

무선 멀티홉 네트워크에서 종단간 최적 전송률을 위한 분산 송신전력제어

Distributed Transmit Power Control for Optimal End-to-End Throughput in Wireless Multihop Networks

최 현 호*
(Hyun-Ho Choi)

요 약

이 논문에서는 무선 멀티홉 네트워크 환경에서 종단간 최적 전송률을 제공하기 위한 분산 송신전력제어 방안을 제안한다. 제안 방안은 멀티홉 구성 링크들의 전송률이 갖는 연대 특성과 멀티홉 종단간 전송률이 최소 링크 전송률에 의해 결정된다는 점을 고려하여, 멀티홉 구성 링크들의 전송률이 모두 같아지도록 송신전력을 제어함으로써 종단간 전송률을 최대화 한다. 또한 제안 방안은 이웃단말과의 정보 공유만을 가지고 단말 스스로 송신전력 값을 계산하는 분산 방식으로 송신전력 제어에 필요한 정보 교환 오버헤드를 줄인다. 시뮬레이션 결과 제안 방안은 고정된 최대 송신전력 값을 사용한 기존 방식 대비 종단간 전송률과 전력소비 측면에서 큰 성능이득을 보여준다.

Abstract

In this paper, we propose a distributed transmit power control algorithm for optimal end-to-end throughput in wireless multihop networks. Considering a solidarity property of link rates consisting of a multihop link and the fact that the multihop end-to-end throughput is determined by the minimum link rate, the proposed scheme controls the transmit power to make all link rates be equal and so maximizes the end-to-end throughput of multihop link. In addition, in the proposed scheme the transmit node calculates its transmit power autonomously in a distributed manner just through the information sharing with its neighbor nodes and so decreases the information sharing overhead. Simulation results show that the proposed scheme achieves significant improvements in terms of end-to-end throughput and power consumption compared with the conventional maximum equal power allocation scheme.

Key words : Transmit power control, Distributed algorithm, Throughput optimization, Multihop network, ad hoc network

† 본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음. [(GRRC환경2011-B03), 물류센터 관리를 위한 저전력 사물 통신 및 네트워크 기술 연구]

* 주저자 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 교수

† 논문접수일 : 2012년 3월 8일

† 논문심사일 : 2012년 3월 19일

† 게재확정일 : 2012년 3월 30일

1. 서 론

무선통신 기술의 발달은 다양한 무선통신 서비스의 제공 및 무선통신 단말 수의 증가를 가져왔다. 세계 이동통신 연구 포럼인 WWRF(World Wide Radio Forum)에서는 2017년에 70억 세계 인구가 7 조개의 무선 통신 단말을 소유하게 될 것이라는 비전을 제시하였다[1]. 이것은 한 사람이 들고 다니는 이동전화 외에 앞으로는 집, 사무실, 창고, 자동차, 길거리, 공공장소 등 어디든지 존재하는 사물에 무선 통신 기능이 부여됨을 의미한다. 이와 같이 널리 퍼져있는(pervasive) 수많은 무선통신 단말에게 언제 어디서나 서비스를 제공하기 위해서는 기지국 인프라 기반의 무선통신 네트워킹 기술 외에 단말간 직접통신 기반의 네트워킹 기술이 필요하다. 단말간 직접통신 기술은 인프라가 없는 환경에서도 송수신 단말 간 정보 교환이 가능하게 해주므로 이동 애드혹 네트워크(Mobile Ad hoc Network; MANET) 및 유비쿼터스 센서 네트워크(Ubiquitous Sensor Network; USN) 등에 접목하여 사용되고 있다. 기본적으로 무선단말은 송신 출력이 작아 통신거리가 제한되므로 통신 반경 바깥에 위치한 단말과 통신하기 위해서는 주변 단말과의 협력을 통한 멀티홉 전송이 필요하다.

무선 멀티홉 전송을 위해서 각 단말은 동적으로 망을 구성하고, 경로를 찾아 연결하고, 무선 자원을 할당하고, 정해진 전송 규약에 따라 정보를 전달해야 한다. 이와 같은 멀티홉 네트워크 환경에서 단말 수의 증가는 트래픽 부하량을 증가시키므로, 전송 자원의 효율적인 제어 없이 여러 단말이 동시에 전송할 경우에는 상호 간섭으로 인해 성능 열화가 발생한다[2]. 효과적인 간섭 제어 방법 중 하나는 단말의 송신전력을 줄이는 것으로, 데이터 수신율에 문제를 야기하지 않는 한도 내에서 송신전력을 낮춤으로써 주변 단말로의 간섭을 줄일 수 있다. 하지만 멀티홉 전송 환경에서는 송신전력 값을 너무 작게 할 경우 전송 홉 수가 늘어나 전체 트래픽 량이 증가하므로 추가적인 간섭이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 균형(trade-off) 관계를 고려하여 전체 네

트워크 용량(network capacity)을 극대화 할 수 있도록 단말의 송신전력 값을 적절히 조절해야 한다.

