

저 전력 저 복잡도 무선 기기를 위한 분산적인 다중 홉 멀티 캐스트 중계 기법

고 병 훈*, 전 기준*, 이 성 로**, 김 광 순^o

Distributed Multi-Hop Multicast Transmission Scheme for Low-Power and Low-Complexity Wireless Devices

Byung Hoon Ko*, Ki-Jun Jeon*, Seong Ro Lee**, Kwang Soon Kim^o

요 약

본 논문에서는 저 전력 저 복잡도 무선 기기로 구성된 다중 홉 멀티캐스트 네트워크를 위한 분산적인 중계 기법과 전력 제어 기법을 제안한다. 정보의 전달 시간이 제한되는 다중 홉 멀티캐스트 네트워크에서 선박 내 무선 네트워크 기술로 주요하게 활용 되고 있는 지그비 기술의 플러딩 기법과 비교하여 중계 기법을 위한 추가적인 정보 교환 없이 아웃리지 확률과 총 소모 전력 사이의 관계에서 제안하는 방식이 더 우수함을 실험을 통해서 확인 하였다.

Key Words : distributed multi-hop multicast, relay decision scheme, power control scheme, delay constraint, energy efficiency, outage probability

ABSTRACT

Distributed relay scheme for wireless ad hoc multi-hop multicast network composed of low-power and low-complexity wireless devices with high density is proposed. The proposed relay scheme is shown to be better than flooding, which is the distributed relay scheme applied to ZigBee, in the outage probability and the multicast transmission rate by simulations.

I. 서 론

선박 건조 기술과 접목된 정보 통신 기술은 선박 네트워크 기반 스마트 선박 건조를 가능하게 하며, 스마트 선박에서는 선박 내 상황의 실시간 모니터링을

통해 안전하고 경제적인 항해, 승선 인원 보호 및 선박 유지 보수를 가능하게 한다¹⁾. 무선 멀티캐스트 통신은 여러 사용자에게 동시에 정보를 전달할 수 있는 방법으로서, 선박 네트워크에 구현된 무선 멀티캐스트 통신을 활용하여 선박 내 상황을 주파수 효율적인 방

※ 이 논문은 2015년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2014R1A2A2A01007254).

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT 융합고급인력과정지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2015-H8601-15-1006).

♦ First Author : School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University, bhko@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University, ks.kim@yonsei.ac.kr, 종신회원

* 연세대학교 전기전자공학과 디지털통신 연구실, puco201@dcl.yonsei.ac.kr, 학생회원

** 목포대학교 정보전자공학과 srlee@mokpo.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2014-04-147, Received April 30, 2015; Revised May 4, 2015; Accepted May 4, 2015

법으로 송신 인원들이 공유할 수 있다. 하지만 선박 내 통신 환경은 방수문, 철제 강판 등이 곳곳에 설치되어 긴 통달 거리의 무선 신호 전달이 용이하지 않은 환경이다^[2]. 또한 전력 공급이 제한되는 선박 내 환경에서는 에너지 효율적인 다중 홉 신호 전달이 필요하다. 하드웨어 기술의 발전은 무선 기기의 소형화와 경량화를 가속시킴으로서 저 복잡도 저 전력 무선기기 네트워크 구성을 가능하게 한다.

선박 네트워크에는 무선랜, 블루투스, 지그비와 같이 다양한 이기종 네트워크가 혼재한다. 위의 것들 중에서 지그비는 저 전력, 저 비용 특성을 가진 근거리 무선 통신 기술로서 다양한 네트워크 토폴로지와 다수의 무선 기기 지원이 가능하여 선박 내 무선 네트워크 구축에 적용되는 대표적인 기술이다^{[2][3]}. 그리고 플러딩(flooding)은 지그비에서 사용되는 다중 홉 멀티캐스트 중계 방식이다. 플러딩 기법은 데이터 수신에 성공한 노드들이 추가적인 정보 없이 중계 여부를 스스로 결정하는 방식으로 복잡도가 낮은 장점이 있지만 노드의 밀도가 증가함에 따라 불필요한 중계가 증가한다^[4].

