

협력통신을 이용하는 무선 센서네트워크에서의 에너지 소비 감소를 위한 속도와 훈련심볼의 오버헤드 임계값 추정

정회원 모하메드 라키불 이슬람*, 종신회원 김진상*, 정회원 조원경*

Estimation of Velocity and Training Overhead Constraints for Energy Efficient Cooperative Technique in Wireless Sensor Networks

Mohammad Rakibul Islam* *Regular Member*, Jinsang Kim* *Lifelong Member*,
Won-Kyung Cho* *Regular Member*

요약

본 논문에서는 에너지가 제한적인 무선 센서네트워크에서 MIMO 기반 협력통신을 가능하게 하는 훈련심볼의 오버헤드와 데이터 수집노드(DGN)의 속도의 임계값을 제안한다. 두개의 송수신 안테나가 있는 경우에 대하여 에너지 효율과 지연값에 대한 성능을 분석하였다. 센서로부터 데이터 수집노드까지 장거리 통신을 할 경우에 대하여 기존의 SISO 보다 에너지를 적게 소모하는 MIMO 기반 협력통신 무선 센서 네트워크의 속도와 훈련심볼의 오버헤드 임계값들을 구하였으며 이들의 상관관계도 분석하였다.

Key Words : 협력통신, 에너지 소비, 훈련심볼 오버헤드, 무선 센서네트워크, 다중입력 다중출력.

ABSTRACT

A boundary value of the velocity of data gathering node (DGN) and a critical value for training overhead beyond which the scheme will not be feasible for a Multiple Input Multiple Output (MIMO) based cooperative communication for energy-limited wireless sensor networks is proposed in this paper. The performance in terms of energy efficiency and delay for a combination of two transmitting and two receiving antennas is analyzed. The results show that a set of critical value of velocity and training overhead pair is present for the long haul communication from the sensors to the data gathering node. Finally a relation between training overhead and velocity is simulated.

I. 서론

오늘날 협력통신 기술을 이용하여 원격 클러스터 무선 센서네트워크에서 에너지 소모를 최소화하려는 시도는 중요한 이슈가 되었다. 최근에는 하드웨어 기술의 발달로 인해 단일 칩내에 보다 많은 신호처리 기능들이 직접될 수 있다. RF 송수신기, A/D와 D/A 변환기, 기저대역 프로세서, 그 밖의 응용 인터

페이스들이 하나의 완전한 기능을 가지는 무선 노드 로써 사용되기 위해 단일 장치에 직접되어 질 수 있다. SoC(system on chip) 기반 무선 노드들은 소형 배터리로 동작되지만, 배터리 교체에는 많은 어려움과 비용이 따른다. 따라서 대다수의 경우에 무선 노드들은 수년 동안 배터리 교체없이 동작하도록 설계되어야 한다. 그러므로 에너지 소비 최소화는 센서 네트워크 설계시 매우 중요한 고려사항이다.

※ 본 연구는 경희대학교(과제번호: 20080042)의 지원으로 수행되었습니다.

* 경희대학교 전자전파공학과 (jskim27@khu.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-11-502, 접수일자 : 2008년 11월 12일, 최종논문접수일자 : 2009년 4월 23일

회로 레벨에서 많은 전력소비를 가져오는 복잡한 송수신기 회로와 신호처리가 요구되는 MIMO 기술은 에너지 제약적인 무선 센서네트워크에서의 MIMO 기술의 응용을 불가능하게 했다. 또한 크기가 작은 센서노드에서 다중 안테나를 구현한다는 것이 타당하지 않다. 이러한 문제에 대한 해결방안으로 MIMO 기반 협력통신기법과 가상 안테나 배열 개념이 제안되어 왔다. 전통적인 무선 시스템의 주된 전력소비는 전송 전력에 기인하지만, 무선 센서네트워크의 경우에는 항상 그렇지 않다; 실제로 무선 센서네트워크에서 송신기와 수신기의 처리에 필요한 회로 에너지가 주된 전력소비가 되는 경우가 많다. 따라서 전송에 필요한 에너지를 최소화하는 일반적인 에너지 최적화 기술은 무선 센서네트워크에서 항상 효율적이지 않다.

