

채널 모델링 방법에 따른 센서 네트워크 성능 변화

(The Effect of Wireless Channel Models on the Performance of Sensor Networks)

안 증 석[†] 한 상 섭^{**} 김 지 훈^{***}
 (Jong Suk Ahn) (Sang Seob Han) (Ji Hoon Kim)

요약 최근에 사용 편의성으로 인해 다양한 무선 이동 네트워크들이 널리 보급되면서, 무선 네트워크 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 무선 네트워크에서의 패킷 손실은 유선 네트워크의 혼잡이 아닌, 전파 오류로 인해 빈번히 발생되기 때문에, 시뮬레이션에서 무선 네트워크의 성능을 정확히 평가하기 위해서는 알맞은 무선 채널 모델을 채택해야 한다. 적합한 채널 모델은 사용 주파수 영역, 신호 출력, 방해물 존재 유무, 평가하는 프로토콜의 비트 오류에 대한 민감성 등 여러 가지 변수를 고려하여 선택해야 한다.

본 논문에서는 센서(Sensor) 채널의 고 전파 오류 특성을 분석하고, 센서 채널에 알맞은 채널 모델을 결정한다. 또한 센서 네트워크에서 수집한 비트 오류 데이터와 다양한 이론적 무선 채널 모델링 방식을 이용하여 링크계층 FEC(Forward Error Correction) 알고리즘과 TCP 성능 변화를 평가한다. 10일간의 센서 채널 트레이스와의 비교 분석에 의하면, CM(Chaotic Map) 모델은 센서 채널의 BER 편차와 PER(Packet Error Rate) 값을 각각 3배와 10배 이내의 오차 범위에서, 다른 모델은 수십 배 이상 오차 범위에서 예측한다. FEC 알고리즘과 세가지 TCP (Tahoe, Reno, 그리고 Vegas) 시뮬레이션 실험에서도 CM 모델은 트레이스와 유사한 성능 변화를, 다른 모델은 최대 10배 이상의 오차를 보인다.

키워드 : 전파 오류 모델, 무선 네트워크 시뮬레이션, 무선 센서 네트워크, CM(Chaotic Map) 모델

Abstract As wireless mobile networks have been widely adopted due to their convenience for deployment, the research for improving their performance has been actively conducted. Since their throughput is restrained by the packet corruption rate not by congestion as in wired networks, however, network simulations for performance evaluation need to select the appropriate wireless channel model representing the behavior of propagation errors for the evaluated channel. The selection of the right model should depend on various factors such as the adopted frequency band, the level of signal power, the existence of obstacles against signal propagation, the sensitivity of protocols to bit errors, and etc.

This paper analyzes 10-day bit traces collected from real sensor channels exhibiting the high bit error rate to determine a suitable sensor channel model. For selection, it also evaluates the performance of two error recovery algorithms such as a link layer FEC algorithm and three TCPs (Tahoe, Reno, and Vegas) over several channel models. The comparison analysis shows that CM(Chaotic Map) model predicts 3-time less BER variance and 10-time larger PER(Packet Error Rate) than traces while these differences between the other models and traces are larger than 10-time. The simulation experiments, furthermore, prove that CM model evaluates the performance of these algorithms over sensor channels with the precision at least 10-time more accurate than any other models.

Key words : Propagation Error Models, Wireless Network Simulation, Wireless Sensor Network, Chaotic Map Model

· 본 연구는 2004년도 동국대학교와 한국과학재단 특장기초연구과제 R01-2003-000-10739-0의 지원에 의하여 이루어졌음

† 종신회원 : 동국대학교 컴퓨터공학과 교수
 jahn@dgu.edu

** 비회원 : 동국대학교 컴퓨터공학과
 dboy1@dgu.edu

*** 학생회원 : 동국대학교 컴퓨터공학과
 whitefan@dgu.edu

논문접수 : 2004년 1월 29일
 심사완료 : 2004년 4월 27일

1. 서론

최근에 사용의 편의성으로 인해 다양한 무선 네트워크는 빠른 속도로 확산되어 사용되고 있다. 채택한 주파수 영역과 사용 목적에 따라 다양한 무선 네트워크들, 802.11b LAN, Bluetooth, 센서 네트워크, 802.16 WLL (Wireless Local Loop), WCDMA(Wideband Code

Division Multiple Access) 등이 등장하였다. 그러나 무선 채널은 일반적으로 유선 채널과는 다르게 BER이 10^{-4} 이상 높고, 짧은 시간 동안에 많은 비트들에 연속적으로 오류가 발생하는 군집적 특성이 있다. 이러한 비트 오류의 군집적 특성에 따라 링크 계층 FEC 알고리즘 성능이 변화하며, 또한 군집도에 따라 패킷 손실률도 다르게 되어 TCP 성능도 변화한다. 즉 시뮬레이션에 의한 알고리즘 성능 평가는 채택하는 무선 채널 모델에 의존한다.

무선 채널은 채택된 주파수의 영역, 신호 출력, 사용되는 환경 등에 따라 BER과 BER 분포도(distribution)가 다르다. 즉 다양한 환경에서의 무선 채널은 서로 다른 모델들로 표현되므로, 사용하려는 무선 채널에 따라 알맞은 모델을 선택해야 한다. 일례로 FS(Free Space), TWG(Two-Way Ground), SM(Shadowing Model), 리시안(Ricean), 레이라이(Rayleigh), UE(Uniform Error), MSM(Multi-State Markov), 그리고 CM(Chaotic-Map)[1,2] 모델 등이 제안되었다.

이들 모델들은 모델링 세밀도(granularity)에 따라 패킷 손상 여부만을 결정하는 패킷 단위(level) 모델과 각 비트들의 오류를 결정하는 비트 단위 모델로 분류된다. 패킷 모델은 TCP와 같은 상위 계층 평가에, 비트 모델은 링크 계층 FEC 알고리즘 평가에 사용된다. 또한 전파가 전송되는 물리적 현상을 수식화하여 오류 여부를 결정하는 방식과 물리적 현상과는 상관없이 측정된 오류 비트들의 분포를 근접한 확률 함수로 표현하는 방식으로 분류된다. 일례로 FS와 레이라이 모델은 물리적 현상을 모델링하는 방식이며, 세밀도 측면에서 FS는 패킷 오류를 결정하는 광대역 페이딩(LSF: Large-Scale Fading) 모델이고, 레이라이는 비트 오류를 결정하는 협대역 페이딩(SSF: Small-Scale Fading) 모델이다.

