

무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 전송 방안에 관한 연구[☆]

An Energy-Efficient Transmission Strategy for Wireless Sensor Networks

관반카* 김 정 근**
Phan, Van Ca Kim, Jeong Geun

요 약

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적인 전송방안을 제안하고 이에 대한 이론적 분석을 제시하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 전송기법은 채널 상태가 상대적으로 좋을 때만 전송을 시도하는 opportunistic transmission에 기반한 이진 결정 (binary-decision) 기반 전송이다. 이진 결정 기반 전송에서는 Markov decision process (MDP)를 이용하여 성공적인 전송을 위한 최적의 채널 임계값을 도출하였다. 다양한 시뮬레이션을 통해 제안하는 전송기법의 성능을 에너지 효율성과 전송 측면에서 분석하였다.

Abstract

In this work we propose an energy-efficient transmission strategy for wireless sensor networks that operate in a strict energy-constrained environment. Our transmission algorithm consists of two components: a binary-decision based transmission and a channel-aware backoff adjustment. In the binary-decision based transmission, we obtain the optimum threshold for successful transmission via Markov decision process (MDP) formulation. A channel-aware backoff adjustment, the second component of our proposal, is introduced to favor sensor nodes seeing better channel in terms of transmission priority. Extensive simulations are performed to verify the performance of our proposal over fading wireless channels.

☞ Key Words : 센서 네트워크 (sensor networks), 마코프 결정 프로세스 (Markov Decision Process)

I. 서 론

무선 센서 네트워크의 설계에서 에너지 효율성은 가장 중요한 기술적 고려 대상 중에 하나이다 [1]-[4]. 특히, 무선 네트워크의 수명을 극대화하기 위해서는 효율적인 에너지 자원의 관리 기법이 물리계층에서 응용계층까지 전 계층에서 활용되어야 한다[5]. 무선 센서 네트워크에서 센서 노드는

페이딩 (fading)과 간섭 (interference)으로 대표되는 시변적 (time-varying)인 무선 채널 환경 하에서 동작한다. 이렇게 시간에 따라 변하는 성질을 가진 무선 채널은 효율적인 에너지 운용 전송방안을 설계하는 데에 있어서 많은 제약을 준다. 예를 들면, 무선 채널 상태가 일시적으로 나쁠 경우의 전송 시도는 대체적으로 실패하게 되고, 이는 에너지 낭비로 이어진다. 그러나 채널 상태가 나아질 때까지의 전송을 연기하게 되면 throughput이 저하되거나 혹은 전송 지연 (delay)을 야기할 수도 있다. 여기서 에너지 효율과 throughput 및 delay 성능간의 trade-off 문제가 발생한다. 그러므로 무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 전송 방법은 두 개의 대립되는 요소의 조화를 이루면서 무선 채널의 변화에 적응할 수 있어야 한다.

* 정 회 원 : 경희대학교 전자전파공과 (박사과정)
phanvanca@yahoo.com

** 정 회 원 : 경희대학교 전자전파공학과 교수
jg_kim@khu.ac.kr(교신저자)

[2008/11/19 투고 - 2008/11/21 심사 - 2008/12/1 심사완료]

☆ 이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2005-003-D00210)

무선 센서 네트워크에서 에너지 효율을 높이기 위한 많은 기법들이 제안되었다. [6]에서는 무선 센서 네트워크를 위한 링크 적응 기법이 제안되었다. 이 논문에서는 전송 프레임 크기의 적응적인 조정을 제안하였고 Kalman filter를 이용하여 최적의 프레임 크기를 예측하였다. [7]에서는 채널 접속에 있어서 좋은 채널 상태를 가지고 있는 노드에게 우선순위를 주기 위해 멀티 캐스트 Ready-to-Send (RTS)와 우선순위 기반 Clear-to-Send (CTS)를 적용한 전송 방법을 제안하였다. [8]에서는 버퍼와 채널 상태에 따른 적응적인 전송 문제에서 시스템 throughput 극대화를 위한 최적화된 해결책을 제시하였다. [10]에서 Receiver Based Auto Rate (RBAR) 프로토콜을 제안하였고 이 기법의 특징은 수신 노드가 RTS 패킷의 signal-to-noise ratio (SNR)을 기반으로 전송 속도를 선택한 점이다.

이 연구에서는 무선 페이딩 채널 환경에서 운영되는 무선 센서 네트워크를 위한 에너지 효율적인 전송 방안을 제안한다. 제안 기법의 기본적인 아이디어는 채널 상태가 상대적으로 좋을 때만 전송을 시도하는 기회주의적(opportunistic)인 전송기법이다. 이 아이디어는 두 부분의 구성 요소로 이루어져있는데, 하나는 이진 결정 기반 전송법(Binary decision based transmission; BDT)이고 다른 하나는 채널상태를 고려한 backoff 조절기법(Channel-aware backoff adjustment; CBA)이다. 이진 결정 기반 전송법은 전송 시도 여부가 현재의 채널 상태에 의해서 결정된다. 현재 채널 상태의 측정은 짧은 제어 메시지를 송수신기간에 교환함으로써 이루어진다. CBA라는 채널 상태를 고려한 backoff 조절기법은 현재 채널 상태가 우수한 센서 노드가 전송의 우선순위를 갖도록 설계되어 있다. 좋은 채널 상태를 가진 노드에게 작은 contention window (CW)를 적용함으로써 채널 접속을 더 신속히 할 수 있게 하고, 채널 상태가 열악한 노드들에게는 상대적으로 큰 CW값을 적용시킨다.

