

전송 용량 제한조건을 가진 무선 중계 네트워크의 수명을 최대화하는 효율적인 전송 전력 할당 기법

정회원 박 대준*, 종신회원 김 형 명**

An Efficient Power Allocation Scheme to Maximize Network Lifetime in Wireless Relay Networks with Energy Constraint

Daejun Park* *Regular Member*, Hyung-Myung Kim** *Lifelong Member*

요 약

에너지 자원이 제한된 네트워크에서는 채널 상태 정보와 남은 에너지 정보를 기반으로 에너지자원을 각 유저들에게 최적으로 할당함으로써 네트워크의 수명을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 전송 용량을 만족시키면서 네트워크의 수명을 최대화하도록 전송에 참여하는 중계기를 선택하고 전송 전력을 할당하는 기법을 제안한다. 모의 실험을 통해 제안된 기법이 기존 기법에 비해서 수명을 증가시키는 것을 보인다.

Key Words : Wireless Relay Network, Transmission Power Allocation, Network Lifetime

ABSTRACT

In energy resource constrained networks, the network lifetime can be enhanced by optimally allocating energy resource among users based on the available channel state information and the residual energy information at each node. In this paper, we propose the relay selection scheme and power allocation scheme to maximize the network lifetime in wireless relay networks with capacity constraint. The computer simulation results show that the proposed scheme increase the network lifetime in comparison to the conventional schemes.

1. 서 론

이동 통신 시스템에서 통신의 전송용량을 증대시키고 통신의 신뢰성을 향상시키기 위한 여러 가지 방법들이 연구되고 있다. 여러 방법들 중에 다중 입출력(Multiple input multiple output, MIMO) 기법과 함께 중계기(Relay)를 이용한 협력 통신(Cooperative communication)은 각 노드에 다중 안테나가 없어도 공간 다이버시티 이득(Spatial diversity gain)을 얻을 수 있기 때문에 많은 각광을 받고 있다^[1,2]. 중계기를 이용해 협력통신을 하면 메시지를 전송할 수 있는 거리(Coverage)가 늘어나

게 되고, BER(Bit error rate), 전송 용량(Capacity) 등 시스템의 성능 또한 향상된다. 이러한 특징은 차세대 무선 이동 통신의 목적에 적절히 부합된다. 무선 중계 네트워크는 메시지를 중계하는 다수의 사용자(중계자)가 존재하고, 이 중계자들이 목적지까지 독립적인 다중의 전송 경로를 형성하여 메시지를 목적지까지 전송하는데 실패할 확률을 획기적으로 줄여준다.

무선 통신 시스템의 발전은 종종 단말기의 제한된 배터리 수명과 다수의 사용자들에 의해 공유되는 대역폭의 부족으로 제한 받는다. 그래서 최근에 많은 연구들은 자원 제한 조건을 갖고 시스템의 성능을 최대화시키는데

* 삼성전자 무선사업부 Global GSM 개발팀 (daejeun.park@samsung.com)

** 한국과학기술원 전기 및 전기공학과 통신신호처리 연구실 (hmkim@ee.kaist.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-01-024, 접수일자 : 2009년 1월 20일, 최종논문접수일자 : 2010년 6월 30일

초점을 맞추고 있다^[3]. 이동 통신 단말기를 가진 사용자들을 중계기로 이용하는 무선 중계 네트워크에서는 중계자의 배터리 에너지를 자신의 통신이 아닌 중계하는 데에도 사용하므로 추가적인 에너지 소모가 발생한다. 그러므로 시스템 전체의 배터리 에너지를 적절히 사용하여 네트워크의 수명(Lifetime)을 늘릴 수 있는 전송 기법이 필요하다.

이러한 추세에 따라 최근에는 네트워크 수명을 최대화하기 위한 전송 전력 할당 기법들이 많이 연구되고 있다. 대부분의 논문에서 주로 하나의 중계기를 선택하는 방법이 제안되었다. 가장 고전적인 방법은 전송 전력이 가장 작은 중계기를 선택하는 것이다(기법 1). [4]에서는 현재 메시지를 보낸 후에 가장 많은 에너지가 남아 있을 중계기를 선택한다(기법 2). [5]에서는 가장 적은 비율로 남아있는 에너지를 소비하는 중계기를 선택한다(기법 3). [6]에서는 현재 메시지를 보낸 후 최소의 outage 확률을 갖는 중계기를 선택한다(기법 4). [7]에 의하면 기법 3과 기법 4가 비슷하게 가장 긴 평균 수명을 보이고, 기법 1과 기법 2는 평균 수명이 더 짧다.

다중 중계기에 전송 전력을 할당하는 기법도 발표되었다^[8]. 여러 중계기에서 전송을 돕는다면 보다 더 적은 전송 전력으로 원하는 전송 용량을 만족시킬 수 있고, 수명도 더 늘릴 수 있다. [8]에서는 BER을 제한 조건으로 하고 수명을 최대화 시킨다.

네트워크의 수명은 남은 배터리 에너지 양과 채널 상태 정보에 영향을 받는다. 본 논문에서는 다수의 사용자들이 중계기로 참여하는 무선 중계 네트워크에서 전송 용량의 제한 조건이 있을 때 남은 에너지 양과 채널 상태 정보를 기반으로 네트워크의 수명을 최대화 할 수 있는 중계기 선택과 전송 전력 할당 기법을 제안한다.