최근에 무선 통신 시스템을 위한 다양한 MIMO 기술에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다^{[1],[2]}. MIMO 기반 협력통신^[3]과 가상 안테나 배열^[1] 개념은 단일 안테나를 사용하는(단일-입력/단일-출력 또는 SISO) 노드의 네트워크에서 MIMO 성능을 발휘하기 위해 제안되어 왔다. 에너지 효율과 지연 분석에 관한 연구결과에서는 MIMO 기반 협력통신이 일정한 거리 이후에서는 SISO보다 성능이 좋다는 것이 증명되었다^{[5],[6],[7]}. 전통적인 MIMO 기반 협력통신방법과 몇 개의 우수한 노드만을 선택하여 통신을 하는 협력통신방법의 전체 에너지 소비와 지연시간에 대한 비교는 [2]에서 자세히 설명되었다. 협력통신을 할 경우 데이터의 상관성에 대한 연구는 [3]에서 상세하게 분석되었으며 선택적인 방법이 데이터의 상관성이 작은 경우와 높은 경우에도 전통적인 협력통신방법보다 성능면에서 우수함을 보였다.

본 논문에서는 에너지 제약적인 무선 센서네트워크상에서 MIMO 기반 협력통신을 이용할 경우 에너지 소모에 영향을 주는 훈련심볼의 오버헤드와 DGN의 속도의 임계값을 분석한다. 이를 위하여 MIMO 기반 협력통신과 SISO 의 경우에 대하여 전체 에너지 소비측면에서 성능을 분석한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 시스템 모델과 에너지 모델 및 협력통신 방법에 대하여 설명한다. 3장에서 분석 방법 및 결과를 보여주었고, 4장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

2.1 시스템 개요

본 연구에서 고려된 시스템은 그림 1과 같이 클

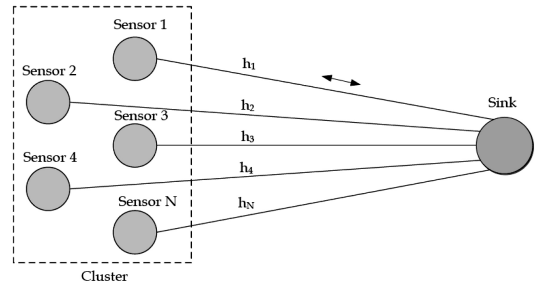


그림 1. 시스템 모델

러스터 무선 센서네트워크(WSN: wireless sensor network)이다. 본 논문에서는 일반적으로 MIMO, MISO, SIMO, SISO 구조를 형성할 수 있는 두개의 무선 센서 노드와 협대역, 플랫폼 페이딩의 통신링크를 고려한다. [1]과 같이 기저대역 신호처리 블록에서의 에너지 소비는 제외하고 논의를 간단하게 하기 위하여 비부호화 통신을 가정한다.

송신기와 수신기는 각각 N_T 와 N_R 안테나를 갖고 있으며 송신기 측에서는 N_T 개의 안테나들이 N_T 개의 센서로 분산되어 있고 이들이 협력통신을 위한 다중입력으로 사용된다.

2.2 에너지 모델

전체 에너지 소비는 크게 두개의 중요한 항목으로 표현될 수 있다. 전송 전력 P_{out} 의 함수인 모든 전력 증폭기의 소비전력 P_{PA} 와 그 외의 다른 회로 블록의 전력소비 P_C 로 분류된다.

$$P_T = P_{PA} + P_C \tag{1}$$

여기서 P_{PA} 는 증폭기 소비전력이고 P_C 는 회로 소비 전력이다. 증폭기 소비전력은 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$P_{PA} = (1 + \alpha)P_{out} \tag{2}$$

여기서 $\alpha = \left(\frac{\zeta}{\eta}\right) - 1$ 이고 η 는 드레인 효율 이고 ζ 는 평균율의 최대값이다. 비부호화 MQAM을 기반으로 분석을 하며 MQAM에서 $\zeta = 3 \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}+1}$ 이고 심볼당 비트 수(성상도 값)는 $b = \log_2 M$ 으로 정의된다. 채널이 AWGN 잡음을 갖는 k 멱수의 패스 손실을 가질 경우, P_{out} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{out} = \bar{E}_b R_b \times \frac{(4\pi)^2 d^k}{G_t G_r \lambda^2} M_t N_f \quad (3)$$

여기서 \bar{E}_b 는 주어진 BER 값을 충족시키는데 필요한 비트당 평균 에너지이다. R_b 는 전송 비트율이고, d 는 전송 거리이다. G_t 와 G_r 은 각각 송신기와 수신기 안테나 이득이고, λ 는 캐리어 파장, M_t 은 하드웨어 프로세스 변화와 배경 잡음을 보상하는 링크 마진이다. N_f 는 수신기 잡음값이고, $N_f = N_f/N_o$ 로 정의된다. 여기서 N_f 는 수신기 입력측에서 잡음의 전력 스펙트럼 밀도(PSD; power spectrum density)이고, N_o 는 실내 온도에서 single-sided 온도 잡음 PSD이다.

