

전파 오류가 높은 센서 네트워크를 위한 적응적 FEC 알고리즘

(An Adaptive FEC Algorithm for Sensor Networks with
High Propagation Errors)

안 종 석 [†]

(Jong Suk Ahn)

요약 전파(propagation) 오류가 빈번한 무선 이동 네트워크에서는 전송 성능을 향상하기 위해 FEC(Forward Error Correction) 알고리즘을 채택한다. 그러나 정적인 FEC 방식은 연속적으로 변화하는 전파 오류율에 알맞은 정적 코드(check code)를 적용하지 못해 성능이 저하된다. 본 논문에서는 변화하는 무선 채널의 전파 오류율에 따라 FEC의 정정도를 알맞게 결정하는 링크 계층용 적응적 FEC 기법인 FECA(FEC-level Adaptation)를 제안한다. FECA는 오류율이 높고, 오류율이 천천히 변화하는 무선 환경에 알맞은 알고리즘이다. 일례로 전파 간섭이 있는 환경에서 센서(sensor) 네트워크는 평균 오류율이 10^{-6} 이상이며 오류율이 평균 수백 밀리초 이상 지속되는 것으로 관찰되었다. FECA는 분석적인 무선채널 시뮬레이션과 패킷 트레이스 기반(trace-driven) 시뮬레이션에서 정적 FEC 알고리즘에 비해 최대 15% 이상 성능을 향상하였다.

키워드 : 링크계층 FEC, 동적 오류 복구 알고리즘, 무선 이동 네트워크, 센서 네트워크

Abstract To improve performance over noisy wireless channels, mobile wireless networks employ forward error correction(FEC) techniques. The performance of static FEC algorithms, however, degrades by poorly matching the overhead of their correction code to the degree of the fluctuating underlying channel error. This paper proposes an adaptive FEC technique called FECA(FEC-level Adaptation), which dynamically tunes FEC strength to the currently estimated channel error rate at the data link layer. FECA is suitable for wireless networks whose error rate is high and slowly changing compared to the round-trip time between two communicating nodes. One such example network would be a sensor network in which the average bit error rate is higher than 10^{-6} and the detected error rate at one time lasts a few hundred milliseconds on average. Our experiments show that FECA performs 15% in simulations with theoretically modeled wireless channels and in trace-driven simulations based on the data collected from real sensor networks better than any other static FEC algorithms.

Key words : Link-level FEC, Dynamic Error Recovery Algorithm, Wireless Mobile Networks, Sensor Networks

1. 서론

최근에 이동 편이성과 향상된 전송 속도로 인해 무선 네트워크가 급속도로 보급되고 있다. 그러나 과도한 전파 오류, 즉 높은 BER(Bit Error Rate) 수치 때문에 무선 네트워크의 전송 효율은 유선 네트워크에 비해서 현저히 낮다. 무선에서의 평균 BER은 약 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 으

로 평가되고 있어, 전파 오류 방지나 복구 방법을 채택하지 않는 경우에는 대부분 패킷들이 전파 오류에 의해 손실된다. 실제로 본 연구에서 사용되는 센서 네트워크 [1]에서는 신호 간섭이 있는 환경에서는 90% 이상의 패킷이 손실되는 것으로 관찰되었다. 또한 무선 채널 BER은 송수신자의 이동 또는 주위 환경 변화에 따라서 큰 폭으로 변화하기 때문에, 이러한 변화에 정적인 오류 복구 방식은 비 효율적이다.

무선 채널 오류는 두 개의 모델, 장기적인 BER의 변화를 나타내는 광대역 페이딩(LSF: Large-Scale Fad-

· 본 연구는 2003학년도 동국대학교 지원에 의하여 이루어졌음

† 종신회원 : 동국대학교 컴퓨터공학과 교수

jahn@dgu.edu

논문접수 : 2003년 4월 30일

심사완료 : 2003년 9월 15일

ing)과 단기적인 BER의 변화를 나타내는 협대역 페이딩(SSF: Small-Scale Fading)으로 표현된다[2]. LSF은 송신자(Transmitter)와 수신자(Receiver)사이의 T-R 거리에 반비례하여 평균 BER이 증가하는 것을, SSF은 평균값이 아닌 임의의 시간 BER이 확률적으로 변화하는 것을 예측한다. LSF은 신호의 세기가 전송 거리에 따라 감소되는 현상을, SSF은 다중경로(multi-path) 간섭과 도플러 효과(Doppler Effects)를 설명한다. 이 두 모델에 의하면, 무선채널에서 수신 신호 세기는 평균적으로는 T-R 거리가 증가할수록 서서히 감소하나, 순간적으로는 급격히 변동할 수 있다.