무선 멀티홉 네트워크 환경에서 기존 송신전력 제어 방법들은 주로 개별 링크 상황만을 고려하였다 [3]. [4-6]에서는 전송 패킷의 서비스의 질(Quality of Service, QoS)에 따라 수신 단말이 요구하는 신호 대 간섭 및 잡음 비(Signal-to-Interference plus Noise Ratio, SINR)를 보장하는 한도 내에서 최소 송신전력 값을 사용함으로써 전력절감 효과와 함께 네트워크 전체 간섭량을 줄인다. [7, 8]은 패킷 길이(packet size)를 기반으로 송신전력 값을 결정하는데 패킷 길이가 길수록 비트에러가 많이 발생하므로 송신전력을 증가시킨다. 또한 [9]는 채널 상태(channel condition) 정보를 기반으로 비트 에러율이 일정한 값을 유지하도록 송신 전력을 제어한다. [10]은 무선랜 환경에서 CTS(Clear-to-Send)와 같은 제어 패킷을 전송할 때 송신전력을 증가시켜 주변에 숨어있는(hidden) 노드로부터의 충돌 및 간섭을 방지한다. [11]은 양방향 링크의 전송 보장을 위해 전체 네트워크 관점에서 모든 노드가 공통으로 사용해야 할 공통전력수준(common power level)을 결정한다. 이와 같이 기존의 송신전력 제어 방법은 개별 링크 상황만을 고려함으로써 각 링크의 QoS를 보장하면서 단말의 송신전력을 절감하는 것이 주된 목적이었다. 하지만 개별 링크 기반의 송신 전력 제어 방법은 링크간에 발생하는 상호작용을 고려하지 않기 때문에 다수의 링크를 거쳐 데이터를 전송하는 멀티홉 네트워크에서의 중단간 전송률(end-to-end throughput)을 보장하기 어렵다. 다시 말해, 멀티홉 네트워크 환경과 같이 다수의 링크가 동시에 송수신하여 상호 간섭을 미치는 경우에는 발생하는 모든 간섭 관계를 고려하여 멀티홉 전송에 참여하는 모든 단말의 송신전력을 다같이 제어해야 한다. 하지만 이러한 방식은 각 링크의 채널상태 정보 및 타단말의 송신전력 값 등에 대한 정보교환이 추가적으로 필요하므로 오버헤드(overhead)가 증가하는 문제가 있다. 따라서 멀티홉 중단간 전송률을 극대화하기 위해서는 참여 단말의 송신전력을 통합 제어하면서 발생하는 제어정보 교환 오버헤드를 최

소화하는 방안을 함께 고려해야 한다.

제안 방안은 멀티홉 네트워크에서 다수의 링크가 동시 전송을 수행할 때 발생하는 상호 간섭을 고려하여 종단간 전송률을 최적화하기 위한 단말의 송신전력제어 알고리즘이다. 제안 방안은 멀티홉 종단간 전송률이 최소 링크 전송률에 의해 결정된다는 점과 멀티홉 구성 링크들이 갖는 연대 특성(solidarity property)을 고려하여, 멀티홉을 구성하는 모든 링크의 전송률이 같아지도록 송신전력을 제어함으로써 종단간 전송률을 최대화 한다. 아울러 제안방안은 송신전력 제어에 필요한 정보 교환 오버헤드를 줄이기 위해 주변 이웃 단말에서 제공하는 전송률 정보만으로도 단말 스스로 자신의 송신전력 값을 결정하는 분산 방식을 따른다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 연구 배경과 관련 기존 연구들에 대해 서술하고, 2장에서는 무선 멀티홉 전송 환경에서 종단간 전송률의 최적화 문제를 기술한다. 3장에서는 제안하는 멀티홉 송신전력 제어 방법을 자세히 설명하고, 4장에서 시뮬레이션 결과들을 바탕으로 제안 방식의 우수성에 대해 논의한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

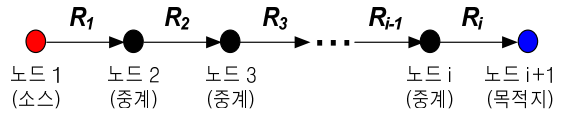
II. 무선 멀티홉 전송에서의 종단간 전송률 최적화 문제

<그림 1>은 고려하는 무선 멀티홉 전송 링크를 보여준다. 소스(source)노드와 목적지(destination)노드는 중계(relay)노드를 통해 연결된다. 전체 $i+1$ 개의 노드로 구성된 멀티홉 네트워크에서 i 개의 링크가 존재하며 i 번째 링크 전송률을 R_i 로 나타낸다.

멀티홉 전송 링크의 종단간 전송률은 구성하는 링크들이 갖는 가장 작은 전송률에 의해 제한되므로 종단간 전송률은 다음과 같이 각 링크 전송률의 최소값으로 결정된다[12].

$$R_{e2e} = \min \{R_1, R_2, \dots, R_i\} \quad (1)$$

제안하는 송신전력 제어 방법은 종단간 전송률 R_{e2e} 를 최대화하는 모든 송신노드의 송신전력 값들(벡



<그림 1> 무선 멀티홉 전송 링크
(Fig. 1) Wireless multihop transmission link

터 \mathbf{P} 값)을 구하는 것으로 다음과 같은 최적화 문제로 기술된다.

