

전력 제한된 무선 센서네트워크에서 협력 다이버시티를 위한 전력인지 릴레이 선택 알고리즘

준희원 고 상*, 종신회원 박형근**°

Power-aware Relay Selection Algorithm for Cooperative Diversity in the Energy-constrained Wireless Sensor Networks

Gao Xiang* Associate Member, Hyung-Kun Park**° Lifelong Member

요 약

본 논문에서는 간단히 한국통신학회의 논문작성법에 대하여 설명하고자 합니다.(스타일-요약본문)협력 다이버시티 기법은 다중경로 페이딩 환경을 효과적으로 극복할 수 있는 통신 기술이다. 이 기술을 에너지 제한된 무선 센서 네트워크에 적용하기 위해서는 무선 센서네트워크에서 가장 중요한 성능요소인 네트워크 수명을 고려한 릴레이 선택과 전력 할당 방법 등이 설계되어야 한다. 본 논문에서는 네트워크 수명을 최대화하기 위해 노드의 잔여전력을 고려한 새로운 다중 릴레이 선택 및 전력 할당 알고리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘은 2단계로 구분되어 있다. 먼저 각 노드의 채널 상태를 고려하여 릴레이 후보노드를 선택 한 후 각 노드의 잔여전력을 고려하여 전력을 할당함으로써 전체 송신전력을 최소화함과 동시에 네트워크수명을 극대화 하도록 하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘은 기본적으로 AF(Amplify and Forward) 릴레이 모델을 바탕으로 하였으며 시뮬레이션을 통해 제안한 방식이 기존의 방식에 비해 더 높은 네트워크 수명을 가지는 것을 입증할 수 있었다.

Key Words : Sensor Networks, Relay Selection, Cooperative Diversity, Network Lifetime

ABSTRACT

Cooperative diversity is an effective technique to combat multi-path fading. When this technique is applied to energy-constrained wireless sensor networks, it is a key issue to design appropriate relay selection and power allocation strategies. In this paper, we proposed a new multi-relay selection and power allocation algorithm to maximize network lifetime. The algorithm are composed of two relay selection stages, where the channel condition and residual power of each node were considered in multi-relay selection and the power is fairly allocated proportional to the residual power, satisfies the required SNR at destination and minimizes the total transmit power. In this paper, proposed algorithm is based on AF (amplify and forward) model. We evaluated the proposed algorithm by using extensive simulation and simulation results show that proposed algorithm obtains much longer network lifetime than the conventional algorithm.

* 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRF-2008-331-D00343)

* 한국기술교육대학교 전기전자공학과 (flynn@kut.ac.kr)

** 한국기술교육대학교 정보기술공학부 (hkpark@kut.ac.kr) (°:교신저자)

논문번호 : KICS2009-04-143, 접수일자 : 2009년 4월 6일, 최종논문접수일자 : 2009년 10월 6일

1. 서 론

무선통신 시스템에서 열악한 채널환경을 극복하고 신호의 전송용량을 증대시키는 방법으로 다이버시티 기술이 사용되어 왔다. 다이버시티 기술은 그 구현 내용에 따라 시간 다이버시티, 공간 다이버시티, 주파수 다이버시티 등으로 구분할 수 있는데, 이 중 공간 다이버시티는 다수의 안테나를 사용하여 전송효율을 증대시키는 방법이다. 하지만 이러한 다수의 안테나를 사용하는 기술은 ad-hoc 네트워크 또는 센서 네트워크에서와 같이 노드의 크기가 작고 하드웨어 및 비용의 제한이 있는 경우는 적용되기가 어려웠다. 이에 대한 해결 방안으로 나온 것이 협업 통신 또는 협업 릴레이 네트워크라 불리는 새로운 개념인데, 이는 각 노드에 하나의 안테나만이 있더라도 다이버시티의 이득을 얻을 수 있게 하는 것이다. 기본 개념은 릴레이 환경에서 하나의 안테나를 가지는 각 노드들이 그들의 안테나를 상호 공유함으로써 일종의 가상 어레이 안테나 시스템을 만들어 내는 것이다. 즉 전송부에 안테나가 하나이더라도 중간에서 릴레이역할을 해주는 노드들이 전송 안테나의 역할을 하여 다이버시티 이득을 얻게 해준다. 이를 협업 다이버시티라 한다. 센서 네트워크는 특정지역에 노드들이 밀집되어 있어서 상호 협업을 통해 즉, 센서들의 협업적 특성을 이용하여 이러한 다이버시티를 최대한 활용할 수 있는 구조를 갖고 있다.