본 논문에서는 센서 네트워크에서 10일간 수집한 비트 오류 데이터를 기반으로 센서 채널의 오류 특성을 분석하고, 기존에 제안된 무선 채널 모델들 중에서 센서 채널에 알맞은 무선 모델을 결정한다. 또한 본 논문에서는 다양한 무선 모델의 특성에 따른 두 개의 오류 복구 알고리즘, 즉 링크 계층 FEC 알고리즘과 세가지 TCP, Tahoe, Reno, Vegas의 성능을 측정한다. 참고로 본 논문에서 사용하는 센서 네트워크는 UC Berkely에서 개발한 모트(Mote)로 구성되는데, 모트는 ISM(Industrial Scientific Medical) 밴드 433MHz 주파수를 이용하여 맨체스터(Manchester) 코딩 된 데이터를 최대 13.3kbps 속도로 전송한다. 센서 네트워크에서는 3.5mW 저 출력으로 인해 방해물과 방해 신호가 존재하는 환경에서는 BER 10^{-5} 인 고 오류율이 발생한다.

구체적으로 본 논문은 3개 확률 모델, UE, MSM, 그

리고 CM 모델과 물리 수식 모델인 SM을 실제 센서 트레이스(RT: Real Trace)와 비교한다. 채널 모델의 적합성 여부는 비트 단위 모델인 경우에는 BER과 군집 정도를 표현하는 BER 편차(variance), 패킷 단위 경우에는 PER과 PER 편차로 결정한다. 편차를 사용하는 이유는 같은 평균 값을 갖는 모델들인 경우에도 편차가 다르며, 편차에 의해 오류 복구 알고리즘들의 성능이 상이하기 때문이다. BER/PER 편차는 두 개의 인접한 오류 비트/패킷들간의 거리의 편차 역수, 즉 연속적인 무 오류 비트/패킷 수의 편차 역수로 계산한다. 비교 실험에 의하면, 4개 기존 모델 중에서 CM이 센서 채널의 비트 오류 군집 특성을 가장 정확하게 예측한다. 같은 BER 상태에서 RT와 비교할 때 CM 모델의 BER 편차와 PER은 각각 3배와 10배의 오차가, 다른 모델은 각각 10배와 100배의 오차가 있다.

4개의 모델과 측정 데이터를 이용한 802.11b LAN 시뮬레이션에서 CM 모델은 RT와 유사하게 BER이 증가하면 성능이 선형적으로 감소하다가 임의의 한계 BER을 기점으로 급격히 감소한다. 다른 모델에서도 802.11b 성능은 유사하게 선형적으로 감소하나, 한계 BER값은 CM 모델과 실제 데이터에 비해 10배정도 작다. 리드-솔로몬(RS: Reed-Solomon) FEC 알고리즘[3]을 적용한 경우도 RT와 CM 모델은 비슷한 감소 형태를 가지고 있으나 다른 모델은 많은 차이를 보이고 있다. 즉 같은 BER일 때에 군집도가 높은 모델에서는 낮은 모델에 비해, 복구되지 않은 패킷 수가 증가되어 FEC 알고리즘 성능은 저하된다. 또한 BER이 증가할 때에 세가지 TCP, Tahoe, Reno, Vegas[4]의 성능은 CM 모델과 RT 경우에는 완만하게 감소하는 추세를, 다른 모델에서는 저 오류율에서도 성능이 급격히 감소하는 추세를 보인다. 같은 BER일 때 군집도가 높은 모델에 비해 낮은 모델에서는 손상되는 패킷 개수가 증가해서 TCP 성능이 저하된다. 마지막으로 PER을 증가할 때는 비트 오류 모델의 종류에 상관없이 비슷하게 TCP 성능이 감소되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 널리 사용되는 무선 채널 모델들을 소개하며, 3장에서는 4개의 비트 단위 모델과 실제 센서 네트워크에서 수집한 비트 오류 특성을 비교 설명하며, 4장과 5장에서는 4개 채널 모델의 군집 정도, BER 변화, PER 증가에 따른 FEC 알고리즘 성능, 그리고 세가지 TCP 성능을 측정한다. 마지막으로 6장에서는 실험 결과를 요약하고 향후 연구 방향을 서술하였다.

2. 다양한 무선 채널 모델링 방식

무선 채널의 오류 특성을 표현하는 여러 가지 모델들

은 모델링 세밀도와 모델링 방식에 의해 구분된다. 모델링 세밀도 측면에서는 비트 단위와 패킷 단위로 구분되는데, 비트 세밀도는 비트 움직임에 영향을 받는 하위 계층 알고리즘 평가에, 패킷 세밀도는 상위 계층 알고리즘 평가에 필요하다. 패킷 시뮬레이터에서는[5,6] 패킷 손상 여부를 결정하는 패킷 세밀도를, 채널 시뮬레이터[7,8]는 다양한 신호 주파수, 송신자간의 거리, 사용환경 등을 고려하여 비트들의 손상여부를 결정하는 비트 세밀도를 제공한다. 대표적인 패킷 시뮬레이터인 NS-2에서는 수신 출력에 의해 패킷 손실을 계산하는 FS, TRG, SM을, MIT 채널 시뮬레이터는 주어진 무선 채널에서 오류 비트들을 결정하는 리시안과 레이라이 등 다양한 모델들을 제공한다.

채널 모델은 모델링 방식에 따라 비트/패킷들을 전송할 때 발생하는 물리적 현상을 수식화하는 방식과 측정된 오류 비트/패킷들의 분포를 확률 함수로 수식화하는 방식으로 구분한다. 다 경로 간섭(multi-path interference) 등의 물리적 현상을 수식화한 리시안과 레이라이 모델에서는 다음과 같이 비트 오류를 계산한다. 먼저 송수신자간에 존재하는 방해물 정도에 따라 리시안과 레이라이 모델을 선택하고 송/수신자간의 거리, 송/수신자의 속도에 의해 수신 신호 출력을 계산한다. 참고로 신호를 구성하는 사인(sine) 파형(wave)들의 출력이 비슷한 경우에 레이라이 모델을, 어느 하나의 구성 파형 출력이 월등할 때 리시안 모델을 사용한다. 다음은 수신 출력과 변복조 방식과의 오류 비트 발생 확률 함수를 이용하여 오류 비트를 결정한다[9]. 즉 같은 수신 출력에서도 사용하는 변복조 방식, QAM(Quadrature Amplitude Modulation), DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 등에 따라 오류 비트 발생 확률이 다르다.