다중 홉 멀티캐스트 통신에서 중복 중계를 줄이기 위한 최소 크기 중계 노드 집합을 결정하는 것은 MCDS(minimum connected dominating set)를 구하는 것이다^[4]. 하지만 이것을 결정하는 것은 모든 노드의 위치를 알아야 할 뿐 아니라 NP-난해 문제이다. 그러므로 MCDS에 근사한 중계 집합을 결정하기 위한 많은 연구가 진행되었다^[4]. 하지만 위의 방법들은 노드의 수가 증가하고 네트워크 토폴로지가 동적으로 변함에 따라 필요한 정보가 증가하므로 정보 전달 시간이 정해져 있고 저 전력 기반 낮은 복잡도와 낮은 연산량을 요구하는 상황에 적합하지 않다. [4]에서는 다중 홉 멀티캐스트 통신에서 동일한 정보를 전달하는 다른 노드의 신호를 간섭으로 간주하는 직교 전송 방식을 고려한다. 반면 [5]에서는 동일한 정보를 여러 노드들이 동시에 전송 하는 것을 허용하는 비 직교 전송 방식을 고려한다. 수신 노드의 수 n 이 무한하게 증가할 때 직교 전송 방식에서는 모든 수신 노드에게 전달 가능한 최대 전송률이 $\theta(1)$ 이 되지만, 비 직교 전송 방식에서는 $\theta(\log n)$ 으로 증가 한다^[5]. 그리고 비 직교 전송 방식이 직교 전송 방식과 비교하여 메시지 전달 시간 측면에서도 이득이 있다.

본 논문에서는 선박 내 상황 정보 공유를 목적으로 하는 무선 멀티캐스트 네트워크를 위한 비 직교 전송 방식 기반 분산적인 다중 홉 멀티캐스트 중계 방식을 제안한다. 네트워크 내에서 제한된 시간 내에서 소스

노드의 정보를 수신 못한 노드의 비율을 아웃티지 확률로 정의하고, 총 에너지 소모와 아웃티지 확률과의 관계를 성능 척도로 사용한다. 제한된 영역에서 무선 노드의 밀도가 증가함에 따라 다중 홉 전송 시 짧은 송신 거리로 인한 송신 전력이 감소하므로 그것과 비교하여 무시할 수 없는 크기의 송신기 프로세싱 전력을 고려한다. 위와 같은 환경에서 중계 노드 결정을 위한 메시지 교환 없이 중복 재전송을 줄여서 아웃티지 확률을 감소시키는 중계 노드 결정 방식을 제안 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모형에 대해 설명한다. III장에서는 제안하는 다중 홉 멀티캐스트 전력 제어 기법 및 중계 기법을 설명한다. 그리고 IV장에서는 실험을 통하여 기존의 기법과 제안하는 기법의 성능을 비교한다.

II. 시스템 모형

본 논문에서는 선박 내 임의의 지역에서 발생한 선박 내 상황을 공유하기 위한 통신 환경을 간략화하여 소스 노드가 중심에 있고 단위 면적당 노드의 수가 λ 일 때, 노드들의 위치는 균일한 분포를 갖는 무선 애드 혹 네트워크를 고려한다. 그림 1에서와 같이 소스 노드로부터 반지름이 R 인 원 안에 존재하는 모든 노드들은 소스 노드의 목적지 노드이다. $\mathbf{x}_0 = (0, 0)$ 은 소스 노드의 위치 벡터이고, $\mathbf{x}_k \in \Phi (k > 0)$ 는 목적지 노드의 위치 벡터이다. 이 때, Φ 은 노드 위치 벡터의 집합이다. 소스 노드에서 발생하는 정보는 개별적으로 부호화된 패킷들로 나누어진다. 한 개의 패킷은 길이가 τ_p (초)인 송신 슬롯 동안 전송률 r (bps/Hz)로 시스템 대역폭 B (Hz)을 통해서 송신 된다. 각 패킷은 소스 노드와 목적지 노드들에 의해서 다중 홉 방식으로 중계 된다. 전송률 r 과 다중 홉 수 N 은 소스 노드에 의해서 결정되고, 이 값들은 패킷이 전송되기 전에 목적지 노드에게 미리 전달된다고 가정한다.

그림 1에서처럼 소스 노드에서 전송된 각 패킷은 이후 $N-1$ 개의 송신 슬롯 동안 다중 홉 방식으로 중계 된다. 각 슬롯에서 패킷 수신에 성공한 목적지 노드들은 측정된 수신 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio, SNR) γ 와 중계 확률 함수 $q(\gamma)$ 를 사용하는 중계 결정 방식 $I(q(\gamma)) \in \{0, 1\}$ 으로 다음 슬롯에서의 패킷 중계 여부를 결정한다. 소스 노드는 중계 확률 함수 $q(\gamma)$ 와 송신 전력 P_{tx} 를 결정하고 앞의 r, N 과 함께 방송한다. 그리고 중계 결정 방식 I 를 사용하여 i 번째 송신 슬롯에서 데이터 패킷을 전송하는 노드들