Cove와 Gamel에 의해 처음으로 협업 통신에 대한 기본 적인 정보이론적 연구가 수행되었다^[1]. 이때 릴레이 네트워크에서 릴레이의 역할은 메인 채널을 보조하는 역할만을 의미하였고 단순한 AWGN 채널에서 용량을 주로 분석하였으나 최근에는 페이딩 채널에서의 다이버시티의 개념을 강조하게 되었고 각 사용하는 정보의 소스와 릴레이의 역할을 모두 수행하는 것으로 개념이 확대되었다. [2]에서는 공간 다이버시티를 위한 협업 다이버시티의 개념이 소개되고 처음으로 기존의 CDMA 시스템에 이를 적용하였다. 최근에는 협업 다이버시티의 구조는 멀티홉 다이버시티, 릴레이채널, 사용자 협업다이버시티, 가상 MIMO 등의 다양한 형태로 연구되고 있다. [3]에서는 릴레이노드의 통신방식을 amplify-and-forward(AF)와 decode-and-forward(DF) 방식으로 분류하였다. AF 릴레이들은 수신된 신호를 증폭하여 재전송하는 역할을 하며 DF 릴레이 들은 수신신호를 디코딩한 후 다시 코딩과정을 거쳐 재전

송하는 역할을 한다.

협업 다이버시티기술에서 릴레이노드의 개수를 얼마로 정하며 어떤 노드를 릴레이 노드로 참여시켜 다이버시티를 얻느냐하는 릴레이노드 선택 방법은 협업 다이버시티의 성능을 좌우할 수 있는 중요한 기술이 된다. 참여 릴레이노드의 수가 증가하면 처음에는 다이버시티 이득이 증가할 수 있으나 많은 수의 노드가 전송에 참여하게 되면 전체적인 전력효율이 감소할 수 있다. 이러한 릴레이 선택기술에 대한 연구는 아직 시작 단계이며 특히 ad-hoc네트워크에서와 같은 분산 네트워크를 위한 릴레이선택방식에 대한 연구가 많이 발표되지는 않은 상태이다. ad-hoc 네트워크에서의 릴레이선택 방법으로서 [4]에서는 802.11b와 유사한 MAC프로토콜 기반에서 opportunistic relaying(OR)이라고 하는 간단한 형태의 분산화된 릴레이 선택 알고리즘을 제안하였다.

전력할당에 있어서는 논문 [5]에서 소스와 릴레이의 전력이 수신단에서의 SNR을 최대화 하도록 할당하는 방식을 제안하였다. 이 방법은 순시채널상태가 가장 좋은 노드를 릴레이노드로 선택하고 수신성능을 극대화하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 peer-to-peer 링크성능의 향상이 주요 논점이며 전력효율 및 에너지 소모의 측면을 고려하고 있지 않으며 참여노드의 수도 제한되어 있다.

센서 네트워크에서는 센서노드들이 협력을 해서 데이터를 싱크 노드까지 전송하기 때문에 각 센서노드의 수명이 센서 네트워크의 통신망 자체의 수명을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 또한 센서네트워크에서 특정 노드들의 전력이 모두 소모되면 네트워크 전체가 더 이상의 기능을 상실하게 센서네트워크에 협업 다이버시티를 적용하기 위해서는 릴레이노드를 선택할 때 노드의 잔여전력과 요구 송신전력을 고려하여 네트워크 수명을 극대화 할 수 있도록 릴레이노드를 선택하고 송신 전력을 할당할 수 있는 협업 프로토콜이 필요하다. 논문 [6]은 네트워크의 수명을 증가시키기위해 노드의 잔여전력을 고려하여 릴레이를 선택하는 릴레이 선택 알고리즘을 제안하고 있으나 제안된 알고리즘은 단일 릴레이 노드 선택으로 제한되어있다.

논문에서는 센서네트워크에서 협업 다이버시티 방식의 연구를 통해 센서네트워크의 수명을 극대화 할 수 있는 다중 릴레이 선택 및 전력할당 알고리즘을 제안한다. 센서네트워크는 중앙집중형 네트워크가 아니므로 각각의 노드들이 스스로 전송에 참

역할지를 독립적으로 결정할 수 있는 분산화된 협업프로토콜을 설계하고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증하였다.

II. 분산적 릴레이노드의 선택 및 전력할당알고리즘

본 논문에서는 소스노드와 목적노드 사이에 여러 개의 릴레이 노드가 병렬로 배치된 2홉 멀티홉 네트워크 모델을 가정하였다. 모든 잠재적 릴레이 노드 가운데 통신에 참여할 릴레이 노드를 선택하게 되는데 릴레이 노드를 선택하지 않으면 소스와 목적노드간의 직접 통신이 이루어지게 된다.

센서네트워크는 네트워크를 관장하는 기지국을 가지고 있지 않다. 따라서 노드 및 전력의 할당은 분산적 방식으로 이루어져야 한다. 분산적 릴레이 노드 선택은 소스노드와 목적노드간의 경로를 설정할 때 기지국의 도움없이 분산적 방법으로 단일 또는 다중 릴레이 노드를 선택하는 방식이다. 이 방식은 릴레이 노드간 뚜렷한 형태의 통신이나 네트워크 형태에 대한 선행적 정보 등이 요구되지 않고, 일시적인 무선 채널의 측정값과 상호 관계 등을 기반으로 하여 릴레이노드를 선택하고 송신전력을 계산한다.