서론에 이어 2장에서는 시스템 모형을 살펴보고, 3장에서는 무선 중계 네트워크의 수명을 최대화 하기 위한 중계기 선택 및 전송 전력 할당 방법을 제안한다. 4장에서는 모의 실험을 통해 제안된 방법의 성능을 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모형

이동통신 단말기를 가진 $N+1$ 명의 사용자와 하나의 기지국이 있는 네트워크 환경을 고려해보자. 이러한 시스템에서 한 명의 사용자는 목적지이고, 공급지로부터 전송된 메시지를 수신한다. 나머지 N 명의 사용자는 협력자이고, 공급지로부터 목적지까지 전송하는 메시지를 중계한다. 기지국은 메시지를 전송하는 공급지의 역할을 수행한다. 이러한 무선 중계 네트워크 시스템을 그림 1에

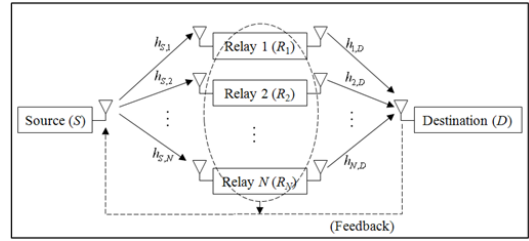


그림 1. 제안된 무선 중계 네트워크 시스템 모형

나타내었다. 2단(Dual hop) 중계 시스템을 가정하고, 공급지와 목적지 사이의 직접 경로는 없는 경우에 대해 고려한다.

공급지로부터 목적지까지의 협력 전송(Cooperative transmission)은 반이중 방식(Half-duplex mode)을 이용한다. 첫 번째 시구간에서는 공급지가 데이터 심벌 x 를 중계기에 전송한다. 이 때 k 번째 중계기에서 수신한 신호는 다음과 같다.

$$y_{S,k} = \sqrt{p_S} h_{S,k} x + n_{S,k} \quad (1)$$

여기서 $h_{S,k}$ 는 공급지로부터 k 번째 중계기까지의 채널 계수이고, 평균값이 0이고 분산이 $\sigma_{S,k}^2$ 인 circularly symmetric complex Gaussian이며, 모든 k 에 대해 독립이라 가정한다. 즉, $h_{S,k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{S,k}^2)$ 이다. 그리고 $n_{S,k}$ 는 k 번째 중계기 수신단에서 생기는 잡음과 간섭을 나타내고, 평균값이 0이고 분산이 $N_{S,k}$ 인 circularly symmetric complex Gaussian이다. 즉, $n_{S,k} \sim \mathcal{CN}(0, N_{S,k})$ 이다. 또한 p_S 는 공급지의 전송 전력이다.

두 번째 시구간에서는 N 개의 중계기들이 수신한 신호를 정규화하여 증폭 후 전송(amplify-and-forward, AF) 방식으로 TDMA, FDMA 또는 CDMA 등을 이용하여 N 개의 직교(orthogonal) 채널을 통해 재전송한다. 이 때 k 번째 중계기는 p_k 의 전송 전력으로 신호를 전송한다. 즉 k 번째 중계기에서 전송되는 신호는 다음과 같다.

$$x_k = \frac{y_{S,k}}{\sqrt{E\{|y_{S,k}|^2\}}} = \frac{\sqrt{p_S} h_{S,k} x + n_{S,k}}{\sqrt{p_S |h_{S,k}|^2 + N_{S,k}}} \quad (2)$$

k 번째 중계기에서 전송된 신호는 다음과 같이 목적지

에서 수신된다.

$$\begin{aligned}
 y_{k,D} &= \sqrt{p_k} h_{k,D} x_k + n_{k,D} \\
 &= \sqrt{\frac{p_k}{p_S |h_{S,k}|^2 + N_{S,k}}} h_{k,D} (\sqrt{p_S} h_{S,k} x + n_{S,k}) + n_{k,D} \quad (3) \\
 &= \sqrt{\frac{p_S p_k}{p_S |h_{S,k}|^2 + N_{S,k}}} h_{k,D} h_{S,k} x + \tilde{n}_{k,D}
 \end{aligned}$$

여기서 $h_{k,D} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{k,D}^2)$ 는 k 번째 중계기로부터 목적지까지의 채널 계수이고, $n_{k,D} \sim \mathcal{CN}(0, N_{k,D})$ 는 목적지 수신단에서 생기는 잡음과 간섭을 나타낸다. 또한 $\tilde{n}_{k,D}$ 는

$$\text{평균이 } 0 \text{ 이고 분산이 } \tilde{N}_{k,D} = N_{k,D} + \frac{p_k |h_{k,D}|^2 N_{S,k}}{p_S |h_{S,k}|^2 + N_{S,k}} \text{ 인}$$

circularly symmetric complex Gaussian을 나타낸다. 모든 채널 계수 $h_{i,j} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{i,j}^2)$ 는 Rayleigh fading을 따르고, 채널 이득 $|h_{i,j}|^2$ 은 $\sigma_{i,j}^2$ 를 파라미터로 갖는 지수 분포를 따른다. 모든 채널 이득과 모든 중계기의 남은 배터리 에너지 양에 대한 정보는 공급지로 피드백된다. 이 정보는 공급지에서 중계기를 선택하고 전송 전력의 할당량을 계산하기 위해 필요한 것이다.

각 중계기에는 1부터 N 까지의 번호가 부여되어 있다. m 번째 메시지를 보낼 때 N 개의 중계기 번호의 집합을 다음과 같이 정의한다.

$$\mathcal{R}^{(N)}[m] = \{r_1[m], r_2[m], \dots, r_N[m]\} \quad (4)$$

여기서 $m \in \{1, 2, \dots\}$ 은 전송하는 메시지의 순서를 나타낸다.