이러한 지속적인 BER의 변화에 대비하여 무선 링크(link) 계층과 물리 계층에서는 다양한 오류 방지 및 복구 방식을 채택한다. BER를 줄이기 위해서 물리 계층에서는 변/복조 방식과 멀티플렉싱(multiplexing) 방법을, 링크 계층에서는 인터리빙(interleaving)기법 등을 사용한다. 오류 교정을 위해서 링크 계층에서는 전파 오류를 후향적(reactive)으로 교정하는 ARQ(Automatic ReQuest)방식과 전향적(proactive)으로 교정하는 FEC 방식을 사용한다.

그러나 FEC 정정 코드 량을 무선 채널의 BER에 알맞게 결정하기 어렵다는 문제가 있다. 참고로 정정 코드를 증가하면 정정할 수 있는 바이트(byte)의 수도 증가된다. 일례로 GSM[3]은 정정도가 다른 네 개의 FEC 단계를 제공하는데, 사용하는 무선 채널에 알맞은 FEC 단계를 송신자가 결정해야 한다. GSM의 네 개의 FEC 단계는 각각 정정 코드 크기가 전체 프레임(frame) 크기의 0, 25%, 33%, 50%를 차지한다. 또한 최초로 알맞은 FEC 단계를 선택하였다더라도 전송 중에 환경의 변화에 따라 BER이 변화하기 때문에, FEC 단계를 계속적으로 알맞게 변환할 필요가 있다.

연속적으로 BER이 변화하는 무선 채널에서 FEC 성능을 개선하기 위해, 본 논문에서는 무선 채널 상태에 따라 FEC 부하를 동적으로 조절하는 적응적 FEC 알고리즘인 FECA(FEC-level Adaptation)를 제안한다. FECA는 수신측으로부터 채널 상태에 대해 정확한 피드백(feedback) 없이 응답(ack) 패킷의 도착 유무에 따라 적절한 FEC 단계를 결정하는 기법이다. FECA는 패킷 손실이 발생할 때는 현재의 FEC 단계를 상위 단계로, 패킷 손실이 임의의 측정 시간 동안 발생하지 않을 때는 하위 단계로 변화하며 알맞은 FEC 단계를 결정한다. 또한 이 측정 시간은 각 단계마다 정해지는데, 어느 FEC 단계를 자주 사용하게 되면 이 FEC 단계의 측정 시간은 지수적으로 증가하여 이 FEC 단계로 안정화된다.

FECA의 성능 향상은 무선 BER 변화의 연관성

(correlation)에 의존하게 된다. 즉 BER이 항상 무작위적(random)으로 변화하게 되면 FECA는 알맞은 FEC 단계로 안정화되지 않기 때문에 전송 성능을 향상시킬 수 없다. 이론적 분석과 실제 센서 네트워크에서 수집한 데이터를 분석한 결과 저속 그리고 간섭이 있는 저출력 무선 네트워크에서는 전파 오류는 수백 밀리초 동안 지속되는 것으로 관찰되었다. 이러한 오류 지속 시간은 ack패킷의 도착 지연이 수십 밀리초 이내인 네트워크에서 알맞은 FEC 단계를 파악하기에 충분하다. 평균 BER이 10^{-4} 일 때 이론적 오류 모델을 이용한 시뮬레이션과 센서 네트워크에서 수집한 데이터를 기반한 시뮬레이션에서 정적 FEC 방식보다는 각각 최대 15%정도 향상되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 관련 연구들을 소개하며, 3절에서는 적응적 알고리즘의 성능 향상 가능성을 분석적으로 또한 실험적으로 살펴본다. 4절에서는 FECA 구조를 설명하며, 5절에서는 이론적 무선채널을 모델링 하는 방법들을 소개하며, 6절에서는 다양한 전파 오류 분포 하에서 FECA의 성능을 측정하며, 7절에서는 FECA 구현 코드를 설명하고 마지막으로 8절에서는 실험 결과와 차후 연구 과제를 요약한다.