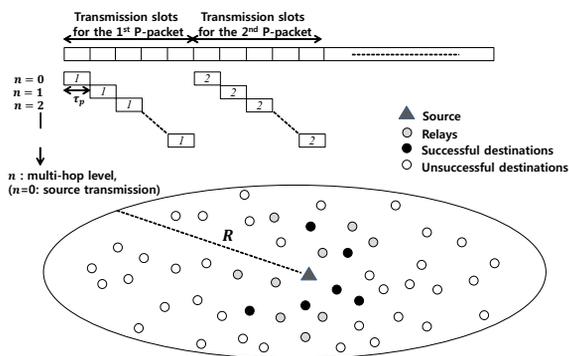


그림 1. 네트워크 모형
Fig. 1. Network model

의 집합을 $\mathcal{E}_{tx}^{\phi, \Pi}[i]$ 로 표현할 때, 0번째 송신 슬롯에서 소스 노드가 패킷을 전송한 후 $i > 0$ 번째 송신 슬롯에서 패킷을 중계하는 모든 $k \in \mathcal{E}_{tx}^{\phi, \Pi}[i]$ 번째 목적지 노드들은 [5]에서처럼 시간 동기를 맞추어서 동시에 전송한다고 가정한다. 각 노드에서 소비되는 전체 전력 P_{tot} 는 송신 신호 전력 P_{tx} , 송신기와 수신기 회로에서 각각 소모되는 전력 P_{tp} 와 P_{rp} 의 합으로 다음과 같이 정의한다.

$$P_{tot} = P_{tx} + P_{tp} + P_{rp}. \quad (1)$$

송수신기 회로는 기적 대역(baseband) 신호 처리부와 무선 주파수(radio frequency, RF) 신호 처리부로 구성되고, 송수신기 회로의 기적 대역 신호 처리부에서 소모되는 전력 P_{tb} 와 P_{rb} 은 부호기(encoder) 및 변조기(modulator), 그리고 복호기(decoder) 및 복조기(demodulator)에서 소모되는 전력의 합으로 각각 정의한다. 그리고 무선 주파수 신호 처리부에서 소모되는 전력 P_{tc} 와 P_{rc} 는 [6]에서처럼 디지털-아날로그 변환회로(Digital-to-analog converter, DAC), 아날로그-디지털 변환회로(Analog-to-digital converter, ADC), 필터(filter), 주파수 혼합기(mixer), 저잡음 증폭기(low noise amplifier, LNA), 국부 발진기(local oscillator, LO), 그리고 주파수 증폭기(Intermediate Frequency amplifier, IFA)에서 소모되는 전력의 합으로 각각 정의한다. 앞에서 언급한 송수신기 회로의 블록들은 심볼 전송율에 비례하여 전력 소모가 증가하는 블록, 비트 전송율에 비례하여 전력 소모가 증가하는 블록, 그리고 전송율과 대역폭 변화에 관계없이 전력 소모가 대략 일정하게 유지되는 블록으로 구별된다. 그리고 P_{tp} 와 P_{rp} 은 [7]을 참조하여 유사한 방법으로 다음과 같이 정의한다.

$$P_{tp} = P_{tb} + P_{tc} = (\theta_1 + \theta_2 r)B + \theta_3, \quad (2)$$

$$P_{rp} = P_{rb} + P_{rc} = (\theta_4 + \theta_5 r)B + \theta_6. \quad (3)$$

위 식에서 θ_1 과 θ_4 는 심볼 전송율에 비례하여 전력 소모가 증가하는 송수신기의 변조기와 DAC, 그리고 복조기와 ADC에 의해서 각각 결정된다. 그리고 θ_2 과 θ_5 는 비트 전송율에 비례하여 전력 소모가 증가하는 부호기와 복호기에 의해서 각각 결정된다. 그리고 θ_3 과 θ_6 는 DAC와 ADC를 제외한 송수신기 회로의 무선 주파수 신호 처리부와 네트워크 카드에 의해서 각각 결정된다. 본 논문에서는 [5]에서처럼 협대역 신호를 고려하여 거리가 다른 노드들로부터 전송된 신호의 전파 지연에 의한 차이는 무시할 수 있다고 가정한다. 이 때 i 번째 송신 슬롯에서 k 번째 목적지 노드의 수신 신호 대 잡음 비 $\gamma_k^{\phi, \Pi}[i]$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma_k^{\phi, \Pi}[i] = \frac{1}{BN_0 N_f} \left| \sum_{m \in \mathcal{E}_{tx}^{\phi, \Pi}[i]} \sqrt{GP_{tx}} d_{k,m}^{-\alpha} h_{k,m}[i] \right|^2. \quad (4)$$

위 식에서 $d_{k,m}^{-\alpha} = |x_k - x_m|^{-\alpha}$ 와 $|h_{k,m}|$ 은 k 번째 목적지 노드와 m 번째 중계 노드 사이의 거리 감쇠와 분산이 1인 레일리 블록 페이딩을 나타낸다.