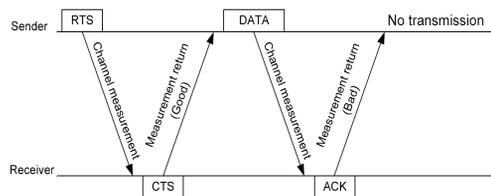
BDT 방법에서는 Markov decision process (MDP)를 이용하여 성공적인 전송을 위한 최적의

임계값을 도출하였다[12]. 본 연구에서 제안한 전송기법의 성능을 측정하기 위하여 ns-2를 이용하여 실험을 수행하였다. 전송 알고리즘의 구현은 IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF) [11] 모델을 기반으로 이루어졌다. 시뮬레이션 실험 결과, 본 연구에서 제안하는 채널상태를 고려한 backoff 조절기법과 이진 결정(binary-decision)기반 전송법을 사용하였을 때에 기존의 IEEE 802.11에 상응하는 throughput 성능을 유지하면서도 동시에 100% 이상의 에너지 효율성이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

II. 시스템 모델

1. MAC 프로토콜

본 연구에서 고려하는 전송 시스템 모델은 IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF) 프로토콜을 기반으로 BDT와 CBA 기능을 추가한 형태이다. 주요 수정 사항은 채널 측정과 이에 대한 피드백 방식과 관련이 있다. 그림 1에서 나와 있듯이, 기존의 IEEE 802.11과 달리 RTS/CTS와 DATA/ACK 메시지는 채널을 계속적으로 모니터링 하고 측정 결과를 피드백 하는 데에 모두 사용된다. 수신기에서 보내진 RTS와 DATA 프레임은 송신기에 의해서 채널 상태를 측정하는데 사용되고 이에 대한 측정결과는 대응되는 CTS와 ACK프레임에 실려 수신기에 전달된다. 본 연구에서 제안하는 전송방안을 적용하기 위해서는 짧은 제어 메시지 교환이나 데이터 메시지를 통한 피드백 메커니즘만 요구됨으로 대부분의 무선 전송 프로토콜에서도 쉽게 적용될 수 있다.



(그림 1) 메시지 교환을 통한 채널 측정과 피드백

2. 채널 모델

시간에 따라 채널 상태가 변하는 무선 페이딩 채널을 모델링하기 위해서 Markov 채널 모델이 사용된다. Rayleigh 페이딩 채널에서 신호대잡음비 (signal-to-noise-ratio; SNR) y 는 다음과 같은 지수분포를 갖는다[13].

$$f_y(y) = \frac{1}{\rho} e^{-\frac{y}{\rho}}$$

여기서 $\rho = E[y]$ 이다. y_i 가 수신한 SNR의 임계값을 나타낼 때 $0 = y_0 < y_1 < y_2 < \dots < y_k = \infty$ 이다. 만약 SNR의 범위가 $[y_k, y_{k+1})$ 라면, 채널의 상태는 g_k 상태에 있다고 정한다 ($0 \leq k < K$). SNR의 임계값과 Markovian 채널의 상태전이 확률 (state transition probability)은 [13]의 기법을 이용하여 얻을 수 있다. BPSK의 경우, g_k 상태 일 때, 심볼 오류가 발생할 확률 P_{ek} 는 아래와 같다.

$$P_{ek} = \frac{\delta_k - \delta_{k+1}}{p_k} \quad (1)$$

여기서 p_k 는 g_k 에 대한 정상상태 (steady-state) 확률을 의미하고, δ_k 는 다음의 식과 같이 주어지며,

$$\delta_k = e^{-\frac{y_k}{\rho}} (1 - F(\sqrt{2y_k})) + \sqrt{\frac{\rho}{\rho+1}} F\left(\sqrt{\frac{2y_k(\rho+1)}{\rho}}\right)$$

$F(x)$ 는 표준정규 랜덤변수의 누적분포함수 (Cumulative Distribution Function; CDF)를 나타낸다. 이후 본 논문에서의 사용될 채널 오류 확률은 위의 식에 나와 있는 BPSK 경우를 따른다.

