link loss rate)를 근거로 이전 홉의 ETT를 계산한다.

V. 실험 및 결과

제안된 MAMCR 매트릭이 적용된 시스템 성능은 ns-2를 사용하여 시스템 처리량(system throughput), 패킷 전달률(packet delivery ratio), 단-대-단 지연(end-to-end delay)의 관점에서 MCR과 비교 평가되었다.

1. 시뮬레이션 파라미터

ns-2는 각 무선 노드 상에서 다수의 무선 인터페이스 카드와 혼합 채널 할당 방식을 지원하고, MAC 계층과 네트워크 계층 간에 정보 교환이 가능하도록 수정되었다. 물리 계층은 전송 속도, 전송 시간 및 PHY 오버헤드 길이 등을 IEEE 802.11a에 맞게 수정되었다. 각각 노드에는 2 개의 IEEE 802.11a 인터페이스 카드들이 장착되었고, 각 인터페이스에서는 5 개의 비-간섭(non-interfering) 채널들이 사용되었으며, 인터페이스 스위칭 지연은 1 ms로 가정되었다. 각 시뮬레이션 시간은 200 초로 설정되었다. 트래픽 발생 모델(traffic generation model)에서 트래픽 연결 형태는 CBR(constant bit rate)이 선택되었고, 1500 바이트(byte)의 고정 크기를 갖는 패킷이 사용되었다. 시뮬레이션에서 경로 갱신 주기는 20 초로 설정되었고, 헬로우 패킷들은 5 초마다 교환되었다. 경로 매트릭을 구성하는 성분 간에 균형을 맞추기 위하여 가중치 β 는 0.5의 값이 선택되었다.

2. 성능 평가

제안된 MAMCR 매트릭의 혼잡 지역 회피 성능을 평가하기 위하여 혼잡한 네트워크 조건에서 각각 MAMCR

과 MCR을 사용하여 설정된 경로로 CBR 트래픽을 전송하는 실험을 다음과 같은 시뮬레이션 환경에서 수행했다. 14x14 정방형 그리드 네트워크(grid network)로부터 각각 랜덤하게 선택되어진 10개의 100-노드 네트워크 토폴로지(topology)를 생성했다.

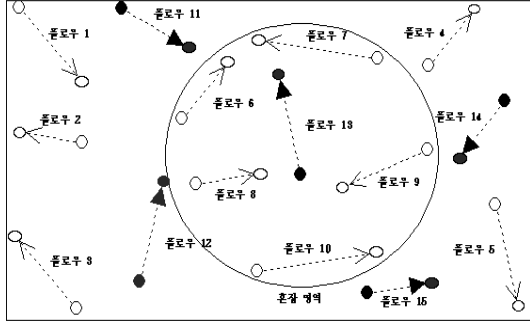


그림 3. 실험 조건
Fig. 3. Experiment conditions

각 토폴로지에서 5 노드 쌍들을 랜덤하게 선택하여 0에서 6 Mbps 사이에서 랜덤하게 선택되어진 속도로 CBR 플로우들을 발생시켰으며, 특정 지역에 위치하는 5 노드 쌍들을 선택하여 5 Mbps의 속도로 CBR 트래픽을 발생시킴으로써 네트워크 내에 혼잡 영역을 형성했다. 또한, 50초 시점에서 추가로 5 노드 쌍을 랜덤하게 선택하여 0에서 9 Mbps 사이에서 랜덤하게 선택되어진 속도로 CBR 플로우들을 발생시켰다.

각 토폴로지 실험에서 추가된 5 플로우에 대해서 측정된 결과 값들은 평균하여 오름차순으로 정렬하고 각 토폴로지에는 정렬된 값들을 기준으로 1에서 10까지의 번호를 부여했다. 토폴로지의 변화에 따른 처리량, 단-대-단 지연, 패킷 전달률의 변화는 MCR을 사용했을 때 얻어진 결과 값들을 기준으로 정규화하여 표시하였다.

