

전달 시간 제한이 있는 브로드캐스트 아웃티지 확률을 감소시키는 분산적인 다중 홉 중계 기법

고병훈*, 변일무*, 이두호*, 전기준*, 김범무**, 이성로**, 김광순^o

Distributed Multi-Hop Relay Scheme to Reduce Delay-Constrained Broadcast Outage Probability

Byung Hoon Ko^{*}, Ilmu Byun^{*}, Duho Rhee^{*}, Ki Jun Jeon^{*}, Beom Mu Kim^{**},
 Seong Ro Lee^{**}, Kwang Soon Kim^o

요 약

본 논문에서는 수신 노드의 수가 증가하고 전달 제한 시간이 있는 브로드캐스트 센서 네트워크에서 아웃티지 확률을 감소시킬 수 있는 다중 홉 중계 방식을 제안한다. 패킷을 수신한 여러 개의 노드들이 분산 빔 형성 기법과 같이 동시에 패킷을 전송하는 다중 홉 중계 방식을 고려했다. 그리고 제한된 전달시간 내에서 패킷을 전송하는 데에 소모되는 평균 에너지 제한 조건을 만족 시키면서 패킷 수신에 성공한 모든 노드가 중계 노드로 동작하기 위한 채널 접속 제어 기법과 송신 전력 제어 방식을 제안한다. 그리고 센서 네트워크 구축에 사용되는 지그비 기술의 다중 홉 브로드캐스트 중계 방식인 플러딩 기법과 비교하여 제안하는 방식의 아웃티지 확률이 더 낮아지고 평균 총 수신 전송률은 증가하게 되는 것을 실험을 통해서 보인다.

Key Words : multi-hop broadcast, delay constraint, energy constraint, outage probability, distributed beamforming

ABSTRACT

Distributed multi-hop relay scheme to reduce delay-constrained outage probability for broadcast network is proposed. We consider multi-hop relay scheme, which is similar to distributed beamforming, where multiple nodes simultaneously relay packets, and we propose channel access control and power control for relaying nodes to satisfy energy constraint. Compared with flooding which is multi-hop relay scheme used for ZigBee, the proposed scheme is better in terms of outage probability and average reception throughput.

I. 서 론

본 논문에서는 센서가 수집한 정보를 제한된 전달 시간 이내에 높은 신뢰도로 네트워크 내의 모든 통신 장치가 공유하기 위한 다중 홉 브로드캐스트

전송 기법에 대해서 연구한다. 이러한 브로드캐스트 전송 기법을 요구하는 센서 네트워크 응용 분야로 국방 센서 네트워크를 예로 들 수 있다. 국방 센서 네트워크 시스템은 생화학 공격 탐지, 적의 감시 및 경계, 작전 지역 정찰 등에 활용 가능하며 신뢰성

※ 본 연구는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2011-0029321).

♦ 주저자 : 연세대학교 전기전자공학과 디지털통신 연구실, bhko@yonsei.ac.kr, 준회원

° 교신저자 : 연세대학교 전기전자공학과 디지털통신 연구실, ks.kim@yonsei.ac.kr, 종신회원

* 연세대학교 전기전자공학과 디지털통신 연구실, dlfan@dcl.yonsei.ac.kr, dhrhee@dcl.yonsei.ac.kr, 준회원, puco201@dcl.yonsei.ac.kr, 준회원

** 목포대학교 정보전자공학과, ktiger1907@mokpo.ac.kr, srlee@mokpo.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2012-01-016, 접수일자 : 2013년 1월 12일, 최종논문접수일자 : 2013년 2월 15일

있고 실시간 지원 가능한 통신을 요구한다^[1]. 위와 같은 센서 네트워크의 활용 필요성 증대, 통신 장치를 결합한 소형 센서의 발전과 비용의 감소로 센서 네트워크에서 노드의 밀도는 증가할 것으로 예상할 수 있으므로 노드의 밀도가 증가하는 센서 네트워크의 브로드캐스트 전송 기법에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 위와 같은 센서 네트워크 구축을 위한 기존 통신 기술로서 지그비 (zigbee) 통신 기술을 고려한다. 지그비 통신 기술은 통신 장치의 소형화 및 낮은 복잡도, 그리고 낮은 송신 전력 소비를 특징으로 하며 100 미터 이내 거리의 전달 범위를 갖는 통신 기술로서 센서 네트워크 구축에 많이 사용되고 있는 기술이다^[2]. 지그비 통신에서는 다중 홉 브로드캐스트 전송 방식으로 CSMA/CA (carrier sensing multiple access/collision avoidance) 기반 플러딩 (flooding) 기법을 이용한다^[3]. CSMA/CA 기반 플러딩 기법은 수신에 성공한 노드들 중에서 채널 접속 권한을 획득한 노드가 메시지를 중계하는 다중 홉 브로드캐스트 기법이다. 플러딩 기법은 분산적으로 동작 가능하고 복잡도가 낮은 장점이 있지만 수신에 성공하지 못한 노드의 위치를 고려한 중계 노드 선택을 하지 않으므로 전달 시간의 제한 조건이 있는 경우 노드의 수가 증가함에 따라 메시지를 수신하지 못하는 노드가 존재하는 확률이 높아진다.