그리고 G 는 송신 안테나 이득, 수신 안테나 이득, 그리고 단위 거리 당 감쇠 이득을 포함하는 단위 거리 당 전송 이득 값이며 N_0 와 N_f 는 각각 가우시안 잡음의 전력 스펙트럼 밀도와 잡음 지수이다. i 번째 송신 슬롯에서 패킷 수신에 성공한 목적지 노드의 집합 $\mathcal{E}_{rx}^{\phi, \Pi}[i]$ 은 수신 신호 대 잡음비가 수신 시도를 위한 문턱 값 η 보다 높은 노드 중에서 수신에 성공한 노드의 집합으로 정의하고, η 은 수신 시도를 위한 타겟 비트 오류율 ζ 으로 결정한다. 노드의 수신 성공 여부는 γ , r 그리고 변조 방식 M 에 의해서 결정되는 AWGN 채널의 비트 오류율 $P_M(\gamma|r)$ ^[8], 베르누이 프로세스 Ψ 로 다음과 같이 결정한다.

$$\mathcal{E}_{rx}^{\phi, \Pi}[i] = \{k | k \in \mathcal{E}_{trial}^{\phi, \Pi}[i], \Psi(P_{err}(\gamma_k^{\phi, \Pi}[i]|r)) = 1\}, \quad (5)$$

$$\mathcal{E}_{trial}^{\phi, \Pi}[i] = \{k | \gamma_k^{\phi, \Pi}[i] \geq \eta\}, \quad (6)$$

$$\eta = P_M^{-1}(\zeta|r). \quad (7)$$

수식 (7)의 $\varepsilon_{rx}^{\phi, \Pi}[i]$ 에 속한 노드 중에서 중계 확률 함수 $q(\gamma)$ 에 따라 $i+1$ 번째 송신 슬롯에서 패킷 송신을 결정할 노드들의 집합 $\varepsilon_{tx}^{\phi, \Pi}[i+1]$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{tx}^{\phi, \Pi}[i+1] \\ = \{k|k \in \varepsilon_{rx}^{\phi, \Pi}[i], \Pi(q(\gamma_k[i]))=1\}. \end{aligned} \quad (8)$$

그리고 N 홉 동안 Φ 에 위치하고 중계 결정 방식 Π 를 사용하는 전체 노드들에 의해서 한 비트 당 소모되는 총 에너지는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} W_{tot}^{\phi, \Pi} \\ = \frac{1}{rB} \sum_{i=0}^{N-1} \left((P_{tp} + P_{tx}) |\varepsilon_{tx}^{\phi, \Pi}[i]| \right. \\ \left. + P_{rp} |\varepsilon_{trial}^{\phi, \Pi}[i]| \right) \end{aligned} \quad (9)$$

III. 제안하는 다중 홉 멀티캐스트 전력 제어 기법 및 중계 기법

본 논문에서 제안하는 전력 제어 기법과 중계 확률 함수는 매 홉에서 동일하도록 소스 노드에서 결정하여 전달한다. 전력 제어 기법은 매 i 번째 홉에서의 목표 한 홉 거리 d^* 내에 위치한 목적지 노드들에게 전송률 r (bps/Hz)인 패킷을 전달하도록 정한다. 송신 신호 전력 P_{tx} 는 수식 (4)와 AWGN 채널의 비트 오류율 $P_M(\gamma|r)$ 로부터 송신 노드에서 d^* 만큼 떨어진 거리에서의 비트 오류율이 χ 가 되도록 다음과 같이 결정한다.

$$P_{tx} = P_M^{-1}(\chi|r)BN_0N_f(d^*)^\alpha G^{-1}. \quad (10)$$

제안하는 중계 방식은 중복 전송을 줄이기 위하여 송신 노드로부터 가까운 곳에 위치한 노드가 중계 노드로 동작하는 것을 제한하고자 중계 가능 노드 γ 의 상한 값을 정한다. 그리고 매 i 번째 홉에서 목표 영역 R_i 내의 목적지 노드들의 γ 의 확률 분포 함수가 대략 일정하게 유지되도록 하기 위하여 중계 가능 노드 γ 의 하한 값을 다음과 같이 정한다.

$$\gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\min} + \gamma_{width}. \quad (11)$$