본 논문에서 제안하는 릴레이선택 및 전력할당알고리즘은 2단계로 이루어져 있다. 먼저 노드간의 채널정보를 바탕으로 하여 협업통신에 참여할 릴레이 노드 후보군을 선별한다. 1차적으로 압축된 후보군을 대상으로 하여 각 노드의 잔여전력을 파악하고 수신SNR을 만족시키기 위한 송신전력을 계산하고 최종적인 릴레이노드를 선택하게 된다. 3장과 4장에서 단계별 노드선택 알고리즘을 상세히 설명하였다.

III. 채널상태를 고려한 1차 릴레이 선택

1차 릴레이 선택은 노드간의 채널정보를 바탕으로 하여 후보 릴레이노드를 선택한다. 먼저 전송할 데이터를 갖고 있는 소스노드는 RTS (Request to Send) 패킷을 전송하여 패킷의 송신을 알리고 RTS 패킷을 수신 받은 목적노드는 CTS (Clear to Send) 패킷을 전송함으로써 패킷전송을 시작하게 된다. 이와 같은 RTS-CTS 패킷교환방식을 이용하면 각각의 채널정보를 파악할 수 있다.

소스노드에서는 그림1과 같이 잔여전력 정보를 포함한 수정된 형태의 RTS 패킷을 송신한다. RTS 패킷을 수신한 각 릴레이 노드는 소스노드의 잔여

Frame control	duration	RA	TA	Residual Power	FCS
---------------	----------	----	----	----------------	-----

그림 1. 잔여 전력 정보가 포함된 수정된 형태의 RTS 패킷

전력 정보뿐만 아니라 소스노드와 릴레이 노드 i 사이의 채널 상태 $h_{sr,i}$ 추정이 가능해지고, 목적노드에서는 소스노드와 목적노드 사이의 무선 채널 상태 h_{sd} 추정이 가능해진다.

RTS 패킷을 수신한 목적노드는 CTS 패킷을 송신하는데 CTS 패킷을 통해 릴레이 노드들은 릴레이 노드 i 와 목적노드간의 채널 상태 $h_{rd,i}$ 를 추정할 수 있게 된다. RTS-CTS 패킷 교환을 통해 각 노드들은 릴레이노드 결정에 필요한 채널 정보 및 소스노드의 잔여 전력 정보를 수집할 수 있게 된다.

RTS와 CTS 패킷 전송 후에는 첫 번째 릴레이 노드 선택 과정이 수행된다. 각 릴레이 노드들은 먼저 채널 상태 정보만을 가지고 타이머 값을 설정하고 타이머를 동작시킨다. 이중 채널 상태가 가장 좋은 릴레이 노드의 타이머가 가장 먼저 만료되게 된다. 각 채널 상태 $h_{sr,i}$ 및 $h_{rd,i}$ 는 각 릴레이 노드에 있어서 소스노드와 릴레이노드 그리고 릴레이노드와 목적노드간 무선 경로의 특성을 반영한다. 기회적 릴레이 선택은 전체 가능한 경로 집합 가운데 가장 최적에 가까운 경로를 선택하는 것이다. 따라서 타이머값은 모든 홉의 채널특성을 고려하여 설정되어야한다. 릴레이 노드 i 에 대한 타이머값 T_i 을 설정하기 위해 파라미터 H_i 를 식(1)와 같이 형태로 정의하였다.

$$H_i = \min\{|h_{sr,i}|^2, |h_{rd,i}|^2\} \quad (1)$$

함수 H_i 의 값이 큰 릴레이 노드 일수록 더 나은 end-to-end 경로를 가지게 되고, 모든 릴레이 노드들은 아래 식 (2)와 같이 이러한 채널 상태 값 H_i 을 반비례하게 반영한 초기값을 가지고 타이머를 동작시킨다.

$$T_i = \frac{\lambda}{H_i}, T_s = \frac{\lambda}{H_d} \quad (2)$$

이때 T_i 는 릴레이 노드 i 의 타이머값이고 T_s 는 소스노드의 타이머값이다. λ 는 채널 상태 값 $|h|^2$ 를 시간 단위로 변환시키기 위한 상수 값이고, H_d 는

소스노드에서 목적노드까지의 직접 통신시의 채널의 절대값의 제곱값이다. 보다 좋은 채널상태를 갖고 있는 노드는 보다 작은 타이머값을 갖게 되어 릴레이 드로 선택될 가능성이 높아진다.