다음으로 중계기를 기준으로 source-relay(S-R) link, relay-destination(R-D) link의 채널 이득 집합을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{H}^{(N)}[m] &= \left\{ |h_{S,r_1[m]}[m]|^2, \dots, |h_{S,r_N[m]}[m]|^2, \right. \\
 &\quad \left. |h_{r_1[m],D}[m]|^2, \dots, |h_{r_N[m],D}[m]|^2 \right\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

마찬가지로 중계기의 전송 전력 집합을 다음과 같이 정의한다.

$$\mathcal{P}^{(N)}[m] = \{p_{r_1[m]}[m], p_{r_2[m]}[m], \dots, p_{r_N[m]}[m]\} \quad (6)$$

또한 각 중계기에 남아있는 배터리 에너지 양의 집합을 다음과 같이 정의한다.

$$\mathcal{E}^{(N)}[m] = \{e_{r_1[m]}[m], e_{r_2[m]}[m], \dots, e_{r_N[m]}[m]\} \quad (7)$$

여기서 $e_{r_n[m]}[m] = e_{r_n[m]}[m_0] - \sum_{i=m_0}^{m-1} p_{r_n[m]}[i] \cdot \tau$ 이다. τ

는 메시지를 전송하는 걸리는 시간이다. 모든 에너지 손실은 신호를 전송하는 것에서 기인한다고 가정하면^[9], 전송 전력은 전송 구간 동안 소모되는 에너지 양과 같기 때문에 에너지에서 전송 전력의 합을 빼면 남아있는 에너지 양이 된다.

III. 중계기 선택 및 전송 전력 할당 알고리즘의 제안

3.1 문제의 정의

앞 절에서는 N 개의 중계기가 모두 참여하는 상황을 나타내었지만 효율적인 전송을 위해 채널 정보와 각 중계기에 남아있는 에너지 양에 따라 참여하는 중계기의 개수를 달리해야 한다. 앞으로는 N 개의 중계기 중에서 임의의 Q 개만 이용하는 상황을 고려한다.

우선 k 번째 중계기의 경로에서 m 번째 메시지 전송 시 식 (3)을 이용해 SNR을 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{SNR}_k[m] &= \frac{\frac{p_S p_k[m]}{p_S |h_{S,k}[m]|^2 + N_{S,k}}}{N_{k,D} + \frac{p_k[m] |h_{k,D}[m]|^2 N_{S,k}}{p_S |h_{S,k}[m]|^2 + N_{S,k}}} \\
 &= \frac{\frac{p_S p_k[m]}{N_{S,k} N_{k,D}}}{1 + \frac{p_S |h_{S,k}[m]|^2}{N_{S,k}} + \frac{p_k[m] |h_{k,D}[m]|^2}{N_{k,D}}} \quad (8)
 \end{aligned}$$

그러므로 m 번째 메시지 전송 시 전송 용량은 Q 개의 중계기가 선택되어 중계에 참여하는 상황을 고려하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & C_m(\mathcal{R}^{(Q)}[m], \mathcal{H}^{(Q)}[m], \mathcal{P}^{(Q)}[m], \mathcal{E}^{(Q)}[m]) \\
 &= \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \sum_{k \in \mathcal{K}^{(Q)}} |h_{s,k}[m] h_{k,d}[m]|^2 \text{SNR}_k[m] \right) \\
 &= \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \sum_{k \in \mathcal{K}^{(Q)}} \frac{\frac{p_s p_k [m] |h_{s,k}[m] h_{k,d}[m]|^2}{N_{s,k} N_{k,d}}}{1 + \frac{p_s |h_{s,k}[m]|^2}{N_{s,k}} + \frac{p_k [m] |h_{k,d}[m]|^2}{N_{k,d}}} \right) \quad (9)
 \end{aligned}$$

bits/channel use

여기서 모든 $k \in \mathcal{K}^{(Q)}$ 에 대하여 $0 < p_k[m] \cdot \tau \leq e_k[m]$ 을 만족하여야 한다. 즉, 전송 전력은 남은 에너지 양이 하로 할당되어야 한다. 또한 N 개의 중계기 중에서 임의의 Q 개만 참여하는 상황이므로, 해당되는 중계기만 전송 용량 식에 포함된다.

본 논문에서는 그림 2에서 나타내는 바와 같이 시스템의 전송 용량이 목표로서는 R 이상으로 유지되는 동안에 네트워크의 수명으로 정의한다. 즉, 현재 m_0 번째 메시지를 전송할 때 네트워크의 수명을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \mathcal{L}_{m_0}(\mathcal{R}^{(Q)}[m_0], \mathcal{H}^{(Q)}[m_0], \mathcal{P}^{(Q)}[m_0], \mathcal{E}^{(Q)}[m_0]) \\
 &= \max_m \{ m : C_m(\mathcal{R}^{(Q)}[m], \mathcal{H}^{(Q)}[m], \mathcal{P}^{(Q)}[m], \mathcal{E}^{(Q)}[m]) \geq R \} - m_0 + 1 \quad (10)
 \end{aligned}$$

네트워크의 수명을 최대화 시키도록 중계기의 집합을 선택하고 전송 전력을 할당하기 위해서는 미래의 정보를 알아야 한다. 불확실한 미래의 채널 정보에 의해 각 중계기에 할당되는 전송 전력이 정해지고, 이렇게 불확실하게 정해진 전송 전력만큼 배터리 에너지가 소모되기 때문에 현재 가진 정보로는 최적화 문제를 풀 수가 없다. 그러므로 현재 주어진 정보로 수명을 최대화 시키는 최적화 문제를 풀기 위해 가정이 필요하다. 우선 오랜 시간 동안

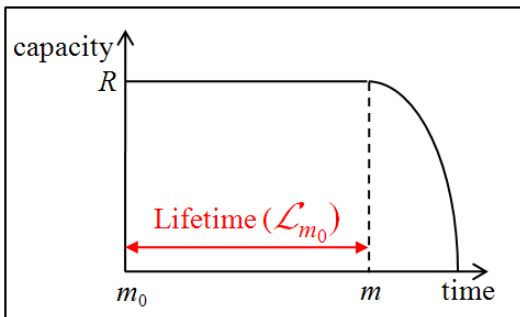


그림 2. 무선 중계 네트워크의 수명

안(수명이 유지되는 동안) 현재 상태의 모든 채널의 이득이 유지된다고 가정한다. 즉, $\mathcal{H}^{(N)}[m] = \mathcal{H}^{(N)}[m_0]$ 이라고 가정한다. 그리고 이렇게 채널이 유지되면 할당되는 전력 또한 고정된다고 가정한다. 즉, 수명이 유지되는 동안 $\mathcal{P}^{(Q)}[m] = \mathcal{P}^{(Q)}[m_0]$ 이라고 가정한다. 그러면 식 (10)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \mathcal{L}_{m_0}(\mathcal{R}^{(Q)}[m_0], \mathcal{H}^{(Q)}[m_0], \mathcal{P}^{(Q)}[m_0], \mathcal{E}^{(Q)}[m_0]) \\
 &= \max_m \{ m : C_m(\mathcal{R}^{(Q)}[m_0], \mathcal{H}^{(Q)}[m_0], \mathcal{P}^{(Q)}[m_0], \mathcal{E}^{(Q)}[m_0]) \geq R \} - m_0 + 1 \quad (11)
 \end{aligned}$$