플러딩 기법의 문제점을 해결하기 위해 [4]-[6]에서는 메시지의 중복 수신 횟수, 노드들의 위치에 관한 정보 등을 이용하여 메시지를 수신하지 못한 노드를 줄이기 위한 중계 노드를 결정하는 다중 홉 브로드캐스트 기법들을 제안하였다. [4], [5]에서는 신호의 충돌이 발생하지 않도록 하는 이상적인 채널 접속 제어 (medium access control, MAC) 방식과 다중 홉 수를 최소화 하는 라우팅 (routing)을 사용하는 경우 수신 노드의 수가 증가 하여도 전달 가능한 최대 전송률은 이론적으로 감소하지 않음을 증명하였다. [6]에서는 주변 노드들의 위치 정보를 이용하여 수신에 성공하는 노드의 숫자를 최대로 할 수 있는 중계 노드 선택으로 플러딩 기법과 비교하여 메시지 전달 시간이 감소함을 실험을 통해 확인하였다. 하지만 수신 노드의 수가 증가함에 따라 중계 노드를 선택하기 위해 저장하고 처리하는 주변 노드에 관한 정보가 증가하게 되므로 통신 장치의 낮은 복잡도와 연산을 요구하는 센서 네트워크에서 사용하기에는 적합하지 않다^[7]. 그러므로 본 논문에서는 주변 노드에 관한 정보를 이용하지 않

으면서 전달 시간의 제한 조건을 고려한 브로드캐스트 다중 홉 중계 기법을 제안한다.

플러딩 기법에서는 노드들 사이의 신호 충돌을 피하여 메시지를 전송하였지만 [8], [9]에서는 분산 빔 형성 기법과 같이 여러 개의 노드들이 동시에 메시지를 전송하는 브로드캐스트 다중 홉 중계 방식을 고려하고 수신 노드의 수가 무한하게 증가할 때 점근적인 성능 분석을 수행하였다. [8]에서는 수신 노드의 수 n 이 무한하게 증가하고 다중 홉 수가 2일 때 모든 수신 노드에게 전달 가능한 최대 전송률이 $\Theta(\log n)$ 으로 증가할 수 있음을 밝혔다. 그리고 [9]에서는 수신 노드의 수가 무한하게 증가하는 경우 소스 노드로부터의 거리에 따른 수신 성공 확률의 수치적 결과를 제시하고 직교 전송 방식으로 여러 개의 노드들이 중계하는 것과 비교하여 동시 전송이 전달 지연 시간 측면에서 이득이 있음을 보였다. 본 논문에서는 위의 이론적 결과를 바탕으로 여러 개의 노드들이 동시에 메시지를 중계하는 방식으로 제한된 전달 시간과 패킷 당 평균 송신 신호 에너지 조건을 만족시키면서 유한하게 증가하는 모든 수신 노드에게 패킷을 전달하기 위한 분산적인 채널 접속 제어 방식과 중계 노드의 송신 전력 제어 방식을 제안한다.

II. 시스템 모형

본 논문에서는 그림 1에서와 같이 소스 노드 주위 반지름이 R 인 원 모양의 클러스터 (cluster) 내에 존재하는 모든 수신 노드들이 소스 노드 (source node)가 전달하는 패킷을 수신하는 것을 목적으로