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{P}} R_{e2e} &= \max_{\mathbf{P}} \min \{R_1, R_2, \dots, R_i\} \\ \text{s.t. } \mathbf{P} &= [P_1, P_2, \dots, P_i] \\ R_i &= \log_2 \left(1 + \frac{P_i g_{i(i+1)}}{I_i + N_i} \right) \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{P_i g_{i(i+1)}}{\sum_{\forall j, j \neq i} P_j g_{j(i+1)} + N_i} \right) \quad [\text{b/s/Hz}] \\ P_i &\leq P_{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서 P_i 는 i 번째 링크에서 송신노드의 송신전력 값을 나타내며, g_{ij} 는 노드 i 에서 노드 j 로의 채널이득 값을 나타낸다. 또한 I_i 와 N_i 는 i 번째 링크에서 수신노드가 받는 간섭(interference)량과 노이즈 양을 나타낸다. I_i 는 다른 송신노드가 같은 자원을 사용하여 동시에 전송할 때 링크 i 의 수신노드에서 발생하는 간섭의 총 합으로써 $\sum_{\forall j, j \neq i} P_j g_{j(i+1)}$ 로 표현된다. 링크 i 의 전송률 R_i 는 새논 용량(Shannon capacity)식에 의해 결정되며, 송신전력 P_i 는 최대 송신전력 값 P_{\max} 보다는 클 수 없다.

결국 제안 방안의 목적 함수(objective function)는 종단간 전송률 R_{e2e} 를 최대화 하는 각 링크의 송신전력 벡터 \mathbf{P} 를 구하는 것으로, 멀티홉 종단간 전송률은 구성 링크들의 최소 전송률에 의해 결정되기 때문에 멀티홉 구성 링크의 최소 전송률을 최대화 하는 전략(max-min strategy)이 필요하다.

III. 제안하는 분산 송신전력제어 방법

1. 무선 네트워크의 연대 특성

무선 네트워크 환경에서 동시에 같은 자원을 사

용하여 송수신하는 링크들의 전송률은 상호 간섭으로 인해 연대 특성을 갖는다. 연대 특성은 다음과 같이 정의된다 [13].

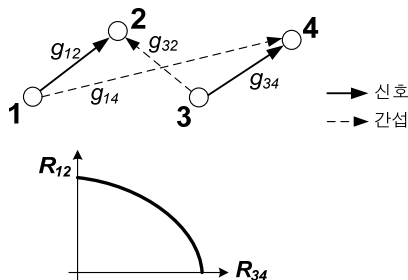
- 연대 특성의 정의: R_n 의 부분집합 X 에 속하는 임의의 n 차원 벡터 $x \in X$ 에서, x 의 i 번째 원소 $x_i > 0$ 와 충분히 작은 값 $\varepsilon > 0$, $0 < a_i < \varepsilon$ 인 a_i 에 대하여, 원소 x_i 의 변화 $x_i \pm a_i$ 에 의해 다른 모든 원소의 변화 $x_j \mp a_j$ ($0 < a_j < \varepsilon$, $\forall j \neq i$)가 발생하고 이 달라진 벡터 값 $y = x \pm a_i e_i \mp \sum_{j \neq i} a_j e_j$ 이 X 에 속한다면 부분집합 X 는 연대 특성을 갖는다. (여기에서 e 는 단위벡터를 나타낸다.)

다시 말해, 한 원소의 작은 증감(增感)이 다른 모든 원소의 감증(感增)을 가져올 때 이 원소들의 집합은 연대 특성을 가진다고 말할 수 있다. 쉬운 예로, 무선 네트워크에서 가능한 전송률의 집합은 연대 특성을 갖는데, <그림 2>와 같이 두 개의 무선 링크가 존재할 때 링크 12와 링크 34의 전송률은 각각 다음 식과 같이 주어지며 <그림 2>의 그래프와 같은 관계를 가진다.

$$R_{12} = \log_2 \left(1 + \frac{P_1 g_{12}}{P_3 g_{32} + N} \right) \quad (3)$$

$$R_{34} = \log_2 \left(1 + \frac{P_3 g_{34}}{P_1 g_{14} + N} \right) \quad (4)$$

따라서 한 링크의 전송률 증감은 다른 링크의 전송률 감증을 야기하므로 무선 링크의 전송률 집합은 연대 특성을 가짐을 알 수 있다.



<그림 2> 연대 특성을 갖는 무선 네트워크의 전송률 (Fig. 2) Wireless network whose set of rates has the solidarity property

연대 특성을 갖는 집합은 다음과 같은 정리 (proposition)를 만족한다.