III. 전송 알고리즘

1. 이진 결정 기반 전송법 (Binary-decision Based Transmission)

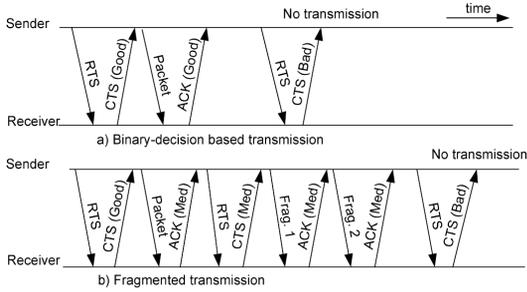
이 기법에서 센서 노드는 전송 가능한 시점에

Transmit 또는 Defer라는 결정을 취하게 되는데, Transmit은 데이터를 전송하는 행동에 해당하고 Defer는 전송을 연기하는 행동에 해당한다. 그림 1에서 보면, 무선 채널은 RTS 또는 데이터 프레임 을 통해서 측정되고, SNR 값에 따라서 두 가지 (Good, Bad) 상태중 하나로 분류된다. 이 정보는 반환될 프레임(CTS 또는 ACK 프레임)을 통해 송신기에 전달된다. 채널 상태를 분류하기 위해서 사용되는 SNR의 임계값은 추후 설명될 Markov decision process (MDP)를 사용하여 결정된다.

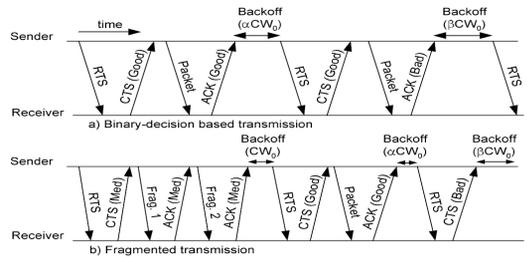
에너지 효율성 향상을 위해 고려해 볼 수 있는 또 다른 기술로는 [11]에서 제시한 바와 같이 한 프레임을 여러 개의 작은 프레임으로 나눠 전송함으로써 프레임 에러율을 줄이는 것이다. 이 방법은 분할 전송 (Fragmented Transmission; FT) 기법이라 명명한다. 이 연구에서는 BDT 기법과의 비교를 위해서 FT 기법의 성능도 분석될 것이다. FT 기법에서는 채널 상태가 Good, Medium, Bad로 세 종류로 나뉘는 것을 제외하고는 FT는 BDT와 동작이 비슷하다. FT 기법에서 채널 상태가 Medium으로 판단되면, 송신기는 프레임을 분할해서 전송한다. 분할 방식에 있어서 이 연구에서는 전체 프레임을 n 개의 똑같은 크기의 프레임으로 나눈다고 가정한다. 그림 2에서는 BDT와 FT 기법의 차이를 보여주고 있다.

2. 채널상태를 고려한 backoff 조절기법

IEEE 802.11 DCF에서는 이진 지수 Backoff (Binary Exponential Backoff; BEB) 알고리즘이 채널 접속에 있어서 경쟁 해결을 위해 사용되고 있다. 이 논문에서 우리는 채널상태를 고려하는 backoff 조절기법 (Channel-aware Backoff Adjustment; CBA)이라는 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 방법은 BEB 알고리즘을 기반으로 하지만 시간에 따라 변하는 무선 채널의 특성을 활용하여 에너지 효율을 높이도록 새롭게 설계되었다.



(그림 2) 이진결정기반전송과 분할 전송.



(그림 3) Backoff-based priority scheme

느린 페이딩 채널에서 무선 채널은 시간에 따라 상대적으로 서서히 변화한다. 만약 현재에 채널상태가 좋으면 그 시점이후로 어느 정도까지는 좋은 채널 상태를 유지할 가능성이 크다. 이런 채널 특성을 활용하기 위해서 CBA 알고리즘은 현재 채널 상태가 우수한 센서 노드가 채널 접근에 대한 우선순위를 갖도록 설계되었다. 센서 노드의 채널 상태에 따라 다른 크기의 contention window (CW)를 적용하여 채널 접근의 우선순위를 차별화한다.

CBA 알고리즘의 상세한 과정은 다음과 같다. 모든 센서 노드는 링크상태 테이블 (Link State Table)이라는 테이블 갖고 있는데, 이 테이블은 이웃 노드들과 연결된 각 링크에 대한 채널 상태 (Channel state)와 유효성(validity)이 나열되어 있다. 각각의 링크에 대한 정보는 (channel state, validity)로 구성된다. 테이블 내에 있는 이 정보들은 센서 노드들이 메시지 교환을 통해 새로운 채널 정보를 얻게 되거나 또는 채널 정보의 유효기

간이 경과되었을 때 갱신된다. 테이블 내의 유효성(validity) 필드는 각 링크 채널의 채널 coherence time으로 설정된다.

초기 CW 값은 다음과 같이 채널 상태에 따라 결정 된다:

$$CW = \begin{cases} \alpha(t) \cdot CW_0, & \text{upon Good channel} \\ CW_0, & \text{upon Medium channel or} \\ & \text{expired channel information} \\ \beta(t) \cdot CW_0, & \text{upon Bad channel} \end{cases}$$

여기서 $\alpha(t)$ 와 $\beta(t)$ 는 상대적으로 채널 상태가 우수하거나 열악한 노드 각각에게 채널 접속의 우선권의 차이를 구현하기 위해 CW에 곱해지는 상수이다. 그리고 t 는 타이머 값으로 처음에는 유효기간 (validity period)으로 설정되고, 시간이 지남에 따라 감소하게 된다. 타이머가 종료되어 이전에 획득한 채널 정보가 오래된 정보가 될 경우에는 $\alpha(t)$ 와 $\beta(t)$ 는 1로 설정되고, 링크상태 테이블에서 유효성 필드는 invalid로 설정된다. 타이머가 종료되지 않았다면 $\alpha(t)$ 와 $\beta(t)$ 는 연속적인 충돌이 있더라도 유효하게 된다. 이 논문에서는 $\alpha(t) = 1/2$, $\beta(t) = 2$ 라고 가정하기로 한다. 이러한 설정에 대한 적정성 여부는 추후 연구에서 다루기로 한다.