또 한, 가까운 곳에 위치한 노드가 동시에 중계 노드로 동작하는 것을 줄이기 위하여 중계 확률 q_{tx} 와 베르누이 프로세스로 중계 결정 방식을 다음과 같이 정한다.

$$\Pi(q(\gamma)) = \Psi(q(\gamma)), \quad (12)$$

$$q(\gamma) = \begin{cases} q_{tx}, & \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\min} + \gamma_{width}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

제안하는 중계 결정 방식 Π 의 중계 확률 함수 $q(\gamma)$ 는 홉에 상관없이 $\mathbf{z} = (\gamma_{\min}, \gamma_{width}, q_{tx})$ 로 결정된다. 매 홉에서 목적지 노드들의 γ 의 확률분포가 대략 일정하게 유지되는 거리를 한 홉 거리 $d^{\phi, \Pi(\mathbf{z})}$, 그 때의 다중 홉 수 $N(d^{\phi, \Pi(\mathbf{z})}) = \left\lceil \frac{R}{d^{\phi, \Pi(\mathbf{z})}} \right\rceil$ 으로 정의할 때, \mathbf{z} 는 $W_{tot}^{\phi, \Pi(\mathbf{z})}$ 과 목표 한 홉 거리 d^* 및 목표 한 홉 아웃티지 확률 P_{out}^* 의 오차, $\xi^{\phi, \Pi(\mathbf{z})}$,의 곱으로 아래에서 정의된 목적 함수 $f(\mathbf{z})$ 을 최소로 하도록 다음과 같이 결정한다.

$$\mathbf{z}^* = \underset{\mathbf{z}}{\operatorname{argmin}} E_{\phi} \left[W_{tot}^{\phi, \Pi(\mathbf{z})} \left\{ \frac{\xi^{\phi, \Pi(\mathbf{z})} - \rho}{1 + e^{-v(\xi^{\phi, \Pi(\mathbf{z})} - \rho)}} + \rho \right\} \right], \quad (14)$$

$$\xi^{\phi, \Pi(\mathbf{z})} = \left(1 - \frac{d^{\phi, \Pi(\mathbf{z})}}{d^*} \right)^2 + \left(1 - \frac{P_{out}^{\phi, \Pi(\mathbf{z})}}{P_{out}^*} \right)^2, \quad (15)$$

$$\overline{P_{out}^{\phi, \Pi(\mathbf{z})}} = \frac{1}{N(d^{\phi, \Pi(\mathbf{z})})} \sum_{i=0}^{N(d^{\phi, \Pi(\mathbf{z})})-1} P_{out}^{\phi, \Pi(\mathbf{z})}[i]. \quad (16)$$

위 식에서 $\rho \approx 0$ 와 $v \gg 1$ 은 $\xi^{\phi, \Pi(\mathbf{z})} \leq \rho$ 일 때에는 목적 함수가 $W_{tot}^{\phi, \Pi(\mathbf{z})}$ 에 비례하여 증가하도록 하고, $\xi^{\phi, \Pi(\mathbf{z})} > \rho$ 인 경우에는 목적 함수가 $W_{tot}^{\phi, \Pi(\mathbf{z})} \xi^{\phi, \Pi(\mathbf{z})v}$ 에 비례하여 증가하도록 정해지는 상수이다. 본 논문에서는 $\rho = 10^{-3}$, $v = 10^6$ 으로 정한다.

IV. 실험 결과

본 논문의 실험에서는 원 모양의 한 개의 애드 혹 멀티 캐스트 네트워크 환경을 고려한다. 그리고 2.4 GHz 주파수 대역에서 사용하는 지그비의 파라미터를 실험 파라미터로 표 1에서처럼 사용한다. 비 위상 동기(non-coherent) 수신기 사용을 가정하고, 그 때의

표 1. Simulation parameters

| Parameters | Setting |
|------------|-------------------------|
| α | 4 |
| M | OQPSK, 16-ary |
| r | 0.125 bps/Hz |
| B | 2 MHz |
| N_0 | -173.8 dBm/Hz |
| N_f | 10 dB |
| f_c | 2.4 GHz |
| G | 3.427×10^{-15} |
| θ_1 | 1.683×10^{-9} |
| θ_2 | 10^{-12} |
| θ_3 | 1.274 |
| θ_4 | 6.71×10^{-10} |
| θ_5 | 10^{-12} |
| θ_6 | 0.5544 |