모든 릴레이 후보 노드들은 다른 후보노드들의 채널상태 혹은 타이머값을 알지 못한다. 따라서 분산적 방식을 통해 릴레이노드를 선택해야한다. 타이머값을 설정한 노드들은 타이머를 동작시키기 시작하고 타이머가 0에 도달하는 순간 플래그 패킷을 송신한다. 다른 릴레이 노드들은 소스노드로부터 플래그 패킷을 수신할 때 즉, 소스노드의 타이머 값이 0이 됐음을 알게 됐을 때 타이머를 리셋하고 플래그의 전송을 중지한다. 즉, 상대적으로 소스노드-목적노드간의 직접 전송보다 좋은 전송을 제공할 수 있는 릴레이 노드들이 1차적으로 릴레이노드 후보군으로 선택되는 것이다. 즉, TOS(Timer value Of source)라는 이름의 임계값을 지정하여, TOS값 보다 작은 타이머값을 갖는 노드들이 첫번째 릴레이 선택 과정에서 릴레이 후보군으로 선택될 수 있도록 하였다. 그림 2은 TOS값과 노드의 타이머값에 따른 릴레이 후보노드의 선택을 보여주고 있다.

만약 소스노드와 목적노드 사이의 채널 상태가 매우 좋은 TOS값이 다른 노드의 타이머 값보다 작다면 릴레이노드는 선택되지 않고 소스와 목적간의 직접통신이 이루어지게 된다. 1차 릴레이노드 선택 과정에서 상호 플래그를 전송하게 되는데 플래그의 전송을 통해 각각의 선택된 릴레이 노드들은 다른 선택된 노드들과의 채널 상태 정보를 얻게 되며 이는 2차 릴레이노드 선택에 활용되게 된다.

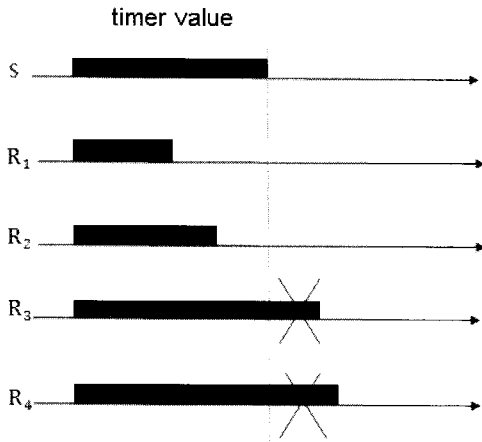


그림 2. 릴레이 노드 선택을 위한 TOS

IV. 전력할당 및 잔여전력을 통한 2차 릴레이 노드 선택

이 단계에서는 후보노드들의 잔여전력을 고려하고 요구되는 SNR을 만족시키도록 후보 릴레이 노드들에게 송신전력을 할당하고 최종적으로 협업통신에 참여할 릴레이노드를 선택한다. 시간 k 에 릴레이와 목적노드에서의 수신 신호를 아래 식과 같이 각각 $y_{sr,i}(k)$, $y_{sd}(k)$ 으로 표시하였다.

$$y_{sr,i}(k) = h_{sr,i}s(k) + n_{sr,i}(k) \quad (3)$$

$$y_{sd}(k) = h_{sd}(k)s(k) + n_{sd}(k) \quad (4)$$

이때 $h_{sr,i}$ 와 h_{sd} 는 각각 소스와 릴레이, 소스와 목적노드 사이의 페이딩을 의미하고, $n_{sr,i}$ 와 n_{sd} 는 분산값 σ_N^2 를 가지는 가우시안 잡음을 의미한다. 소스노드로부터 데이터를 수신받은 릴레이노드 i 는 이를 다시 목적노드에 전송한다. 이때 릴레이 노드 i 가 전송하는 신호를 $x_{r,i}(k) = y_{sr,i}(k - \tau)$ 라고 하면, 목적노드에서 수신하게 될 신호는 식(5)와 같다.

$$y_{rd,i}(k) = h_{rd,i}x_{r,i}(k) + n_{rd,i}(k) \quad (5)$$

$h_{rd,i}$ 는 각각 릴레이 노드 i 와 목적노드 사이의 페이딩을 의미한다. 목적노드는 각 소스노드 및 릴레이노드들이 송신한 신호를 수신하고, 이때 가중치를 부여하여 식(6) 과 같은 수신신호를 얻게 된다.

$$\begin{aligned} & \omega_1 y_{sd}(k - \tau) + \sum_{i=1}^n \omega_{r,i} y_{rd,i}(k) \\ &= \omega_1 (h_{sd}s(k - \tau) + n_{sd}(k - \tau)) \\ &+ \sum_{i=1}^n \omega_{r,i} (h_{rd,i}x_{r,i}(k) + n_{rd,i}(k)) \end{aligned} \quad (6)$$

이때 ω_1 와 $\omega_{r,i}$ 는 결합계수이다. 또한 우리가 릴레이 모델로써 고려하였던 AF 릴레이 방식에서는, 각 릴레이 노드는 아래 식(7)과 같이 수신신호를 증폭하여 송신하게 된다.

$$x_{r,i}(k) = \mu_i y_{sr,i}(k - \tau) \quad (7)$$

따라서 소스노드의 송신 전력 P_s 는 i 번째 릴레이 노드의 송신전력 $P_{r,i}$ 와 아래와 같은 관계를 가진다.