IV. Markov Decision Process (MDP)

이 장에서는 Markov decision process (MDP) [9]를 이용하여 성공적인 전송을 위한 최적의 임계값을 찾고자 한다. 이를 바탕으로 BDT와 FT 기법에서의 에너지 효율성 측면에서 최적의 운영방법을 도출한다.

분석의 편의성을 위해서 전송 시스템은 시간축 상에서 T_s 길이의 동일한 시간 슬롯을 나누어져 있다고 가정한다. 그리고 시간 슬롯은 충분히 짧

고 트래픽 양이 크지 않다고 가정하여, 각 시간 슬롯에 도착하는 패킷의 도착과정은 매개 변수 λ 를 가지는 Bernoulli 분포를 따른다고 가정한다. 가장 최신의 센싱 정보만을 필요로 하는 어플리케이션을 고려하기 위해 각 노드의 버퍼는 최대한 개의 프레임은 유지할 수 있다고 가정한다. 그래서 새롭게 들어온 프레임은 버퍼를 차지하고 기존의 프레임은 버려진다.

1. 이진 결정 기반 전송법 (Binary-decision Based Transmission)

1) 시스템 상태 (System States): S 는 가능한 모든 시스템 상태의 집합을 나타낸다. 시간 슬롯 i 에서 시스템 상태 s_i 는 아래와 같다.

$$s_i = \langle g_i, t_i \rangle$$

여기서 g_i 는 시간 슬롯 i 에서의 채널 상태를 나타내고 $0 \leq g_i < K$, t_i 는 시간 슬롯 i 에서 센서 노드의 상태를 나타낸다. 센서 노드가 취할 수 있는 상태는 Idle과 Active이다. 버퍼 안에 전송할 프레임이 있으면 Active 상태이고 프레임이 버퍼 안에 없으면 Idle 상태이다.

2) 제어 동작 (Control Actions): 시스템 상태 s_i 에 따라 센서 노드는 프레임을 전송할지 혹은 연기할지를 선택한다. $A(s_i)$ 는 s_i 상태에서 가능한 모든 제어 동작들의 집합을 의미한다. a_i 는 시간 슬롯 i 에서 실행되는 제어 동작이다. $A(s_i)$ 에서 각각의 동작은 다음과 같은 값에 대응된다.

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{Defer} \\ 1, & \text{Transmit} \end{cases}$$

3) 동작 비용 (Cost of Actions): 시스템 상태 s_i 와 제어 동작 a_i 가 주어졌을 때, 시간 슬롯 i 에서 발생하는 비용을 정의하면 다음과 같다.

$$C_i(s_i, a_i) = L_c(g_i, a_i)P_t + \delta L_d(g_i, a_i) \quad (2)$$

여기서 P_t 는 전송 전력이고, δ 는 에너지 절감에 대비하여 프레임 손실의 상대적인 중요성을 나타내는 가중치이다. $L_c(g_i, a_i)$ 는 전송 에러로 인한 프레임 손실수의 기대값이고, $L_d(g_i, a_i)$ 는 버퍼 오버플로우(overflow)로 인한 프레임 손실수의 기대값이다. $L_c(g_i, a_i)$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$L_c(g_i, a_i) = a_i P_f(g_i) \quad (3)$$

여기서 $P_f(g_i)$ 는 채널 상태가 g_i 일 때 프레임 오류율이다. 독립적으로 발생하는 비트 오류와 프레임 크기 $L(\text{bits})$ 그리고 채널 상태가 g_i 라고 가정했을 때 프레임 오류율 $P_f(g_i)$ 는 다음과 같다.

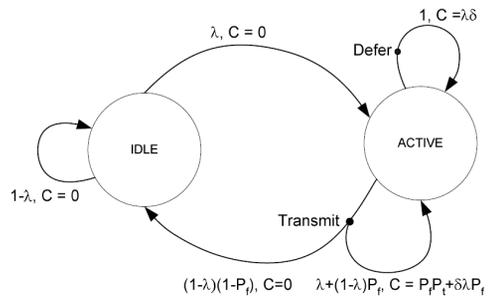
$$P_f(g_i) = 1 - (P_b(g_i))^L \quad (4)$$

여기서 $P_b(g_i)$ 는 (1)로부터 구할 수 있다. $L_b(g_i, a_i)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$L_d(g_i, a_i) = \lambda((1 - a_i) + a_i P_f(g_i)) \quad (5)$$

4) 시스템의 동적 특성 (System Dynamics): 채널 상태는 제어 동작과는 독립임을 가정한다. 주어진 시스템 상태 $s_i = \langle g_i, t_i \rangle$ 와 제어 동작 a_i 에서 시스템이 다음 시간슬롯에서 $s'_{i+1} = \langle g_{i+1}, t_{i+1} \rangle$ 로 천이할 확률은 다음과 같다.

$$P_{ss'}^a = \Pr[s_{i+1} = s' | s_i = s, a_i = a] = P_g(g, g')P_t(t, t', a) \quad (6)$$



(그림 4) BDT 방식의 상태 천이도.