AWGN 채널 비트 오류율^[8]로 수신 성공 여부를 결정한다. 송수신기의 전력 소모에 관한 수식 (2)와 (3)의 파라미터는 [7]의 파라미터를 동일하게 사용한다. 단, [7]에서 고려한 비터비 복호기 사용으로 인한 전력 소모는 고려하지 않는다. 그리고 $B \log_2 B$ 에 비례하여 전력 소모가 증가하는 [7]의 OFDM의 FFT/IFFT 블록 대신에 B 에 비례하여 전력 소모가 증가하는 지그비의 직접 확산 변조(direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) 방식의 확산기 블록을 고려한다. 중계 확률 q_{tx} 를 고정하면 수식 (14)의 개형은 $(\gamma_{min}, \gamma_{width})$ 에 관한 단봉 함수(uni-modal function)임을 실험을 통하여 확인하였다. 따라서 그림 2에서는 $d^* = 2.5$, $P_{out}^* = 0.5$, $\rho = 10^{-3}$, $\nu = 10^6$ 이고, $q_{tx} = 1$ 로 고정시켰을 때 반복 국부 최적화 (iterative local optimization) 알고리즘 MADS(mesh adaptive direct search)^[10]를 이용하였다. 그리고 수식 (14)의 준 최적해 $(\gamma_{min}, \gamma_{width})$ 를 찾는 반복 과정과 매 과정에서의 $d^{\phi, \Pi(z)}$ 및 $P_{out}^{\phi, \Pi(z)}$ 을 실험을 통하여 구하였다. 그리고 수식 (14)의 $e^{\phi, \Pi(z)} \approx 0$ 이 되도록 하는 $(\gamma_{min}, \gamma_{width})$ 을 결정할 수 있음을 확인하였다.

그림 3은 MADS 알고리즘을 사용하여 다양한 q_{tx} 에 대한 준 최적해 $(\gamma_{min}(q_{tx}), \gamma_{width}(q_{tx}))$ 를 획득한 실험 결과 및 목적 함수 결과를 보여준다. 중계 확률이 1에서 0.1까지 감소할 때, 준 최적해 $\gamma_{min}(q_{tx})$ 은

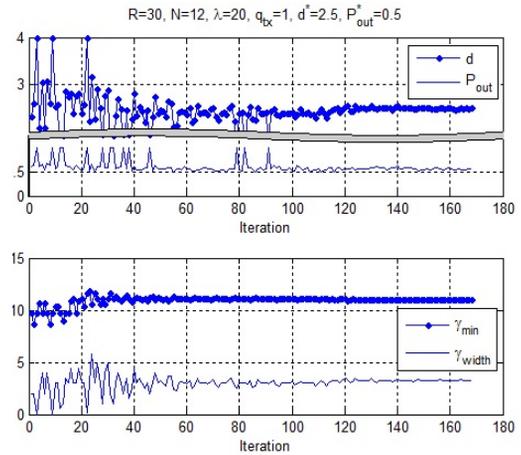


그림 2. 고정 중계 확률에서 준 최적 중계 함수 결정
Fig. 2. Decision of sub-optimal relay scheme with $q_{tx}=1$

감소하고 $\gamma_{width}(q_{tx})$ 은 증가함에 따라 $e^{\phi, \Pi(z)} \approx 0$ 이고 목적 함수 값이 대략 일정하게 유지된다. 그러므로 q_{tx} 에 관계없이 d^* 과 P_{out}^* 을 만족하기 위한 평균 중계 노드 수는 대략 일정하다. 이 때, 중계 확률 q_{tx} 이 낮은 준 최적 중계 기법을 사용할수록 후보 중계 노드 수가 증가한다. 그러므로 q_{tx} 을 낮춤으로서 연속되는 정보 전달을 위한 개별 노드의 전력 제한 문제가 완화되어 전체 네트워크의 안정성 및 연결성이 향상될 수 있다.

그림 4의 실험에서는 허용되는 최대 다중 홉 수 $N=10, 15$ 이고, 전체 아웃티지 확률 제한 조건이 1%인 상황을 고려한다. 이 때, 평균 총 소모 에너지와 평균 전체 아웃티지 확률 사이의 관계를 통해 제안하는 중계 기법과 지그비에서 활용되는 확률 플래딩 기법을 비교한다. 플래딩 기법의 중계 확률 q_{tx} 은 실험을