- 정리 1: 집합 X 가 연대 특성을 갖는다면, 최대-최소 공평 할당(max-min fair allocation)을 하는 벡터 $x \in X$ 의 모든 원소는 서로 같다. 즉, 벡터 x 의 원소들의 최소값이 최대가 되는 벡터 x 는 모든 i, j 에 대해서 $x_i = x_j$ 이다.
- 증명: 연대 특성을 갖는 집합 X 에서 벡터 x 를 최대-최소 공평 할당 벡터라고 할 때, $\varepsilon > 0$ 에 대하여 $x_i = x_j + \varepsilon$ 인 i 와 j 가 존재한다고 가정하자. 그러면 연대 특성의 정의에 따라 $y = x - a_i e_i + \sum_{j \neq i} a_j e_j$ ($0 < a_i < \varepsilon$, $0 < a_j < \varepsilon$, $\forall j \neq i$)을 만족하는 벡터 y 가 존재한다. 이는 또한 $x_i > y_i > x_i - \varepsilon = x_j$ 와 $x_j < y_j < x_j + \varepsilon$ ($\forall j \neq i$)를 만족하므로, 벡터 y 의 모든 원소는 x_j 보다 크게 된다. 즉, $\max\{\min(y)\} > \max\{\min(x)\} = x_j$ 이므로 가정은 모순이 된다. 따라서 x 가 최대-최소 공평 할당 벡터라면 $x_i = x_j + \varepsilon$ 인 i 와 j 가 존재할 수 없고, 임의의 i 와 j 에 대하여 $x_i = x_j$ 를 만족해야 한다.

2. 제안 알고리즘

<그림 1>과 같은 무선 멀티홉 네트워크를 구성하는 각 링크의 전송률은 연대 특성을 가지므로 정리 1을 만족한다. 따라서 링크 전송률들의 최소값이 최대가 되는 경우는 모든 링크의 전송률이 동일한 경우가 된다. 아울러 멀티홉 종단간 전송률은 구성하는 링크 전송률들의 최소값으로 정의되므로, 결국 모든 링크의 전송률이 동일한 경우 종단간 전송률이 최대가 됨을 알 수 있다. 따라서 제안하는 송신전력제어 알고리즘은 모든 멀티홉 구성 링크들의 전송률이 서로 같아지도록 (즉, $R_1 = R_2 = \dots = R_n$) 각 송신노드의 송신전력 값을 조절함으로써 멀티홉 종단간 전송률을 최대화 한다.

앞에서 보았듯이 링크 i 의 전송률 R_i 는 자신의 송신전력 P_i 뿐만 아니라 다른 모든 노드의 송신전력 P_j ($\forall j \neq i$)와도 관계되므로 한 노드의 송신전력의 변화는 다른 노드의 전송률에 영향을 미친다. 이러한 무선 링크간에 발생하는 상호 영향은 모든 링크의 전송률이 동일하게 되는 최종 전송률 값을 한 번에 닫힌 형식(closed form)으로 구할 수 없게 만든

다. 따라서 제안 알고리즘은 최종 전송률 값을 얻기 위해 반복적인(Iterative) 방식을 사용한다[14]. 매 단계마다 각 링크는 주변 링크의 전송률 값을 인지하고 인지한 전송률 값들의 평균값으로 다음번 목표(target) 전송률을 설정한 후 이를 달성하기 위한 송신전력 값을 계산하여 사용한다. 이러한 반복적인 인접 링크 간 전송률 평준화 전략은 최종적으로 서로 연결되어 있는 모든 링크들의 전송률을 동일하게 만들어 주므로 멀티홉 중단간 전송률을 최대화시킨다. 또한 제안 방안은 멀티홉을 구성하는 모든 링크의 전송률 값을 이용하는 대신에 인지 가능한 주변 링크들의 전송률 값만을 이용하므로 동작에 필요한 정보 교환 오버헤드를 현저히 줄일 수 있다. 즉, 제안 방안은 주변 노드의 정보만을 가지고 스스로 자신의 송신전력을 결정하는 분산방식을 따른다.

<그림 3>은 제안하는 분산 송신전력제어 알고리즘의 동작을 보여준다. 단위 시간에 따라 동작하며 단계별로 다음 동작을 따른다.

- 1) 각 송신노드 i 는 초기($t=0$) 송신전력 값으로 최대 송신전력 값 P_{max} 를 설정한다.
- 2) 송신노드 i 는 결정된 송신전력 값을 할당하여 해당 수신노드에게 패킷을 전송한다.
- 3) 시간 t 에서 수신노드는 송신노드 i 로부터 데이터를 수신하면서 $SINR_i(t)$ 를 측정하고 이 정보를 해당 송신노드에게 피드백 한다.
- 4) 송신노드 i 는 피드백 받은 $SINR_i(t)$ 를 가지고 $R_i = \log_2(1 + SINR_i)$ 를 이용하여 현재 자신의 전송률 값 $R_i(t)$ 를 계산한다.
- 5) 각 송신노드 i 는 인접 노드와 $R_i(t)$ 또는 $SINR_i(t)$ 정보를 서로 공유한다.
- 6) 인접 송신노드의 전송률 $R(t)$ 정보를 알게 되면 다음 시간 $t+1$ 을 위한 전송률 $R_i(t+1)$ 을 계산한다. 새로운 전송률은 알게 된 송신노드들의 전송률의 평균으로 다음과 같이 계산된다.

$$R_i(t+1) = \text{mean}\{R_j(t)\} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_j(t) \quad (5)$$

