

무선 센서 네트워크를 위한 간섭 모델 기반의 Cross-Layer 라우팅 기법의 설계

김헌태*, 나인호**, 주영훈**

군산대학교 BK21 지능형 임베디드시스템 인력양성사업팀*, 군산대학교 전자정보공학부**

Cross-Layer Routing Schemes based on Interference Model for Wireless Sensor Networks

Hyun Tae Kim*, In Ho Ra**, Houg Hoon Joo**

Human Resource for Intelligent Embedded System-BK21, Kunsan National University**

Abstract - 본 논문에서는 간섭 제어 토폴로지 정보를 이용한 전송 전력 제어로 간섭을 최소화할 수 있는 교차계층 계층 라우팅 기법을 제안한다. 제안된 프로토콜은 간섭 제어모델을 MAC 계층과 라우팅 계층들의 모델에 통합한다. 그 모델은 송·수신 기반의 간섭모델로 데이터 송신과 수신에 관련된 간섭 정보를 통합된 MAC 계층과 라우팅 계층에서 중계 노드 선정 및 채널 경쟁을 위한 측정기준으로 활용된다. 또한 다양한 성능인자로 간섭을 회피할 수 있는 중계 노드 선정 전략은 중단간 전송 지연시간을 줄이며 각 수신노드 기반으로 예정되지 않은 노드의 라디오 모듈을 비활성 상태로 전환하도록 하여 에너지 소비를 줄이도록 설계된다.

1. 서 론

무선 에드혹 및 센서 네트워크에서 에너지 보존성은 가장 중요한 대표적인 설계 목표이다. 일반적으로 에너지 소비량은 MAC 프로토콜, 토폴로지 제어, 라우팅 프로토콜, 응용 데이터 특성 등과 같은 다양한 요소들에 의하여 결정된다. 토폴로지 제어는 MAC 계층과 라우팅 계층 사이에서 무선 네트워크의 에너지 소비를 줄이기 위한 차원에서 연구되고 있다[1]. 기존의 연구에서는 라우팅의 효율성을 보다 더 높이기 위하여 전송전력을 조정하고 정간 네트워크 토폴로지를 구성을 목적으로 하였다. 그러나 토폴로지 제어가 전송 전력 조정 및 라우팅과 독립적으로 수행될 때 발생하는 간섭의 최소화 문제는 현재까지 효과적인 대안이 제시되지 못했다. 예를 들어 어떤 토폴로지가 심한 간섭을 일으킬 수 있는 구조로 생성되었다면 센서 노드들에서 MAC 충돌 회피와 같은 기법이 제공되지 않는다면 상당히 심각한 패킷 충돌이 발생하여 에너지 소비가 높아지고 전송 지연이 증가된다. 또한 무선 센서 네트워크의 다양한 응용 특성으로 인하여 에너지 효율성과 자원 이용률 최적화를 위해 교차계층 설계 개념을 적용한 프로토콜의 개발도 이루어지고 있다[2]. 무선 센서 네트워크에서 교차 계층 설계는 물리 계층과 응용 계층의 정보를 이용한 효율적인 네트워크 전송 결정을 위한 가능성을 높인다고 알려져 있다[3]. 그러나 응용 계층에서 제공되는 정보는 실제 센서 네트워크에서 사전에 미리 알기는 어렵다.

따라서 본 논문에서는 간섭 제어 토폴로지 정보를 이용한 전송 전력 제어로 간섭을 최소화할 수 있는 교차계층 계층 라우팅 프로토콜을 설계하는 방법을 제안한다. 제안하는 프로토콜은 간섭제어모델, MAC 계층, 라우팅 계층들의 기능들을 전반적으로 고려한 통합모델의 제시로 에너지 효율성과 자원 이용률이 최적화 될 수 있는 방법을 제안한다. 또한 제안된 간섭 제어모델은 송·수신 기반의 간섭모델로 데이터 송신과 수신에 관련된 간섭 정보를 통합된 MAC계층과 라우팅 계층에서 중계노드 선정 및 채널경쟁에 적용한다. 또한 다양한 성능인자로 간섭을 회피할 수 있는 이런 중계 노드 선정 전략은 중단간 전송 지연시간을 줄이며 각 수신노드 기반으로 예정되지 않은 노드의 라디오 모듈을 비활성 상태로 전환하도록 하여 에너지 소비를 줄이도록 설계된다.