$$\mu_i^2 \left(|h_{sr,i}|^2 P_s + \sigma_N^2 \right) = P_{r,i} \quad (8)$$

이를 통해 증폭계수 μ_i^2 를 식(9)과 같이 표현할 수 있고 AF 모델에 의한 목적노드에서의 SNR은 최종적으로 식(10)와 같이 계산할 수 있다.

$$\mu_i^2 = \frac{P_{r,i}}{|h_{sr,i}|^2 P_s + \sigma_N^2} \quad (9)$$

$$SNR = \frac{P_s \left| h_{sd} \omega_1 + \sum_{i=1}^n \mu_i h_{sr,i} h_{rd,i} \omega_{r,i} \right|^2}{\left(|\omega_1|^2 + \sum_{i=1}^n |\omega_{r,i}|^2 \left(\mu_i |h_{rd,i}|^2 + 1 \right) \right) \sigma_N^2} \quad (10)$$

여기서 ω_1 와 $\omega_{r,i}$ 는 결합 계수로써 MRC(maximal ratio combing)을 이용하여 계산할 수 있다.^[7]

$$\omega_1 = \frac{\sqrt{P_s} h_{sd}^*}{\sigma_N^2} \quad \omega_{r,i} = \frac{\mu_i \sqrt{P_s} h_{sr,i}^* h_{rd,i}^*}{\left(\mu_i^2 |h_{rd,i}|^2 + 1 \right) \sigma_N^2} \quad (11)$$

식(11) 결합계수 값을 식(10)에 대입하였을 때 아래와 같이 목적노드에서의 SNR을 구할 수 있다.

$$SNR = \left(|h_{sd}|^2 + \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i^2 |h_{sr,i} h_{rd,i}|^2}{\mu_i^2 |h_{rd,i}|^2 + 1} \right) \frac{P_s}{\sigma_N^2} \quad (12)$$

식(9)을 식(12)에 대입하여 목적노드에서의 SNR 값을 구하면 아래와 같다.

$$SNR = \left(|h_{sd}|^2 + \sum_{i=1}^n \frac{|h_{sr,i} h_{rd,i}|^2 P_{r,i}}{|h_{rd,i}|^2 P_{r,i} + |h_{sr,i}|^2 P_s + \sigma_N^2} \right) \frac{P_s}{\sigma_N^2} \quad (13)$$

위의 SNR값은 수신성능을 위한 최소 요구 SNR_{req} 충족할 뿐 아니라, 전송 시 소스노드 및 릴레이 노드들의 전체 송신 전력 또한 최소화하여야 하므로 아래와 같이 라그랑지 승수법을 이용하여 최소화 문제를 해결하고자 하였다.

$$\min_{P_s, P_{r,i}} \left(P_s + \sum_{i=1}^n P_{r,i} \right) \quad (14)$$

식(13)의 조건하에서 식(14) 와 같이 총 송신전력을 최소화하기 위한 소스의 송신전력과 릴레이의 송신전력을 구해야 한다. 이를 위해 식(13)와 식(14)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} f(P_s, P_{r,i}) = P_s + \sum_{i=1}^n P_{r,i} \\ g(P_s, P_{r,i}) = |h_{sd}|^2 P_s + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sqrt{|h_{sr,i}|^2 |h_{rd,i}|^2} P_s P_{r,i} \\ \quad - \sigma_N^2 SNR_{req} \end{cases} \quad (15)$$

$g(x) = 0$ 인 조건하에서 $f(x)$ 를 최소화 하는 문제는 아래와 같이 라그랑지 승수법을 사용하여 풀 수 있다.

$$F(P_s, P_{r,i}, \lambda) = f(P_s, P_{r,i}) - \lambda g(P_s, P_{r,i}) \quad (16)$$

식 (17)을 거쳐 최종적으로 식(18)를 구할 수 있다.

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial P_s} = 1 - \lambda \left(|h_{sd}|^2 + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \sqrt{|h_{sr,i}|^2 |h_{rd,i}|^2} \sqrt{\frac{P_{r,i}}{P_s}} \right) = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial P_{r,i}} = 1 - \frac{1}{4} \lambda \sqrt{|h_{sr,i}|^2 |h_{rd,i}|^2} \sqrt{\frac{P_s}{P_{r,i}}} = 0 \\ |h_{sd}|^2 P_s + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sqrt{|h_{sr,i}|^2 |h_{rd,i}|^2} P_s P_{r,i} - \sigma_N^2 SNR_{req} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} P_s = \frac{-4a^2 \pm a \sqrt{16a^2 + 4 \sum bc}}{\sum bc + 4a^2 \mp a \sqrt{16a^2 + 4 \sum bc}} \\ P_{r,i} = 2bc \frac{(-4a \pm \sqrt{16a^2 + 4 \sum bc})^2}{\sum bc (\sum bc + 4a^2 \mp a \sqrt{16a^2 + 4 \sum bc})} \end{cases} \quad (18)$$