2. 관련 연구

FEC 알고리즘은 응용 계층과 링크 계층에서 사용된다. 전자는 유선 네트워크에서는 혼잡에 의한 패킷 손실을 복구하며, 후자는 무선 네트워크에서의 전파 오류에 의한 비트(bit) 손상을 복구한다. 또한 링크 계층 FEC 알고리즘은 패킷 크기에 영향을 받으며, 적용하는 BER 지속 시간이 작다는 차이점이 있다. 즉 혼잡은 패킷 크기에 많은 영향을 받지 않으나 패킷 손상은 패킷의 크기에 비례한다. 인터넷 혼잡은 적어도 몇 십분 정도 지속하나, 무선 채널 상태는 수 밀리초로 빠르게 변화할 수 있다.

응용 계층 FEC 방식은 재 전송 지연 없이, 패킷 손실을 실 시간 복구하기 위해서 과거에 전송된 패킷들을 다시 현재 패킷에 덧붙여 보낸다. Bolot[5]은 측정된 평균 패킷 손실률에 따라 현재 패킷에 첨부되는 중복 데이터의 양을 조절하는 적응적 FEC기법을 제안하였다. 링크 계층의 적응적 FEC기법들은 타입-I과 타입-II ARQ 하이브리드(hybrid) 방식으로 분류된다. 타입-I은 데이터를 포함하여 강화된 정정 코드를 재전송하며, 타입-II는 재전송 시에 강화된 정정 코드만을 전송한다. 전자는 매번 데이터를 재전송하기 때문에 비 효율적이며, 후자는 데이터 패킷 자체를 수신하지 못하는 경우에는 비효율적이다. 일례로 저전력 센서 네트워크에서는 패킷 프리앰블(preamble)이 손상되어 패킷 자체를 수신

하지 못하는 경우가 빈번히 발생한다. FECA는 FEC 정정 코드의 크기, 즉 정정도를 능동적으로 결정하는 알고리즘으로 이들 두 방식에 모두 적용할 수 있다.

오류 방지 방식을 무선 채널의 변화에 따라 동적으로 조절하는 연구[6-8]들이 활발히 진행되고 있다. 이들 연구는 측정된 평균 패킷 손실률 또는 신호 대 잡음비, SNR(Signal-to-Noise Ratio)에 맞추어, 세 가지 전송 변수들, 즉 MTU(Maximum Transmission Unit) 크기, 변조 방식, 그리고 전송 속도를 동적으로 변경한다. 특히 Holland[8]는 수신단에서 측정된 SNR의 값에 따라 알맞은 변조 방식을 선택하는 기법을 제안하였다. SNR이 작은 경우에는 잡음에 강한 변조 방식을, SNR이 큰 경우에는 고속의 변조 방식을 선택한다. 또한 이 논문에서는 이론적 분석을 통해 같은 BER 상태가 적어도 연속된 두 개의 패킷 전송 시간 동안에는 지속되는 것을 보여 주었다.

FECA는 기존의 적응적 알고리즘들과는 다르게 채널의 상태에 대한 명시적(explicit) 정보 없이, 패킷 손실 정보만으로 동작한다. Holland의 기법에서는 매 패킷의 도착 시에 수신단에서 측정된 SNR정보가 필요하며, 다른 두 개의 알고리즘들은 평균 패킷 손실률 정보가 필요하다. 또한 위의 기법들은 전파 오류 방지 기법들인 반면에, FECA는 훼손된 패킷을 복구하는 방식으로 이들 방지 알고리즘들과 함께 사용할 수 있다. 참고로 무선 네트워크에서는 이미 오류 복구와 오류 방지 기법들이 중복적으로 사용되고 있다.