전송 용량은 R 이상을 유지하면서 식 (11)을 최대화 시키도록 중계기 집합 $\mathcal{K}^{(Q)}$ 를 선택하고 전송 전력 $\mathcal{P}^{(Q)}$ 를 구하는 최적화 문제를 풀어야 한다. 최적화 문제는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \max_{\mathcal{K}^{(Q)}, \mathcal{P}^{(Q)}} \mathcal{L}_{m_0}(\mathcal{R}^{(Q)}[m_0], \mathcal{H}^{(Q)}[m_0], \mathcal{P}^{(Q)}[m_0], \mathcal{E}^{(Q)}[m_0]) \\
 & \text{subject to } C_{m_0}(\mathcal{R}^{(Q)}[m_0], \mathcal{H}^{(Q)}[m_0], \mathcal{P}^{(Q)}[m_0], \mathcal{E}^{(Q)}[m_0]) \geq R \\
 & \quad 0 < p_k[m_0] \cdot \tau \leq e_k[m_0] \quad \forall k \in \mathcal{K}^{(Q)} \quad (12)
 \end{aligned}$$

앞으로 2~3절에서 단일 중계기를 선택할 때와 다중 중계기를 선택할 때로 나누어 최적화 문제 식 (12)을 풀 어보도록 한다.

3.2 단일 중계기 선택 및 전송 전력 할당 알고리즘

우선 특수한 경우로 단일 중계기를 선택하여 전송 전력을 할당하는 알고리즘에 대해 살펴보자. 하나의 중계기만 메시지를 전송하는데 참여하므로 이 경우에 $Q=1$ 이고 m_0 번째 메시지를 전송할 때 전송 용량은 식 (9)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & C_{m_0}(\mathcal{R}^{(1)}[m_0], \mathcal{H}^{(1)}[m_0], \mathcal{P}^{(1)}[m_0], \mathcal{E}^{(1)}[m_0]) \\
 &= \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\frac{p_s p_k [m_0] |h_{s,k}[m_0] h_{k,d}[m_0]|^2}{N_{s,k} N_{k,d}}}{1 + \frac{p_s |h_{s,k}[m_0]|^2}{N_{s,k}} + \frac{p_k [m_0] |h_{k,d}[m_0]|^2}{N_{k,d}}} \right) \quad (13)
 \end{aligned}$$

bits/channel use

여기서 $p_k[m_0]$ 는 전송 용량 $C_{m_0} = R$ 을 만족하도록 할당된다. 즉,

$$p_k[m_0] = \frac{1 + \frac{p_s |h_{s,k}[m_0]|^2}{N_{s,k}}}{\frac{|h_{k,D}[m_0]|^2}{N_{k,D}} \left\{ \frac{p_s |h_{s,k}[m_0]|^2}{N_{s,k} (2^{2R} - 1)} - 1 \right\}} \quad (14)$$

이다. 여기서 단일 중계기 선택 시 수명은 $e_k[m] < p_k[m_0] \cdot \tau$ 이 되기 바로 전 순간까지이다. 다시 말해, 현재 전송 전력만큼씩 계속해서 할당할 때 중계기에 남아있는 배터리 에너지양이 전송 전력 이상으로 유지되는 순간이 바로 수명이 된다. 왜냐하면 전송 전력을 전송 용량 $C_m = R$ 을 만족하도록 할당했으므로 $p_k[m] < p_k[m_0]$ 이면 $C_m < R$ 이 되기 때문이다. 수명을 정리해 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{m_0} &= \max_m \{ m : e_k[m] \geq p_k[m_0] \cdot \tau \} - m_0 + 1 \\ &= \max_m \{ m : e_k[m_0] - (m - m_0) p_k[m_0] \cdot \tau \geq p_k[m_0] \cdot \tau \} - m_0 + 1 \\ &= \max_m \left\{ m : m \leq m_0 + \frac{e_k[m_0]}{p_k[m_0] \cdot \tau} - 1 \right\} - m_0 + 1 \\ &= \left\lfloor \frac{e_k[m_0]}{p_k[m_0] \cdot \tau} \right\rfloor \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에서 τ 는 일정한 상수값이므로 현재 주어진 정보를 바탕으로 $\frac{e_k[m_0]}{p_k[m_0]}$ 를 최대화 시키는 중계기를 선택하는 것이 수명을 최대로 하는 선택이 된다. 그러므로 $\frac{e_k[m_0]}{p_k[m_0]}$ 의 정보를 갖는 새로운 변수를 다음과 같이 선언한다. (앞으로 표현의 편의 상 메시지의 인덱스를 나타내는 m_0 를 생략하도록 한다.)

$$z_k \triangleq \frac{e_k}{p_k} = \frac{\frac{e_k |h_{k,D}|^2}{N_{k,D}} \left\{ \frac{p_s |h_{s,k}|^2}{N_{s,k} (2^{2R} - 1)} - 1 \right\}}{1 + \frac{p_s |h_{s,k}|^2}{N_{s,k}}} \quad (16)$$

그리고 식 (14)에서 구한 p_k 으로 다음을 만족하는 집합을 정한다.

$$\mathcal{U} = \{ k : 0 < p_k \leq e_k \} \quad (17)$$

\mathcal{U} 중에서 식 (15)를 최대화 시키는 중계기를 다음과 같이 선택한다.

$$k^* = \arg \max_{k \in \mathcal{U}} z_k = \arg \max_{k \in \mathcal{U}} \frac{e_k}{p_k} \quad (18)$$

이렇게 단일 중계기를 선택하는 알고리즘은 [5]에서 energy efficiency index로 먼저 제안되었고, [6]에서 제한한 outage 확률을 최소화 시키는 것과 비슷한 성능을 보인다.