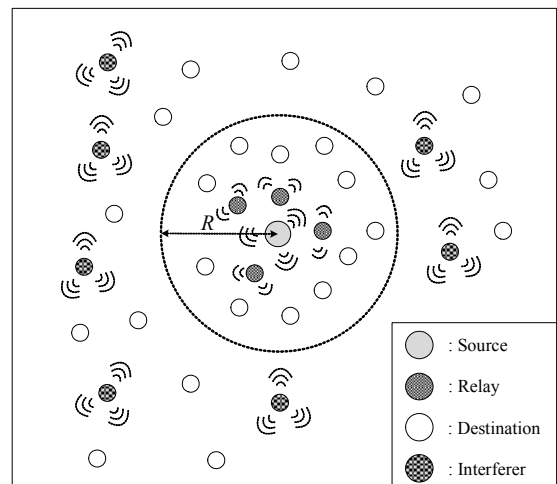


Fig. 1. Broadcast network model

하는 한 개의 브로드캐스트 네트워크를 고려한다. 소스 노드의 위치는 x 로 나타내고, $\Phi_d = \{y_1, y_2, \dots\}$ 는 클러스터 내에 존재하는 수신 노드 위치의 집합이다. 이 때 y_j 는 j 번째 수신 노드의 위치를 나타내며, $J = \{1, 2, \dots, |\Phi_d|\}$ 는 수신 노드 번호(index)의 집합이다. 이 때 Φ_d 는 단위 면적 당 평균 수신 노드의 수가 λ_d 인 균일 포아송 점 과정 (Poisson point process)을 따른다. 간섭 노드는 소스 노드와 동일한 채널 접속 제어 방식을 사용하지만 노드의 목적에 따라 다양한 신호 전달 모형을 갖는다. $\Phi_z = \{z_1, z_2, \dots\}$ 는 간섭 노드 위치의 집합으로서, z_j 는 j 번째 간섭 노드의 위치이며 단위 면적 당 평균 수신 노드의 수가 λ_z 인 균일 포아송 점 과정을 따른다. 그리고 $Z = \{1, 2, \dots, |\Phi_z|\}$ 는 간섭 노드 번호의 집합이다. 본 논문에서는 한 개의 패킷을 D 개의 슬롯동안 최대 송신 신호 에너지 W 를 소모하여 다중 홉으로 전송하였을 때, 클러스터 내에 패킷을 수신하지 못하는 노드가 존재하게 되는 사건을 아웃티지 (outage) 사건으로 정의한다. 송신 신호 에너지 W 에 관한 제한 조건은 소스 노드의 송신 전력 P_T , 전송 가능한 슬롯 수 D , 그리고 한 슬롯의 길이 τ (sec)에 의해서 다음과 같이 결정된다.

$$W \leq P_T D \tau. \quad (1)$$

소스 노드는 한 개의 패킷을 전송하기 위해 슬롯 기반 CSMA 기법을 이용하여 채널 접속 권한을 획득하고 그림 2와 같이 D 개 슬롯 길이의 CFP(contention free period)를 확보한다^[10]. 그리고 노드 간 채널 접속 경쟁이 없는 CFP동안 매 슬롯 t 에서 간섭 노드들의 신호를 고려하지 않고 채널

에 접속하여 다중 홉 방식을 통해 패킷을 전송한다. 첫 번째 슬롯에서 P_T 를 소모하여 패킷을 전송하는 소스 노드는 이 후 슬롯에서는 더 이상 패킷을 전송하지 않는다. $M^t \subset J$ 는 슬롯 t 에서 패킷 수신에 성공한 수신 노드 번호의 집합이고 $K^t \subset \left(\bigcup_{u=1}^{t-1} M^u\right) \subset J$ 는 슬롯 t 에서 패킷을 중계하는 수신 노드 번호의 집합일 때, 슬롯 t 에서 패킷 수신에 성공한 노드 $j \in M^t$ 는 슬롯 $(t+1)$ 부터 슬롯 D 동안 중계 노드로 동작하고 $j \in K^u, t+1 \leq u \leq D$ 이다. 슬롯 $t \geq 2$ 에서 패킷을 중계하는 노드 $j \in K^t$ 들은 그림 2에서와 같이 t 번째 슬롯이 시작되는 시점에서 시간 동기를 맞추어 동시에 송신 전력 P 로 전송한다. 이 때에 슬롯 t 에서 한 패킷을 전송하는 데에 소모되는 총 송신 전력 $P_R[t] = P|K^t|$ 이다. 노드들 사이의 송신 시간 동기를 맞추기 위하여 패킷을 전송하는 노드들에 의해 비컨(beacon) 신호가 주기적으로 전송된다. 그리고 본 논문에서는 [9]에서처럼 현대역 신호를 고려하여 거리가 다른 중계 노드로부터 전송된 신호의 전파 지연 (propagation delay)에 의한 차이를 무시할 수 있다고 가정하므로 슬롯 t 에서 패킷을 중계하는 노드들로부터 동시에 전송된 패킷은 분산 빔 형성 기법에서처럼 수신 노드에서 자연스럽게 결합된다^[11]. 브로드캐스트 네트워크에서는 패킷의 전달 여부를 확인하는 응답 (acknowledge character, ACK) 신호를 사용하지 않으므로 패킷 수신에 성공하지 못한 수신 노드들의 존재 유무와 상관없이 미리 정해진 D 번의 슬롯동안 재전송이 발생한다. 그리고 슬롯 t 에서 수신 노드 $j \in M^t$ 에 수신된 패킷은 슬롯 t 에 관한 정보와 패킷 전송을 위해 확보된 슬롯의 수 D 에 관한 정보를 포함하고 있다고 가정하므로 $j \in M^t$ 는 슬롯 $(t+1)$ 부터 슬