3. 무선 채널 BER 연관성 평가

FECA 성능은 BER 변동 지속 시간과 변동 폭에 관련이 있다. 만약 무선 BER이 과거 상태와 연관성없이 무작위적으로 변화한다면, 과거에 측정된 채널 특성에 근거한 적응적 알고리즘은 성능을 향상할 수 없다. 만약 연관성이 존재한다면, 연관성의 지속 시간과 BER 변화 폭에 알맞게 적응적 FEC 기법을 설계해야 한다. 본 절에서는 이론적 분석과 센서 네트워크상의 실험 데이터를 바탕으로 무선 BER 연관성을 평가한다.

3.1 이론적 분석

본 절에서는 LSF와 SSF 모델에서 예측하는 송수신자의 이동에 따른 BER의 변화 지속 시간을 계산한다. LSF모델에 의한 BER의 변화는 두 가지 관계, BER과 SNR관계[9]와 SNR과 T-R거리 관계에 의해 결정된다. 첫 번째 관계에 의하면 BER은 신호 출력을 데이터 전송 속도로 나눈 E_b/N_0 (Ratio of signal energy per bit to noise power density per Hertz)에 반비례한다. 일례로 변조 방식을 사용하지 않는 비 가시영역(line-of-sight)에서는 대략적으로 신호 출력이 10배로 감소할

때 BER은 10배로 증가하며, 가시영역 내에서는 BER은 100배정도로 증가한다. 또한 대표적인 LSF 모델인 LNS(Log-Normal Shadowing)모델에 의하면 SNR은 T-R거리에 반비례하여 지수적으로 감소한다. 지수 값은 가시영역 내 또는 자유 공간에서는 2이고, 신호 전파를 방해하는 방해물이 있는 빌딩에서는 3-6이다.

이러한 대략적인 수치를 적용하면 평균 BER은 장애물이 많은 사무실과 자유 공간과 같은 무선 통신 상황에서는 수초 이내에 변하지 않는다. 일례로 수신자가 방해물이 있는 사무실에서 0.5m/s의 속도로 멀어지고 있을 때, 신호 출력은 매 10m마다 10배 정도로 감소하고 평균 BER은 10배 정도 증가하게 된다. 즉 평균 BER은 매 20초마다 10배정도로 변화하는 데, 이 지속 시간은 채널 상태를 파악하기 위한 RTT(Round Trip Time) 시간을 수십 ms(milli second)로 가정할 때 약 수 백배에 해당한다.

SSF 모델에 의한 단기간의 BER변화는 물체의 이동 속도에 따른 SNR의 변화에 영향을 받는다. 그림 1은 대표적인 SSF 모델인 레일리(Rayleigh) 페이딩에 의해 감소된 출력과 지속 시간과의 관계를 보여준다. 그림 1은 1m(meter)의 기준거리(close-in reference distance), 0.2818W 송신 출력, 그리고 수신단의 신호 입계치를 $1.559 \times 10^{-11}W$ 인 914Mhz Lucent LAN환경하에서의 T-R거리가 각각 5m, 10m, 그리고 20m일 때 두 가지 속도 0.1m/s와 10m/s로 수신자가 송신자로부터 멀어지는 상황을 가정한다. 그림 1의 여섯 개의 출력 감소 선의 최대 출력값은 LNS모델에서 지수가 3인 경우의 평균 출력값이며, 수평 및 수직선은 각각 수신 입계값과 1ms RTT를 나타낸다.

그림 1의 여섯 개의 선을 비교하면, BER 지속시간은 T-R 거리가 멀어질수록 증가하고 수신자의 이동 속도에는 반비례하여 감소하며, 출력 평균 지속 시간은 수 μs (micro second)에서 수 s(second)의 범위에 있다.