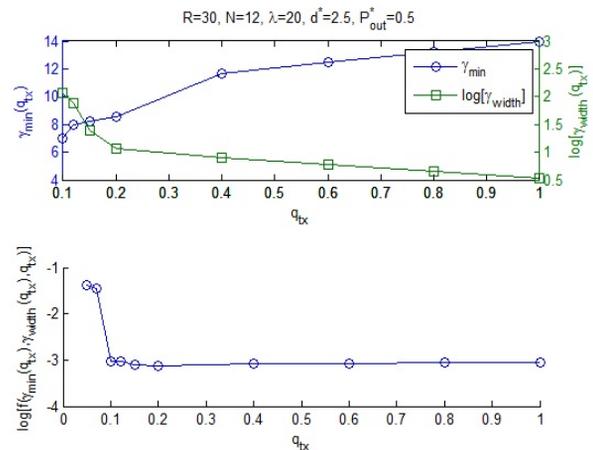


그림 3. 준 최적 중계 기법 및 목적 함수 결과
Fig. 3. Sub-optimal relay scheme and objective result

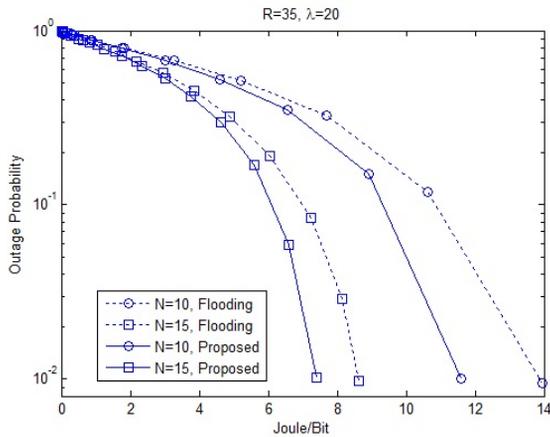


그림 4. 전체 아웃티지 확률과 평균 총 에너지 소비 관계
Fig. 4. Ouage probability and energy consumption

통해 N 에 대한 조건에 따라 전체 아웃티지 조건을 만족하는 최소 확률 0.058과 0.018으로 각각 정하였다. 이 때, N 이 증가함에 따라 전체 아웃티지 확률을 만족하기 위해 필요한 평균 총 소모 에너지는 감소한다. 제안하는 기법에서는 각 N 에 대한 플러딩 기법의 $(d^{\phi, \Pi}, P_{out}^{\phi, \Pi})$ 결과가 (4.38, 0.96), (2.91, 0.76)임을 알고, N 과 전체 아웃티지에 대한 제한 조건을 만족하면서 에너지 소모를 줄일 수 있도록 플러딩 기법 보다 (d^*, P_{out}^*) 을 낮추어 (4.16, 0.91), (2.65, 0.74)으로 임의로 정하였다. 그리고 $q_{tx} = 0.3$ 으로 임의로 고정하고 MADS 알고리즘을 사용하여 목적 함수 수식 (14)의 준 최적해 $(\gamma_{min}, \gamma_{width}, q_{tx})$ 을 (3, 4, 0.3), (4.85, 2.7, 0.3)으로 정하였다. 제안하는 중계 기법이 플러딩 기법과 비교하여 에너지 효율적인 방식임을 그림 4의 결과를 통해 확인하였다.