전체 전력소비에서 두 번째 항은 그림 2와 그림 3과 같이 송신기와 수신기 회로 블록으로 구성되는 회로블럭의 소비전력이다. 이 블록들의 소비전력은 다음과 같이 여러 개의 서브 블록으로 나누어진다.

$$\begin{aligned} P_{ct} &= P_{mix} + P_{syn} + P_{filt} + P_{DAC} \\ P_{cr} &= P_{mix} + P_{syn} + P_{LNA} + P_{filt} + P_{IFA} + P_{ADC} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 P_{ct} 와 P_{cr} 은 각각 송신기와 수신기의 회로 전력이다. P_{mix} , P_{syn} , P_{filt} , P_{LNA} , P_{IFA} , P_{DAC} , P_{ADC} 는 각각 믹서의 전력소비값, 주파수 합성기, 송신기와 수신기의 능동 필터, 저잡음 증폭기, 중간 주파수 증폭기, D/A와 A/D 변환기이다. 비트당 총 에너지 소비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{bt} = (P_{PA} + P_C) / R_b \quad (5)$$

여기서 R_b 는 실제 비트율이고 $R_b^{eff} = \frac{F - pN_T}{F} R_b$ 로

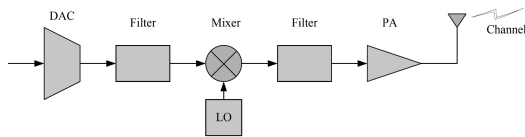


그림 2. 송신기 회로 블록

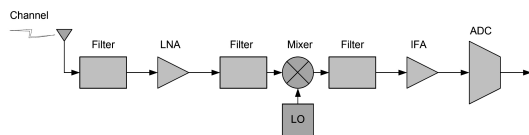


그림 3. 수신기 회로 블록

대체될 수 있다. 트레이닝 심볼 pN_T 은 채널을 추정하기 위해서 각각의 블록으로 삽입된다. 블록 크기는 심볼 F 와 같고 $F = \text{floor}(T_C R_s)$ 이다. 여기서 R_s 는 심볼율이고 T_C 는 페이딩 간섭시간이다. 페이딩 간섭시간은 $T_C = \frac{3}{4f_m \sqrt{\pi}}$ 로 계산될 수 있다. 여기서 최대 도플러 쉬프트 f_m 은 $f_m = \frac{v}{\lambda}$ 로 주어지고, v 는 속도이고, λ 는 캐리어 파장이다. 전체 에너지 소비는 E_{bt} 에 곱과 전송되는 비트 수 L_t 를 곱하여 계산된다.

2.3 협력통신

센서네트워크에서 네트워크 수명의 최대화는 중요한 관심사이다. 네트워크 관점에서 다중 노드들의 총 에너지 소비를 최소화하기 위해서 MIMO 기반 협력통신이 제안되었다. 일반적인 센서네트워크에서 다중 지역에 있는 센서들로부터 수집된 정보는 원격 중앙 프로세서로 전송된다. 만약 원격 프로세서가 멀리 떨어져 있다면, 정보는 먼저 중계 노드로 전송될 것이고, 그 다음 최종 목적지까지 데이터를 전달하기 위해 다중 홉 기반 라우팅이 사용될 것이다. MIMO(MISO, SIMO, MIMO를 포함)가 페이딩 채널에서 에너지 절약을 제공할 수 있다는 점을 이용하여, 우리는 다중 센서 노드들을 이용하여 협력통신을 할 수 있고, 다중 센서 노드들을 목적지 노드의 다중 안테나로 취급할 수 있다. 클러스터 헤드는 이런 클러스터 기반 WSN에서 협력통신을 위한 코디네이터처럼 동작한다.