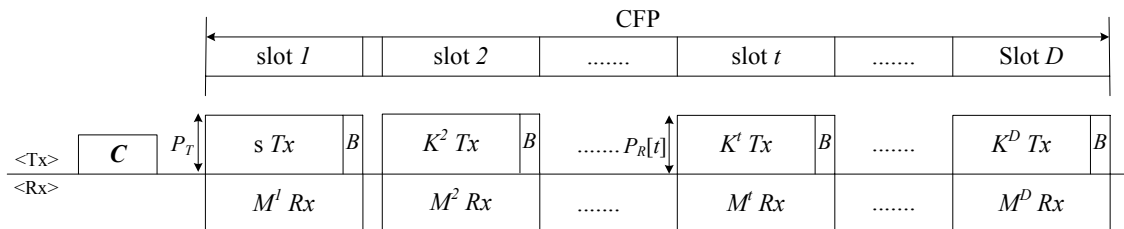


Fig. 2. Multi-hop packet relaying model
(C : CSMA, s : Source node, Tx : Packet transmission, B : Beacon transmission, Rx : Packet reception success)

롯 D 이내에서 스스로 패킷을 중계 할 수 있다.

중계 노드들은 반복 부호 (repetition code)를 사용하고 채널 부호는 이상적인 가우시안 랜덤 부호 (Gaussian random coding)를 사용한다고 가정하며 무선 채널 모형은 거리 감쇠와 레일리(Rayleigh) 블록 페이딩을 고려한다. 수식 (1)에서 노드 사이의 거리를 표현하는 $d_{xy_j} = |x - y_j|$ 을 나타내고, α 는 경로 감쇠 지수이다. 슬롯 t 에서의 $h_{xy_j}[t]$ 는 소스 노드와 j 번째 수신 노드사이의 페이딩 채널을 나타내며 평균이 0이고 분산이 1인 독립 복소 가우시안(complex Gaussian) 랜덤 변수이다. 그리고 Z^t 는 슬롯 t 에서 전송 중인 간섭 노드 번호의 집합일 때, 슬롯 t 에서 수신 노드 j 의 패킷 수신 성공 여부는 수신 신호 대 간섭 잡음 비(signal to interference plus noise ratio, SINR), $\gamma_j[t]$ 로 결정되며 $\gamma_j[t]$ 는 다음과 같다.

$$\gamma_j[t] = \begin{cases} \frac{P_T d_{xy_j}^{-\alpha} |h_{xy_j}[t]|^2}{\sum_{z \in Z^t} P_Z d_{zy_j}^{-\alpha} |h_{zy_j}[t]|^2 + N_0}, & t = 1 \\ \frac{\left| \sum_{l \in K^t} \sqrt{P} d_{ly_j}^{-\frac{\alpha}{2}} h_{ly_j}[t] \right|^2}{\sum_{z \in Z^t} P_Z d_{zy_j}^{-\alpha} |h_{zy_j}[t]|^2 + N_0}, & t \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

단, P_Z 는 간섭 노드들의 송신 전력이며 $\frac{N_0}{2}$ 는 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise)의 전력 스펙트럼 밀도이다. 슬롯 t 에서 패킷 수신 여부는 $\gamma_j[t]$ 가 전송률 r (bits/sec/Hz)인 패킷을 복호하기 위한 임계값 $\beta = 2^r - 1$ 을 넘는지 여부를 통해 결정된다. 본 논문에서 정의하는 아웃티지 사건은 D 개의 슬롯 동안 전송률이 r 인 한 개의 패킷을 소스 노드가 전송하였을 때, 클러스터 내 전체 N 개의 수신 노드 중에서 수신에 실패한 노드가 존재하는 사건이다. 그리고 $p_N(n)$ 는 전체 수신 노드의 숫자 N 에 관한 확률 질량 함수이고, $\Pr[\gamma_j^D > \beta]$ 는 수신 노드 j 가 슬롯 D 이내에 패킷 수신에 성공할 확률 일 때 아웃티지 확률의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{out}(D) &= \sum_{n=0}^{\infty} p_N(n) P_{out}(D;n), \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} p_N(n) (1 - \Pr[\gamma_1^D > \beta, \gamma_2^D > \beta, \dots, \gamma_n^D > \beta]). \end{aligned} \quad (3)$$

이 때 $\Pr[\gamma_j^D > \beta]$ 은 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} \Pr[\gamma_j^D > \beta] &= 1 - \Pr[\gamma_j[1] < \beta, \gamma_j[2] < \beta, \dots, \gamma_j[D] < \beta]. \end{aligned} \quad (4)$$

또 한 제한 시간 D 이내에 패킷 수신에 성공한 수신 노드의 평균 총 전송률 $\eta(D)$ (bits/sec/Hz)의 정의는 다음과 같다.

$$\eta(D) = \frac{r \lambda_d (1 - E_j[\Pr[\gamma_j^D > 2^r - 1]])}{D}. \quad (5)$$