여기서 $P_g(g, g')$ 는 채널 상태 g 에서 g' 로 변화될 확률이고, $P_t(t, t', a)$ 는 주어진 제어 동작이 a 일 때 t 에서 t' 로 센서 노드 상태가 변하는 확률을 나타낸다. 그림 4는 BDT 방식의 상태 천이도를 나타내고 있는데, 상태 천이 확률 $P_t(g, g', a)$ 와 이에 해당하는 동작 비용이 나와 있다.

5) 평균 비용 (Average Cost): $\pi = [\mu_0, \mu_1, \mu_2, \dots]$ 는 각 시스템 상태와 제어 동작을 연결한 운영예(policy)를 나타낸다. 우리의 목적은 모든 상태 i 에서 취할 수 있는 모든 동작에 대해 평균 비용을 최소화하는 운영법(policy)를 구하는 것이다.

$$J_\pi(s) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} C(s_i, u_i(s_i)) \mid s_0 = s \right\} \quad (7)$$

우리는 다음의 식을 만족하는 최적의 운영(policy)을 구해야 한다:

$$\pi^* = \operatorname{argmin}_\pi J_\pi(s) \quad (8)$$

여기서 사용한 모델은 unichain MDP 모델이다. 그리고 평형상태 운영(stationary policy)과 최적의 평균 비용은 동적프로그래밍의 relative value iteration 알고리즘으로 구할 수 있다[8][14].

2. 분할 전송 (Fragmented Transmission)

1) 시스템 상태 (System States): S 는 가능한 모든 시스템 상태의 집합을 나타낸다. 시간 슬롯 i 에서 시스템 상태 s_i 는 아래와 같다.

$$s_i = \langle g_i, t_i \rangle$$

여기서 g_i 는 시간 슬롯 i 에서의 채널 상태이고, $0 \leq g_i \leq K$ 이다. 그리고 t_i 는 시간 슬롯 i 에서의 센서 노드의 상태이다. 센서 노드의 상태는 Idle, Active, n-1 Fragment 상태로 구분된다. I, F_n, F_k

($k=1, 2, \dots, n-1$)는 각각 Idle, Active, n-1 Fragment 상태를 나타내는 것으로 한다. BDT 방법과 유사하게, 버퍼 안에 프레임이 전송 대기상태이면 Active 상태이고, 프레임이 없으면 Idle 상태이다. k 번째 분할 상태 F_k 는 버퍼에 전체 n 개의 분할 프레임 중 k 개 분할된 프레임이 남아있을 경우를 의미한다.

2) 제어 동작 (Control Actions): 센서 노드는 현재 상태에서 Transmit, Defer, Fragment 중 하나의 동작을 선택할 수 있다. $A(s)$ 는 상태 s 에서 가능한 모든 동작의 집합을 말한다. a_i 는 시간 슬롯 i 에서 실행되는 제어 동작이고 그 값은 다음과 같다.

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{Defer} \\ 1, & \text{Transmit} \\ 2, & \text{Fragment} \end{cases}$$

3) 동작 비용 (Cost of Actions): 시스템 상태 s_i 와 제어 동작 a_i 가 주어졌을 때 시간 슬롯 i 에서 발생하는 비용은 BDT와 유사한 방법을 사용하여 구한다. Idle 상태에서 센서 노드는 아무런 동작도 취하지 않으므로 비용은 0 이다. 다른 상태에서 동작으로 인한 비용은 다음과 같이 구할 수 있다. Defer($a_i = 0$)와 Transmit ($a_i = 1$)의 경우에 비용 $C_i(F_k, g_i, a_i)$ 는 다음과 같다.

$$C_i(F_k, g_i, a_i) = a_i \left((1-\lambda)k + n\lambda \right) \frac{P_f^{(k)}(g_i) P_t}{n} \quad (9) \\ + (1-a_i) \lambda \frac{(n-k) P_t}{n} \\ + \lambda \delta (1-a_i (1-P_f^{(k)}(g_i)))$$

여기서 $P_f^{(k)}(g_i)$ 는 같은 크기의 k 개의 분할된 프레임으로 형성된 프레임의 전송 오류 확률이다. 이 확률은 (4)에서 L 을 kL/n 로 바꿈으로써 쉽게 구할 수 있다.