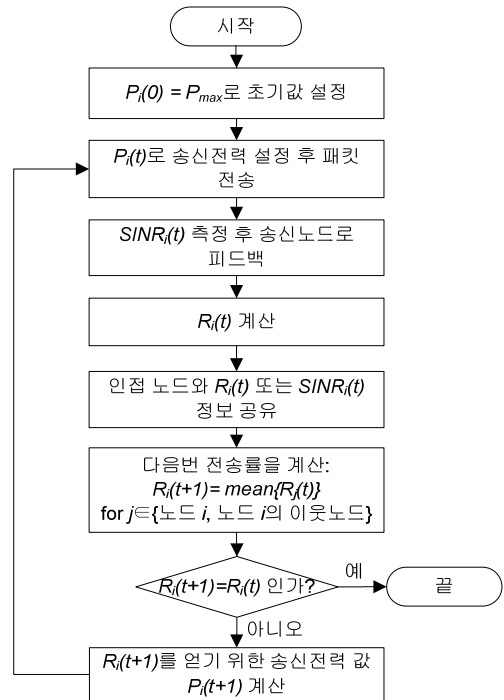
여기에서 j 는 자신을 포함한 주변 송신노드들

을 나타내며 N 은 평균값을 취하는 송신노드들의 전체 개수이다.

- 7) 갱신된 $R_i(t+1)$ 값이 이전 $R_i(t)$ 값과 같지 않으면 갱신된 $R_i(t+1)$ 값을 얻기 위해 식 (2)로부터 다음과 같이 $P_i(t+1)$ 값을 역으로 계산하고 단계 2로 넘어간다.

$$P_i(t+1) = \frac{(2^{R_i(t+1)} - 1)(I_i(t) + N_i(t))}{g_{i(i+1)}} \quad (6)$$

만약 $R_i(t+1)$ 값이 이전 $R_i(t)$ 값과 같다면 동작을 종료하고 $P_i(t)$ 값을 최종 송신전력 값으로 결정한다.



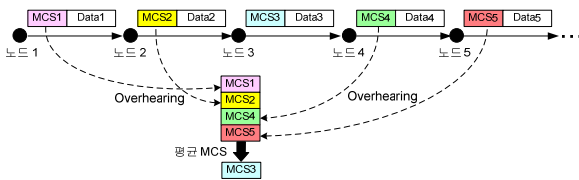
<그림 3> 제안하는 분산 송신전력제어 알고리즘
(Fig. 3) Proposed distributed transmit power control algorithm

3. 노드간 정보 공유 방법

제안 방안은 송신노드 간에 전송률 또는 SINR 정보를 공유해야 한다. 하지만 실제 시스템에서 이들 정보의 실수 값을 공유하기 위해서는 많은 정보량이 필요하므로 우리는 무선통신 시스템에서 전송

를과 매핑되어 전송되는 MCS (Modulation & Coding Set) 정보의 사용을 고려한다. MCS는 전송하는 데이터의 변조 및 코딩 방식을 알려주는 값으로 해당 데이터의 전송률에 매핑 가능하다. MCS 정보는 패킷 헤더에 포함되어 전송되는데, 모든 패킷 헤더는 제어정보로써 약속된 규약으로 방송되므로 인접 노드에서 다른 노드가 전송하는 패킷의 MCS 값을 엿들(overhearing) 수 있다.

<그림 4>는 멀티홉 전송 환경에서 실제적인 전송률 정보 교환 방법을 보여준다. 노드 3이 2홉 거리 내에서 송신노드의 제어정보를 엿들 수 있다고 가정하면, 자신의 새로운 전송률 값을 결정하기 위하여 2홉 거리 내에 있는 인접 노드들이 송신하는 패킷의 MCS 정보를 읽을 수 있다. 이후 노드 3은 인접 노드의 MCS 값의 평균으로 자신의 MCS 값을 결정하고 이에 맞게 송신전력을 결정한다. 이와 같이 실제 시스템 환경에서는 평균 MCS 기반으로 송신전력을 제어함으로써 노드간 정보 교환 오버헤드를 줄이며, MCS 단위에서 알고리즘의 수렴이 이루어지므로 수렴 시간을 현저히 줄일 수 있다.



<그림 4> 멀티홉 전송 환경에서 전송률 정보 교환 방법
<Fig. 4> Rate information sharing method in the multihop transmission

IV. 시뮬레이션 결과

1. 시뮬레이션 환경 및 가정

시뮬레이션 환경으로 <그림 1>과 같은 선형 (linear) 멀티홉 토폴로지에서 소스노드에서 목적지 노드로 단방향의 하나의 전송 흐름(flow)을 고려한다. 본 논문에서는 소스노드에서 목적지노드로의 라우팅은 이미 완료되어 각 노드는 연결된 상태라고 가정한다. 소스노드와 목적지노드 사이의 거리