III. 제안하는 다중 홉 브로드캐스트 중계 기법

시그마 기술에서 사용하는 다중 홉 브로드캐스트 기법인 CSMA/CA 기반 플러딩 기법에서는 슬롯 t 이전에 패킷을 수신하였지만 채널 접속 권한을 획득하지 못하여 중계에 참여하지 못한 수신 노드 $j \in (\cup_{u=1}^{t-1} M^u) \cap (\cup_{u=1}^{t-1} K^u)^c$ 중에서 슬롯 t 의 채널 접속 권한을 획득한 노드 k 가 패킷을 중계한다. 슬롯 t 에서 패킷을 중계하기 위해 채널 접속을 시도하던 다른 모든 노드들은 채널 사용 감지(carrier sensing)를 통해 채널이 노드 k 에 의해 사용 중인 것을 식별하고 채널 접속 시도를 중지한다. 슬롯 t 에서 한 개의 노드가 채널 접속 권한을 획득하고 송신 전력 $P = P_T$ 을 소모하여 패킷을 중계할 때, D 개의 슬롯동안 한 개의 패킷을 전송하는 데에 소모되는 송신 에너지 $W = P_T D r$ 가 된다. 그러므로 수식 (1)의 송신 에너지 제한 조건을 만족한다. 플러딩 기법은 패킷을 수신하지 못한 노드를 고려하여 중계 노드를 결정하지 않기 때문에 필요하지 않은 재전송이 발생함에 따라 제한된 D 개의 슬롯 내에 모든 수신 노드가 패킷 수신에 성공하지 못하고 아웃티지 확률 $P_{out}(D)$ 이 증가할 수 있는 한계점이 있다. 따라서 본 논문에서는 중계 노드를 결정하기 위한 복잡도는 증가시키지 않으면서

$P_{out}(D)$ 은 감소시킬 수 있도록 수신에 성공한 노드들이 [8],[9],[11] 에서처럼 동시에 채널에 접속하고 패킷 당 송신 에너지를 나누어서 패킷 중계에 참여하는 방식을 고려한다. 단위 면적 당 수신 노드의 평균 숫자 $\lambda_d = \frac{E[|J|]}{\pi R^2}$ 가 증가할 때, 패킷을 중계할 수 있는 노드의 숫자 $|\cup_{u=1}^{D-1} M^u| \leq |J|$ 도 증가하므로 수신에 성공하지 못한 노드 근처에서 패킷을 중계할 수 있는 노드가 존재하는 확률이 높아짐에 따라 $P_{out}(D)$ 은 감소할 수 있기 때문이다.

제안하는 방식은 제한된 시간 동안 패킷 수신에 성공한 노드 중에서 중계에 참여하는 평균 노드 수의 비율이 $1 - \delta, 0 \leq \delta < 1$ 가 되도록 각 노드가 패킷 중계 여부를 결정하는 방식이다. 슬롯 s 에서 패킷 수신에 성공한 노드 $j \in M^s$ 는 슬롯 s 이 후 k 번째 슬롯에서 중계 확률 $q(s, k; \delta, D, \rho)$ 로 패킷 중계 여부를 결정한다. 이 때, k 는 $1 \leq k \leq D - s$ 이다. 그리고 ρ 는 패킷 수신 이후 시간이 지나면서 패킷을 중계하는 평균 노드 수가 감소하는 비를 결정하는 값이며 $0 < \rho < 1$ 일 때, $q(s, k; \delta, D, \rho)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$q(s, k; \delta, D, \rho) = \frac{(1 - \delta)(1 - \rho)\rho^{k-1}}{1 - \rho^{D-s}} \quad (6)$$

소스 노드는 각 중계 노드에서 패킷 중계 확률 $q(s, k; \delta, D, \rho)$ 을 계산하기 위한 값 δ, D, ρ 를 미리 결정하여 패킷에 포함시킨다. 그리고 패킷을 전송하고 있는 슬롯에 관한 정보를 패킷에 포함하여 전달하도록 한다. 따라서 슬롯 s 에서 패킷을 수신한 노드는 s, δ, D, ρ 에 관한 정보를 획득하여 슬롯 s 이 후 k 번째 슬롯에서의 패킷 중계 확률 $q(s, k; \delta, D, \rho)$ 을 스스로 계산할 수 있다. 그리고 패킷을 중계할 때 각 노드에서 사용하는 송신 전력 P 는 모든 중계 노드가 동일한 값을 사용하며 패킷 당 평균 송신 에너지 제한 조건을 만족할 수 있도록 다음과 같이 결정한다.

$$P = \frac{(D - 1)P_T}{(1 - \delta)\pi R^2 \lambda_d} = \frac{(D - 1)}{(1 - \delta)} P_\mu \quad (7)$$

