JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 17, No. 12 : 2826~2834 Dec. 2013

이동 애드혹 네트워크에서 생존시간 최대화를 위한 전력절감과 라우팅 결합 알고리즘

최현호*

Joint Power-Saving and Routing Algorithm for Lifetime Maximization in Mobile Ad Hoc Networks

Hyun-Ho Choi*

Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

요 약

이동 애드혹 네트워크에서 단말의 전력절감과 관련된 기술은 송신전력제어(transmit power control; TPC), 전력절감모드(power-saving mode; PSM), 라우팅(routing)으로 나뉠 수 있다. TPC와 PSM은 주로 하위 물리 및 데이터링크 계층에서 담당하는 반면 라우팅은 상위 네트워크 계층에서 담당하므로 이들 알고리즘들이 하나의 목적을 위해 보다 나은 성능을 제공하기 위해서는 통합된 관점에서의 알고리즘 설계가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 애드혹 네트워크에서 주어진 종단간 전송률을 만족시키면서 전송 경로의 생존시간을 최대화하는 것을 목적으로 전력절감과 라우팅의 결합 알고리즘을 제안한다. 제안 방안은 먼저 단말의 송신전력을 줄이기 위하여 TPC 또는 PSM을 적용하여 개별 단말의 생존시간을 증가시키고, 이후 결정된 노드 생존시간을 고려하여 라우팅을 수행함으로써 멀티홉 전체 경로의 생존시간을 극대화한다. 시뮬레이션 결과 제안방식은 네트워크의 단말 수 및 간섭량의 변화에 따라 요구 전송률을 만족시키면서 생존시간을 극대화시킨다.

ABSTRACT

In mobile ad hoc networks (MANET), power-saving technology of mobile nodes is divided into transmit power control (TPC), power-saving mode (PSM), and routing. TPC and PSM are operated in physical layer but the routing is managed in network layer, so the design of a joint algorithm is needed to provide better performance. Therefore, in this paper, we propose a joint power-saving and routing algorithm for maximizing the network lifetime while satisfying the end-to-end data rate in ad hoc networks. The proposed algorithm first applies the TPC or PSM to reduce the power consumption of mobile nodes and then performs the routing by considering the decided node lifetime in order to maximize the path lifetime. Simulation results show that the proposed algorithm maximize the lifetime while satisfying the required rate according to the number of mobile nodes and the level of interference.

키워드 : 생존시간 최대화, 이동 애드혹 네트워크, 전력절감모드, 라우팅, 송신전력제어

Key word : Lifetime maximization, Mobile ad hoc network, Power-saving mode, Routing, Transmit power control

접수일자 : 2013. 10. 07 심사완료일자 : 2013. 11. 11 게재확정일자 : 2013. 11. 22

*** Corresponding Author** Hyun-Ho Choi(E-mail:hhchoi@hknu.ac.kr, Tel:+82-31-670-5297)
Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

Open Access **http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.12.2826** print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

이동 애드혹 네트워크(Mobile Ad hoc Network; MANET)는 중앙 집중적인 제어나 고정된 라우터 없이 모든 단말들이 임의의 경로를 통해 동적으로 네트워크를 구성한다. 일반적으로 MANET의 모든 노드는 배터리로 구동되며 배터리 용량의 한계가 존재하기 때문에 네트워크의 생존성을 극대화하기 위해서는 단말의 소비 전력을 줄일 수 있는 기술이 필요하다.

단말의 전력절감과 관련된 기술은 송신전력제어(transmit power control; TPC), 전력절감모드(power-saving mode; PSM), 라우팅(routing)으로 나뉠 수 있다 [1]. TPC는 송수신 단말의 거리 및 채널특성에 따라 송신 파워를 변경함으로써 전력을 절감하는 방법이고, PSM은 단말의 통신 유무에 따라 송수신 모듈을 켰다/껐다(on/off 또는 wake/sleep)함으로써 전력을 절감하는 방법이다. 또한 라우팅은 링크의 전력소모 비용 및 단말의 배터리잔량 등을 고려하여 전송 경로를 선택함으로써 각 단말 및 네트워크의 생존시간(lifetime)을 증대시킬 수 있다.

MANET에서 단말의 전력절감을 위한 기존의 TPC 및 PSM 방식들은 주로 개별 단말간 링크 상황만을 고려함으로써 각 링크의 서비스의 질(quality of service; QoS)을 보장하면서 단말의 송신전력을 절감하는 것이 주된 목적이었다. 전송 패킷의 QoS에 따라 수신 단말이 요구하는 신호 대 간섭 및 잡음 비(signal-to-interference plus noise ratio; SINR) 및 비트 에러율을 보장하는 한도 내에서 최소 송신전력 값을 사용하는 TPC 방식들이 제안되었다 [2-4]. 또한 전송하는 패킷 길이 및 링크 상태를 기반으로 최소 송신시간을 결정하여 이 기간 동안 wake 상태로 머물고 나머지 기간 동안에는 sleep 상태로 천이하는 PSM 방식들이 제안되었다 [5-7]. 일반적으로 MANET에서의 라우팅 방식은 가장 짧은 연결 홉 수를 갖거나 링크 전송률이 높은 경로를 선택하나 [8], 이러한 방식은 노드가 송수신에 소비하는 전력량이나 배터리 소모량을 고려하지 않아 네트워크의 생존시간 측면에서는 좋은 성능을 보여주지 못한다. 따라서 노드의 사용 전력량을 고려한 에너지 효율적인 라우팅 방식들이 제안되었다 [9-11]. 이 방식들은 네트워크 생존시간의 증대를 위하여 노드의 소모 전력량을 고려하여 라우팅 비용을 설계하고 이를 기반으로 전체 라우팅 비용을 최소화하는 경로를 최종 선택한다.