그러나, 물리적 수식 방식은 상관되는 변수들 값을 정확히 결정하기 어렵고 계산 량이 많아, 무선 패킷 시뮬레이터에는 오류 비트를 결정하기 위해 근접 확률 분포 함수를 사용한다. 확률 분포 함수 방식은 실제 무선 채널에서 발생하는 비트 오류의 분포도를 임의의 분포 함수들의 계수들을 조정해서 근접하게 표현한다. 대표적으로 무선 채널을 위한 확률 함수로는 UE, MSM, CM 등이 있다. UE은 오류 비트들이 무작위적으로 균일하게 분포되는 상태를 표현하는데, rand()함수의 값과 주어진 BER 값을 비교하여 비트 오류를 결정한다.

무선 채널에서 시간에 따라 상이하게 발생하는 오류 비트들의 균집 분포도를 표현하기 위해, MSM은 서로 다른 BER을 갖는 다수 상태를 가정한다. MSM의 일종인 길버트-엘리엇(GE: Gilbert-Elliott)모델[10,11]은 두 상태, 즉 오류와 무 오류 상태를 가정하는 모델로 기존의 대표적인 무선 채널 모델이다. GE은 그림 1에서 보

듯이 저 오류(State I)와 고 오류(State II)의 두 상태를 가지는데, 각 상태의 BER인 r_1 과 r_2 , 각 상태의 지속 시간인 t_1 과 t_2 , 두 상태간의 확률 p_{12} 와 p_{21} 등, 6개 변수로 표현된다. 이때 무 전이 확률 p_{11} 과 p_{22} 는 각각 $1 - p_{12}$, $1 - p_{21}$ 으로 결정된다.

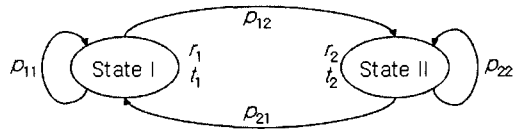


그림 1 GE 모델 상태 전이도

이 6개 변수를 조정하여 BER과 균집 정도를 결정하는데, GE의 BER은 식 (1)과 같다. 즉 상태 1과 2에 머무는 확률은 각각 $p_{12}/(p_{12}+p_{21})$ 과 $p_{21}/(p_{12}+p_{21})$ 이므로, 각 상태에서 발생하는 오류 비트 수는 $p_{12} * t_1 * r_1 / (p_{12} + p_{21})$ 과 $p_{21} * t_2 * r_2 / (p_{12} + p_{21})$ 이다. 따라서 GE의 BER은 총 오류 비트를 오류 발생 시간 $(p_{12} * t_1 + p_{21} * t_2) / (p_{12} + p_{21})$ 시간으로 나눈 것이다.

$$BER = \frac{(p_{12} * t_1 * r_1) + (p_{21} * t_2 * r_2)}{(p_{12} * t_1) + (p_{21} * t_2)} \quad (1)$$

GE은 같은 BER이라도 사용되는 계수 값, 즉 각 상태에 머무는 확률(p), 각 상태 지속 시간(t), 각 상태의 오류율(r) 값에 따라 상이한 오류 비트의 균집도를 표현한다. 그림 2는 NS-2 시뮬레이션에서 BER은 같으나 균집도가 다른 GE 모델을 사용할 때 802.11b LAN에서의 PER 변화를 보여준다. GE I과 GE II의 다섯 개 변수 t_1 , t_2 , r_1 , p_{12} , p_{21} 은 각각 (1ms, 100ms, 0%, 0.5%, 0.5%)과 (1ms, 10ms, 0%, 0.6%, 0.2%)으로 고정하고, GE I과 GE II의 r_2 를 변화하여 같은 BER이 되도록 한다. GE I과 GE II는 각각 오류상태가 100ms와 10ms 동안 유지되므로, 같은 BER일 때는 GE I은 GE II에 비해 장기간 낮은 BER을 유지하여 GE I의 PER이 크

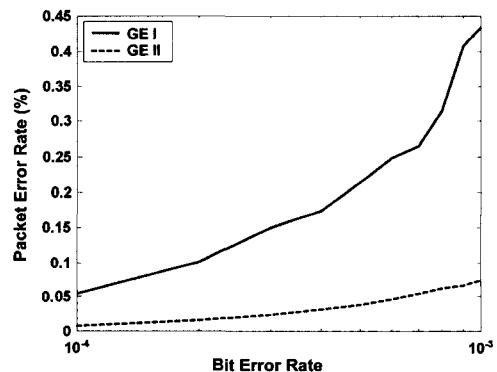


그림 2 두 가지 GE 모델에서의 무선 LAN PER 변화

다. BER이 증가하면 이 차이가 계속 증가하게 되는 데, 일례로 BER이 10^{-3} 일 때 PER 차이는 약 40%까지 증가한다.

그러나 두 상태를 반복하는 GE 모델은 다양한 BER이 분포되는 채널 상태를 정확하게 표현하지 못하며, 정확한 채널 모델링을 위해 MSM 또는 CM을 사용한다. 특히 CM은 최근에 802.11b 무선 LAN 채널을 위한 것으로 GE처럼 두 상태, 오류(bad) 상태와 무 오류(good) 상태를 갖는다. 그러나 GE와는 다르게 균집도를 높이기 위해 CM 오류 상태에서 전송되는 모든 비트에는 오류가 발생된다. 매 비트를 전송할 때마다 식 (2)를 계산하여 상태가 변환되는 데, x_{t-1} 이 1보다 크게 되면 상태가 변환되고 1 이하이면 현재 상태를 유지한다. 초기 x_t 값은 0과 1사이의 무작위 수로 결정된다.

$$x_{t+1} = x_t + u * x_t^z + e \quad t \in N \quad (2)$$

식 (2)에서의 세 개의 인자, u , e , z 는 오류 상태와 무 오류 상태에서 서로 다른 값, (u_g, e_g, z_g)과 (u_b, e_b, z_b)을 갖는다. u 값이 클수록 상태 변화가 빈번히 발생하여 오류 비트 열 또는 무 오류 비트열의 길이가 짧아지며, z 값은 클수록 현재 상태에 머무르는 확률이 높아진다. 마지막으로 e 는 최대 오류 또는 무 오류 비트 열의 수를 제한하는 인자이다. 즉 x_t 의 값이 연속적으로 0의 값이 되어도 식 (2)에서 $1/e$ 번 후에 x_{t+1} 값이 1보다 크기 때문에 적어도 $1/e$ 번 마다 한번씩 상태 전이가 일어난다.