Fragment ($a_i = 2$) 동작에서의 비용 $C_i(F_k, g_i, a_i)$ 는 다음과 같다.

$$C_i(F_k, g_i, a_i) = ((1-\lambda) \sum_{m=1}^k L_e(g_i, m) + \lambda \sum_{m=1}^k (n-k+m) L_e(g_i, m)) \frac{P_t}{n} + \delta \lambda \sum_{m=1}^k L_e(g_i, m) + \sigma \quad (10)$$

여기서 σ 는 송신자가 전송 동작 대신 분할 동작을 할 때의 분할 비용(오버헤드 처리 등으로부터 발생)이다. 그리고 $L_e(g_i, m)$ 는 m 번째 조각의 프레임이 오류가 났을 확률이다.

$$L_e(g_i, m) = (1 - P_p^{(1)}(g_i))^{m-1} P_p^{(1)}(g_i) \quad (11)$$

4) 시스템의 동적 특성 (System Dynamics): FT 기법에서 시스템의 동적 특성을 제어하는 세 개의 요소가 있는데, 채널 변화 정도, 새로운 프레임의 생성, 제어 동작이 그것이다. BDT와 유사하게 시스템 동적 특성은 (6)으로 설명될 수 있다. 센서 노드가 Idle 상태일 때 상태 천이 확률은 제어 동작에 의존하지 않는다. 즉,

$$P_t(I, F_n, \cdot) = \lambda \\ P_t(I, I, \cdot) = 1 - \lambda$$

센서 노드가 Active나 Fragment 상태일 때, 상태 천이 확률은 제어 동작, 슬롯 i 에서의 프레임 오류율, 프레임 생성에 영향을 받는다. 이경우는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$P_t(F_k, F_k, 0) = (1-\lambda) + 1(k=n)\lambda \\ P_t(F_k, I, 1) = (1-\lambda)(1 - P_p^{(k)}(g)) \\ P_t(F_k, F_k, 1) = (1-\lambda)P_p^{(k)}(g) + 1(k=n)\lambda \\ P_t(F_k, F_i, 2) = (1-\lambda)(P_p^{(1)}(g))(1 - P_p^{(1)}(g))^{k-i} + 1(k=n, i=n)\lambda, 1 \leq i \leq k \leq n \\ P_t(F_k, I, 2) = (1-\lambda)(1 - P_p^{(1)}(g))^k \\ P_t(F_k, F_n, a) = \lambda, k < n, \forall a$$

여기서 $1(e)$ 는 사건 e 에 indicator function이다.

5) 평균 비용 (Average Cost): 시스템 동적 특성과 위에서 구해진 비용을 기반으로 BDT 방법처럼 MDP 문제를 구성할 수 있다. 최적의 운영법 (policy)을 얻기 위해 동적 프로그래밍 기술이 사용되었다.

V. 실험결과와 시뮬레이션

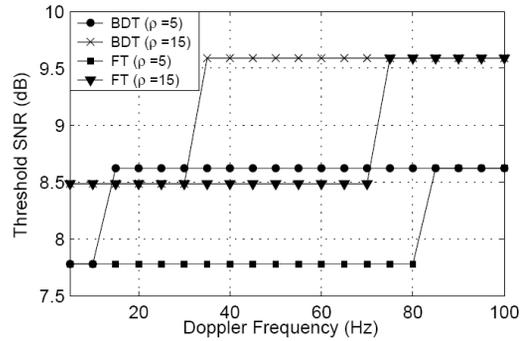
이 장에서는 BDT, FT 그리고 CBA의 특징을 분석한다. 또한 ns-2 시뮬레이터를 사용하여 다양한 시뮬레이션을 수행하고 우리가 제안하는 알고리즘의 에너지 효율성과 throughput 면에서의 성능을 검증한다. 30개의 센서 노드를 네트워크 필드 (350m × 350m)에 랜덤하게 배치하고 1개의 싱크 노드가 존재하고 있다고 가정하였다. 전체 노드중에서 15개의 센서 노드만이 128 바이트의 프레임을 생성하고, 0.25초 마다 한 번씩 목적 노드인 싱크 노드에게 프레임을 전송한다. 나머지 센서 노드들은 수신된 프레임을 싱크 노드에게 전달하는 역할만을 수행한다. 무선 페이딩 채널은 20개의 상태의 Markov chain 모델을 사용했다. 표 1은 시뮬레이션 및 수치 분석에 사용된 파라미터 값들이다.

(표 1) 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value (default)
Number of sensor nodes	30
Mobility of sensor nodes	stationary
Transmission rate of the channel	1 (Mbps)
Transmission range of sensor node	150 m
Traffic model of sensor nodes	CBR
CBR source traffic rate	4.096 (Kbps)
CBR packet size (L)	128 (bytes)
Routing protocol	DSDV
Doppler frequency	10 Hz
Timer value for $\alpha(t)$, $\beta(t)$	0.75
Frame arrival probability (λ) in MDP	0.001
Weighting factor in cost function (δ)	0.05
Fragmentation cost (σ)	0.01