일반적으로 TPC와 PSM은 주로 하위 물리 및 데이터 링크 계층에서 담당하는 반면 라우팅은 상위 네트워크 계층에서 담당하므로 이들 알고리즘들이 하나의 목적을 위해 함께 설계되기 어렵다. 하지만 이들 기술은 단말의 전력절감 및 네트워크 생존시간을 늘리는데 필수적인 기술로써 보다 나은 성능을 제공하기 위해서는 통합된 관점에서의 알고리즘 설계가 필요하다 [12, 13]. 따라서 본 논문에서는 애드혹 네트워크에서 주어진 종단간(end-to-end) 전송률을 만족시키면서 전송 경로의 생존시간 최대화를 위한 목적으로 전력절감 및 라우팅을 수행하는 결합 알고리즘을 제안한다. 제안방식은 단말의 전력절감 및 생존시간 최대화를 위해 PSM, TPC, 라우팅 알고리즘을 효과적으로 연동시킨다. 먼저 단말의 전력소비를 줄이기 위하여 TPC 또는 PSM을 적용하여 개별 단말의 생존시간을 증가시키고, 이후 결정된 노드 생존시간을 고려하여 라우팅을 수행함으로써 멀티홉 전체 경로의 생존시간을 극대화한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 고려하는 애드혹 네트워크에서의 시스템 모델을 기술하고, III장에서는 제안하는 전력절감 및 라우팅 방식의 동작 알고리즘을 자세히 설명한다. IV장에서는 제안 방식과 기존 방식의 성능을 비교 분석한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 모델링

그림 1은 고려하는 이동 애드혹 네트워크 환경을 보여준다. 소스(source) 노드가 목적지(destination) 노드에게 데이터를 전송하기 위해서는 멀티홉 연결이 필요하다. 이때 다수의 중간노드 중 어떠한 노드를 어떤 순서대로 선택할지에 대한 라우팅 문제가 발생한다. 이러한 라우팅 문제를 우리는 다음과 같이 표현할 수 있다 [8].

$$\mathbf{L} = \{\mathrm{i} \mid \mathrm{node}\ \mathrm{i} \in \mathrm{path}\} \quad (1)$$

즉 소스와 목적지 사이의 연결 경로를 구성하는 노드 i를 순서대로 결정하고 이 노드 집합을 **L**이라 한다.

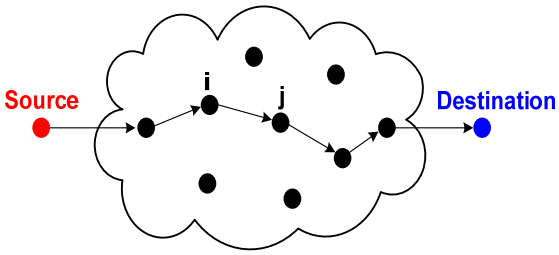

그림 1. 고려하는 이동 애드혹 네트워크 환경
Fig. 1 Considered mobile ad hoc network environments

경로 결정시 사용 가능한 라우팅 메트릭은 다음과 같다.

- P_{ij}: Power consumption for transmission via link ij (watt)
- I_j: Interference power at receiving node j (watt)
- W_{ij}: Channel bandwidth of link ij (Hz)
- Γ_{ij}: SINR for link ij
- R_{ij}: Data rate of link ij, $R_{ij}=W_{ij}\log_2(1+\Gamma_{ij})$ (b/s)
- E_i : Residual energy of node i (Joule)
- T_{ij}: Lifetime ($T_{ij} = E_i / P_{ij}$)

P_{ij}는 송신노드 i와 수신노드 j간(즉, 링크 ij간)에 전송시 소모되는 전력 값을 나타내며, I_j는 수신노드 j가 받는 간섭량을 나타낸다. Γ_{ij}와 R_{ij}는 각각 링크 ij에 대한 SINR 값과 전송률을 나타내는데, 전송률은 링크 ij간의 대역폭 W_{ij}와 SINR값 Γ_{ij}을 Shannon 용량 공식에 대입하여 구한다. 또한 각 노드 i가 갖고 있는 에너지 잔량을 E_i로 나타내며, 링크 ij의 생존시간 T_{ij}를 송신 노드 i의 에너지 잔량 E_i를 전송에 소모되는 전력 P_{ij}로 나눈 값으로 결정한다 [10].