이 때 P 의 값을 계산하기 위한 정보 $P_\mu = \frac{P_T}{\pi R^2 \lambda_d}$ 는 소스 노드가 미리 결정하여 패킷에 포함시킴으로서 중계 노드로 동작하는 모든 노드가 송신 전력 P 로 패킷을 전송하도록 한다. 본 논문에서 제안하는 다중 홉 브로드캐스트 중계 기법을 사용하기 위해서는 s, δ, D, ρ, P 에 관한 정보가 추가적으로 전송되어야 한다. s 는 D 보다 작거나 같은 정수이고, δ, ρ 는 0과 1사이의 양자화된 값이다. 그리고 P 에 관한 정보를 전달하기 위한 P_μ 는 소스 노드의 송신 전력 P_T 의 비를 이용하여 양자화 된 값으로 전달한다. 따라서 추가적으로 전송되어야 하는 정보의 필요량은 크지 않다. 전달 제한 시간 동안 패킷을 중계하는 전체 노드 수의 평균은 다음과 같다.

$$(1 - \delta) |\cup_{s=1}^{D-1} M^s| \leq (1 - \delta)\pi R^2 \lambda_d \quad (8)$$

그러므로 D 개의 슬롯동안 모든 중계 노드가 송신 전력 P 를 사용하여 패킷을 전송할 때, 한 개의 패킷을 전송하는 데에 소모되는 평균 송신 에너지 W 는 수식 (1)의 송신 에너지 제한 조건을 만족한다.

IV. 실험 결과

본 논문의 실험에서는 정사각형 모양의 전체 네트워크 면적이 10^4m^2 이고 단위 면적 당 평균 간섭 노드의 수가 10^3 인 환경을 고려한다. 채널 접속 권한을 획득한 소스 노드와 중계 노드 주변 R 이내에는 CSMA 방식을 가정하여 전송 중인 간섭 노드가 존재하지 않는다. 그리고 반경 R 이 20m인 원 모양의 클러스터에서 제한된 전달 슬롯 수 D 가 10일 때 소스 노드의 송신 전력 P_T 는 1m 거리의 평균 수신 신호 대 잡음 비 값이 30dB가 되도록 정하였다. 그리고 간섭 노드의 송신 전력 P_Z 는 P_T 와 동일하게 하였다. 이러한 환경에서 플러딩 기법과 제안하는 기법을 사용하였을 때 그림 3에서는 평균 수신 노드 수의 증가와 패킷의 송신 전송률 r 변화에 따른 아웃티지 확률 $P_{out}(D)$ 결과를 실험하였다. 제안하는 기법을 사용하는 경우, 패킷 중계 확률의 δ 과 ρ 의 값은 각각 0.1로 정하였다. r 이

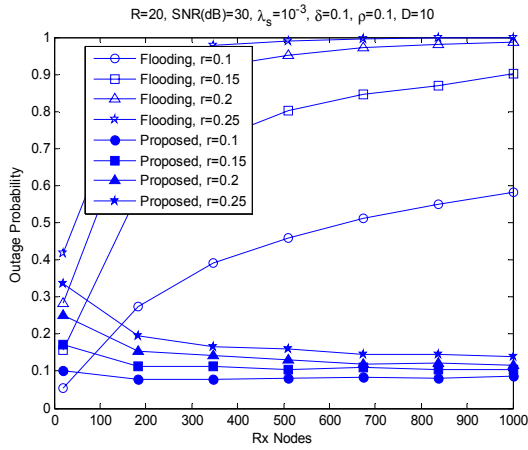


Fig. 3. Outage probability comparison for a variety of receivers' density

증가함에 따라 패킷을 수신하기 위한 수신 신호 전력의 임계값이 증가하므로 플러딩 기법과 제안하는 방식을 사용하는 두 경우 모두에서 $P_{out}(D)$ 은 증가한다. 그리고 수신 노드 수가 증가함에 따라 플러딩 기법을 사용하는 경우에는 $P_{out}(D)$ 이 항상 증가하게 된다. 하지만 r 이 낮은 실험 환경에서 제안하는 기법을 사용하는 경우에는 λ_d 가 증가할 때 $P_{out}(D)$ 이 감소 후 수렴한다. λ_d 가 증가함에 따라 증계 노드의 수가 증가하므로 수신 노드와 증계 노드 사이의 거리 감소로 경로 감쇄 손실(path loss)이 감소하고 다이버시티 이득이 증가하기 때문이다. 단, λ_d 이 작은 경우에는 증계 노드 수의 증가로 인한 충분한 다이버시티 이득을 얻지 못하고 에너지 손실의 증가로 인하여 제안하는 방식을 사용하였을 때 $P_{out}(D)$ 이 증가하는 경우가 발생한다.