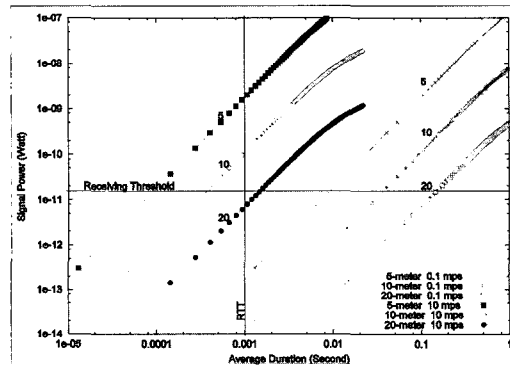


그림 1 협대역 페이딩에 의한 평균 페이딩 지속시간

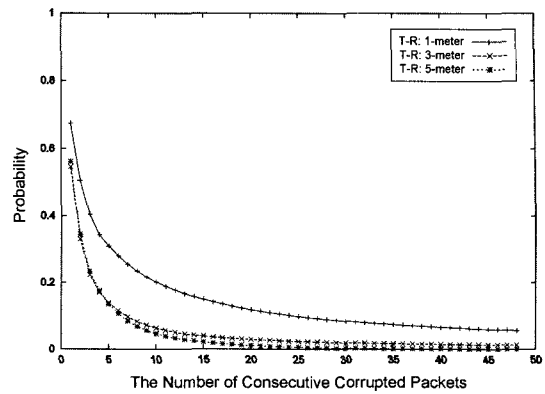
즉, RTT 수직선의 원편 영역에서의 SSF 페이딩, 즉 SSF에 의한 BER은 RTT보다 빠르게 변화하기 때문에 FECA가 적용할 수 없다. 채널 상태를 파악하는 데 적어도 한번의 RTT가 소요되는 적응적 기법들은 LSF 변화에 의한 BER변화에는 적용할 수 있으나, SSF에 의한 변화에는 제한적으로만 적용할 수 있다.

3.2 센서 네트워크에서의 무선 채널 특성 측정

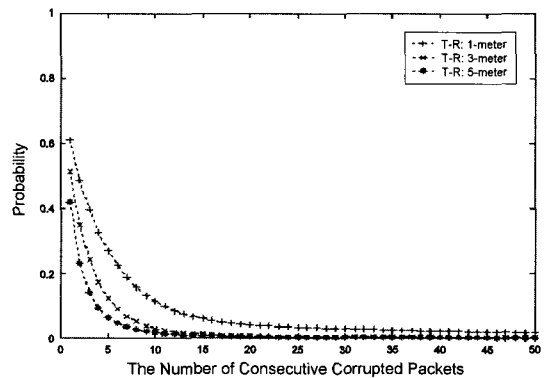
3.1절에서는 일반적인 전파 모델에 근거하여 FECA는 이동 무선 네트워크에서 제한적으로 성능 향상을 할 수 있다는 것을 보여주었다. 그러나 이 분석은 주로 셀룰러 폰(cellular phone)과 802.11랜(LAN)과 같은 고출력 라디오파를 사용하는 네트워크를 대상으로 한 것이다. 본 절에서는 저출력 라디오파를 이용하여 빈번히 오류가 발생하는 센서 네트워크에서 적용 가능성을 알아본다. 참고로 실험에 사용한 센서 네트워크는 900MHz 저출력 라디오파를 사용하는 8비트 모트(mote)[1]라고 불리는 센서 노드들로 구성된다.

적용 가능성은 두 가지 수치, 임의의 FEC 단계가 알맞게 적용되는 BER 지속 시간과 패킷 크기의 증가에 따른 손상률(정정코드의 바이트 수와 손상된 바이트의 비율)로 결정할 수 있다. 지속시간은 적어도 채널 상태를 알기 위해 소요되는 RTT보다는 커야 되며, 또한 정정 코드를 증가할 때 이로 인해 손상되는 바이트의 수가 정정되는 바이트 수보다는 적어야 한다. 먼저 지속 시간을 측정하기 위해서 그림 2은 두 지역에서 두 개의 모트 사이에서 36바이트(6바이트의 헤더와 30바이트의 사용자 데이터) 패킷을 ack없이 5.6kbps와 1.2kbps의 속도로 전송할 때, 사용해야 할 FEC 단계의 변화 정도를 측정하였다. 그림 2의 (a)는 USC/ISI 복도에서 송수신자가 가시거리에 있을 때, (b)는 동국대학교 복도에서 송수신자가 장애물이 있는 비 가시거리에 있을 때의 실험 결과이다. USC/ISI와 동국대학교에서는 850~950 MHz ISM(Industrial, Scientific and Medical) 주파수 대역의 간섭 신호로 인해서 오류율이 상당히 높다. USC/ISI에서는 전송된 전체 패킷의 10% 이상이 패킷의 프리앰블이 훼손되어 수신하지 못하며, 또한 수신한 패킷중의 90% 이상이 손상된다. 동국대에서도 전체 패킷의 10% 이상을 수신하지 못하며, 송신한 패킷 중에서 거리에 따라 약 60%에서 90% 이상에 오류가 발생하였다. 그림 2의 (a)는 세 개의 곡선은 T-R거리가 각각 1m, 3m 그리고 5m정도에서, (b)는 3m, 5m 그리고 7m에서 수집한 데이터를 나타내며, 곡선상의 점들은 삼 일간에 걸쳐 1시간 이상 측정된 평균값이다.