MIMO 기반 협력통신 네트워크의 에너지 소비는 데이터 수집 센서들 사이에서의 지역 통신을 위해 필요한 에너지와 데이터 수집 노드에서 데이터 집합 노드까지 장거리 통신을 위해 필요한 에너지의 두가지 요소로 구성된다. 지역 통신을 위한 센서 노드당 비트당 평균 에너지는 E_i^l 로 나타낼 수 있고, 전체적인 또는 장거리 통신을 위한 비트당 평균 에너지는 E_j^g 로 나타낼 수 있다. 각각의 센서 노드가 데이터 집합 노드로 전송하기 위한 비트 수 L_i 를 갖는다고 가정한다면, 모든 노드에서 데이터 집합 노드까지 데이터를 전달하기 위해서 필요한 전체 에너지는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E^{MIMO} = \sum_{i=1}^{N_T} L_i E_i^l + E_j^g \sum_{i=1}^{N_T} L_i \quad (6)$$

본 논문에서는 2개의 데이터 수집 센서사이의 최대 거리가 d_m 미터라고 가정하고 전체 통신 거리 $d \gg d_m$ 라고 가정한다. 또한 모든 데이터 수집 노드들로부터 데이터 집합 노드까지의 거리는 같다고 가정한다. SISO 기반의 전통적인 무선 센서네트워크에서 상기와 같은 데이터를 전달하는데 요구되는 전체 에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E^{SISO} = \sum_{i=1}^{N_T} L_i E_i^{SISO} \quad (7)$$

여기서 센서 노드 i 부터 데이터 집합 노드까지 전송하기 위한 비트당 평균 에너지 E_i^{SISO} 는 $N_T = N_R = 1$ 일 경우의 MIMO 기반 통신의 특별한 경우로 간주하여 계산할 수 있다.

III. 분석결과

3.1 분석 파라미터

전체 통신 에너지 소비값을 구하기 위해서는 주어진 BER을 만족하는데 필요한 비트당 평균 에너지 \bar{E}_b 값을 알아야 한다. MQAM의 Alamouti 구조를 이용하는 MIMO 시스템의 평균 BER 값은 다음과 같이 주어진다^[15].

$$\begin{aligned} \bar{P}_b &\approx E_H \left[\frac{4}{b} \left(1 - \frac{1}{2^{\frac{b}{2}}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3b}{M-1}} \gamma_b \right) \right] \text{ for } b \geq 2 \text{ and} \\ &\approx E_H \left[Q \left(\sqrt{2\gamma_b} \right) \right] \text{ for } b = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $E_H[\cdot]$ 는 변수 H 를 포함하는 기대값이고,

$Q(\cdot)$ 는 $Q(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$. 와 같이 정의된다.

본 논문에서는 수치 탐색기법을 이용하여 \bar{E}_b 의 값을 구한다. 복잡성을 피하기 위하여 Alamouti 구조를 기반으로 하는 M-ary QAM의 2x2 MIMO 시

표 1. 시스템 파라미터

$f_c = 2.5$ GHz	$\eta = 0.35$
$G_t G_r = 5$ dBi	$N_0 = -171$ dBm/Hz
$B = 10$ KHz	$k = 2$ for local comm.
$N_f = 10$ dB	$k = 3$ for long haul com.
$M_i = 40$ dB	$P_{mix} = 30.3$ mW
$P_{syn} = 50.0$ mW	$P_{filt} = P_{filr} = 2.5$ mW
$P_{LNA} = 20$ mW	$L_i = 10$ kb

스템에 대하여 분석한다. 레일리 페이딩에서 M-ary QAM MIMO 시스템($M=2b$, b 는 짝수)의 BER은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} P_b &= \frac{4}{b} \left(1 - \frac{1}{2^{b/2}} \right) \frac{1}{2^{N_T N_R}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{E_b/2N_0}}} \right)^{N_T N_R} \\ &\times \sum_{k=0}^{N_T N_R - 1} \frac{1}{2^k} \binom{N_T N_R - 1 + k}{k} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{E_b/2N_0}}} \right)^k \end{aligned} \quad (9)$$

클러스터내의 센서들 사이의 지역 통신 경우에 거리 d_m 은 복잡성을 피하기 위해 1m로 결정하며 long haul 거리는 클러스터내의 모든 센서들로부터 같다는 것을 가정한다. 시뮬레이션에서 사용된 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

3.2 분석 결과

시뮬레이션을 위해서 클러스터내의 모든 센서들이 같은 데이터 크기 $L_i = 10$ kb를 전송하고 있다고 가정한다. 2x2 MIMO 시스템을 대상으로 실험하였으며, MIMO 기반 협력통신과 SISO의 경우에 대하여 비트당 전체 에너지 소비값을 예측하여 비교하였다. 일정한 속도를 유지한 상태에서 훈련심볼 오버헤드 (p)를 변경하여 에너지 소모 변화량을 실험하였다. 또한, 일정한 훈련심볼 오버헤드를 유지하면서 속도를 변경하여 에너지 소모량을 예측하였다.