SM 모델은 전파 전송의 물리적 현상인 협대역과 광대역 페이딩에 기반하여 오류 패킷 또는 비트를 결정한다. 즉 SM에서는 송/수신자간의 거리에 따라 수신 신호 세기가 감소되는 광대역 페이딩과 사용 환경의 미세한 변경에 의해서 수신 신호 세기가 급격히 변화하는 협대역 페이딩을 모두 반영한다. 구체적으로 SM에서는 신호 세기는 송/수신자간의 거리에 비례하여 감소한 전파 세기에 임의 정규 분포 함수 값을 더한 값으로 결정된다. 따라서 SM에서 BER과 BER편차는 정규 분포 함수의 평균과 편차에 의해서 결정된다.

마지막으로 RT 방식은 특정 무선 채널에서 수집한 데이터를 그대로 시뮬레이션에 적용하여 패킷의 오류 비트 수와 위치를 결정한다. 이 방식은 일반적인 무선 채널이 아닌 특정 채널만을 모델링하는데, 다음의 세 가지 방법으로 세분된다. 첫째 방식은 수집한 오류 데이터의 분포도를 위에서 설명한 하나의 수식으로, 또는 다수 수식으로 표현하는 것이다. 둘째 방식은 수집한 데이터를 분석하여 각 오류 비트 수와 연관된 확률 값을 테이블 형식의 히스토그램(histogram)으로 저장하여 사용하는 것이다[12]. 마지막 방식은 측정된 비트 트레이스를 시뮬레이션 할 패킷 크기로 나누고 각 패킷마다 발생한

일련의 오류 비트의 수를 저장하여, 차례로 시뮬레이션에서 전송하는 패킷의 오류 비트수로 사용하는 것이다. 이 방식은 트레이스의 크기에 의해 시뮬레이션할 수 있는 패킷 개수가 제한되나, 특정 장소와 시간대의 무선 채널을 정확히 모델링한다. 본 논문에서는 이 방식으로 RT 모델을 구현하였다.

3. 센서 네트워크의 비트 오류 예측

본 절에서는 UE, GE, CM 모델과 물리 현상모델, SM이 센서 채널 오류 특성을 적합하게 표현하는가를 평가한다. 오류 트레이스는 UC Berkeley에서 개발된 세 개의 미카 모트(mica mote)[13]로 센서 네트워크에서 수집하였는데, 두 노드는 단 방향으로 데이터를 전송하고 나머지 하나는 수신 패킷을 측정하였다. 미카 모트는 8비트 마이크로 프로세서(micro-processor)와, 128 Kbyte 플래쉬(flash) RAM, 8Kbyte의 SDRAM으로 구성되며, 433Mhz 대역의 ISM 라디오 주파수 대역의 저출력 신호를 사용한다.

비트 오류는 i 번째 송신한 비트 s_i 와 수신한 비트 r_i 의 비교를 통해 판단하는 데, 연속적인 무 오류 비트 열은 run으로 그리고 연속적인 오류 비트 열은 burst라 지칭한다. 일례로 전송한 비트가 모두 0이고 수신한 비트들이 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1이면, run 길이는 3, 4, 2이고 burst 길이는 2, 1, 3이 된다. 각 오류 모델의 적합성 여부는 오류 비트들의 균집 정도, 또는 run 길이의 CCDF (Complement Cumulative Density Function)로 표현된다[1]. CCDF는 CDF의 보수(complement)이며, CDF는 무작위 확률 변수 X 가 특정 값 C 보다 작을 확률, $P\{X \leq C\}$ 을 의미한다.

그림 3은 3개의 오류 모델 BER을 트레이스 BER $2.5 \cdot 10^{-3}$ 에 맞추었을 때, 오류 모델의 run 길이 CCDF와 트레이스 run길이 CCDF를 비교한다. BER을 맞추기 위해서 UE의 평균 값 p 는 $2.5 \cdot 10^{-3}$ 로, GE 모델에서의 $p_1, p_2, r_1, r_2, t_1, t_2$ 는 각각 (0.5%, 0.5%, 0, $2.75 \cdot 10^{-3}$, 1ms, 10ms)로, CM 모델에서 저 오류 상태와 고 오류 상태의 z, u, e 값은 각각 ($3.7, 10^{-10}, 0.001$)과 ($1.67, 6.83, 4.6 \cdot 10^{-3}$)로 정하였다. 참고로 CM에서의 BER은 $2.8 \cdot 10^{-3}$ 인데, 이 차이는 주어진 평균 BER을 생성하는 CM의 여섯 변수 값을 정확히 결정하기가 어렵기 때문이다[1].

그림 3에서 보듯이 4개의 오류 모델은 거의 같은 BER을 가지지만, 상이한 오류 분포도를 보인다. 즉 UE와 GE의 CCDF는 run 길이가 증가하면 지수적으로, CM과 트레이스의 CCDF는 두꺼운 꼬리 분포(heavy-tailed distribution)를 가지며 선형적으로 감소한다. 이러한 분포도는 UE와 GE의 무 오류 비트열의 길이는

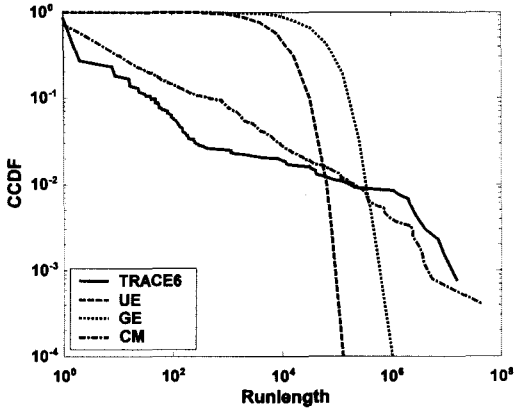


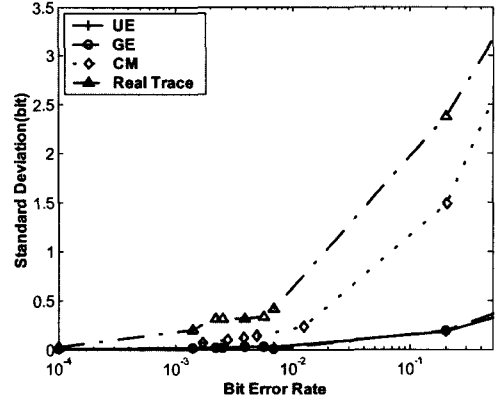
그림 3 트레이스과 3개 오류 모델의 CCDF 비교

작은 범위로 제한되어 있는 것을, CM과 트레이스의 무 오류 비트 열은 넓은 범위에 퍼져 있는 것을 의미한다. 즉 UE은 대부분 10^4 에서 10^5 개 비트열 다음에, GE은 10^5 에서 10^6 비트열 다음에 오류가 발생한다. 이에 반해, CM 모델과 트레이스 run길이가 1에서 10^7 까지 고르게 분포한다.