2. 기존 연구

일반적으로 무선 센서 네트워크는 토폴로지 제어를 위해 2차원 평면에 임의로 분산 배치된 센서 노드들로 구성된 무방향성 그래프 모델을 고려한다. 무선 노드들은 고유 ID를 가지며 노드 u 의 최대 전송 전력을 P_u 라고 가정한다. 대칭형 통신 링크 uv 는 송신노드 u 가 전송한 메시지는 링크 vu 를 통하여 수신노드 v 가 송신노드 u 로 ACK 된다는 것을 나타낸다. 즉 두 노드 u, v 가 최대 전송 전력으로 상호 직접 통신할 때 링크 uv 가 존재한다고 한다. 그림 1과 같이 송신노드 u 가 전송전력 p 로 데이터를 전송할 때 u 로부터 신호를 성공적으로 받을 수 있는 영역을 전송범위 $C(u, p)$ 라고 정의한다. 또한 노드 u 가 전송전력 p 로 전송할 때 노드 u 를 제외한 어떤 다른 노드로부터 통신범위에 있는 어떤 노드가 신호를 수신할 수 있는 영역을 간섭범위 $I(u, p)$ 라고 그림 1과

같이 가정한다.

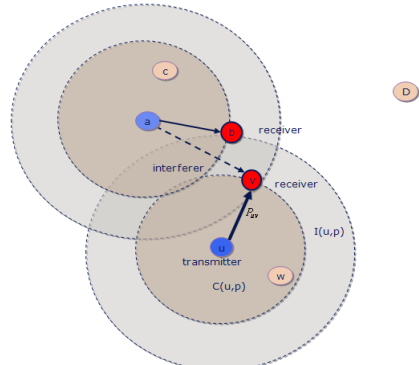


그림 1. 네트워크 간섭 시나리오

노드 u 가 이웃 노드들 중에 하나인 노드 v 에게 메시지를 전송할 때 링크 uv 를 위한 에너지 비용은 p_{uv} 라고 가정한다. 또한 각 무선 장치들은 자신의 전송 전력을 p_u 를 조절할 수 있다. 단 $0 \leq p_u \leq P_u$ 이다. 그뿐만 아니라 송신 노드 u 는 다음 홉 노드에게 데이터를 전송할 수 있는 전송 전력을 최소로 설정하고 중계노드로 선정된 수신노드 v 에 따라 전송 전력을 조정한다. 또한 간섭노드 a 는 자신의 간섭범위에 포함된 모든 다른 노드에게서 간섭을 일으킨다고 가정한다. 이러한 간섭을 예방하기 위해서 노드 a 는 자신의 전송 전력을 적절하게 설정하고 전송범위에 포함된 노드의 개수를 최소화 한다. 이 모델을 송신자 기반 간섭모델이라고 한다. 따라서 이 모델에 따라 노드 a 의 간섭크기(가중치) sI_a 는 식 (1)의 조건을 만족하는 집합원소의 개수이다.

$$sI_a = |\{ap_{av} \leq p_w(H)\}| \quad (1)$$

이와 대조적으로 노드 v 가 주변 노드에 의해 간섭을 받고 있을 때 주변 노드들 중 하나만이 임의의 시간에 노드 v 에게 메시지를 보낼 수 있다. 주변 노드들은 노드 v 에서 간섭이 일어나지 않도록 하기 위해 노드 v 가 주변노드들의 간섭범위에 포함되지 않도록 송신전력을 적절하게 줄인다. 이처럼 주변 노드들의 전송 전력 축소로 노드 v 가 주변 노드들의 간섭 영역에 포함되지 않을 가능성을 최소화한다. 이 모델을 수신자 기반 간섭 모델이라고 하며 간섭 크기 rI_v 는 식 (2) 조건을 만족하는 집합원소의 개수이다.