위의 알고리즘을 바탕으로 정해진 중계기와 전송 전력을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathcal{R}^{(1)} &= \{ r_1 = k^* \}, \quad \mathcal{P}^{(1)} = \{ p_{r_1} = p_{k^*} \} \\ \mathcal{H}^{(1)} &= \left\{ |h_{s,r_1}|^2 = |h_{s,k^*}|^2 \right\}, \quad \mathcal{E}^{(1)} = \{ e_{r_1} = e_{k^*} \} \end{aligned} \quad (19)$$

3.3 다중 중계기 선택 및 전송 전력 할당 알고리즘

다중 중계기를 선택하여 이용하면 앞 절에서 살펴본 단일 중계기를 선택할 때보다 여러 중계기가 전송을 돕기 때문에 보다 적은 전송 전력으로 전송 용량 R 을 만족시킬 수 있다. 이 논문에서는 다중 중계기를 선택하는 것과 전송 전력을 할당하는 것을 따로 고려하는 준최적의 방법을 제안한다. 전체적인 알고리즘은 표 1과 같다.

표 1에서 최적의 Q 개의 중계기를 선택하는 Step 1-1에 대해 살펴보자. 우선 N 개의 중계기에 대한 인덱스를 나타내는 $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ 을 정의하고, $\mathcal{R}^{*(0)} = \emptyset$ 으로 놓는다. 그리고 단일 중계기에 대해 최적의 중계기를 선택하는 기준이었던 식 (18)을 적용한다. (18)에서 p_k 는 (14)의 식으로부터 얻는다.

즉, 단일 중계기를 사용할 때 현재의 전송 전력으로 가장 오래 사용할 수 있는 Q 개의 중계기를 선택하는 것이다. $q = 1, 2, \dots, Q$ 에 대하여

$$\begin{aligned} r_q^{*(0)} &= \arg \max_{k \in \mathcal{N}} z_k = \arg \max_{k \in \mathcal{N}} \frac{e_k}{p_k} \\ \mathcal{R}^{*(0)} &\leftarrow \mathcal{R}^{*(0)} \cup \{ r_q^{*(0)} \} \\ \mathcal{N} &\leftarrow \mathcal{N} - \{ r_q^{*(0)} \}, \quad q \leftarrow q + 1 \end{aligned} \quad (20)$$

위의 식을 반복하면

표 1. 다중 중계기 선택 및 전송 전력 할당 알고리즘

Step 1. $Q = 1, 2, \dots, N$ 에 대하여

Step 1-1. 최적의 Q 개의 중계기를 선택한다.

$$R^{*(Q)} = \{r_1^{*(Q)}, r_2^{*(Q)}, L, r_Q^{*(Q)}\}$$

Step 1-2. Capacity를 만족시키면서 전송 파워의 합을 최소화 시키는 전송 파워 집합을 구한다.

$$P^{*(Q)} = \arg \min_{p^{(Q)}} \sum_{k \in R^{*(Q)}} p_k^{(Q)}$$

subject to $C_{m_0}(R^{*(Q)}, H^{(Q)}, P^{(Q)}, E^{(Q)}) \geq R,$

$$0 \leq p_k^{(Q)} \leq e_k^{(Q)}, \forall k \in R^{*(Q)}$$

$$\Rightarrow P^{*(Q)} = \left\{ p_{r_1}^{*(Q)}, p_{r_2}^{*(Q)}, L, p_{r_Q}^{*(Q)} \right\}$$

$$\therefore L_{m_0}(R^{*(Q)}, H^{(Q)}, P^{*(Q)}, E^{(Q)})$$

$$= \min_{1 \leq q \leq Q} \left[\frac{e_{r_q^{*(Q)}}}{p_{r_q^{*(Q)}}^{*(Q)} \times \tau} \right] = \min_{k \in R^{*(Q)}} \left[\frac{e_k}{p_k^{*(Q)} \times \tau} \right]$$

Step 2. 수명을 최대화 시키는 최적의 중계기 개수를 구한다.

$$Q^* = \arg \max_{1 \leq Q \leq N} L_{m_0}(R^{*(Q)}, H^{(Q)}, P^{*(Q)}, E^{(Q)})$$

$$\mathcal{R}^{*(Q)} = \{r_1^{*(Q)}, r_2^{*(Q)}, \dots, r_Q^{*(Q)}\} \quad (21)$$

을 정할 수 있다. 즉, $z_k = \frac{e_k}{p_k}$ 을 내림차순으로 정렬하여

상위의 Q 개를 선택하는 것이다. 이러한 선택은 단일 중계기를 선택하는 알고리즘에서 최적임을 보였으므로 같은 관점으로 적용할 수 있다.