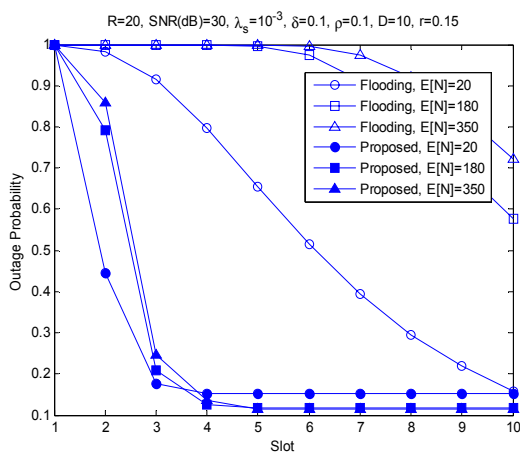


Fig. 4. Outage probability comparison at each time slot

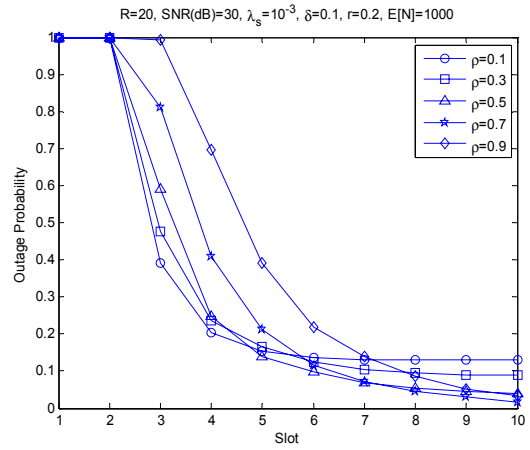


Fig. 5. Outage probability comparison for a variety of ρ

그림 4에서는 그림 3에서와 같은 실험 환경에서 r 을 0.15(bits/sec/Hz)로 고정하였을 때 시간 슬롯의 증가와 평균 수신 노드 숫자 $E[N] = \pi R^2 \lambda_d$ 의 증가에 따른 $P_{out}(D)$ 변화를 실험하였다. 제안하는 기법을 사용하는 경우, 소스 노드가 전송하는 첫 번째 슬롯 이후 시간이 지남에 따라 일정 시간까지 $P_{out}(D)$ 의 감소 기울기가 더 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 수신에 성공한 여러 개의 노드가 동시에 증계하므로 소스 노드 주위 모든 방향에서 재전송이 이루어지고 따라서 수신에 성공한 노드 수가 더 빠르게 증가하기 때문이다. 그리고 제안하는 기법을 사용하고 수신 노드의 수가 증가할 때 시간이 지남에 따라 아웃티지 확률이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 패킷 증계 확률의 ρ 를 변화시킬 때 아웃티지 확률의 실험 결과이다. ρ 가 0에 가까울수록 패킷을 수신 후에 바로 증계 노

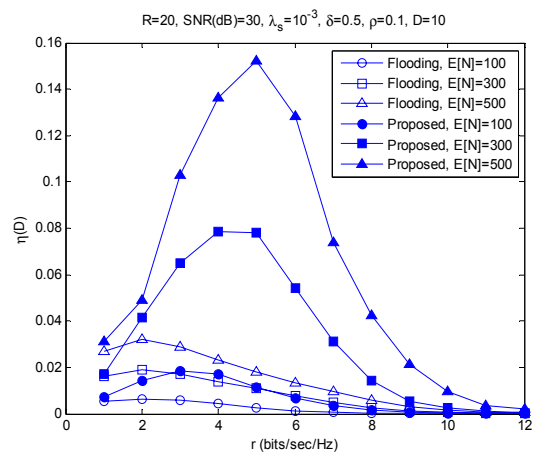


Fig. 6. Average total reception throughput for increased transmission rate

드로 동작하는 노드의 평균 숫자가 증가하고, ρ 가 증가할수록 중계 노드의 수는 제한된 전달 시간 동안 균일하게 분포한다. 그림 5의 실험 결과를 통해서 아웃티지 확률의 제한 조건 값이 큰 경우에는 ρ 를 감소시키는 것이 적합하고, 제한 조건이 엄격한 경우에는 ρ 를 증가시키는 것이 바람직하다는 것을 확인할 수 있다. 그림 6에서는 송신 전송률 r 의 증가에 따른 수신 노드의 평균 총 전송률 $\eta(D)$ 의 변화량을 평균 수신 노드의 숫자 $E[N]$ 를 변경하며 실험하였다. 수식 (5)를 통해서 알 수 있듯이 r 과 수식 (4)의 패킷 수신 성공 확률은 트레이드-오프(trade-off) 관계이다. 따라서 $\eta(D)$ 를 최대화 하는 r 이 존재하게 된다. 그리고 아웃티지 확률 결과와 비교하여 $\eta(D)$ 측면에서 제안하는 방식의 이득이 플러딩 기법과 비교하여 더욱 증가하고, 그것은 $E[N]$ 이 증가함에 따라 커지는 것을 확인할 수 있다. 왜냐하면 $\eta(D)$ 은 패킷 수신에 성공한 평균 노드 수에 비례하기 때문이다. 따라서 그림 3, 그림 4에서의 아웃티지 확률 결과 뿐 만 아니라 평균 총 수신 전송률 측면에서도 제안하는 방식이 플러딩 기법보다 더 우수한 것을 실험을 통해서 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 플러딩 기법과 비교하여 수신 노드의 수가 증가할 때 평균 송신 에너지의 제한 조건을 만족시키면서 전달 시간의 제한이 있는 브로드캐스트 아웃티지 확률을 감소시키고 평균 총 수신 전송률을 증가시킬 수 있는 다중 홉 브로드캐스트 중계 방식을 고려하였다. 그리고 중계 노드들을 위한 채널 접속 제어 기법과 전력 제어 방식을 제안하였다. 제안하는 다중 홉 중계 방식은 주변 노드들에 대한 정보를 필요로 하지 않는 분산적인 방식이고 전달해야 하는 추가적인 정보의 양이 크지 않으므로 노드의 수가 증가하고 낮은 복잡도를 요구하는 센서 네트워크 설계에 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