$$rI_v = |\{up_{uv} \leq p_u(H)\}| \quad (2)$$

3. 간섭 모델 기반의 교차계층 설계 라우팅 기법

간섭 모델 기반의 교차계층 설계 라우팅 기법은 간섭토폴로지 생성 단계, 중계노드 경쟁 단계, 이웃 노드의 WakeUp 단계로 구성된다. 이 프로토콜에서는 MAC계층과 라우팅 계층에 간섭정보를 통합한 교차계층 라우팅 기법으로서 에너지 소비를 최소화하며, 각 노드의 좌표 정보를 이용하여 최종 목적지 D에게 정보패킷을 전달할 때 간섭밀도를 이용한 전송 전력 제어로 패킷 손실을 줄이고 전송지연시간을 축소시키는 것을 목적으로 한다. 중계 노드 경쟁 단계에서는 각 노드의 전송능력에 따라 서로 다른 전송전력으로 데이터를 전송할 때 그 노드가 최종 목적지 방향으로의 근접성 기준에 따라 중계노드가 결정된다. 이 단계에서는 전송노드 T가 다음 중계 노드를 결정하기 위해 중계후보 노드에서 수행되는 수신자 기반 경쟁(receiver based contention)기법에 따라 다음 홉 중계 노드가 결정되도록 한다. 이런 경쟁은 송신노드 T가 단계적으로 전송 전력을 증가시키면서 가장 효율적인 중계 노드가 발견되지 않는다고 판단 될 때까지 계속된다. 이 과정에서 다음 중계노드(R)가 선정

되면 T는 정보 패킷을 수신노드 R에게 전달한다.

2.2.1 전송전력 제어를 위한 간섭 기반의 네트워크 모델

$G = \{V, E, I\}$ 은 v 는 무선 노드들을 집합 원소 나타내고 e 는 통신 링크의 집합원소들을 나타낸다. 링크 w 의 간섭 밀도 가중치(I)는 두 노드 u 와 v 간의 링크로 발생한 간섭범위에 포함되는 전체 노드집합의 개수이다. 전체 네트워크 그래프 G 의 서브그래프 H 라고 할 때 H 에서 간섭을 일으키는 최대 가중치는 $w_M = \max_{e \in H} I(e)$ 이다.

2.2.2 간섭회피 전송전력 제어

무선 센서 네트워크 모델은 센서 노드의 밀도가 Z 인 어떤 지역에도 다음 분포가 포아송 분포를 따른다고 가정한다. 송신노드 T가 최종 목적지 노드 D와 연결을 시도할 때 식 (3)과 같은 전송전력(p_T) 집합이 전송전력 제어를 위한 송신노드 T의 전송전력을 정의한다.

$$p_T(i) = \{p_i, i=1,2,\dots,i\}, \text{ if } p_1^T < p_2^T < \dots < p_m^T \quad (3)$$

전송전력이 p_j 라면 송신노드 T의 전송범위 $C(T, p_j)$ 에 포함된 노드들은 $S_j(T)$ 라고 하자. 여기서 $S_1(T) \subseteq S_2(T) \subseteq \dots \subseteq S_m(T)$ 과 같은 집합관계가 성립한다. 이런 가정에 의하여 각 홉에서의 가중치 진행 인자(factor) $W_{T,R}$ 은 식 (4)와 같이 정의한다

$$W_{T,R} = \frac{d(T,D) - d(R,D)}{p} \quad (4)$$

식 (4)에서 T는 정보소스 또는 현재 중계 노드로서 송신노드이고 R은 다음 중계노드로서 수신노드이다. p 는 R에게 정보패킷을 전달하기 위한 T의 최소전송전력이다. $d(A,B)$ 는 노드 A와 노드 B 간의 거리이다. $W_{T,R}$ 은 목적지 노드 D 방향에 대하여 각 전송 전력마다의 근접성을 나타내는 가중치이다.

송신노드 T에서 전송전력이 p_j 일 때 간섭범위 $I(T, p_j)$ 에 포함된 노드들은 집합 $A_j(T) = \{i|a_i, i=1,2,\dots,i\}$ 이고 I 는 간섭집합의 원소의 개수이다. 이러한 집합 정의로부터 전송 전력 수준이 p 일 때 집합 $A_j(T)$ 의 원소들의 간섭 신호 수준은 $p_{T,a}^j = p_T + p_T^{idle}$ 이 된다. $p_{T,a}^j$ 은 송신노드 T가 전송 전력 p_j 로 신호를 송신할 때 $A_j(T)$ 의 각 원소들에서 발생된 간섭 신호 강도이다.