그림 5의 실험에서는 그림 4와 동일한 플러딩 기법

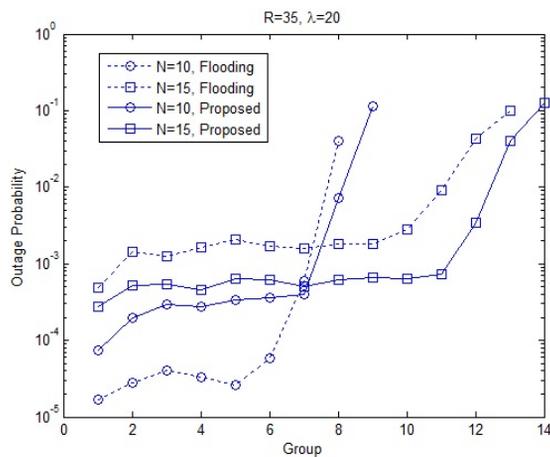


그림 5. 거리에 따른 그룹 아웃티지 확률
Fig. 5. Outage probability in each group

과 제안하는 중계 기법을 사용한다. 그림 5는 각 기법에서 획득한 한 홉 거리에 따라 단말 그룹을 정하였을 때, N 홉 전송이 모두 끝난 후 각 그룹에서의 아웃티지 확률 결과를 보여준다. 네트워크 경계에 가까워 위치할수록 주변 그룹에서의 중계가 감소하므로 그룹 아웃티지 확률은 증가하고, 이것이 전체 아웃티지 확률의 병목이 되는 것을 확인한다. 플러딩 기법과 구별되게 제안하는 중계 기법은 제한 조건 내에서 (d^*, P_{out}^*) 을 자유롭게 조절 가능하게 함으로서 $N=10$ 일 때는 소스 노드 근처에 위치한 그룹에서의 과도한 중복 전송을 줄이고 전체 아웃티지 확률 조건을 만족하기 위해 필요한 에너지 소모를 줄일 수 있다. 그리고 $N=15$ 으로 지연 조건이 완화되면 전체 아웃티지 확률 조건을 만족하면서 매 홉에서 d^* 을 줄임으로서 필요한 에너지 소모를 줄일 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 제안하는 다중 홉 멀티캐스트 중계 기법과 종래 기법을 사용할 때에 아웃티지 확률과 평균 총 소모 에너지 사이의 관계를 실험으로 비교하였다. 그리고 실험 결과를 통해서 제안하는 방식이 기존 방식 보다 우수함을 확인하였다. 이 후에는 최적 목표한 홉 거리와 최적 목표한 홉 아웃티지 확률을 구하고 이를 만족하는 최적 중계 기법을 설계한다.

References

- [1] S. H. Lee, J. H. Kim, K. D. Moon, K. I. Lee, and J. H. Park, "Performance analysis on integrated ship area network," *J. KICS*, vol. 38C, no. 3, pp. 247-253, Mar. 2013.
- [2] Y. S. Moon, Y. C. Bae, J. K. Park, and S. H. Roh, "The implementation of wire and wireless integration module of Zigbee and optical communication for ship area network," *J. KIECS*, pp. 428-434, vol. 5, no. 5, Oct. 2010.
- [3] K. Y. Kim, B. S. Jang, M. A. Jeong, J. W. Kim, Y. S. Lim, and S. R. Lee, "Ship area network(SAN) technology analysis for smart ship building," in *Proc. KICS Conf.*, pp. 103-104, Nov. 2010.
- [4] T. Camp and B. Williams, "Comparison of

broadcasting techniques for mobile ad hoc networks,” in *Proc. ACM Int. Symp. on Mobile Ad Hoc Netw. and Comput. (MobiHoc)*, pp. 194-205, Jun. 2002.

- [5] B. S.-Mergen and M. C. Gaspar, “On the broadcast capacity of wireless networks with cooperative relays,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 8, pp. 3847-3861, Aug. 2010.
- [6] C. Shuguang, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, “Energy-constrained modulation optimization,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 4, no. 5, pp. 2349-2360, Sept. 2005.
- [7] O. Lee, J. Kim, and S. Choi, “WiZizz: Energy efficient bandwidth management in IEEE 802.11ac wireless networks,” to appear in *Proc. IEEE SECON*, Jun. 2015.
- [8] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 2001.
- [9] P. Chen, B. O’Dea, and E. Gallaway, “Energy efficient system design with optimum transmission range for wireless ad hoc networks,” in *Proc. IEEE ICC*, vol. 2, pp. 945-952, 2002.
- [10] C. Audet and J. E. Dennis Jr., “Mesh adaptive direct search algorithms for constrained optimization,” *SIAM J. Optim.*, vol. 17, no. 1, pp. 188-217, 2006.

고 병 훈 (Byung Hoon Ko)



2006년 8월 : 연세대학교 전기 전자 공학부 졸업 (공학사)
 2007년 2월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합 과정
 <관심분야> 애드혹 네트워크, 계층 간 최적화

전 기 준 (Ki Jun Jeon)



2008년 2월 : 경희대학교 전기 전자 공학과 졸업 (공학사)
 2010년 2월 : 연세대학교 전기 전자 공학과 석사 (공학 석사)
 2010년 3월~현재 : 연세대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 정보이론, 소스 채널 코딩, 영상 코딩

이 성 로 (Seong Ro Lee)



1987년 2월 : 고려대학교 전자 공학과 졸업 (공학사)
 1990년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학 석사)
 1996년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학 박사)
 2005년 3월~현재 : 목포대학교 정보공학부 정보전자공학전공 부교수
 <관심분야> 디지털통신 시스템, 이동 및 위성통신 시스템, USN/텔레미틱스응용분야, 임베디드시스템

김 광 순 (Kwang Soon Kim)



1994년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학 석사)
 1999년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학 박사)
 1999년 3월~2000년 3월 : Dept. ECE, UC San Diego, 박사 후 연구원
 2000년 4월~2004년 2월 : 한국 전자 통신 연구원 선임연구원
 2004년 3월~2009년 2월 : 연세대학교 전기전자공학부 조교수
 2009년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 부교수
 <관심분야> 통신이론, 변복조 방식, 다중사용자/다중셀 다중안테나 시스템, 애드혹 및 이종 셀룰러 네트워크의 용량 및 계층간 최적화