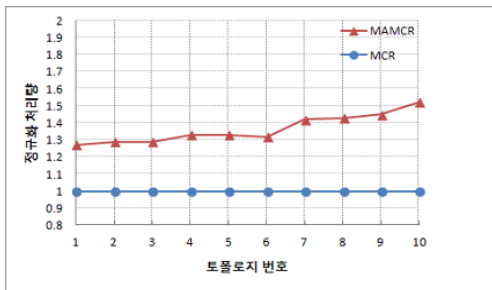


그림 4. 혼잡한 조건에서의 처리량
Fig. 4. Throughput under congested conditions

그림 4에서 보인 것처럼 혼잡한 네트워크 조건에서 MAMCR은 MCR보다 30~50% 정도 높은 처리량을 보인다. MCR의 경우 경로 비용을 계산할 때 데이터 전송을 위해서 실제로 채널을 사용하는 전송 시간만을 고려한다. 반면에 MAMCR의 경우 전송 시간뿐만 아니라 채널을 사용하기 위해서 대기하는 채널 접근 시간도 고려한다. 따라서 네트워크내의 트래픽 부하가 작을 때보다 클 때 MCR에 대한 MAMCR의 처리량 개선 효과는 커진다. MCR은 서로 다른 채널을 사용하는 홉들을 통과 하는 경로를 선택함으로써 동일한 경로상의 인접한 홉들 간에 간섭의 영향을 반영한다. 따라서 네트워크 내의 트래픽 부하가 낮을 때는 인접한 경로를 통해서 전송되는 트래픽에 의해서 발생하는 간섭의 영향이 매우 작기 때문에 잘 동작한다. 하지만 MCR에서 이웃하는 경로들로부터의 간섭의 영향을 반영할 수 있는 메트릭 성분은 패킷 손실 확률을 기반으로 하는 ETT가 유일하다. 본질적으로 패킷 손실 확률은 링크의 품질을 평가하기 위한 메트릭 성분이기 때문에 채널 경쟁과 간섭의 영향을 부분적으로 반영할 수는 있으나 정확하게 평가할 수는 없다. 따라서 네트워크 내의 트래픽 부하가 증가하면 특정 경로상의 홉들이 간섭 영역 내에 있는 다른 경로상의 홉들과 동일한 채널을 사용하는 빈도가 증가하므로 경로의 처리량은 저하된다. 그러나 MCR은 경로를 선택할 때 데이터 전송이 빈번하게 이루어지고 있는 채널인지 여부는 고려하지 않고 경로 상의 홉들에서 동일한 채널을 많이 사용하는지 여부만 고려하므로, 네트워크 내의 트래픽 부하가 과도하게 부과된 지역에 다시 경로를 설정하여 네트워크의 상태를 더욱 악화시킬 수 있다. 반면에 MAMCR 메트릭은 링크의 신뢰성과 채널 다양성을 반영하는 MCR 메트릭에 매체의 혼잡 정도를 반영할 수 있는 채널 접근 시간 성분을 결합하여 혼잡한 조건에서도 높은 처리량을 갖는 경로를 발견할 수 있다.

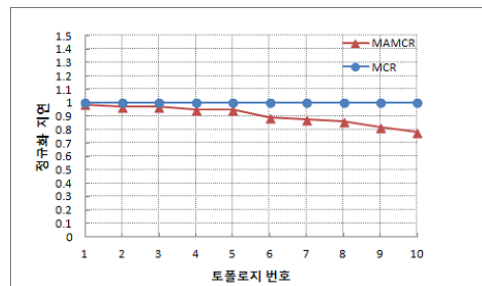


그림 5. 혼잡한 조건에서의 단-대-단 지연
Fig. 5. End-to-end delay under congested conditions

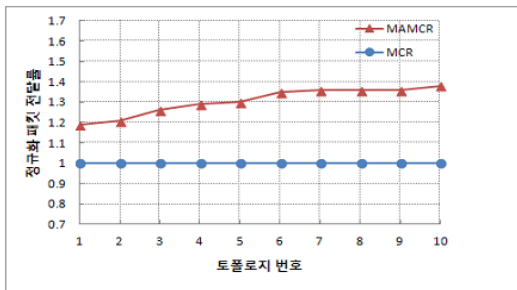


그림 6. 혼잡한 조건에서의 패킷 전달률
 Fig. 6. Packet delivery ratio under congested conditions

그림 5과 6에서 보인 것처럼 혼잡한 조건에서 매체 이용률이 낮은 경로의 선택으로 인해서 얻어지는 이득이 많은 홉을 통과하는 경로의 선택으로 인하여 상쇄되므로, MAMCR은 MCR보다 약간 큰 단-대-단 지연을 갖는다. 반면에 MAMCR의 패킷 전달률은 MCR보다 좀 더 개선된 결과를 보인다.

MCR의 경우 매체의 혼잡 비용을 포착할 수 있는 메트릭 성분을 포함하고 있지 않기 때문에 채널 다양성 비용에 큰 차이가 없을 때 총 자원 소모가 최소화되는 짧은 경로를 선택하는 경향이 있다. 반면에 MAMCR은 통과하는 홉들의 매체 접근 시간을 평가하여 경로를 결정하기 때문에 혼잡한 지역을 회피하여 경로를 설정한다. 따라서 MAMCR은 대체적으로 MCR에 의해서 선택된 경로들보다 더 긴 경로들을 선택하는 경향이 있다. 또한, MAMCR은 더 짧은 경로들보다 더 높은 처리량을 갖는 더 긴 경로들을 선택하므로, 일부 패킷들은 평균값보다 더 긴 지연을 갖지만 최종적으로 목적지에 도달하게 되는 비율은 높아지게 된다.