그림 2와 같이 두 송신노드 u, a가 동시에 각각 데이터 전송을 시도할 때 간섭을 간섭가중치가 높은 송신노드가 우회 전송경로를 검색하여 결정하는 과정이며 이를 위해 송신 노드 간 간섭관계는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$RL_2 = \{(T_1, T_2) | p_{T_1,R_1}/p_{T_1,R_1} < SINR\} \quad (5)$$

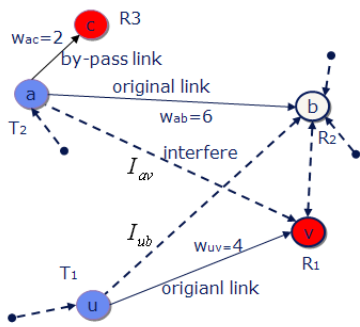


그림 3. 송·수신노드 간섭 모델

송신노드 T는 다음 중계 노드 결정하기 위해 중계결정(Next-hop Relay-Decision : NRD) 기법을 수행한다. NRD 기법에서는 우선 송신노드 T가 이웃 노드 집합(S_j)에서 다음 중계 노드 R의 링크 가중치가 $W_{T,R}$ 이 최대인 링크를 검색한다. 예를 들면 $j=1$ 일 때 중계후보노드 R의 집합은 $S_1(R) = S_1(R)$ 이 된다. 다음 단계로 $j=2$ 로 증가되며 전송전력의 증가는 W 의 값이 상당히 개선될 것을 추정될 때마다 1씩 증가된다. 두 번째로, 송신노드 T는 앞에서 결정된 송신전력 p_j 로 설정하고 WakeUp 단계를 수행한다. 송신노드 T는 송신전력이 결정되면 NRD_AHEAD 메시지를 주변노드들에게 방송한다. NRD_AHEAD 메시지는 (p_i, w_m, d) 과 같은 정보를 포함한다. d 는 목적지의 위치좌표이다. 각 중계 후보 노드들은 NRD_AHEAD 메시지를 받은 즉시 자신들의 W 를 계산하고 CTRL_ACK 메시지에 그 정보를 삽입한다. 송신노드 T는 중계 경쟁이 종료될 때까지 이웃 노드들이 전달하는 CTRL_ACK 메시지들을 수신한다. 송신노드 T는 어떤 CTRL_ACK가 수신될 때 최대 W 와 비교하여 높은 값을 가진 노드를 중계노드로 결정한다. 즉 $R_j = \{i | w_M = \max(w_M, W_i)\}$ 이 된다. 중계 노드 경쟁은 다음 두 조건

중 하나를 만족하면 종료한다. 종료조건은 경쟁을 위한 타임아웃, t_{TO} 이 경과하거나 현재 승자가 가지고 있는 가중치 보다 어떤 다른 중계후보의 가중치가 높은 CTRL_ACK의 수신확률이 임계확률(P_{th})보다 작다면 종료한다. 또한 송신노드 T의 인접 노드들은 수신된 NRD_AHEAD 메시지를 처리하는 수신 처리 알고리즘이 실행된다. 이 기법에서는 노드 a가 $a \in S_i(R_i)$ 일 때 임의시간 t 에서 NRD_AHEAD 메시지를 받았다고 가정할 때 노드 a는 식 (4)에 의해 자신의 $W_{T,a}$ 를 계산한다. 또한 노드 a는 수신자 기반 간섭 모델로부터의 간섭 크기에 따라 back-off 시간을 결정하기 위한 간섭 가중치 인자 r_a 이 식 (7)과 같이 정의된다.

$$r_a = c \frac{1}{|r_{I_j}|} \quad (7)$$

$$T_{backoff} = \sum c w_i + CW \cdot W_{T,a} \cdot r_a \quad (8)$$

여기서 c 는 성능계수이다. 식 (7)은 링크 Ta 상에서 수신노드 a의 간섭 크기를 기반으로 CTRL_ACK 메시지를 전송할 때 back-off 시간을 결정하기 위한 경쟁윈도우(CW)의 크기이다. 이 $T_{backoff}$ 시간은 $W_{T,a}$ 가진 중계후보노드가 간섭의 영향도에 따라 ACK하는 시간을 지연시킴으로써 중계노드로 선정될 확률을 낮춘다.