이때 $a = |h_{sd}|^2, b = |h_{sr,i}|^2, c = |h_{rd,i}|^2$ 이다. 이 과정을 통하여 잠재적 릴레이 노드 i 는 각 소스노드 및 릴레이 i 자신에게 필요한 송신 전력 값 P_s 및 $P_{r,i}$ 를 얻게 된다. 여기에 두 번째 릴레이 선택 과정에서는 소스노드 및 릴레이 노드들의 잔여전력을 고려한다. 이 과정에서 소스노드는 자신의 필요 송신 전력 값 및 현재 잔여 전력 값을 이용하여 타이머를 설정한다. 만약 소스노드의 타이머값이 가장 작을 경우, 소스노드는 후보군에 속한 모든 릴레이 노드들에 플래그를 송신함으로써 릴레이를 통한 협력방식이 아닌 직접 통신 방식으로 전송할 것임을

알린다. 식(18)를 통해 전력 할당 정보를 얻은 후, 1차적으로 선택되었던 모든 릴레이 노드들은 아래 식(19)에 따라 잔여전력 값을 고려하여 타이머 값을 설정한다. 설정된 타이머값을 이용하여 최종적인 릴레이노드를 선택하는데 그 방식은 1차 릴레이노드 선택방식에서의 타이머 이용한 노드 선택방식과 동일하다.

$$\begin{cases} T_i = \frac{\lambda}{\min\{P_{rs} - P_s, P_{rr,i} - P_{r,i}\}} & T_s = \frac{\lambda}{(P_{rs} - P_{sd})} \\ T_i = \lambda \cdot \max\left\{\frac{P_s}{P_{rs}}, \frac{P_{r,i}}{P_{rr,i}}\right\} & T_s = \lambda \cdot \frac{P_{sd}}{P_{rs}} \end{cases} \quad (19)$$

이때, $P_{rs,i}$ 는 소스노드의 잔여전력을 나타내며 $P_{rr,i}$ 는 릴레이노드 i 의 잔여전력을 나타낸다. 두번째 릴레이 선택 과정이 끝나게 되면 소스노드는 선택된 릴레이 노드들과 협력하여 목적노드로 데이터를 송신하게 된다.

V. 시뮬레이션을 통한 성능분석

시뮬레이션을 통해 제안된 전력할당 및 릴레이노드 선택 알고리즘에 대한 성능을 분석하고 기존의 방식과 비교하였다. 일정한 영역에 노드들이 균일하게 분포되어 있고 모든 노드들은 협력 릴레이 노드들을 통해 데이터 송수신이 가능한 네트워크를 가정하였으며 노드 i 와 j 사이의 일시적 채널 이득은 식(20)와 같이 모델링하였다.

$$|h_{ij}|^2 = K_0 d_{ij}^{-k} |\alpha_{ij}|^2 \quad (20)$$

여기서 d_{ij} 는 노드 i 와 노드 j 사이의 거리, α_{ij} 는 일시적 레일레이 페이딩 값을 의미하고 경로설정 계수 값 K_0 는 1, k 인자 값은 4로 설정하였다. 또한 각 수신기에서의 AWGN 노이즈 파워는 일반적으로 $\sigma^2 = 1$ 로 규정하였다. 모든 노드들의 위치는 고정된 것으로 모델링하였고 패킷의 전송시간이 길지 않으므로 패킷의 전송이 완료될 때까지는 채널의 변화가 없는 것으로 가정하였다.

성능평가를 위한 네트워크수명이 다양하게 정의될 수 있다. 수명을 다한 노드가 처음 발생한 시점을 네트워크의 수명으로 정의하기도 하며^[8] 네트워크에서 생존하고 있는 노드의 비율이 일정한 수준 이하로 떨어지는 시점을 네트워크 수명으로 정의하

표 1. 시뮬레이션을 위한 파라미터 (nRF905 싱글 칩 라디오 송수신기)

Frequency (MHz)	Rate (kbps)	Current (mA)	Sensitivity (dB)	Power (dBm)	Modulation
433~915	100	12.5	-100	10	GFSK

기도하였다^{[9]-[10]}. 본 논문에서는 네트워크 수명을 최대 충전 전력의 10%미만의 잔여전력을 가진 노드가 네트워크 상에 하나 이상 존재할 때까지의 기간으로 규정하고, 전체 데이터 송신 시간 구간으로 나타내었다. 시뮬레이션을 위해서 무선센서 nRF905 싱글 칩 라디오 송수신기를 선택하였고, 이에 대한 파라미터는 표 1과 같다.