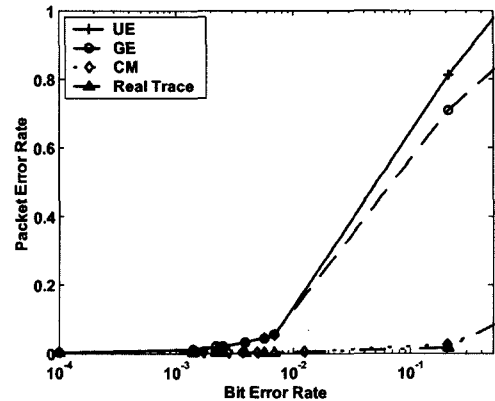
오류 분포도의 정확도는 CCDF가 아닌 수치, 즉 BER 편차, PER 그리고 PER 편차로도 판단할 수 있다. 이는 이 수치들이 각각 비트 단위와 패킷 단위 움직임에 관련 있는 링크 계층 FEC 알고리즘과 TCP 성능에 영향을 주기 때문이다. 일례로 TCP의 혼잡 제어 윈도우 크기는 PER과 연속되어 손실되는 패킷 개수에 영향을 받는다. 그림 4(a), 4(b), 4(c)는 각각 10개의 RT BER을 4개의 오류 모델의 BER과 같게 했을 때 BER 편차, PER, 그리고 PER 편차 값을 비교하였다. 이때 사용한 트레이스는 비트 트레이스가 아닌 패킷 트레이스이기 때문에, BER 편차는 패킷간의 BER 편차를, PER 편차는 인접하여 손상된 패킷간의 무 오류 패킷 개수 편차의 역수를 사용하였다.

그림 4(a)에서 보듯이 BER에 비례하여 세 모델과 RT BER 편차는 증가하며, BER이 5×10^{-1} 근처에서는 트레이스, CM, GE, 그리고 UE 모델은 각각 2.4, 1.5, 0.2, 0.2의 값을 갖는다. 또한 세 모델은 모두 RT의 BER 편차 보다는 작은 값을 예측하는데, UE나 GE는 RT와 10배 이상, 이에 비해 CM 모델은 오차범위가 3에서 0.2배이다. 이는 센서 채널의 비트 오류는 기존의 오류 모델이 예측하는 것보다 균질적이라는 것을 의미한다.

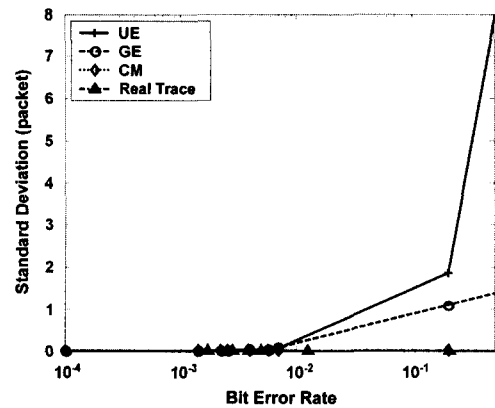
그림 4(b)는 BER 편차와 반 비례 관계가 있는 PER 변화를 보여주는데, BER이 증가하면 UE와 GE에서는 빠른 속도로 PER이 증가하나, RT와 CM에서는 거의 PER이 변화하지 않는다. 일례로 BER이 3.9×10^{-3} 일 때,



(a) BER 편차



(b) PER



(c) PER 편차

그림 4 오류 모델에 따른 BER 편차, PER, PER 편차 비교

RT의 PER은 4.2×10^{-4} 인데, UE, GE, CM의 PER은 각각, 3×10^{-2} , 3.1×10^{-2} , 4×10^{-3} 이다. 즉, 무선 모델의 오류

비트들의 군집적 현상을 정확히 표현하지 못하는 UE와 GE 모델은 RT에 비해 최대 100배 정도 큰 PER 값을 예측하며, CM은 3에서 10배 정도의 오차 범위에서 RT PER을 예측한다. 이러한 수치는 [1]에서 CM 모델이 802.11b LAN의 오류 분포를 오차 범위 70%에서 예측한다는 결과와는 차이가 있다.

마지막으로, 그림 4(c)는 PER 편차를 보여주는데, 4(a)와 4(b)와 같이 고 오류를 상태에서는 UE와 GE는 RT와 많은 차이가 있으나, CM은 차이가 없다. 즉 RT의 PER 편차에 비해 UE나 GE는 10배 정도, CM은 최대 4배 정도의 오차를 갖는다. 일례로 BER이 3.9×10^{-3} 일 때 RT는 1.8×10^{-4} 를, UE, GE, CM은 각각 3.2×10^{-2} , 3×10^{-2} , 4.1×10^{-4} 값을 갖는다. 이는 오류 패킷간의 패킷 수의 편차가 대략적으로 각각 5,000개, 30개, 30개, 2,500개 정도라는 것을 의미한다. BER이 증가하면 PER 편차는 급격히 커지는 데, 일례로 10^{-1} 이상일 때 UE의 PER 편차는 8이다. 이는 대부분 패킷이 손상되어 오류 패킷간의 무 오류 패킷 수와 패킷 수 편차 값이 0에 근접하는 것을 의미한다.

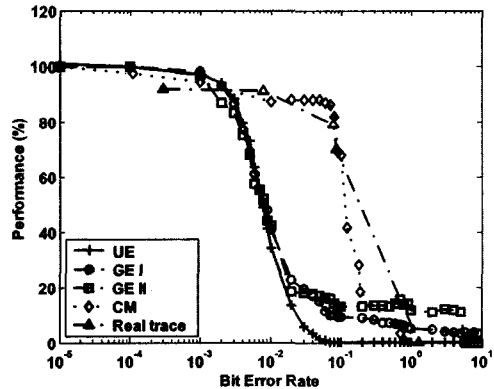
4. 센서 채널 모델링 방식에 따른 FEC 성능 변화

본 절에서는 패킷 시뮬레이터에서 UE, GE, CM 그리고 RT를 사용하여 802.11b에 FEC 알고리즘을 적용할 때의 성능을 측정한다. 그림 5은 두 개의 노드가 100바이트의 UDP 패킷을 지속적으로 전송할 때 각각 802.11b 네트워크와 최대 6비트를 교정할 수 있는 RS 알고리즘을[3] 채택한 802.11b 네트워크의 성능을 보여준다. 그림 5의 y축은 오류 채널에서의 성능과 무 오류 채널에서의 성능 비를, x축은 BER를 나타낸다. 이 절을 포함한 다음 실험에서 성능은 단위시간당 전송되는 무 오류 비트 수를 의미한다. 또한 RT를 제외한 그래프에서 하나의 점은 무작위 함수 시드(seed)를 변경하면서 1000초 시뮬레이션을 10번 반복한 값의 평균이다. 이 시뮬레이션 기간 동안에 드문 사건(rare event)인 오류 패킷은 약 만개이상 발생하였고, 10번 시뮬레이션간의 성능 차이는 무시할 정도인 1%이다. 이는 시뮬레이션 시간 동안에 측정하는 네트워크가 안정 상태에 도달하고, 10번의 반복은 측정하는 네트워크의 특성을 정확히 평가하는 데 충분하다는 것을 의미한다. 이들 시뮬레이션 값의 95% 신뢰구간(confidential interval)은 평균값 $\pm 4.93\%$ 이다.