속도 $v=5.82$ m/s일 경우 블록 크기 F 는 87이며,

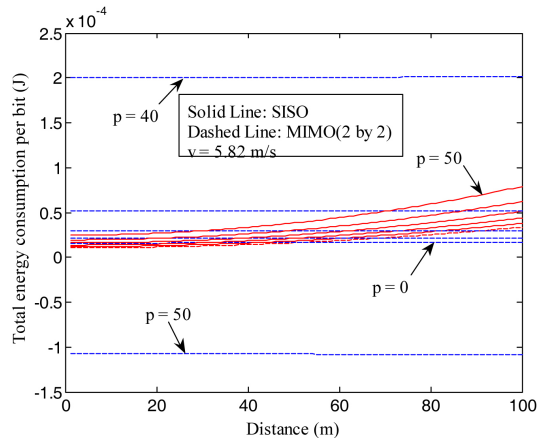


그림 4. 변수 p 의 비트당 전체 에너지 소비와 거리

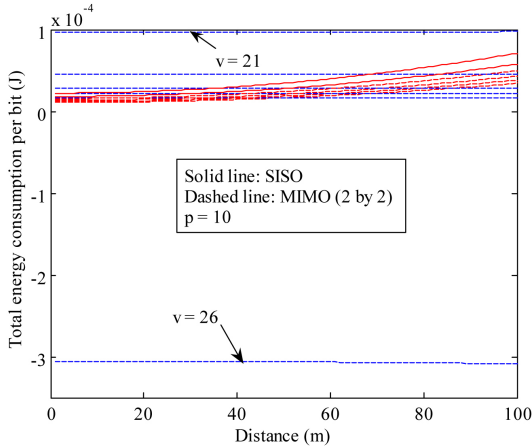


그림 5. 변수 v의 비트당 전체 에너지 소비와 거리

그림 4에서와 같이 $p=50$, $NT=2$ 인 경우 전체 에너지 소비는 SISO 보다 많으므로 임계값을 벗어남을 알 수 있다. 그림 5와 같이 고정된 훈련심볼 오버헤드를 이용하여 속도 v 를 변화시킬 경우에도 어느 이상의 속도에서는 SISO의 소모 에너지가 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 우리는 SISO 보다 에너지 소비가 적은 MIMO 협력통신을 제공하는 훈련심볼의 오버헤드와 속도의 임계값을 구할 수 있다. 표 2는 위와 같은 실험을 통하여 구해진 p 와

표 2. 속도와 훈련심볼 오버헤드의 임계값 쌍의 예

훈련심볼 오버헤드 값, p	속도, $v(m/s)$
10	24
15	16
20	12
25	09

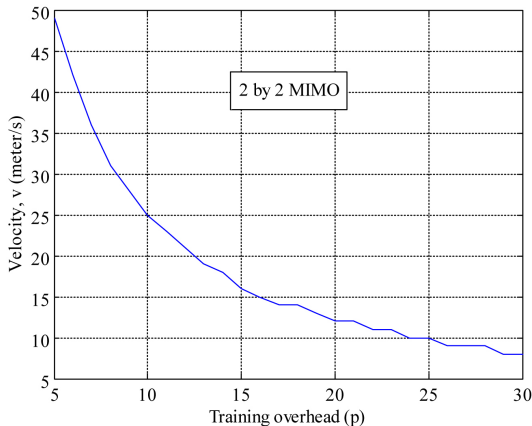


그림 6. 속도의 임계값과 훈련심볼 오버헤드의 임계값의 관계

v 의 임계값 쌍의 예이다. 만약 하나의 변수를 고정 시킨다면 다른 값은 그것의 임계값이 된다.