위와 같은 파라미터들은 전송 경로 **L**과 영향을 주고받는데 이들 관계를 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 먼저 전송 경로 **L**은 링크간의 연결 관계를 결정하므로 각 링크의 SINR값 Γ_{ij}을 결정한다. SINR값 Γ_{ij}에 따라 링크 전송률 R_{ij}가 곧바로 결정되며(이때 링크간 대역폭 W_{ij}는 고정 값으로 모두 동일하게 주어진다고 가정), 결정된 현재 전송률 R_{ij}에 따라 각 노드는 송신전력 P_{ij}를 변경하여 실제 서비스가 요구하는 전송률로 맞출 수 있다. 각 노드의 변경된 송신전력 P_{ij}는 자신의 SINR Γ_{ij}에 영향을 주는 피드백 루프를 형성한다. 또한 노드의 송신전력 P_{ij}는 라우팅에 의해 전송 경로에 포함된 노드의 에너지 잔량 E_i과 함께 단말의 생존시간 T_{ij}를 결정한다. 여기에서 송신전력 P_{ij}와 전송 경로 **L**은 각각 TPC와 라우팅을 통해 우리가 제어할 수 있는 값이며, 나머지는 기본적으로 주어지거나 다른 값들에 의존하여 자동적으로 결정되는 값들이다.

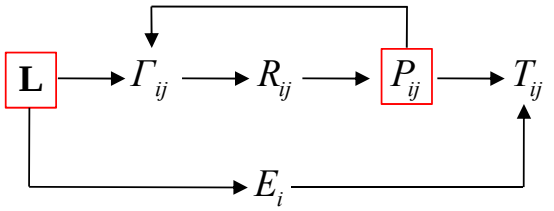

그림 2. 라우팅 메트릭과 전송 경로 간의 관계도
Fig. 2 Relationship between routing metrics and routing path

본 논문에서는 멀티홉 네트워크에서 최종적으로 얻게 되는 종단간 링크 전송률 R_L과 전송 경로의 생존시간 T_L을 다음과 같이 정의한다 [14, 15].

$$R_L = \frac{\min\{R_{ij}\}}{n}, \quad \forall i, j \in \mathbf{L} \tag{2}$$

$$T_L = \min\{T_{ij}\}, \quad \forall i, j \in \mathbf{L} \tag{3}$$

즉, 종단간 링크 전송률 R_L은 각 링크 별 전송률 R_{ij}의 최소값에 의해 제한되며 멀티홉 전송에 사용되는 겹치지 않는(orthogonal) 자원의 개수 n으로 나눠진다. 예를 들어 멀티홉 전송시 두 개의 독립적인 자원이 사용된다면 전송경로 상의 각 링크 순서대로 각 전송자원이 엇갈려 할당되며 이때 두 개의 자원을 사용하므로 종단간 전송률은 각 링크 전송률의 최소값을 2로 나눈 값이 된다. n 개의 독립적인 자원을 각 링크 별로 할당한다면 사용한 자원량이 늘어나게 되므로 이에 반비례하여 전체 종단간 전송률은 감소하게 된다. 아울러 멀티홉 링크의 생존시간 T_L은 각 링크의 생존시간 T_{ij}의 최소값으로 제한된다. 즉 전송에 참여하는 하나의 노드라도 배터리 소진으로 인해 생존시간이 다하게 되면 전체 멀티홉 링크의 연결이 끊어지므로 전체 경로의 생존시간은 각 링크 생존시간의 최소값으로 결정된다.

Ⅲ. 제안 방식

그림 2에서 보듯이 링크 및 노드의 속성을 나타내는 다양한 메트릭들은 서로 피드포워드(feed-forward)와 피드백(feedback)으로 연결되어 있다. 이러한 환경에서 제안 방안은 요구하는 전송률을 만족시키면서 경로 생존시간의 최대화를 목적으로 송신전력 P_{ij}와 전송 경로 **L**을 결정한다. 이를 위해 TPC 또는 PSM을 사용하여 단말의 송신전력을 줄여 단말의 생존시간을 증가시키고, 전체 경로의 생존시간을 증가시키기 위해 라우팅을 수행한다. 본장에서는 먼저 문제 정의 및 접근방안에 대해서 간략히 설명하고, 제안하는 TPC, PSM, 라우팅 동작을 자세히 설명한다.

3.1. 문제 정의 및 접근방안

제안방식은 주어진 종단간 전송률을 만족시키면서 전송경로의 생존시간을 최대화하는 것이 목적이므로 다음과 같은 최적화 문제로 표현 가능하다.

$$\max_{\mathbf{P},\mathbf{L}} T_L = \max_{\mathbf{P},\mathbf{L}} \min\{T_{ij}\} = \max_{\mathbf{P},\mathbf{L}} \min\left\{\frac{E_i}{P_{ij}}\right\}, \forall i,j \in \mathbf{L}$$

$$\begin{aligned} s.t.\quad & R_L \geq R_{e2e} = \frac{R_{req}}{n} \\ & P_{ij} < P_{\max} \\ & \Gamma_{ij} = \frac{P_{ij} g_{ij}}{I_j + N_j} = \frac{P_{ij} g_{ij}}{\sum_{\forall k, k \neq i,j} P_{kj} g_{kj} + N_j} \\ & R_{ij} = \log_2\left(1 + \Gamma_{ij}\right) \\ & R_{ij} \geq R_{req} = n \cdot R_{e2e},\ \forall i,j \in \mathbf{L} \end{aligned} \tag{4}$$

즉, 주어진 종단간 전송률 R_{e2e}를 만족시키면서 정의된 생존시간 T_L을 최대화하는 참여노드의 전송 파워 벡터 **P**값과 라우팅 경로 **L**값을 결정해야 한다. 이를 위해 다음과 같은 단계적인 접근을 시도한다.