References

[1] S. J. Park, H. Park, and Y. H. Ham, "Key technology in a tactical sensor network," *Inf. and Comm. Mag.*, pp. 42-49, Aug. 2008. (박상

준, 박현, 함영환, "국방 센서네트워크의 핵심요소 기술", *정보와 통신*, 25권 10호, pp. 42-49, 2008년 9월.)

[2] C. Gomez, and J. Paradells, "Wireless home automation networks: a survey of architectures and technologies," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 92-101, Jun. 2010.

[3] D. Gislason, *ZigBee wireless networking*, Newnes, 2008.

[4] A. Keshavarz-Haddad, V. Ribeiro, and R. Riedi, "Broadcast capacity in wireless multihop networks," in *Proc. ACM Int. Symp. Mobile Ad Hoc Netw. Comput. (MobiCom)*, pp. 239-250, Apr. 2006.

[5] R. Zheng, "Information dissemination in power, density and interference," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Comput. Commun. (INFOCOM)*, pp.1-10, Apr. 2006.

[6] 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.

[7] G. Ding, and B. Bhargava, "Tree-based data broadcast in IEEE 802.15.4 and ZigBee networks," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol 5, no. 11, pp. 1561-1574, Nov. 2006.

[8] B. S.-Mergen, and M. C. Gaspar, "On the broadcast capacity of wireless networks with cooperative relays," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 56, no. 8, pp. 3847-3861, Aug. 2010.

[9] B. S.-Mergen, A. Scaglione, and G. Mergen, "Asymptotic analysis of multistage cooperative broadcast in wireless networks," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2531-2550, Jun. 2006.

[10] P. Baronti, P. Pillai, V. W. C. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu, "Wireless sensor networks: a survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards," *Comput. Commun.*, vol. 30, no. 1, pp. 1655 - 1695, May 2007.

[11] R. Mudumbai, D. R. Brown, U. Madhow, and H. V. Poor, "Distributed transmit beamforming:

challenges and recent progress," *IEEE Comm. Mag.*, vol. 47, no. 2, pp. 102-110, Feb. 2009.

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

변 일 무 (Ilmu Byun)



2005년 2월 연세대학교 전기전
자 공학부 졸업 (공학사)
2007년 2월 연세대학교 전기자
공학과 (공학 석사)
2007년 3월~현재 연세대 전기
전자공학과 박사과정
<관심분야> 협력 통신, 애드혹
네트워크, LDPC 부호

이 두 호 (Duho Rhee)



2004년 8월 연세대학교 기계
전자 공학부 (공학사)
2006년 8월 연세대학교 전기자
공학과 (공학 석사)
2006년 9월~현재 연세대학교
전기전자공학과 박사과정
<관심분야> 이동 통신, 적응
변조 및 부호화

전 기 준 (Ki Jun Jeon)



2008년 2월 경희대학교 전기전
자 공학과 졸업 (공학사)
2010년 2월 연세대학교 전기전
자 공학과 석사 (공학 석사)
2010년 3월~현재 연세대학교
전자공학과 박사과정
<관심분야> 정보이론, 소스-채
널 코딩, 영상 코딩

김 범 무 (Beom Mu Kim)



2012년 2월 목포대학교 정보
전자공학과 졸업 (공학사)
2012년3월~현재 목포대학교
전자 공학 석사 과정
<관심분야> Machine to machine
network communication,
Network smart device

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 정보전자
공학전공 부교수
<관심분야> 디지털통신 시스템, 이동 및 위성통신시
스템, USN/텔레미틱스응용분야, 임베디드시스템

김 광 순 (Kwang Soon Kim)



1994년 2월 한국과학기술원
전기 및 전자공학과 (공학
사)
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 전기전자공학
부 조교수
2009년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학부 부교
수
<관심분야> 통신이론, 변복조 방식, 다중사용자/다
중셀 다중안테나 시스템, 애드혹 및 이중 셀룰러
네트워크의 용량 및 계층간 최적화