<표 1> 시뮬레이션 파라미터
<Table 1> Simulation Parameters

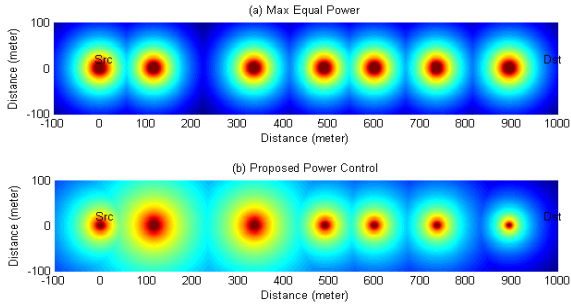
파라미터	값
채널 대역폭	10 MHz
최대 송신전력 값	23 dBm
소스노드-목적지노드 간 거리	1000 m
노드간 최소 거리	10 m
전송 홉 수	1~20
경로 손실(path loss)	$-128.1-37.6\log_{10}d$ [dB] d는 노드간 거리 (km)
Noise figure	9 dB

는 1000 미터로 고정이며, 이 두 노드 사이에 존재하는 중계노드의 수를 조절함으로써 멀티홉 전송 홉 수를 변화시킨다. 중계노드는 소스노드와 목적지노드를 잇는 직선 위 임의의 점에 위치하며, 전이중 중계기(full-duplex relay)를 가정하여 한 방향에서 수신을 하면서 동시에 반대 방향으로 송신이 가능하다 [15]. 이러한 전이중 중계기는 멀티홉 전송에서 중계에 의한 프로세싱 지연을 줄임으로써 중단간 전송률을 높일 수 있지만 노드간 간섭을 심화시킨다. 아울러 무선 채널은 동작 알고리즘의 수렴 속도에 비해 천천히 변한다고 가정한다.

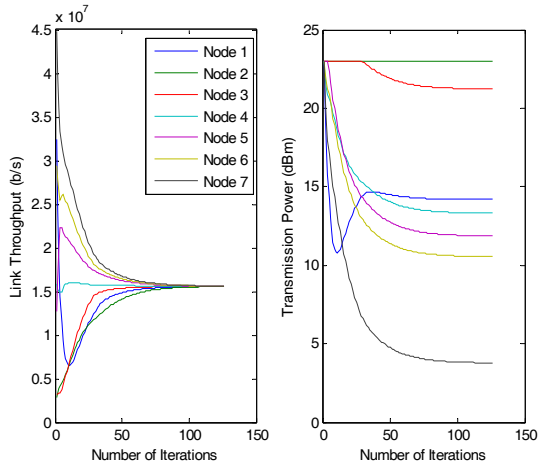
주어진 SINR 값을 만족하도록 송신전력을 제어하는 기존 방법은 현실적으로 주어진 멀티홉 전송 환경에서 최적의 SINR 값을 알 수 없으므로 적용이 불가능하다. 따라서, 성능 비교를 위한 기존 방안으로 주어진 최대 송신전력 값을 고정으로 사용하는 방법을 고려한다. <표 1>은 사용한 시뮬레이션 파라미터를 보여준다.

2. 성능 결과

<그림 5>는 참여 노드 수가 8개(7 홉 전송)인 임의의 멀티홉 토폴로지에서 기존의 고정된 최대 송신전력을 사용하는 방식(max equal power)과 제안 방식의 RSS(Received Signal Strength)를 2차원 평면에서 그린 것이다. 기존 방식은 모두 동일한 송신전력 값을 사용하므로 송신노드를 중심으로 거리에 따라 일정한 RSS 레벨을 보여준다. 하지만 제안 방



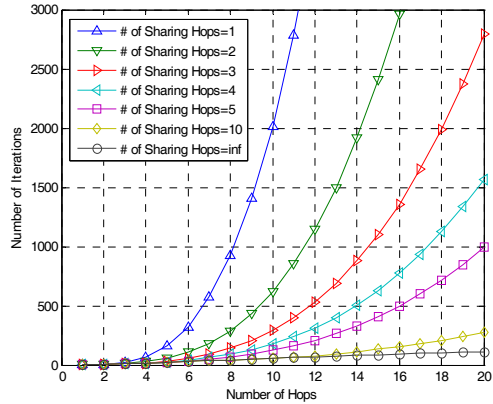
〈그림 5〉 RSS 측정 결과 - (a) 기존 방안(max equal power)와 (b) 제안 송신전력제어
 〈Fig. 5〉 Measurement of RSS - (a) max equal power and (b) proposed power control



〈그림 6〉 알고리즘 반복 횟수에 따른 링크별 전송률 및 송신전력 값
 〈Fig. 6〉 Link throughput and transmission power vs. number of iterations

식은 각 노드가 서로 다른 송신전력 값을 사용하게 되므로 RSS 레벨이 각 노드를 중심으로 거리에 따라서 달라짐을 확인할 수 있다.