1) 요구되는 종단간 전송률 R_{e2e}와 orthogonal 자원 개수 n을 고려하여 각 링크에서 제공해야 하는 전송률 R_{req}를 결정한다. 이때 각 노드는 수신하는 간섭 레벨에 따라서 n 값을 결정할 수 있는데, 본 논문에서는 소스와 목적지 노드의 연결이 하나의 선형 멀티홉 토폴로지로 되어 있고 two-hop 이상의 노드로부터의 간섭은 무시할만하다고 가정하여 n=3을 기본값으로 사용한다. 하지만 상황에 따라 two-hop 이상의 노드로부터 측정된 간섭레벨이 정해진 임계치 보다 높은 경우에는 n 값을 증가시켜 간섭을 낮출 수 있다. 이러한 n 값은 실제 실험을 통해 경험적으로 구해진다. 결정된 n값과 요구되는 종단간 전송률 R_{e2e}를 곱한 값이 각 링크에서 최소한 지원해야 할 전송률로써 $R_{req}=n \cdot R_{e2e}$가 된다. 종단간 전송률은 각 링크에서 제공하는 전송률의 최소값에 의해 제한되므로 모든 링크가 R_{req}이상의 전송률을 갖도록 함으로써 요구되는 종단간 전송률을 만족시킬 수 있다.
2) 각 노드는 정해진 R_{req}을 만족시키면서 TPC를 통하여 송신전력을 제어하거나 PSM을 수행하여 송신전력을 절약한다. TPC는 직접 송신 파워를 줄여 전력소비를 줄이며, PSM은 최대 송신 파워를 사용하여 전송을 일찍 마친 후 sleep 상태로 천이하여 전력소비를 줄인다. 이를 통해 각 단말의 생존시간이 증가된다.
3) TPC 또는 PSM을 통해 줄어든 단말의 전력소비에 따라 달라진 단말의 생존시간을 반영하여 라우팅을 수행한다. 갱신된 단말의 생존시간을 라우팅 비용(cost)으로 설정하여 가장 긴 생존시간을 갖는 전송경로를 찾는다.

3.2. TPC 동작

TPC는 다음과 같이 각 링크 전송률 R_{ij}가 정해진 R_{req}을 만족시킬 때 (즉, $R_{ij} = R_{req}$일 때) 송신노드 i의 새로운 송신전력 값 P_{ij}'를 구한다.

$$\begin{aligned} & R_{ij} = \log_2\left(1 + \frac{P_{ij} g_{ij}}{I_j + N_j}\right) = R_{req} \\ & \therefore P_{ij}' = \frac{(2^{R_{req}} - 1)(I_j + N_j)}{g_{ij}} = \frac{(2^{R_{req}} - 1) P_{ij}}{\Gamma_{ij}} \end{aligned} \tag{5}$$

이때 P_{ij}'를 결정하기 위해서는 링크 ij에 대한 SINR Γ_{ij}가 송신노드 i에게 피드백 되어야 한다. 식 (5)에서 보듯이 P_{ij}'는 주어진 R_{req}를 2의 승수로 가지므로 R_{req}값이 감소함에 따라 전력소비가 상당히 줄어든다.

3.3. PSM 동작

PSM은 단말의 송신전력 값을 변화시키지 않고 고정된 최대 송신전력 값을 사용하면서 각 링크의 전송률에 따라 전송허용시간 내에 전송을 마치면 sleep 상태로 천이하여 송신파워를 끄는(power off) 방식이다. 따라서 링크 전송률이 좋은 경우에는 전송시간이 짧아지므로 단말의 송신전력을 현저히 줄일 수 있다. 그림 3은 동일한 데이터양(bit 수)을 전송할 때 링크 전송률의 상이함에 따라 전송시간이 달라짐을 도식적으로 보여준다.

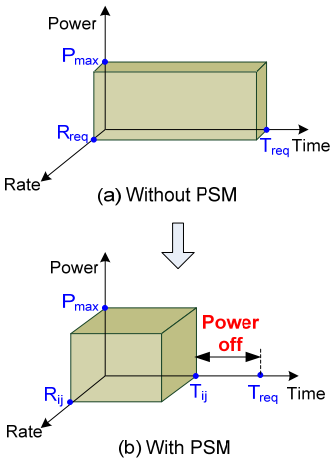

그림 3. PSM 동작 개념
Fig. 3 Concept of PSM operation

그림 3에서 각축은 송신전력(power), 전송률(rate), 전송시간(time)에 해당된다. 한 링크의 전송률이 R_{req}일 때 P_{max}라는 파워로 최소한 T_{req} 시간 동안 D_{req} 만큼의 데이터양(bits)을 전송한다고 가정하면, 전송률이 R_{ij}인 링크에서는 동일하게 D_{req} 만큼의 데이터양을 전송하는데 필요한 시간은 다음과 같은 수식전개에 의해 R_{ij} 값에 비례하여 줄어듦을 알 수 있다.