VI. 결론

다중-인터페이스 네트워크 환경에서 사용하기 위해서 제안된 MCR 메트릭은 단-대-단 지연과 채널 다양성 양쪽 모두를 고려하므로 높은 처리량을 갖는 경로를 발견할 수 있다. 그러나 MCR은 단-대-단 지연 비용을 계산할 때 링크 손실률과 링크 속도로 인하여 발생하는 지연의 비용만 포함하고 매체의 혼잡으로 인하여 야기되는 지연의 영향을 반영하지 않으므로 네트워크 부하가 높은 조건에서 혼잡한 지역을 통과하는 경로를 선택하여 처리

량이 저하되는 문제점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해서 단-대-단 지연 비용의 계산에 링크 손실 확률과 채널 접근 시간 양쪽의 사용을 제안하고 ETT를 핵심 메트릭으로 사용하는 MCR 메트릭에 적용하여 구체화하였다. 제안된 MAMCR 메트릭은 신뢰성이 높고 매체 점유율이 낮은 링크들을 선택하도록 함으로써 트래픽 부하가 높은 조건에서도 혼잡한 지역을 회피하면서 높은 처리량을 갖는 경로를 발견할 수 있는 능력을 지원한다는 것을 시뮬레이션을 통해서 보였다. 또한, 본 논문에서는 매체 접속 지연의 평가를 위해서 경쟁 영역 안에 있는 다른 노드들에 의한 매체 점유 시간뿐만 아니라 임의의 백오프 시간까지 반영하는 MAC 계층의 백오프 타이머(backoff timer) 혼잡 시간 단편을 사용할 것을 제안하였다. 본 논문에서는 단일-속도(single-rate)와 정적인 노드(stationary node)의 조건에서 시뮬레이션을 수행했다. 앞으로 다중-속도(multi-rate)와 노드의 이동성이 네트워크의 성능에 미치는 영향을 연구할 계획이다.

References

- [1] D. S. J. D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A High-throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing", in Proc. ACM Mobicom, San Diego, CA, USA, September 2003.
- [2] B. Awerbuch, D. Holmer, and H. Rubens, "High Throughput Route Selection in Multi-rate Ad Hoc Wireless Networks", in Proc. WONS, January 2004.
- [3] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in Multi-radio, Multi-hop Wireless Mesh Networks", In Proc. ACM MobiCom, Philadelphia, PA, USA, September 2004.
- [4] P. Kyasanur and N. H. Vaidya, "Routing and Link-layer Protocols for Multi-Channel Multi-Interface Ad Hoc Wireless Networks" Mobile Computing and Communications Review, January 2006.
- [5] C.E Perkins and P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers", in Proc. ACM

- SIGCOMM '94 Conference on Communications Architecture, Protocols and Applications, August 1994.
- [6] D.B. Johnson, D.A. Maltz, and Y. C. Hu. "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Network(DSR)", Ietf Manual Working Group(Draft 10), 2004.
- [7] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. DAS, "Ad hoc On-Demand Distance Vector(AODV) Routing", in Ietf RFC 3561, July 2003.
- [8] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, B, A. Chambers, and R. Morris, "Performance of Multihop Wireless Networks: Shortest Path is not Enough", in Proceeding of the First Workshop on Hot Topics in Networks(HotNets-I), (Princeton, New Jersey), ACM SIGCOMM, October 2002.
- [9] S. Zhao, Z. Wu, A. Acharya and D. Raychaudhuri, "PARMA: A PHY/MAC Aware Routing Metric for Ad-Hoc Wireless Networks with Multi-Rate Radios"
- [10] T. Salonidis, M. Garetto, A. Saha, and E. Knightly, "Identifying High Throughput Paths in 802.11 Mesh Networks: a Model-based Approach" in ICNP 2007.

저자 소개

임 현 주(정회원)



- 1987년 : 명지대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1990년 : 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2001년 : 건국대학교 대학원 전자정보통신공학과 수료
- 2013년 : 대은전자(주) 통신기술개발팀

<주관심분야 : 애드 혹 네트워크, 센서 네트워크>

정 수 경(정회원)



- 1996년 : 동서대학교 컴퓨터공학과 졸업(공학사)
- 1998년 : 부경대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2010년 : 건국대학교 대학원 전자정보통신공학과 졸업(공학박사)

<주관심분야 : 무선데이터통신, IEEE 802.11e, 멀티미디어>

이 성 화(중신회원)



- 1989년 : 건국대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사)
- 1991년 : 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1998년 : 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 1991~1993년 : 롯데전자(주) 연구원

• 1999~현재 : 제주한라대학교 정보통신과 교수, 창업보육센터 소장

<주관심분야 : 정보통신, 스마트 컴퓨팅 시스템, 정보보안>

박 인 갑(정회원)



- 1973년 : 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1975년 : 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2006년 : 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 1980년~현재 : 건국대학교 전자공학부 교수

<주관심분야 : 컴퓨터네트워크, parallel processing>