1. BDT와 FT에서의 최적의 임계값

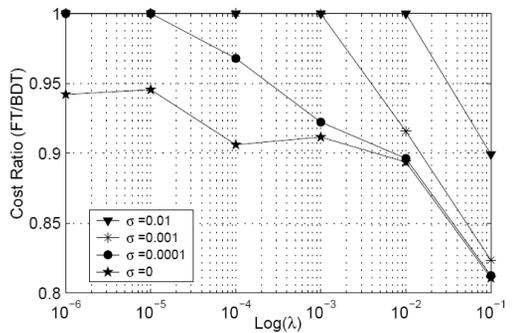
먼저 다양한 채널 환경에서 성공적인 전송을 위한 최적의 임계값이 어떻게 변하는 지를 분석하고자 한다. 그림 5는 도플러 주파수가 변할 때 최적의 임계값을 dB값으로 나타내고 있다. 이 그림에 나타나듯이 도플러 주파수가 커지면 최적의 임계값이 커지는 경향이 있다. 최적의 임계값은 현재 채널 상태를 고려하여, 패킷을 보낼 것인가 혹은 지연시킬 것인가를 결정한다. 그러므로 느린 페이딩 채널에서는 현재 채널 상태가 나빴을 경우 가까운 미래에서의 채널 상태 또한 좋지 않기 때문에 전송 지연은 이득이 되지 않으며 따라서 임계값이 낮아지게 된다. 반면에 빠른 페이딩 채널에서는 반대로 높은 임계값을 갖게 된다. 또한 같은 평균 SNR에서의 FT의 임계값은 BDT의 임계값보다 낮음을 볼 수 있는데 이는 보다 작은 분할 프레임 크기 때문이다.



(그림 5) BDT와 FT의 최적의 임계값 (L = 100bits)

2. Energy Efficiency of BDT and FT

이 전 장에서 BDT 그리고 FT 방법에서의 최적의 전송 방법을 공식화하였다. 여기서 우리는 (2), (9) 그리고 (10)에서 공식화함으로써 이런 방법들의 평균 비용을 비교할 수 있다. 그림 6에서 $\delta = 0.05$ 일 때 FT와 BDT의 평균 비용을 비교하였다. 이 그림을 보면, FT는 BDT 방법에 비하여 프레임 도착률이 증가할 때와 분할 비용이 낮아질 때 적은 비용을 갖음을 볼 수 있다. 이 결과에서 더 낮은 분할 비용이 보다 적은 비용을 갖음은 당연하다고 볼 수 있는데, 낮은 분할 비용은 FT의 비용에 직접적으로 영향이 있기 때문이다. 또한 높은 프레임 도착률에서 보다 적은 비용이 드는 이유는 버퍼 오버플로우의 비용이 전송 비용보다 높기 때문이다. 그러므로 버퍼의 오버플로우가 보다 적게 발생하는 FT 알고리즘에서는 BDT의 비용보다 적음을 알 수 있다. 또한 낮은 프레임 도착률과 높은 분할 비용에서의 BDT와 FT의 비용 차이는 무의미하다는 것을 확인할 수 있다.

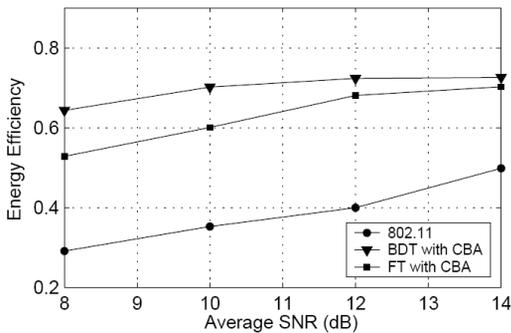


(그림 6) 프레임 도착률(λ)이 변할 때 BDT와 FT의 비율

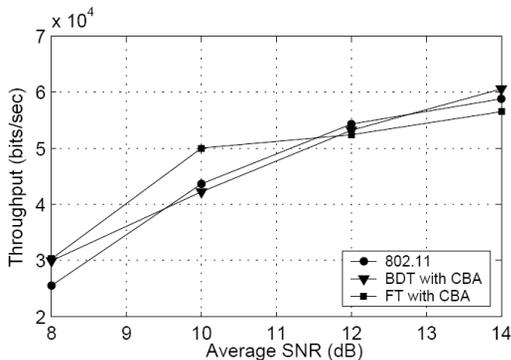
3. Energy Efficiency and Throughput

그림 7은 채널의 상태가 변할 때 3개의 전송 방안 (CBA를 사용한 BDT, CBA를 사용한 FT, 그리고 802.11)의 에너지 효율의 시뮬레이션 결과이다. 여기서 에너지 효율성은 시도한 전송 횟수 분에 성공한 전송 횟수의 비율로 정의한다. 이 그림에서 보면, 평균 SNR이 8dB일 때, CBA를 사용한 BDT, CBA를 사용한 FT, 그리고 802.11의 에너지 효율은 각각 0.64, 0.53, 그리고 0.29이다. 그리고 평균 SNR이 14dB일 때, 각각 0.72, 0.70, 그리고 0.5임을 볼 수 있다. 일반 802.11과 비교해서 BDT와 CBA 방법은 100%가 넘는 현저한 에너지 효율성의 향상을 나타내고 있다. 이러한 에너지 절약은 대부분 전송 에러로 인해 일어나는 프레임 손

실의 수가 감소하여 발생하게 된다. 하지만 이득만이 생기는 것은 아니다. 다음 그림에서 보듯이, 기회주의적 전송 기법에서 채널의 상태가 나빠질 때, 전송을 연기함으로써 throughput의 희생이 따르게 된다. 그림에서 보는바와 같이 비록 그 차이는 크지 않지만 802.11과 CBA의 기법을 사용한 FT는 CBA의 기법을 사용한 BDT보다 높은 throughput을 보이는 것을 확인할 수 있다.