$$E_{req} = P_{\max} T_{req} = P_{\max} \frac{D_{req}}{R_{req}} \tag{6}$$

$$E_{ij} = P_{\max} T_{ij} = P_{\max} \frac{D_{req}}{R_{ij}} = E_{req} \frac{R_{req}}{R_{ij}} \tag{7}$$

따라서 전송에 소비되는 전력량 P_{ij}는 R_{ij} 값에 반비례하며 다음과 같이 최종 결정된다.

$$\therefore P_{ij} = P_{\max} \frac{R_{req}}{R_{ij}} \tag{8}$$

그림 4는 멀티홉 전송시 PSM 동작을 보여준다. PSM 동작시 각 노드는 요구되는 전송률 R_{req}와 사용 프로토콜에 따라 주어지는 한 번에 전송 가능한 최대 데이터 비트수 및 전송 트래픽의 QoS 속성을 고려하여 전송허용시간 T_{req} 값을 결정한다. 각 송신 단말은 T_{req} 동안 주어진 링크 전송률 R_{ij}에 따라 정해진 데이터양을 전송한 후 sleep 상태로 전환(power off)하고 다음 번 전송 시작 시점에 wake 상태로 전환(power on)한다. 예를 들어 그림 4와 같이 노드 7개가 참여하는 6홉 전송 환경에서 n=3의 자원할당을 가정할 때 링크 12와 링크 45는 t_1 시간에 동시 전송을 수행한다. 다른 링크 쌍도 마찬가지로 같은 주파수 밴드에서 각각 t_2와 t_3 시간에 전송을 시작하게 된다. 이때 서로 다른 시간 자원을 사용하기 위해 $t_2=t_1+T_{req}$와 $t_3=t_2+T_{req}$로 결정된다. 이때 각 링크가 갖고 있는 전송률 R_{ij} 값에 따라 전송에 소모되는 시간이 달라지므로 전송을 마친 후 단말은 sleep 상태로 전환하여 파워소모를 막는다. 각 노드가 깨어나는 시간은 각 홉 별로 전송을 모두 마친 시간이 되며, 그림 4의 예에서는 각 노드의 전송시작 후 3T_{req} 시간이 지난 후에 다시 wake 상태로 전환하여 전송을 개시한다.

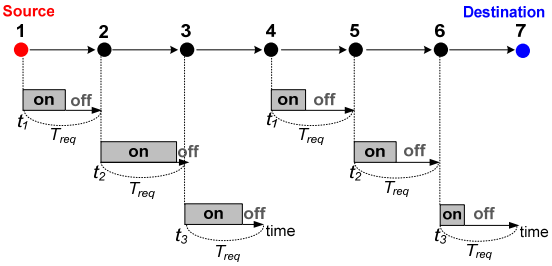

그림 4. 멀티홉 전송시 PSM 동작 예 (6홉 링크의 경우)
Fig. 4 Example of PSM operation in multihop transmission (in case of six-hop link)

3.4. 라우팅 동작

단말이 TPC에 의해 송신파워를 결정하거나 PSM에 의해 전송구간을 결정하면 전송에 필요한 전력소모량 P_{ij}가 결정된다. 그러면 각 송신노드 i의 에너지 잔량이 E_i일 때 링크 ij의 생존시간 T_{ij}는 다음과 같이 결정된다.

$$T_{ij} = \frac{E_i}{P_{ij}} \tag{9}$$

링크의 생존시간이 큰 경로를 선택하는 것이 좋으므로 각 링크 별 라우팅 비용 C_{ij}는 T_{ij}의 역수로 다음과 같이 정의된다.

$$C_{ij} = \frac{1}{T_{ij}} = \frac{P_{ij}}{E_i} \tag{10}$$

TPC를 사용할 경우에 식 (5)을 대입하여 최종적으로 링크 별 라우팅 비용은 다음과 같이 결정된다.

$$C_{ij}^{TPC} = \frac{P_{ij}}{E_i} = \frac{(2^{R_{req}} - 1)(I_j + N_j)}{g_{ij} E_i} \tag{11}$$

$$\Rightarrow C_{ij}^{TPC} = \frac{I_j + N_j}{g_{ij} E_i} \tag{12}$$

여기에서 상수 부분은 최종 라우팅 비용 계산시 동일하게 적용되어 생략이 가능하므로 식 (12)와 같이 단순화가 가능하다. 또한 PSM을 사용할 경우 식 (8)을 반영하여 라우팅 비용은 다음과 같이 구해진다.

$$C_{ij}^{PSM} = \frac{P_{ij}}{E_i} = \frac{P_{\max} R_{req}}{R_{ij} E_i} \tag{13}$$

$$\Rightarrow C_{ij}^{PSM} = \frac{1}{R_{ij} E_i} \tag{14}$$

여기에서 P_{max}와 R_{req}는 모든 노드에서 동일한 상수이므로 최종 라우팅 비용 계산시 생략이 가능하다. 따라서 PSM 사용시 라우팅 비용은 R_{ij}와 E_i의 곱에 반비례함을 알 수 있다. 즉, 제안하는 PSM 방식의 사용시 링크의 전송률이 높고 송신단말의 에너지 잔량이 많은 경우 라우팅 비용이 감소하므로 두 값의 곱이 큰 링크를 선택하는 것이 전체 경로의 생존시간을 최대화하게 된다.