〈그림 6〉은 알고리즘의 반복 횟수에 따라 각 링크 전송률과 각 노드의 송신전력 값의 변화를 보여준다. 이때 노드간 전송률 정보 공유 범위는 2홉을 가정하였다. 반복 횟수에 따라 각 링크 전송률은 하나의 값으로 수렴하며, 처음에 같은 값으로 시작했던 송신전력 값은 시간이 지남에 따라 각자 다른 값으로 수렴한다. 수렴 시에는 초기 가장 좋은 전송률을 가진 노드의 송신전력이 가장 낮아지며, 초기

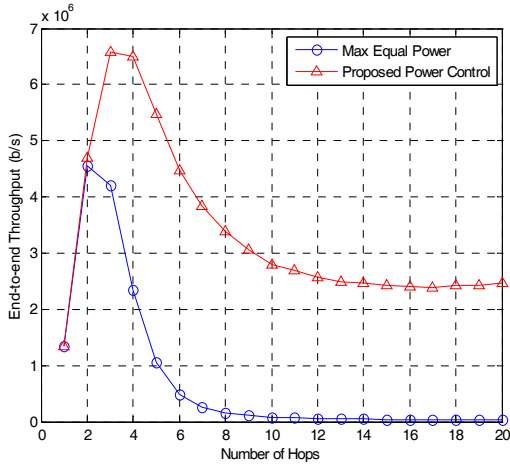


〈그림 7〉 전송 홉 수 및 정보공유 홉 수에 따른 수렴속도
 〈Fig. 7〉 Number of iterations vs. number of hops and number of information sharing hops

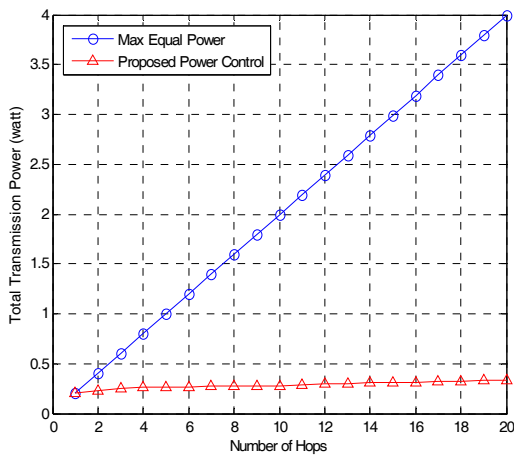
가장 낮은 전송률을 가진 노드의 송신전력은 초기 설정된 최대 송신전력 값을 유지한다. 다시 말하면, 채널이 좋은 링크들은 송신전력을 줄여 자신의 전송률을 희생함으로써 다른 링크들로의 간섭을 줄이고, 채널이 나쁜 링크들은 송신전력을 유지하거나 약간만 줄임으로써 모든 링크의 전송률이 서로 같아지게 만든다. 두 그래프를 비교해보면 초기 링크 전송률과 최종 송신전력 값은 서로 반비례 관계가 있음을 알 수 있다.

〈그림 7〉은 전송 홉 수 및 정보공유 홉 수에 따라 수렴 속도를 보여준다. 홉 수가 증가할수록 수렴 속도가 급격히 증가하는데, 이는 알고리즘에서 고려해야 하는 송신노드 수가 증가하여 복잡도가 증가하기 때문이다. 각 노드는 정보공유 홉 수내에 있는 노드끼리만 전송률 정보를 공유하므로 정보공유 홉 수가 커질수록 알고리즘에서 사용하는 전송률 정보량이 많아지게 된다. 따라서 정보공유 홉 수가 증가할수록 수렴 속도가 빨라지게 된다.

〈그림 8〉은 홉 수의 증가에 따라 중단간 전송률을 보여준다. 송신전력제어를 하지 않는 기존 방식의 경우 낮은 성능을 보이는 반면, 제안 방안의 경우 홉 수에 따라 송신전력제어를 하므로 보다 나은 성능을 보인다. 홉 수가 증가함에 따라 중단간 전송률은 최대치로 올라가다가 급격히 떨어지면서 일정한 값으로 유지된다. 기존 방안의 경우 2홉 전송인



〈그림 8〉 전송 홉 수에 따른 중단간 전송률
(Fig. 8) End-to-end throughput vs. number of hops



〈그림 9〉 전송 홉 수에 따른 송신전력의 총 합
(Fig. 9) Total transmission power vs. number of hops

경우 가장 좋은 성능을 보이고, 제안 방안의 경우 3 홉 전송인 경우에 가장 좋은 성능을 보인다. 초기에는 홉 수가 증가할수록 신호세기가 커져 성능이 증가하는 반면, 홉 수가 어느 이상으로 증가하면 트래픽 증가로 인해 간섭량이 증가하므로 성능이 감소한다. 이 결과는 소스노드와 목적지노드를 연결하는데 최적의 전송 홉 수가 있으며, 간섭량에 따라 적절한 송신전력 제어가 필요함을 알려준다.

〈그림 9〉는 전송 홉 수에 따라 전체 노드의 송신

전력의 총 합을 보여준다. 기존 방안은 고정된 최대 송신전력 값을 사용하므로 홉 수의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 반면, 제안 방안의 경우 홉 수 증가에 의한 간섭 증가에 따라 송신전력을 낮춰서 사용하므로 매우 낮은 전력소비를 보여준다.