(그림 7) 3개의 전송 방식의 에너지 효율 : BDT with CBA, FT with CBA, and 802.11 ($\sigma = 0.01$)



(그림 8) 3개의 전송 방식의 Throughput

VI. 결론

본 논문에서는 에너지에 대한 큰 제약성을 가진 무선 센서 네트워크에서 에너지를 효율적으로

사용하는 전송 방안을 제안하였다. 이 논문에서 제안된 알고리즘은 특별한 복잡성 없이 에너지 효율성을 크게 향상시켰다. 우리의 전송 알고리즘은 2가지 요소로 구성된다. 하나는 기회주의적 전송이고, 다른 하나는 채널 상태를 고려한 backoff 조절 기법이다. 기회주의적 전송에서 채널 상태의 최적의 임계값을 얻기 위해 우리는 MDP 공식을 사용하였다. 이러한 두 요소를 지능적으로 결합한 우리의 전송 알고리즘은 현재 존재하고 있는 어떤 알고리즘보다 에너지 효율면에서 성능이 뛰어나다. 따라서 네트워크의 수명을 더욱더 늘릴 수 있다.

참고 문헌

- [1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks." *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 8 pp. 102-114, Aug. 2002
- [2] W. Stark, H. Wang, A. Worthen, S. Lafortune and D. Teneketzis, "Low-energy wireless communication network design," *IEEE Wireless Commun.*, vol 9, no. 4, pp. 60-72, Aug. 2002
- [3] A. Ephremides, "Energy concerns in wireless networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 9, no. 4, pp 48-59, Aug. 2002
- [4] R. Min, M. Bhardwaj, S. H. Cho, N. Ickes, E. Shih, A. Sinha, A. Wang and A. Chandrakasan, "Energy-centric enabling technologies for wireless sensor networks." *IEEE Wireless Commun.*, vol. 9, no.4, pp. 28-39, Aug. 2002
- [5] A. J. Goldsmith and S. B. Wicker, "Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks." *IEEE Wireless Commun.*, vol. 9, no. 4, pp. 8-27, Aug.2002
- [6] S. Ci, H. Sharif and K. Nuli, "Study of an adaptive frame size predictor to enhance energy conservation in wireless sensor networks." *IEEE J. Select. Areas*

- in Commun., vol.23, no. 2, pp. 282-292, Feb. 2005
- [7] J. Wang, H. Zhai and Y. Fang, "Opportunistic packet scheduling and media access control for wireless LANs and multi-hop ad hoc networks." in Proc. WCNC'04, vol. 3, pp. 1234-1239, Mar. 2004
- [8] A. T. Hoang and M. Motani, "Buffer and channel adaptive transmission over fading channels with imperfect channel state information." in Proc. WCNC'04, vol. 3, pp.1891-1896, Mar.2004.
- [9] J. Pavon and S. Choi, "Link adaptation strategy for IEEE 802.11 WLAN via received signal strength measurement," in Proc. ICC '03, vol.2, pp. 1108-1113, 2004
- [10] G. Holland, N. H. Vaidya and P. Bahl, "A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks," in Proc. MOBICOM 2001, pp. 236-251, Jul.2001
- [11] IEEE Std. 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control(MAC)and Physical Layer(PHY) Specifications,"Jun.1999
- [12] M. L. Puterman, Markov decision processes: discrete schochastic dynamic programing. Hoboken, New Jersey:John Wiley & Sons, Inc, 1998
- [13] H. S. Wang and N. Moayeri, "Finite-state Markov channel-a usefrl model for radio communication channels," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.44, no. 1, pp. 163-171, Feb. 1995
- [14] R.S. Sutton and A. G. Barto, Reinforcement learning: an intorduction. Cambridge: MIT Press, 1998.

● 저 자 소 개 ●



Phan, Van Ca

2002년 베트남 호치민대학교 전자공학과 졸업(학사)
 2005년 베트남 호치민대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)
 2006~현재 경희대학교 전자전파공과 (박사과정)
 관심분야 : 무선네트워크
 E-mail : phanvanca@yahoo.com



김 정 근

1990년 연세대학교 전기공학과 졸업(학사)
 1992년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사)
 2000년 아리조나대학교 대학원 전자컴퓨터공학과 졸업(박사)
 2003~현재 경희대학교 전자전파공학과 교수
 관심분야 : 무선네트워크
 E-mail : jg_kim@khu.ac.kr