제안 방식의 목적은 전체 경로의 생존시간을 최대화하는 것이므로 생존시간의 역수로 정의된 라우팅 비용의 최대값을 최소화해야 한다. 따라서 최종적으로 제안하는 라우팅 알고리즘은 다음과 같이 표현된다.

$$\min\max C_{ij} = \begin{cases} \min\max \dfrac{I_j + N_j}{g_{ij} E_i} & \text{if TPC is used,} \\ \min\max \dfrac{1}{R_{ij} E_i} & \text{if PSM is used.} \end{cases} \tag{15}$$

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

제안 방안의 성능을 도출하기 위해 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 사용한 시뮬레이션 파라미터를 보여준다. 각 노드는 1km^{2}영역 내에 랜덤하게 분포되며 통신 반경은 500 m로 설정된다. 또한 각 노드의 배터리 잔량은 500~1500 Joule 사이에서 uniform 분포를 따른다 [15]. 사용 주파수 대역폭은 10 MHz로 요구되는 전송률을 10 Mb/s라 할 때 요구되는 주파수 효율(spectral efficiency)은 1 b/s/Hz가 된다. 9 dB의 noise figure를 고려하여 잡음의 power spectral density (PSD)는 3.1623e-17 Watt/Hz로 결정되고, 경로 손실(path loss) 모델은 3GPP 표준의 권고를 따른다 [16]. 각 노드가 수신하는 간섭 레벨을 잡음 파워의 10~100배 사이의 값으로 가변하고 멀티홉 전송에 할당되는 orthogonal 자원의 수는 3으로 가정한다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table. 1 Simulation parameters

Name	Value
Node deployment	Uniform-randomly in 1000 m×1000 m square
Number of nodes	20~100
Node's transmission range	500 m
Residual energy distribution	Uniform(500, 1500) [Joule]
Bandwidth	10 MHz
Required rate	10 Mbit/s
Required spectral efficiency	1 bit/s/Hz
Maximum transmission power	23 dBm
Pathloss model	-128.1 - 37.6 log10R [dB], R in km [16]
Lognormal shadowing	8 dB
Noise figure	9 dB
Noise PSD	3.1623e-17 Watt/Hz
Interference level	10~100 times of noise level
Number of orthogonal resources (n)	3

제안방안은 TPC를 수행하며 생존시간을 최대화 하는 TPC+Max Lifetime Routing(MLR) 방식과 PSM을

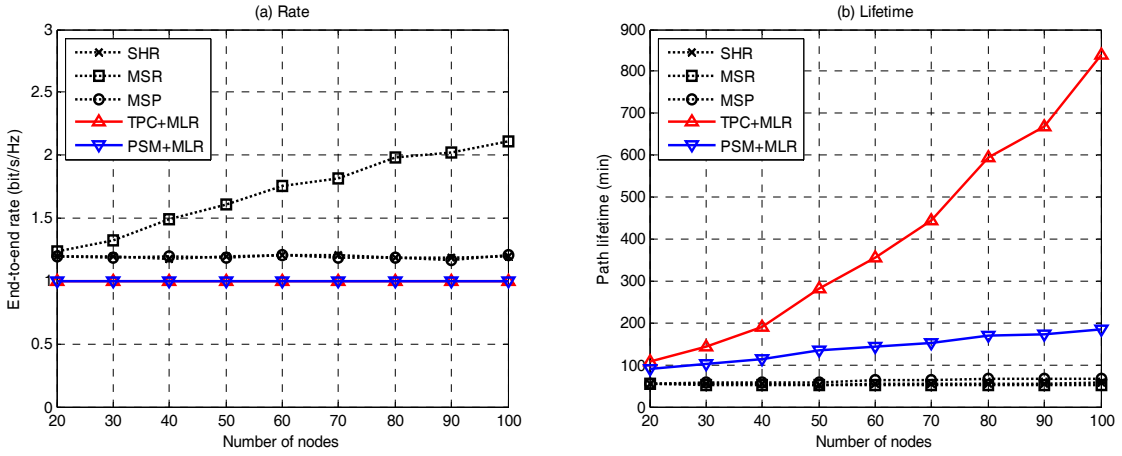

그림 5. 노드 수에 따른 종단간 전송률 및 경로 생존시간 (간섭 레벨이 50 일 때)
Fig. 5 End-to-end rate and path lifetime vs. number of nodes (when interference level is 50)

수행하며 생존시간을 최대화하는 PSM+MLR 방식으로 나뉘며, 성능 비교를 위해 애드혹 네트워크에서 널리 사용되는 Shortest Hop Routing (SHR), Max Sum Rate (MSR), Min Sum Power (MSP)의 라우팅 방식을 고려한다 [8, 9]. SHR은 홉 수를 라우팅 비용으로 보고 소스부터 목적지까지 가장 작은 홉 수로 갈 수 있는 최단 경로를 찾는 방식이고, MSR은 각 링크 전송률을 라우팅 비용으로 보고 멀티홉을 구성하는 각 링크 전송률의 총합이 최대가 되는 경로를 찾는 방식이고, MSP는 각 링크에서 소비되는 전력을 라우팅 비용으로 보고 멀티홉을 구성하는 각 링크의 소비 전력의 합이 최소가 되는 경로를 찾는 방식이다.