그림 3은 AF 릴레이 모델에서 노드 수에 따른 평균 네트워크 수명을 나타내고 있다. 여기서는 협력 통신이 없는 직접 통신 방식, 채널 상태만을 고려하여 릴레이를 선택하는 단일릴레이 선택방식 그리고 본 논문에서 제안한 채널 상태와 잔여 전력을 모두 고려한 방식 등 총 3가지의 방식을 비교하였다. 단, 이때 단일릴레이 선택방식에서도 채널환경에 따라 소스-목적노드 사이의 직접통신이 가능하다. 그림에서 보는 바와 같이, 노드수가 증가하게 되면 각 노드가 데이터 송신에 참여하게 될 확률이 줄어들기 때문에 전체적인 네트워크 수명은 늘어나게 된다. 특히 직접 통신 방식과 비교하여 보았을 때, 협력통신 방식을 사용했을 경우 노드수가 증가함에 따라 네트워크 수명이 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 소스노드가 나쁜 채널환경에서도 송신전력을 높여 전송을 시도하기 때문이다. 반면에 협력통신방식은 소스-목적노드 사이의 채널이 열악할 경우 릴레이노드와의 협동통신을 이용함으로써 전체적인 전력소모를 줄일 수 있다. 한편 본 논문에서 제

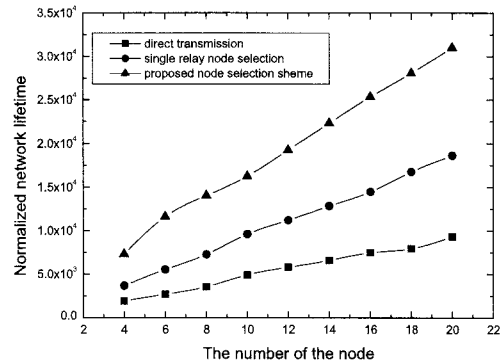


그림 3. 노드선택 방식에 따른 네트워크 수명

안한 알고리즘의 경우 기존의 방식과 달리 채널 상태뿐 아니라 잔여전력이 함께 고려되었는데, 이는 송신 전력이 효율적으로 할당되게 함으로써 평균 네트워크 수명에 있어서 직접 통신 방식에 비해 3배, 채널 상태만 고려한 방식에 비해 1.5배에 가까운 향상을 보였다.

그림 4와 그림 5는 TOS를 기반으로 한 임계값의 변화치에 따른 네트워크 수명을 보여주고 있다. 제한한 알고리즘을 하나의 릴레이만을 선택하도록 디자인 했을 경우 직접 통신 방식에 비해 네트워크 수명이 약 3배 정도 늘어나는 것을 알 수 있다. 하지만 여러 개의 릴레이를 선택하기 위해 임계값을 설정할 경우 싱글 릴레이 선택과는 다른 결과가 있을 수 있다. 시뮬레이션 결과를 볼 때 임계값이 TOS값과 같을 경우 네트워크 수명이 가장 긴 것을 알 수 있다. 이는 릴레이 노드가 소스노드보다 더 좋은 채널 상태와 잔여전력 레벨을 가질 경우에만 릴레이 노드로서 가장 효과적으로 동작함을 보여준

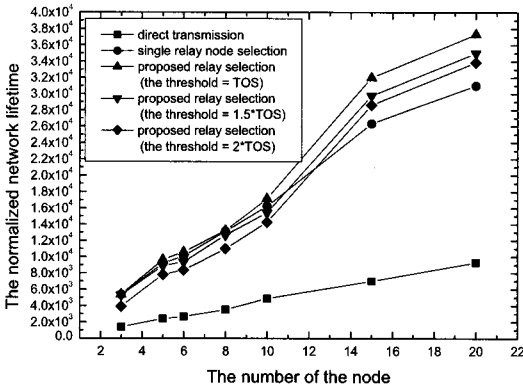


그림 4. 제안한 알고리즘의 노드 개수 및 임계값 변동에 따른 네트워크 수명

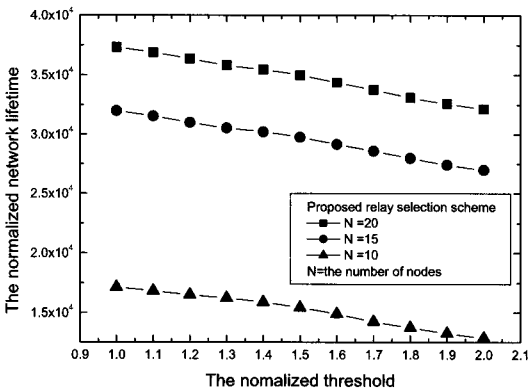


그림 5. TOS에 의해 정규화된 릴레이노드 선택 임계값 및 노드 수(N)에 따른 네트워크 수명

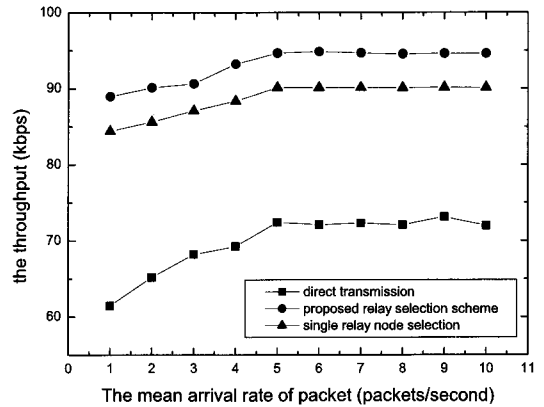


그림 6. 평균 패킷 도착율에 따른 각 알고리즘 별 수율

다. 즉, 임계값을 TOS 이상으로 높이면 소스-목적간 채널상태보다 더 나쁜 무선 채널을 갖는 릴레이 노드가 선택되어 필요이상의 노드를 통신에 참여시킴으로써 전력소모를 증가시키고 결국 네트워크 수명을 오히려 감소시키게 됨을 알 수 있다.