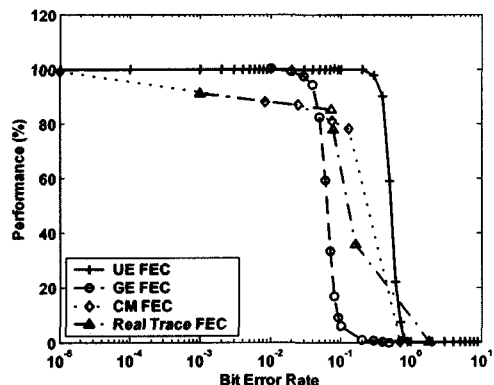
그림 5(a)에서 GE I과 GE II는 각각 $t_1, t_2, r_1, p_{12}, p_{21}$ 를 (1ms, 10ms, 0, 0.5%, 0.5%)과 (1ms, 1ms, 0, 0.5%, 0.5%)로 고정하고, r_2 를 x축 BER에 맞게 변화하였다. 그림 5(a)에서 보듯이 세 가지 모델과 RT는 BER

이 10^{-3} 보다 작으면 거의 유사한 성능을 예측하나, 오류율이 10^{-3} 이상이면 UE와 GE는 빠르게 성능이 감소한다. 참고로 UE 경우에 BER이 0.125×10^{-3} 이면 평균적으로 모든 1000바이트 패킷에서 1비트가 손상된다. 이에 비해 CM과 RT는 BER이 10^{-1} 이 될 때까지 성능이 저하되지 않으며, 이 한계점을 지나게 되면 UE와 GE와 마찬가지로 성능이 급속하게 감소한다. 이와 같이 한계 BER이상 BER을 증가하면 성능이 급격하게 감소하는 것은 802.11b에서 오류 복구를 위한 대부분의 재전송 패킷들도 손상되기 때문이다. 또한 RT와 CM의 한계 BER이 큰 이유는 UE와 GE에 비해 비트 오류들이 군집적으로 분포하여 같은 BER일 때도 오류 패킷 개수가 작기 때문이다.

그림 5(b)는 802.11b에 FEC 알고리즘을 적용할 때의 성능을 보여주는데, 그림 5(a)에 비해서 임계 BER값이 크게 증가하였다. UE와 GE의 임계 BER은 3×10^{-3} 에서 각각 5×10^{-1} 와 3×10^{-2} 으로, CM과 RT는 임계 BER값이 10% 정도 증가했다. 즉 UE와 GE의 경우에는 오류 비



(a) 802.11b의 성능



(b) 802.11b에 FEC 알고리즘을 적용한 경우
그림 5 오류모델에 따른 802.11b의 성능 비교

트들이 비교적 균일하게 분포하여 패킷당 오류 비트 수가 작아 FEC 알고리즘으로 손상된 대부분의 패킷들이 복구된다. 이에 반해 CM과 RT 경우에는 오류 비트들이 균질적으로 분포하기 때문에 복구되는 패킷 수가 현저하게 감소하여 성능이 향상되지 않는다.

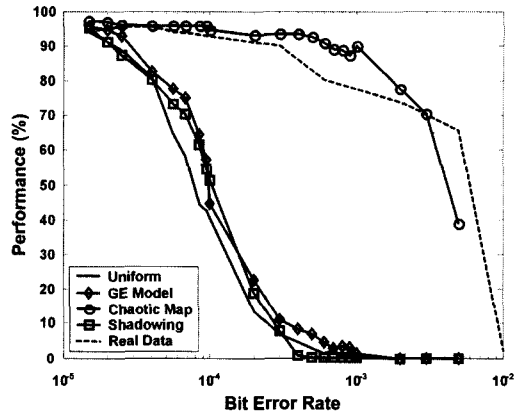
5. 센서 채널 모델링 방식에 따른 TCP 성능 변화

본 절에서는 NS-2 시뮬레이션에서 UE, GE, CM, SM과 RT로 무선 채널을 모델링할 때 세가지 TCP, Tahoe, Reno, Vegas 성능 변화를 측정한다. 초기 버전인 Tahoe는 AIMD(Additive Increase and Multiplicative Decrease)의 방식으로 혼잡 제어 윈도우(CW: Congestion Window)를 조정하여 흐름 제어와 오류 복구 기능을 수행한다. 즉 Tahoe는 패킷 손실이 없는 경우에 현재 CW의 크기에 따라 CW를 지수적으로 또는 선형적으로 증가시키며, 패킷 손실이 발생할 때는 CW를 최소 세그먼트(segment) 크기로 감소시킨다.

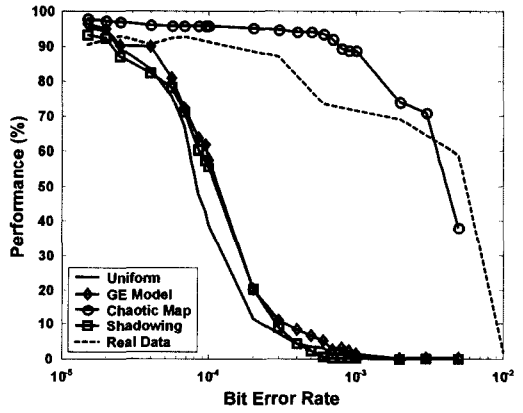
Reno는 패킷이 손실될 때에도 성능이 급격히 저하되는 것을 방지하기 위해 빠른 재전송(fast retransmission)과 빠른 복구(fast recovery) 알고리즘을 추가한다. 빠른 재전송은 세 응답 패킷의 응답 일련번호가 같을 때는 패킷이 손실된 것으로 간주하며, 빠른 복구는 빠른 재전송 방식에 의해 패킷 손실이 감지될 때 CW를 전 상태 크기의 절반으로 감소한다. 마지막으로 CW가 진동되어 성능이 저하되는 문제를 해결하기 위해, Vegas는 수신자의 최대 가용 대역폭을 계속적으로 측정하고, 측정된 대역폭에 알맞게 CW 크기를 조정한다.