다음으로는 선택된 Q 개의 중계기에 최적의 전송 전력을 할당하는 *Step 1-2*에 대하여 살펴보자. 우선

$$a_k = \frac{|h_{S,k}|^2}{N_{S,k}}, b_k = \frac{N_{k,D}}{|h_{k,D}|^2} \left(1 + \frac{P_S |h_{S,k}|^2}{N_{S,k}} \right), c = \frac{1 - 2^{2R}}{P_S} \text{로}$$

놓자. 그러면 최적화 문제는 다음과 같이 재정의할 수 있다.

$$\min \sum_{k \in \mathcal{R}^{*(Q)}} p_k$$

subject to $\sum_{k \in \mathcal{R}^{*(Q)}} a_k \left(\frac{b_k}{p_k + b_k} - 1 \right) = c, 0 < p_k \leq e_k, \forall k \in \mathcal{R}^{*(Q)} \quad (22)$

Lagrange multiplier를 정의하여 식 (22)을 풀어보자.

$$L(\mathbf{p}, \lambda) = \sum_{k \in \mathcal{R}^{*(Q)}} p_k + \lambda \left\{ \sum_{k \in \mathcal{R}^{*(Q)}} a_k \left(\frac{b_k}{p_k + b_k} - 1 \right) - c \right\} \quad (23)$$

식 (23)을 p_k 에 대하여 편미분하여 0이 되는 p_k 를 찾는다.

$$\frac{\partial L}{\partial p_k} = 1 - \lambda \frac{a_k b_k}{(p_k + b_k)^2} + \lambda \sum_{k \in \mathcal{R}^{*(Q)}} \frac{1}{p_k + b_k} \frac{\partial a_k b_k}{\partial p_k} = 0 \quad (24)$$

식 (24)에서 세 번째 항은 0이 되므로

$$p_k = \sqrt{\lambda a_k b_k} - b_k \quad (25)$$

이다. 식 (25)를 식 (22)의 제한조건에 대입하여 λ 에 대하여 정리하면

$$\sqrt{\lambda} = \frac{\sum_{n \in \mathcal{R}^{*(Q)}} \sqrt{a_n b_n}}{\sum_{n \in \mathcal{R}^{*(Q)}} a_n + c} \quad (26)$$

이다. 그러므로 최종적으로 식 (26)를 식 (25)에 대입하면 $k \in \mathcal{R}^{*(Q)}$ 인 모든 k 에 대하여 다음과 같이 전송 전력을 구할 수 있다.

$$p_k^{*(Q)} = \sqrt{a_k b_k} \frac{\sum_{n \in \mathcal{R}^{*(Q)}} \sqrt{a_n b_n}}{\sum_{n \in \mathcal{R}^{*(Q)}} a_n + c} - b_k \quad (27)$$

만약 $p_k^{*(Q)} \leq 0$ 이거나 $p_k^{*(Q)} > e_k$ 이면, $\mathcal{R}^{*(Q)} \leftarrow \mathcal{R}^{*(Q)} - \{k\}$ 로 집합에서 제외시키고, 식 (26)과 식 (25)을 다시 계산한다. 이 과정을 $k \in \mathcal{R}^{*(Q)}$ 인 모든 k 에 대하여 $0 < p_k^{*(Q)} \cdot \tau \leq e_k$ 를 만족할 때까지 반복하여

$$\mathcal{P}^{*(Q)} = \left\{ p_{r_1}^{*(Q)}, p_{r_2}^{*(Q)}, \dots, p_{r_Q}^{*(Q)} \right\} \quad (28)$$

을 구한다.

이렇게 정해진 $\mathcal{R}^{*(Q)}, \mathcal{P}^{*(Q)}$ 는 전송 용량 R 을 만족하도록 정해진 것이므로, 어느 한 중계기라도 남은 배터리 에너지가 전송 전력 이하로 떨어진다면 전송 용량도 R 이하로 떨어질 것이다. 그러므로 수명을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathcal{L}_{m_0}(\mathcal{R}^{*(Q)}, \mathcal{H}^{(Q)}, \mathcal{P}^{*(Q)}, \mathcal{E}^{(Q)})$$

$$= \min_{1 \leq q \leq Q} \left[\frac{e_{r_q^{*(Q)}}}{p_{r_q^{*(Q)}}^{*(Q)} \cdot \tau} \right] - 1 = \min_{k \in \mathcal{R}^{*(Q)}} \left[\frac{e_k}{p_k^{*(Q)} \cdot \tau} \right] - 1 \quad (29)$$

Step 1-1과 Step 1-2를 $Q=1, 2, \dots, N$ 에 대하여 반복한 후 Step 2에서 수명을 최대화시키는 Q 를 찾는다. 이 알고리즘을 이용하면 $Q=1$ 인 경우에는 2절의 단일 중계기 선택 기법과 같고, $Q=N$ 인 경우에는 전송 전력 합의 최소화(Power sum minimization) 기법과 같은 경우가 된다. 전송 전력 합의 최소화 기법은 모든 중계기를 대상으로 전송 전력을 할당하므로 남은 배터리 에너지 양은 고려하지 않고 순간의 채널 이득 정보만을 반영한다.

4장에서는 앞에서 제안한 알고리즘의 모의실험을 통해 결과를 분석해 본다.

IV. 모의 실험 및 결과 분석

4.1 모의 실험 환경

모의 실험에서 사용된 환경은 한 명의 사용자는 목적 지로서 메시지를 수신하고, N 명의 사용자는 중계기로서 메시지를 중계하는 무선 중계 네트워크이다. 채널은 Rayleigh fading을 따르며 circularly symmetric complex Gaussian, 즉 $h \sim CN(0, \sigma^2)$ 이다. 채널 이득은 파라미터를 σ^2 로 갖는 (채널의 분산 또는 채널 이득의 평균이 σ^2) 지수 분포를 따른다. 본 논문에서는 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio, SNR)는 채널 이득과 잡음 전력의 비율로 정의하며, 문제를 간단히 하기 위해 모든 채널 이득의 평균은 1, 잡음의 분산은 N_0 로 놓으면

$$SNR = \frac{E\{h^2\}}{N_0} = \frac{1}{N_0}$$

이다. 또한 한 메시지를 보내는 동안은 채널의 변화가 없다고 가정한다.

4.2 모의 실험 결과 및 성능 분석

모의 실험에서는 제안한 다중 중계기 선택 기법의 성능을 분석하기 위해 단일 중계기 선택(Single Relay Selection, SRS) 기법, 다중 중계기 선택(Multiple Relay Selection, MRS) 기법, 전송 전력 합의 최소화(Power Sum Minimization, PSM) 기법 등 총 3가지 기법을 비교, 분석하였다. 성능 분석을 위해 전송 용량, 네트워크의 사용자 수, SNR, 초기 배터리 에너지를 변수로 두고 네트워크의 수명, 참여하는 사용자 수를 결과로 보여준다. 모든 모의 실험은 Monte Carlo 방식으로 10^4 번 반복하여 결과를 나타내었다.