그림 6은 직접 통신 방식과 제안한 알고리즘의 싱글 및 멀티 릴레이 선택 방식에 따른 수율을 보여주고 있다. 무선 센서네트워크에서는 시변 페이딩 채널이 존재하므로, 직접 통신 방식을 취할 시 패킷 오류 및 손실 등과 같은 문제가 발생할 가능성이 높고 이는 낮은 수율을 초래한다. 그에 비해 제안한 알고리즘은 릴레이 노드를 선택하여 협력적으로 데이터를 송신하기 때문에, 다이버시티 이득으로 인한 페이딩 효과 감소 및 목적노드에서의 높은 SNR 수준 유지가 가능하게 되고 이는 높은 데이터 수신율과 시스템 수율을 가져온다. 그림 6은 패킷 발생률에 따르는 시스템 수율을 보여주고 있는데 예상한 바와 같이 협업통신방식을 사용했을 때 수율이 크게 증가함을 알 수 있으며 제안한 릴레이노드 선택 알고리즘을 적용하였을 때 기존의 협업방식에 비해 성능이 개선됨을 보여주고 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 노드의 잔여전력과 채널환경을 고려하여 네트워크 수명 및 시스템 수율을 극대화 할 수 있는 릴레이 선택 및 전력 할당 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 센서네트워크에 적용할 수 있는 분산방식으로 설계되었다. 릴레이노드 선택을 채널상태만을 고려한 1차 릴레이노드 선택과 잔여전력 및 송신전력할당을 고려한 2차 릴레이

선택으로 나누어 처리함으로써 그 동안 개별적으로 다루어졌던 릴레이노드 선택과 전력할당의 문제를 동시에 처리할 수 있었다. 또한 그 동안 복잡도의 증가로 인해 다중 릴레이노드 선택이 어려웠으나 2 단계 노드선택 방식을 통해 릴레이노드의 수를 한정하지 않고 선택할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘에 대한 성능분석을 수행하였으며 기존의 방식에 비해 네트워크 수명뿐만 아니라 시스템 수율 측면에 있어서도 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 앞으로 제안된 릴레이선택 알고리즘을 3홉 이상의 네트워크로 확장하고 decode-and-forward 방식에 적용하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] T. M. Cover and A. A. E. Gamel, "Capacity Theorems for the Relay Channel," *IEEE trans. info. Theory*, Vol. 25, No. 5, Sept. 1979, pp. 572-584.

[2] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity part I and II," *IEEE trans. Commun.*, Vol. 51, No. 11 Nov., 2003, pp. 1927-1948.

[3] J. N. Laneman, D. N. C. Tse and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 50, No. 12, pp. 3062-3080, Dec., 2004.

[4] A. Bletas, A. Khisti, D. P. Reed, A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE JSAC*, Vol. 24, pp. 659-672, Mar., 2006.

[5] Yonghui Li, Branka Vucetic, and Mischa Dohler, "distributed adaptive power allocation for wireless relay networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 6, No. 3, pp. 948-958, Mar, 2007.

[6] Yan Chen, Guanding Yu, Peilang Qiu and Zhaoyang Zhang, "Power-aware cooperative relay selection strategies in wireless ad hoc networks," in *Proc. IEEE PIMRC'06*, 2006.

[7] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks," in *Proc. IEEE WCNC*, 2000, pp. 7-12

[8] S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra,

"Power-aware routing in mobile ad hoc networks," *Proc. MOBICOM 1998*, pp. 181-190., October, 1998.

[9] Y. Xu, J. S. Heidemann, and D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing," *Proc. MOBICOM 2001*, pp. 70-84, 2001.

[10] A. Ephremides, "Energy concerns in wireless networks," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 9, No. 4, pp. 48-59, Aug., 2002.

고 상 (Gao Xiang)

준회원



2006년 6월 중국 산둥대학교 전자공학과 졸업
 2008년 8월 한국기술교육대학교 전기전자공학과 석사
 2008년 9월~현재 한국기술교육대학교 전기전자공학과 박사과정

<관심분야> 센서네트워크, 협업통신, 인지무선통신

박 형 근 (Hyung Kun Park)

중신회원



1995년 2월 고려대학교 전자공학과 학과
 1997년 2월 고려대학교 전자공학과 석사
 2000년 8월 고려대학교 전자공학과 박사
 2004년 3월~2001년 8월 University of Colorado, Postdoc.

2001년 9월~2004년 2월 현대시스템 선임연구원
 2004년 3월~현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 조교수

<관심분야> 센서네트워크, 무선자원관리, 광대역이동통신, 인지무선통신