그림 6은 에너지 측면에서 우수한 MIMO 협력 통신을 제공하는 속도의 임계값과 훈련심볼의 임계값의 관계를 시뮬레이션을 통하여 구한 그래프이다. 그림 8과 같이 속도의 임계값과 훈련심볼 오버헤드의 임계값은 서로 반비례함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 MIMO 기반 협력통신을 이용할 경우 훈련심볼의 오버헤드와 DGN의 속도에 대한 분석을 통하여 기존의 SISO보다 에너지 소모값을 적게 할 수 있는 훈련심볼의 오버헤드와 속도의 임계값의 분석방법을 제시하였다. 이러한 분석방법을 이용하여 우리는 무선 센서네트워크의 DGN의 속도에 따라, 전체 네트워크의 에너지 소모를 줄일 수 있는 MIMO 협력통신 기반 무선센서네트워크의 훈련심볼 오버헤드를 신중하게 선택해야 함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. K. Jayaweera, "Virtual MIMO-based Cooperative Communication for Energy-constrained Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 5, pp. 984-989 May 2006.
- [2] M. R. Islam, H. T. Anh, J. Kim, "Energy efficient Cooperative Technique for IEEE 1451 based Wireless Sensor Network," *IEEE Wireless Communications & Networking Conference (WCNC), USA, March 2008*. (Accepted for publication)
- [3] M. R. Islam, J. Kim, "Energy Efficient Cooperative Technique for Wireless Sensor Network Using Selective Approach," submitted to *Journal of Communication and Network (JCN)*, 2007.
- [4] M. Dohler, E. Lefranc, and H. Aghvami, "Space-time block codes for Virtual antenna arrays," in *PIMRC, Lisbon, Portugal, September 2002*.
- [5] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-efficiency of MIMO and cooperative

MIMO techniques in sensor networks,” IEEE J. Select. Areas. Commun., vol. 22, no. 6, pp. 1089 - 1098, Aug. 2003.

[6] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, “Modulation optimization under energy constraints,” in Proc. IEEE Intl. Conf. Commun. (ICC 03), Alaska, USA, May 2003.

[7] —, “Energy constrained modulation optimization,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 4, no. 5, pp. 2349 - 2360, Sept. 2005.

[8] R. Berry and R. Gallager, “Communication over fading channels with delay constraints,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 48, no. 5, pp. 1135 - 1149, May 2002.

[9] M. A. Khojastepour and A. Sabharwal, “Delay-constrained scheduling: Power efficiency, filter design, and bounds,” Proc. INFOCOM Conf., Hong Kong, Mar. 7 - 11, 2004.

[10] E. Uysal-Biyikoglu, B. Prabhakar, and A. El Gamal, “Energy-efficient packet transmission over a wireless link,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 10, no. 4, pp. 487 - 499, Aug. 2002.

[11] Y. Yu, B. Krishnamachari, and V. K. Prasanna, “Energy-latency tradeoffs for data gathering in wireless sensor networks,” Proceedings the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '04), vol. 1, pp. 244 - 255, Hong kong, March 2004.

[12] Y. Yao and G. B. Giannakis, “Energy-efficient scheduling for wireless sensor networks,” IEEE Transactions on Communications, vol. 53, no. 8, pp. 1333 - 1342, 2005.

[13] J. Garzas, C. Calzon, and A. Armada, “An Energy-Efficient Adaptive Modulation Suitable for Wireless Sensor Networks with SER and Throughput Constraints,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Volume 2007, Article ID 41401, 7 pages, April 2007.

[14] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, “Space-time block codes from orthogonal designs,” IEEE Transactions on Information Theory, vol. 45, no. 5, pp. 1456 - 1467, 1999.

[15] J. G. Proakis, Digital Communications, 4th ed. New York: McGraw- Hill, 2000.

[16] Y. Gai, L. Zhang and X. Shan, “Energy Efficiency of cooperative MIMO with data aggregation in wireless sensor networks,” IEEE Wireless Communications & Networking Conference (WCNC), Hong Kong, March 2007.

[17] S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” IEEE J. Select. Areas in Commun., vol. 16, pp. 1451-1458, Oct. 1998.

[18] T. S. Rappaport, Wireless Communications Principles and Practices, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2002.

모하마드 라키블 이슬람 (Mohammad R Islam) 정회원



1998년/2004년 BUET 전기및전자공학과 학사/석사
1999년~현재 IUT 전기및전자공학과 조교수
2006년 8월~현재 경희대학교 전자·전자공학과 박사 과정
<관심분야> 이동통신 및 센서

네트워크

김진상 (Jinsang Kim) 종신회원



1985년~1987년 2월 경희대 전자공학과 학사/석사
2000년 12월 미국 콜로라도 주립대 전자공학박사
1990년~2001년 KT연구소
2001년~현재 경희대학교 전자정보학부 부교수

<관심분야> 멀티미디어 및 이동통신 SoC 설계

조원경 (Won-Kyung Cho) 정회원



1980년~현재 경희대학교 전자정보학부 정교수
2004년~2007년 경희대학교 부총장
<관심분야> 컴퓨터시스템 구조, VLSI 설계