그림 3은 전송 용량에 제한조건에 따른 네트워크의 수명을 나타낸다. SNR=5dB이고, 모든 중계기의 초기 배터리 에너지의 합을 100J, 중계기의 개수는 5개와 20개로 설정 후 모의 실험을 하였다. 전송 용량을 높이면 그것

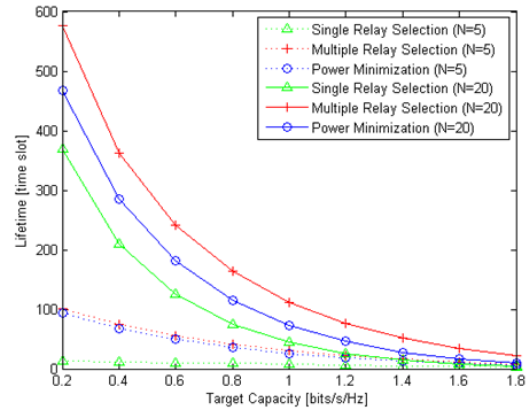


그림 3. 전송 용량 제한조건에 따른 네트워크 수명

을 만족시키기 위해 전송 전력을 높여야 하므로 수명이 줄어드는 것이 보인다. SRS 기법은 네트워크의 수명 측면에서 가장 좋지 않은 성능을 보이며, MRS 기법이 가장 좋은 성능을 보인다. 남은 배터리 에너지 양을 고려하여 중계기를 선택하므로 PSM 기법보다 네트워크의 수명이 연장되는 것이다. 또한 이 그림에서는 중계기의 개수를 5개, 20개로 나누어 보여준다. 20개의 중계기가 있는 환경에서는 공간 다이버시티 이득이 높아지기 때문에 수명 또한 커지는 것을 보여준다. 이 결과를 좀더 자세히 살펴 보기 위해 그림 4를 보자.

그림 4는 네트워크의 중계기 개수에 따른 네트워크 수명을 나타낸다. 전송 용량은 1bits/s/Hz, SNR=5dB, 모든 중계기의 초기 배터리 에너지의 합을 100J로 설정하였다. 중계기의 개수가 늘어날수록 수명이 늘어나지만 일정값으로 수렴함을 보인다. 중계기 개수가 늘어남에 따라

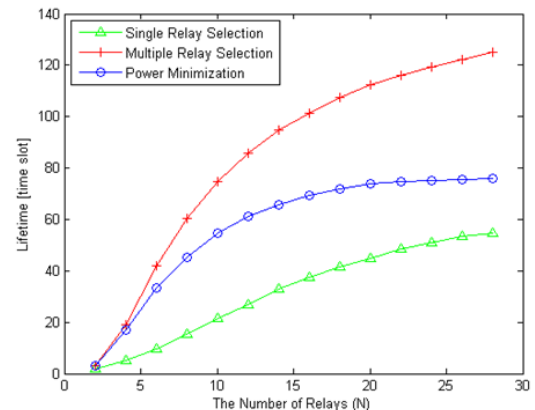


그림 4. 중계기 개수에 따른 네트워크 수명 ($R=1\text{bits/s/Hz}$,

$$SNR = 5\text{dB}, \sum_{k=1}^N e_k[0] = 100\text{J})$$

MRS 기법과 다른 기법 간의 차이는 더욱 두드러진다.

중계기로 이용되는 사용자들은 다른 사용자를 위해 전송을 중계할 때 자신의 통신은 하지 못하는 상황이 발생한다. 그러므로 중계기로 이용되는 사용자가 많아진다면 시스템 상으로는 점차 비효율적으로 되는 것이다. 이것이 다중 중계기 선택 기법의 문제점이 될 수 있다. 그림 5에서는 네트워크 중계기 개수에 따른 참여하는 중계기 개수를 나타낸 것이다. 설정 파라미터는 그림 4에서 한 모의 실험과 같다. 전체 사용자 중 중계기로 참여하는 사용자의 비율은 점차 줄어드는 경향을 보인다. PSM 기법에 비해 MRS 기법이 더 적은 개수의 중계기 참여를 요구하므로 MRS 기법은 수명 뿐만 아니라 시스템의 비효율성 측면에서도 더 이점이 있다.

그림 6는 SNR에 따른 네트워크 수명을 나타낸다. 전송 용량은 1bits/s/Hz, 모든 중계기의 초기 배터리 에너지의 합을 100J, 중계기의 개수는 5개와 20개로 설정하였다. SNR이 높을수록 주어진 전송 용량 제한조건을 만족시키기 위해 더 적은 전송 전력을 필요로 한다. SNR을 decibel scale로 나타내었으므로, 수명은 지수 함수로 증가하게 된다. 앞의 결과들과 마찬가지로 MRS 기법, PSM 기법, SRS 기법의 순서로 긴 수명을 보이며, 중계기의 개수가 20개일 때가 5개일 때 보다 더 긴 수명을 보인다.