2.2.3 WakeUp 단계

제안된 기법에서는 에너지 소비 절약을 위해 각 노드들은 자신의 라디오 모듈을 주기적으로(사이클 주기에 따라) 끈다. 이런 센서 노드의 수행주기(duty cycle)를 T_{cycle} 라고 할 때 노드의 활성시간은 $\delta \times T_s$ 이고 수면시간은 $T_{on} = (1-\delta) \times T_s$ 이다. 여기서 T_s 는 전체수면시간이고 활성 시간은 T_{on} 이고 δ 는 활성계수이다. WakeUp 단계는 송신노드 T가 집합 $S_j(T)$ 에서 다음 중계 노드를 검색을 위한 중계후보 노드들을 깨우고 중계 경쟁을 시작하도록 한다.

송신노드 T는 T_{cycle} 시간에 비문 메시지로써 WAKE_UP 메시지를 $S_j(T)$ 에 방송한다. 이 메시지는 이웃 노드들을 깨우고 바로 NRD_AHEAD 메시지가 방송되어 $S_j(T)$ 에 포함된 노드들 간의 다음 노드 중계 선정을 위한 경쟁단계를 수행한다. 만약 노드 a가 $a \in S_j(T)$ 이고 WAKE_UP 메시지를 받았다면 노드 a는 자신의 $W_{T,a}$ 를 평가하고 NRD_AHEAD 메시지 수신을 위해 활성상태를 유지한다. 송신노드 T는 NRD_AHEAD 메시지를 방송하기 전에 자신의 이웃 노드들을 깨우기 위해 WAKE_UP 메시지들이 T_{cycle} 시간에 발송된다. 이 알고리즘에서는 T_{cycle} 동안에 WAKE_UP 메시지의 전달이 보장된다고 가정한다. WAKE_UP 메시지를 받은 중계후보노드들은 바로 $W_{T,a}$ 를 계산하고 식 (8)의 back-off 지연시간으로 자신의 가중치 값을 송신노드 T에게 전달한다. 이런 식으로 송신노드 T는 집합 $S_j(T)$ 에 포함된 전체 노드 중에서 최선의 중계 가능한 다음 중계 노드 R이 선정되고 자신의 가중치 $W_{T,R}$ 로부터 최적의 전송전력이 결정된다.

3. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 간섭 제어 토폴로지 정보를 통한 전송 전력 제어로 간섭을 최소화할 수 있는 교차형 계층 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 제안된 프로토콜은 간섭제어모델, MAC 계층, 라우팅 계층들의 기능들을 통합하였다. 간섭제어모델은 송·수신 기반의 간섭모델로 데이터 송신과 수신에 관련된 간섭 정보를 통합된 MAC계층과 라우팅 계층에서 중계 노드 선정 및 채널경쟁에 적용하도록 하였다. 또한 다양한 라우팅 결정 인자로 간섭을 회피하기 위한 중계 노드 결정 전략은 중단간 전송 지연 시간을 줄이도록 하며 수신노드 기반의 라우팅 기법으로 예정되지 않은 노드의 라디오 모듈을 비활성 모드로 전환하여 에너지 소비를 줄이도록 하였다. 앞으로 향후 연구는 제안된 기법들의 분석과 시뮬레이션 통하여 우수성을 검증할 계획이다.

감사의 글 : 본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-314-D00347)

[참고 문헌]

- [1] R. Dabora, I. Maric, A. Goldsmith, "Relay Strategies for Interference-Forwarding", Proc. of ITW2008, pp. 46-50, May 2008
- [2] G. Zhou, T. He, J. A. Stankovic, T. Abdelzher, "RID: Radio Interference Detection in Wireless Sensor Networks", Proc. of INFOCOM 2005, Vol 2, pp. 891-901. Mar. 2005
- [3] Rahul Gunesekaran, Hairong Qi, "XLRP: Cross Layer Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", Proc. of WCNC 2008, pp. 2135-2140, April 2008.