3. 관찰결과(Observation)

제안하는 분산 송신전력제어 알고리즘의 성능 분석을 통해 다음과 같은 관찰결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 제안하는 분산 송신전력제어 알고리즘은 멀티홉을 구성하는 모든 링크의 전송률을 동일하게 만든다. 무선 멀티홉 링크의 전송률은 연대 특성을 가지므로 모든 링크 전송률이 같을 때 최소 전송률이 최대가 되며, 멀티홉 중단간 전송률은 최소 링크 전송률에 의해 결정되므로 제안 알고리즘은 멀티홉 중단간 전송률을 최대화(최적화) 시킨다.
- 2) 제안하는 분산 송신전력제어 알고리즘에서 중단간 전송률은 정보공유 홉 수에 상관없이 항상 같은 값으로 수렴한다. 또한 수렴 시에는 초기 전송률이 가장 낮았던 송신노드가 최대 송신전력 값을 사용하고, 초기 전송률이 가장 높았던 송신노드가 최소 송신전력 값을 사용한다.

V. 결 론

제안한 분산 송신전력제어 알고리즘은 무선 멀티홉 네트워크에서 발생하는 링크 전송률의 연대 특성과 멀티홉 중단간 전송률이 최소 링크 전송률에 의해 결정됨을 고려하여 모든 멀티홉 구성 링크들이 같은 전송률이 갖도록 송신전력을 제어한다. 제안 방안이 멀티홉 중단간 전송률을 최적화 시키는 전략임을 증명하였고 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 시뮬레이션 결과 제안 방안은 주변 이웃노드와의 정보 교환량에 상관없이 수렴된 최적 전송률을 달성하였고, 기존 전력제어를 하지 않았을 때 대비 중단간 전송률 및 전력절감 측면에서 큰 성능이득을 제공하였다. 제안 알고리즘은 무선 멀티홉

네트워크와 같이 구성 링크가 서로 영향을 주고받으면서 공동의 목표를 달성하기 위해 협력 전송하는 환경에서 효과적으로 적용 가능하다. 또한 제안 방안은 이웃노드와의 한정된 정보교환과 간단한 알고리즘을 통해서도 안정된 높은 성능 이득을 제공하므로 실제 무선 통신 및 ITS 시스템에서 실용화 가능하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] "OUTLOOK: Visions and research directions for the Wireless World," *WWRF(World Wide Radio Forum)*, no. 4, July 2009.
- [2] G. Parissidis, M. Karaliopoulos, T. Spyropoulos, and B. Plattner, "Interference-Aware Routing in Wireless Multihop Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, no. 5, pp.716~733, May 2011.
- [3] E.-S. Jung and N. H. Vaidya, "Power Control in Multi-Hop Wireless Networks," *Technical Report*, Mar. 2002.
- [4] P. Karn, "MACA - a new channel access method for packet radio," *Proc. 9th ARRL Computer Networking Conference*, Sep. 1990.
- [5] M. B. Pursley, H. B. Russell, and J. S. Wycarski, "Energy-efficient transmission and routing protocols for wireless multiple-hop networks and spread-spectrum radios," *EUROCOMM 2000*, pp.1~5. May 2000.
- [6] S. Agarwal, S. Krishnamurthy, R. H. Katz, and S. K. Dao, "Distributed power control in ad-hoc wireless networks," *PIMRC'01*, Oct. 2001.
- [7] J.-P. Ebert, B. Stremmel, E. Wiederhold, and A. Wolisz, "An energy-efficient power control approach for WLANs," *Journal of Communications and Networks (JCN)*, vol. 2, no. 3, pp.197~206, Sep. 2000.
- [8] J.-P. Ebert and A. Wolisz, "Combined tuning of RF power and medium access control for WLANs," *IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications*, Nov. 1999.
- [9] P. Lettieri and M. B. Srivastava, "Adaptive frame length control for improving wireless link throughput, range, and energy efficiency," *INFOCOM'98*, vol. 2, pp.564~571, Mar. 1998.
- [10] N. Poojary, S. V. Krishnamurthy, and S. Dao, "Medium access control in a network of ad hoc mobile nodes with heterogeneous power capabilities," *IEEE International Conference on Communications*, vol. 3, pp.872~877, June 2001.
- [11] S. Narayanaswamy, V. Kawadia, R. S. Sreenivas, and P. R. Kumar, "Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol," *European Wireless 2002*, Feb. 2002.
- [12] A. Behzad and I. Rubin, "High Transmission Power Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 5, no. 1, pp.156~165, Jan. 2006.
- [13] B. Radunovic and J.-Y. Le Boudec, "Rate Performance Objectives of Multihop Wireless Networks," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 3, no. 4, pp.334~349, Oct. 2004.
- [14] G. J. Foschini and Z. Miljanic. "A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 42, no. 4, pp.641~646, Nov. 1993.
- [15] D. Choi and D. Park, "Effective self interference cancellation in full duplex relay systems," *IET Electronics Letters*, vol. 48, no. 2, pp.129~130, Jan. 2012.

저자소개



최 현 호 (Choi, Hyun-Ho)

2011년 3월 ~ 현재 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 전임강사
2007년 3월 ~ 2011년 2월 : 삼성종합기술원 전문연구원
2007년 2월 : KAIST 이동통신네트워크 전공 박사 졸업
2003년 2월 : KAIST 이동통신네트워크 전공 석사 졸업
2001년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 학사 졸업