그림 7는 초기 배터리 에너지 양에 따른 네트워크 수명을 나타낸다. 전송 용량은 1bits/s/Hz, SNR=5dB, 중계기의 개수는 5개와 20개로 설정하였다. 전체 네트워크의 수명은 간략하게 정의하면 $\frac{\text{전체 에너지 합}}{\text{전송 파워 합의 평균}}$ 으로 나타낼 수 있다. 그러므로 초기 에너지 양이 증가하면 그에

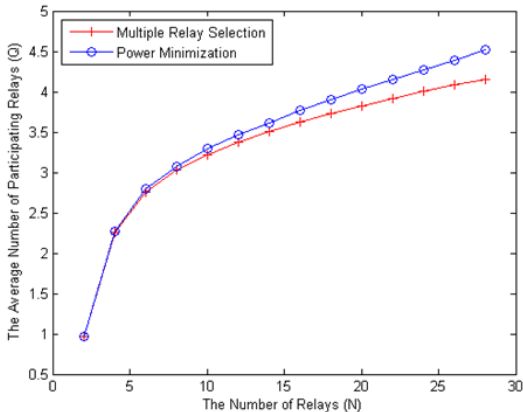


그림 5. 중계기 개수에 따른 참여하는 중계기 개수 ($R = 1\text{bits/s/Hz}$, $SNR = 5\text{dB}$, $\sum_{k=1}^N e_k[0] = 100\text{J}$)

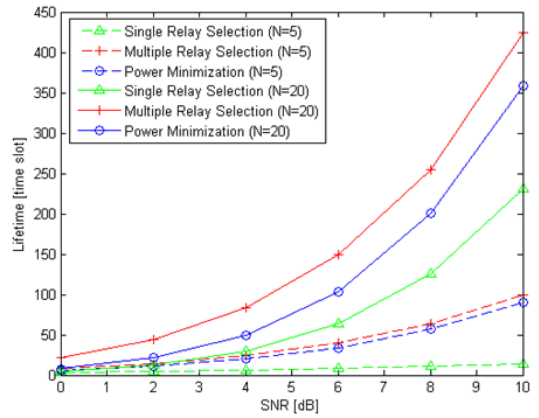


그림 6. SNR에 따른 네트워크 수명 ($R = 1\text{bits/s/Hz}$, $\sum_{k=1}^N e_k[0] = 100\text{J}$)

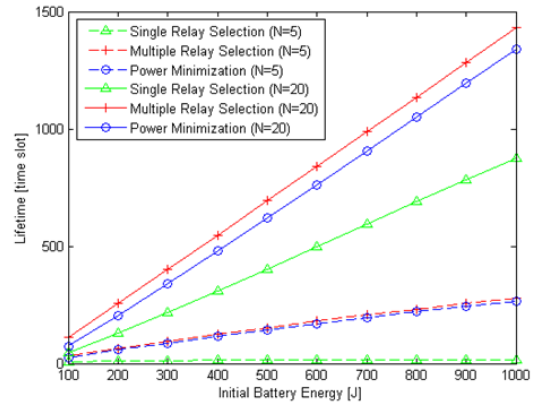


그림 7. 초기 배터리 에너지 양에 따른 네트워크 수명 ($R = 1\text{bits/s/Hz}$, $SNR = 5\text{dB}$)

비례하여 네트워크 수명도 증가한다. 그림 7는 이러한 결과를 나타내며, 역시 마찬가지로 MRS 기법, PSM 기법, SRS 기법의 순서로 긴 수명을 보이며, 중계기의 개수가 20개일 때가 5개일 때 보다 더 긴 수명을 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 전송 용량 제한 조건을 갖는 네트워크의 수명을 최대화하기 위한 전송 전력 할당 기법을 제안하였다. 단일 중계기를 선택할 때와 다중 중계기를 선택할 때로 나누어 살펴보았으며, 단일 중계기 선택 기법보다 다중 중계기 선택 기법이 여러 중계기에서 전송을 협력함으로써 공간 다이버시티 이득을 얻어 더 적은 전송 전력으로도 제한조건을 만족할 수 있었고, 네트워크의

수명을 연장시키는 것을 보였다. 또한 전체 중계기를 대상으로 단순히 전송 전력의 합을 최소화 시키는 것보다 남은 배터리 에너지 양을 고려해 중계기를 적절히 선택할 때 네트워크의 수명이 더 연장됨을 보였다.

참 고 문 헌

[1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity-Part I : System description Part II : Implementation aspects and performance analysis," *IEEE Transactions on Communications*, Vol.51, No.11, pp.1927-1948, Nov., 2003.

[2] J. Laneman, D. Tse, and G. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.50, No.12, pp.3062-3080, Dec. 2004.

[3] Y. W. Hong, W. J. Huang, F. H. Chiu, and C. J. Kuo, "Cooperative communications in resource-constrained wireless networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol.24, No.3, pp.47-57, May 2007.

[4] Y. Chen and Q. Zhao, "Maximizing the lifetime of sensor network using local information on channel state and residual energy," in *Proc. Conference on Information Science and Systems*, 2005.

[5] Q. Zhao, L. Tong, and Y. Chen, "Energy-aware data-centric MAC for application-specific sensor networks," in *Proc. IEEE Workshop on Statistical Signal Processing*, July 2005.

[6] W. J. Huang, Y. W. Hong, and C. J. Kuo, "Lifetime maximization for amplify-and-forward cooperative networks," in *Proc. IEEE Wireless Communications Networking Conf.*, 2007.

[7] W. J. Huang, Y. W. Hong, and C. J. Kuo, "Lifetime maximization for amplify-and-forward cooperative networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.7, No.5, pp.1800-1805, May 2008.

[8] T. Himsoon, W. P. Siriwongpairat, Z. Han, and K. J. R. Liu, "Lifetime Maximization via Cooperative Nodes and Relay Deployment in

Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.25, No.2, pp.306-317, Feb. 2007.

[9] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-constrained modulation optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.4, No.5, pp.2349-2360, Sept. 2005.

박 대 준 (Daejun Park)

정회원



2007년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사
 2009년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
 2009년 2월~현재 삼성전자 무선사업부 Global GSM개발팀

<관심분야> 다중 안테나, 중계기, 무선통신

김 형 명 (Hyung-Myung Kim)

종신회원



1974년 2월 서울대학교 공학사
 1982년 4월 미국 Pittsburgh 대학교 전기공학과 공학석사
 1985년 12월 미국 Pittsburgh 대학교 전기공학과 공학박사
 1986년 4월~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수

<관심분야> 디지털 통신 신호처리, 이동통신 기술, 다중사용자 검파기 다차원 시스템 이론, 디지털 신호와 영상처리 및 부호화