그림 5는 네트워크 노드 수의 변화에 따른 종단간 전송률 및 경로 생존시간을 보여준다. 먼저 종단간 전송률을 보면 제안 방안인 TPC+MLR과 PSM+MLR은 노드 수에 상관없이 요구 전송률인 1 bit/s/Hz를 만족한다. 이에 반해 기존 SHR과 MSP 방식은 제안 방안에 비해 약20% 정도 증가된 1.2 bit/s/Hz의 전송률을 제공하고, 전송률이 높은 링크를 선택하는 MSR은 노드 수가 증가할수록 더 좋은 링크가 늘어나 종단간 전송률이 증가한다. 그러나 경로 생존시간의 성능을 비교해보면 MSR 방식은 전송률만을 고려하고 노드의 소모 전력이나 배터리 잔량을 고려하지 않으므로 가장 짧은 생존시간을 보인다. 비슷하게 SHR과 MSP도 노드의 전력 소모를 줄이지 않고 배터리 잔량을 고려하지 않기 때문에 짧은 생존시간을 갖는다. 반면 제안하는 TPC+MLR과 PSM+MLR은 노드 수가 증가 할수록 생존시간이 점점 증가한다. 이는 노드 수가 증가할수록 노드 간 간격이 가까워져서 링크 품질이 좋아지므로 데이터를 전송하는데 필요한 송신전력 및 송신시간이 줄어들기 때문이다. 특히 TPC를 사용하는 경우에 PSM을 사용하는 것보다 절감되는 전력소비량이 커서 TPC+MLR이 PSM+MLR보다 긴 생존시간을 보여준다. 두 결과를 통해 종단간 전송률과 경로 생존시간 사이에 트레이드오프(trade-off) 관계가 있음을 알 수 있는데, 제안방식은 기존 방식 대비 약 20%의 낮아진 전송률을 갖는 대신 약 2~10배의 늘어난 생존시간을 갖는다.

그림 6은 간섭량의 변화에 따른 종단간 전송률 및 경로 생존시간을 보여준다. 간섭 레벨이 증가할수록 기존 방식인 SHR, MSR, MSP 방식은 종단간 전송률이 점점 감소하게 된다. 하지만 제안 방식인 TPC+MLR과 PSM+MLR은 간섭 레벨에 관계없이 요구 전송률인 1 bit/s/Hz를 만족시킨다. 경로 생존시간 측면에서는 기존 방식의 경우 간섭량에 크게 영향을 받지 않으며 비슷하게 짧은 생존시간을 갖는다. 이는 기존 방식들이 단말의 전력 소비량 및 생존 시간을 정확히 반영하지 않기 때문이다. 반면 제안 방식은 간섭량이 작을 때는 긴 생존시간을 갖다가 간섭량이 증가하면서 생존시간이 점

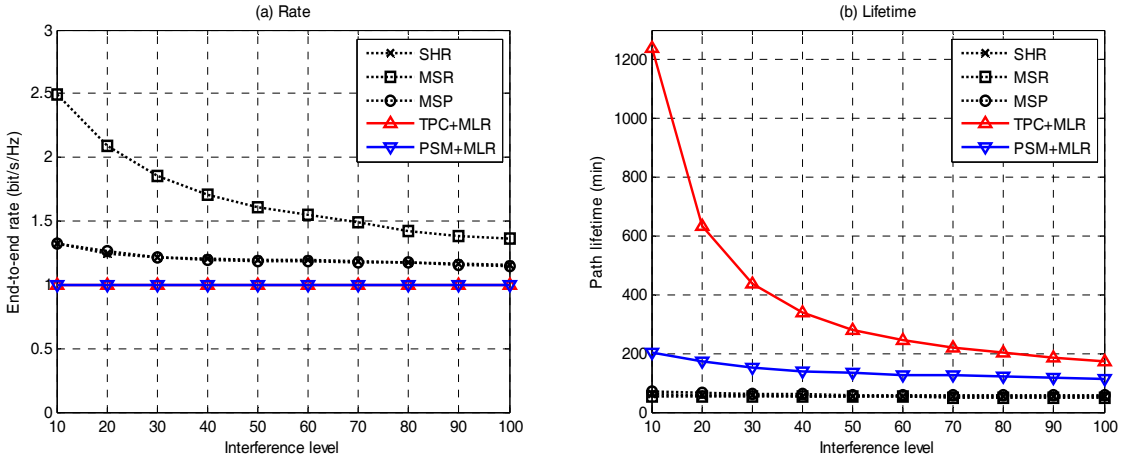

그림 6. 간섭 레벨에 따른 종단간 전송률 및 경로 생존시간 (노드 수가 50 일 때)
Fig. 6 End-to-end rate and path lifetime vs. interference level (when the number of nodes is 50)

점 줄어든다. 이는 간섭량이 증가할수록 각 링크의 전송률이 낮아지기 때문에 요구되는 전송률을 만족시키기 위해서는 송신전력을 증가시켜야 하고 이로 인해 노드의 생존시간이 줄어들기 때문이다. 그러나 높은 간섭량에도 불구하고 제안 방안은 기존 방안 보다 2배 이상의 생존시간을 갖는다.