그림 6에서는 BER이 10^{-5} 에서 10^{-2} 로 변화할 때, 오류 채널에서의 TCP 성능과 무 오류 상태에서의 TCP 성능 비를 보여준다. 측정하는 무선 네트워크는 대역폭이 2Mbps인 802.11b LAN으로, 두 이동 노드가 무한히 큰 파일을 TCP를 통해 전송한다. 패킷 크기는 1000바이트로 고정하였으며, 한번 시뮬레이션은 1000초를 수행한다. 그림 6의 한 점은 10번 시뮬레이션의 평균이며, 이들 값의 95% 신뢰구간은 평균값 $\pm 3.75\%$ 이다. RT의 경우 10^{-3} 이상 고 오류율에 데이터를 위해서 실험하는 BER에 맞게 실제 트레이스에서 고 오류율 부분만을 추출하여 가상의 트레이스를 만들었다. 실제 상황에서 고 오류율이 지속하는 것으로 가정하면, 제작한 트레이스도 실제 센서 네트워크를 반영할 것으로 생각한다.

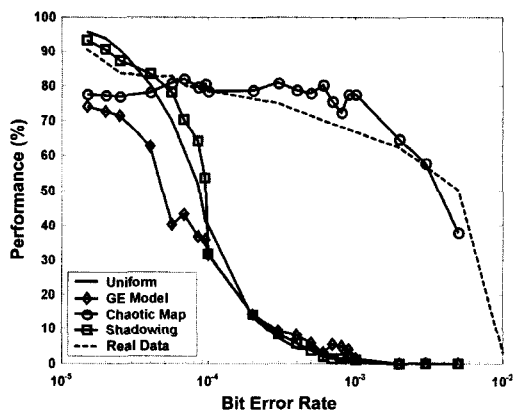
그림 6의 세 개의 그래프에서 보듯이 TCP는 버전에 상관없이 오류율이 증가함에 따라 성능이 저하된다. 특히 Tahoe와 Reno는 거의 같은 성능 변화를 보여 주는데, 이는 패킷들이 연속해서 손실되지 않아 Reno의 빠른 재전송과 빠른 복구 알고리즘의 효과가 크지 않기



(a) Tahoe



(b) Reno



(c) Vegas

그림 6 BER에 따른 Tahoe, Reno, 그리고 Vegas 성능 변화

때문이다. 또한 Vegas는 두 TCP에 비해 BER 10^{-4} 에서 10^{-3} 구간의 고 오류율에서는 낮은 성능을 보여 주는

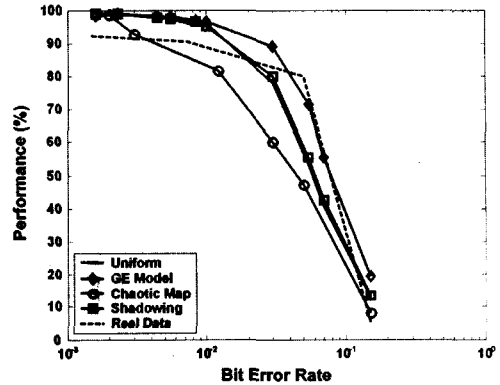
데, 이는 전파오류에 의한 패킷 손실을 혼잡에 의한 패킷 손실로 간주하여 최대 가용 대역폭을 과소 평가하기 때문이다. 또한 다섯 개 모델은 BER 10^{-5} 근처의 저 오류율 상태에서 같은 성능을 보여주나, BER이 10^{-4} 이상이 되면 RT와 CM 모델은 나머지 세 개 모델과는 다른 성능을 보인다. 즉 CM과 RT를 사용한 경우에는 TCP 성능은 BER이 증가함에 따라 선형적으로 서서히 감소하나, 다른 모델에서는 급격히 저하된다. 일례로 BER이 10^{-3} 일 때, TCP 성능은 CM과 RT를 사용하면 80% 이상을, 다른 모델에서는 0에 접근한다. 이에 비해 CM과 RT는 BER이 10배 큰 10^{-2} 로 증가할 때에 비로소 성능이 0이 된다.

이러한 성능 차이는 FEC 알고리즘 평가에서도 지적했듯이 오류 균집도에 인한 것으로, 같은 BER일 경우에도 균집도에 따라 손상된 패킷 개수가 차이가 나기 때문이다. 구체적으로 표 1의 BER 결과 PER율은 각각 BER이 3×10^{-4} 일 때 그리고 PER이 5×10^{-2} 일 때, 다섯 개 모델에서 패킷 단위로 측정된 오류 패킷간의 거리와, 패킷 손실률, 그리고 평균 TCP CW 크기를 보여준다. BER율의 수치를 비교하면 UE와 CM간의 패킷 손실률은 100배정도, CW 크기는 5배 정도의 차이가 난다.

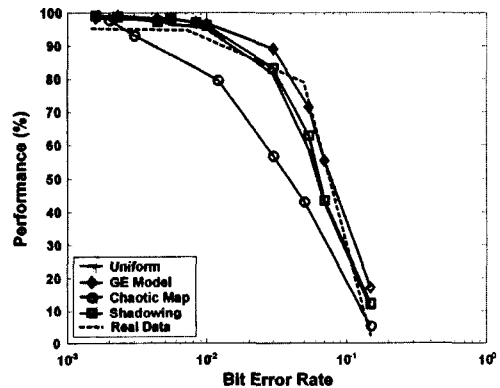
오류 모델링 세밀도와 패킷 단위의 알고리즘 성능과의 상관관계를 알기 위해서, 그림 7은 그림 6과 같은 실험 환경에서 BER이 아닌 PER변화에 따른 세 TCP의 성능 변화를 측정된 것이다. 그림 7의 각 점은 10번 시뮬레이션 결과의 평균 값이며 95% 신뢰구간은 평균값 $\pm 5.18\%$ 이다. 그림 7은 PER이 같은 경우에는 서로 다른 비트 오류 모델을 사용해도 TCP 성능은 유사한 것을 보여준다. 즉 패킷 단위 복구 알고리즘인 TCP의 성능은 BER이 아닌 PER과 PER STD에 의존하기 때문이다. 구체적으로 Tahoe와 Reno는 오류 모델에 따라 최대 20%의 차이로, Vegas는 모델에 상관없이 비슷한 성능을 보이고 있다. 즉 다섯 모델은 PER는 같고 오류 패킷의 분포도만이 다른데, Tahoe와 Reno는 오류 패킷의 분포도에 민감하며 Vegas는 이 수치에 민감하지 않는 것을 보여준다. 구체적으로 표 1에서 같은 PER을 유지할 때에 GE의 오류 거리가 CM에 비해 크다. 이는 CM에서는 GE에 비해 오류 패킷들이 연속적으로 발생하는 것을 의미하며, 이와 같은 연속적 패킷 분실로 인해 CW의 크기는 작아지게 된다.

6. 결론과 향후 연구

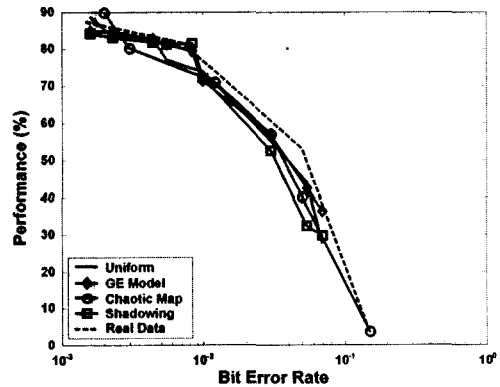
본 연구에서는 센서 채널을 비트 오류 특성을 분석하고 알맞은 오류 모델을 제시하였다. 10일간의 트레이스 데이터에 의하면 최대 BER은 10^{-2} 정도로 다른 고 출력 무선 네트워크에 비해서는 높은 오류율을 보이며 오류



(a) Tahoe



(b) Reno



(c) Vegas

그림 7 PER에 따른 Tahoe, Reno, 그리고 Vegas 성능 변화

분포도도 균집적인 특성을 보이고 있다. 또한 비교 실험한 네 개의 오류 모델 중에서는 CM 모델이 센서 채널의 균집적 특성을 비교적 정확히 예측하였다. 즉 시뮬레이션에 트레이스를 적용한 FEC 알고리즘과 TCP의 성

표 1 오류 모델 3×10^{-4} BER과 5×10^{-2} PER에 따른 채널 특성과 TCP 윈도우 크기

		BER					PER				
		UE	GE	SM	CM	RT	UE	GE	SM	CM	RT
Tahoe	오류 거리	4.65	6.2	5.32	451	320	19.85	26.84	20.22	18.6	19.64
	패킷손실율	0.22	0.16	0.19	0.003	0.0025	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	윈도우크기	2.46	3.12	2.77	12.1	12.42	5.32	6.15	5.87	5.12	5.31
Reno	오류 거리	4.7	6.2	5.48	458	247	20.14	25.44	20.17	16.86	18.48
	패킷손실율	0.21	0.16	0.18	0.002	0.0038	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	윈도우크기	2.66	3.03	2.86	13.27	112.48	5.65	6.38	5.62	4.87	5.55
Vegas	오류 거리	4.95	6.15	5.12	445	301	19.77	24.88	20.07	17.17	19.08
	패킷손실율	0.21	0.17	0.2	0.004	0.0024	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05
	윈도우크기	1.93	2.5	2.08	12.5	12.4	3.2	3.42	3.36	3.49	3.57

능을 측정하는 실험에서, CM 모델은 다른 모델과는 달리 트레이스의 임계 BER을 비교적 정확하게 예측하였다. 차후 연구로는 센서 트레이스를 기반으로 CM 모델보다 센서 채널에 알맞은 모델을 개발하며, 실제 센서 네트워크 상에서 FEC 알고리즘과 TCP 성능 평가를 통해 무선 채널 모델의 정확도를 평가할 것이다.

참고 문헌

[1] Andreas Köpke, Andreas Willig, Holger Karl, "Chaotic Maps as Parsimonious Bit Error Models of Wireless Channels," In Proceedings of the IEEE Infocom, San Fransico, USZ, TKN, IEEE. March 2003.

[2] Andreas Willig, "A New Class of Packet- and Bit-Level Models for Wireless Channels," in Proc. IEEE PIMRC, 2002, accepted for publication.

[3] W. Peterson and E. Weldon, Jr., "Error-Correcting Codes," 2nd Edition, The Massachusetts Institute of Technology.

[4] Brakmo, L., O'Malley, S., "TCP Vegas, New Techniques for Congestion Detection and Avoidance," SIGCOMM'94, London, pp. 24-35, October 1994.

[5] M. Takai, R. Bagrodia, A. Lee, M. Gerla, *Impact of Channel Models on Simulation of Large Scale Wireless Networks*, Proceedings of MSWiM'99, pp. 7-14, August 1999.

[6] Wireless and Mobility Extensions to NS-2, <http://www.monarch.cs.cmu.edu/cmu-ns.html>

[7] C. M. Keller, *Generic Channel Simulator*, MIT Lincoln Laboratory Project Report AST-46, August 1997.

[8] Rappaport, T. S., S. Y. Seidel, and K. Takami-zawa., *Statistical Channel Impulse Response Models for Factory and Open Plan Building Radio Communication System Design*, IEEE Transactions on Communications, vol. COM-39 No. 5, pp. 794-806, May 1991.

[9] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice Hall, 1996.

[10] E. N. Gilbert, "Capacity of a burst-noise channel,"

Bell Systems Technical Journal, vol. 39, pp. 12531265, Sept. 1960.

[11] E. O. Elliot, "Estimates of error rates for codes on burst-noise channels," Bell Systems Technical Journal, vol. 42, pp. 19771997, Sept. 19.

[12] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. "A Flexible and Reliable Radio Communication Stack on Motes," Technical Report ISI-TR-565, USC/Information Sciences Institute, September, 2002.

[13] A. Kumar and R. Gupta, "Capacity Evaluation of Frequency Hopping Based Ad-hoc Systems," Proceeding of SigMetric01, pp. 133-142, June, 2001.

안 종 석



1983년 서울대학교 전자공학과(학사)
1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(석사). 1995년 University of Southern California 컴퓨터공학과(박사)
1983년~1995년 삼성전자 선임연구원
1996년~현재 동국대학교 컴퓨터공학과 부교수. 관심분야는 실시간 프로토콜, 네트워크 시뮬레이션, 멀티캐스트, 무선통신

한 상 섭



2002년 동국대학교 컴퓨터 공학과(학사)
2004년 동국대학교 컴퓨터 공학과(석사)
2004년~현재 (주)UniChal 연구원. 관심분야는 센서 네트워크, 무선 통신

김 지 훈



2002년 동국대학교 컴퓨터 공학과(학사)
2004년 동국대학교 컴퓨터 공학과(석사)
2004년~현재 삼성전자 연구원. 관심분야는 센서 네트워크, 시뮬레이션, 임베디드 시스템