Ⅴ. 결 론

제안 방안은 주어진 전송률을 만족시키면서 멀티홉 경로의 생존시간을 최대화하기 위해 TPC 또는 PSM을 적용하여 단말의 전력소모를 최소화하고 전체 경로의 생존시간을 최대화하는 라우팅을 수행한다. 성능 평가 결과 제안방식은 단말 수 및 간섭량의 변화에 따라 요구되는 전송률을 만족시키면서 생존시간을 극대화시킨다. 또한 PSM 보다 TPC를 사용하는 것이 전력절감 및 생존시간을 향상시키는데 더 효과적임을 보여주었다. 이러한 제안 전력절감 및 라우팅 방안은 애드혹 네트워크 환경에서 전송 QoS를 만족시키면서 네트워크 생존시간을 증대시키는데 활용가능하다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0025424)

REFERENCES

[1] N.A. Pantazis and D.D. Vergados, “A survey on power control issues in wireless sensor networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials,* vol. 9, no. 4, pp. 86-107, Feb. 2007.

[2] E.-S. Jung and Nitin H. Vaidya, “Power Control in Multi-Hop Wireless Networks,” *Technical Report*, Mar. 2002.

[3] M.B. Pursley, H.B. Russell, and J.S. Wysocarski, “Energy-efficient transmission and routing protocols for wireless multiple-hop networks and spread-spectrum radios,” in *Proceeding of EUROCOMM 2000*, Munich, pp.1-5, 2000.

[4] Sharad Agarwal, Srikanth Krishnamurthy, Randy H. Katz, and Son K. Dao, “Distributed power control in ad-hoc wireless networks,” in *Proceeding of IEEE PIMRC*, San

Diego, CA, pp. F59-F66, 2001.

[5] S. Singh and C. Raghavendra, “PAMAS: Power Aware Multi Access Protocol with Signaling for Ad-Hoc Networks,” *ACM SIGCOMM Comp. Commun. Review*, vol. 28, no. 3, pp. 5-26, 1998.

[6] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin, “An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,” in *Proceeding of the IEEE INFOCOM*, New York, USA, 2002.

[7] D. D. Vergados, et al., “A New Approach for TDMA Scheduling in Ad-Hoc Networks,” in *Proceeding of Int’l. Conf. Personal Wireless Communications (PWC’05),* Colmar, France, 2005.

[8] C. E. Perkins, *Ad hoc Networking*, Addison Wesley, 2001.

[9] S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra “Power-Aware Routing in Mobile ad-Hoc Networks,” in *Proceeding of ACM/IEEE Int’l. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Dallas, Texas, pp. 181 - 190, Oct. 1998.

[10] C. Toh, “Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks,” *IEEE Commun. Magazine*, vol. 39, no. 6, pp. 138-147, June 2001.

[11] R. Shah and J. M. Rabaey, “Energy Aware Routing for Low Energy Ad-Hoc Sensor Networks,” in *Proceeding of IEEE WCNC*, Orlando, FL, USA, pp. 350-355, Mar. 2002.

[12] A. Rajeswaran, G. Kim, and R. Negi, “Joint Power Adaptation, Scheduling, and Routing for Ultra Wide Band Networks,” *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 6, no. 5, pp. 1964-1972, May 2007.

[13] R. Jantti and S.-L. Kim, “Joint data rate and power allocation for lifetime maximization in interference limited ad hoc networks,” *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 5, no. 5, pp. 1086-1094, May 2006.

[14] Yanru Bao, et al., “A New Maximum-Lifetime Routing in Wireless Ad Hoc Networks,” in *Proceeding of WiCOM*, Dalian, pp. 1-4, 2008

[15] H.-H. Choi, “Energy-aware Source Routing Protocol for Lifetime Maximization in Mobile Ad Hoc Networks,” *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 31-39, June 2012.

[16] 3GPP TR 36.814 v1.1.1, *Technical Specification Group Radio Access Network; Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects (Release 9)*, June 2009.

최현호(Hyun-Ho Choi)

2001년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학사
2003년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학석사
2007년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학박사
2007년 3월 ~ 2011년 2월: 삼성종합기술원 전문연구원
2011년 3월 ~ 현재: 국립한경대학교 전기전자제어공학과 조교수
※관심분야 : 매체접속제어, 분산자원관리, 저전력 프로토콜, 생체모방 알고리즘, 차세대 이동통신 시스템