그림 2에서 x 축 값 n 은 연속적인 패킷 개수를, y 축 값은 x 축의 n 값으로 패킷들을 그룹 지었을 때 같은 FEC 단계로 복구되는 그룹의 비율을 나타낸다. 일례로



(a) ISI



(b) 동국대

그림 2 센서 네트워크에서 측정된 상관함수

x 와 y 축 값이 5와 30%일때, 이는 실험에서 수집한 패킷들을 연속된 5개의 패킷들로 그룹핑할 때, 이 그룹 중에서 30% 만이 같은 FEC 단계로 복구할 수 있다는 것을 나타낸다. 이 실험에서는 FEC 단계를 0, 5, 10, 15, 20 그리고 25바이트의 오류를 수정하는 여섯 단계로 나누었다. 참고로 이 실험에서는 36바이트중 최대 25바이트가 손상되었다. 또한 FEC 알고리즘[11]에서 복구의 기본 데이터 단위를 심볼(symbol)로 칭하는데, 이 실험에서 심볼 크기를 8비트로 가정하였다.

그림 2의 (a)와 (b)에서 연속적으로 전송되는 패킷들 사이에서는 강한 BER 양성 연관성이 존재하는 것을 보여준다. 일례로, 그림 (a)와 (b)에서는 T-R 거리가 1m과 3m일 때 다음에 전송되는 패킷은 60%의 확률로 전의 패킷과 같은 FEC 단계로 복구된다. 이러한 실험 결과는 Holland 논문[8]에서 측정된 결과와 일치한다. 즉 Holland는 패킷을 전송할 때 바로 전에 전송한 패킷의 BER에 근거하여 다음 패킷에 사용할 알맞은 변조 방식을 선택하였다.

그림 2의 (a)와 (b)의 세 개의 곡선을 비교할 때, T-R 거리가 멀어질수록 인접한 패킷간의 오류 연관성은 감소한다. 이는 T-R 거리가 증가할수록 패킷 프리앰블이 빈번히 손상되어, 패킷이 빈번히 손실되기 때문이다. 이들 평균 패킷간 간격은 (a)에서는 T-R거리가 1m, 3m, 그리고 5m일 때 각각 134ms, 200ms, 그리고 462ms로 측정되었고, (b)에서는 T-R거리가 3m, 5m, 7m일 때 각각 315ms, 357ms, 그리고 374ms로 측정되었다. 그림 (a)와 (b)에 나타난 상관관계 확률 분포도와 평균 패킷간 간격을 이용하여 같은 FEC 단계 적용 지속 시간의 평균을 계산하며, (a)에서는 902ms, 950ms, 1,579ms이고 (b)에서는 1,528ms, 1,260ms, 3,740ms이다. 이 결과는 그림 1의 분석 결과와 일치 되는 것으로, T-R거리가 증가될수록 같은 BER의 상태가 오랫동안 지속된다. 이 센서 네트워크에서는 RTT가 수십 ms정도인 경우에는 FECA는 충분히 성능을 향상할 수 있다.

마지막으로 손상을 증가하는 ISI에서는 3m거리에서 10 바이트당 최대 3바이트가, 동국대에서는 최대 2바이트가 손상된 것으로 측정되었다. 이는 FECA에서 사용하는 RS코드의 정정률에 비해서 낮은 것으로 정정 코드를 증가함으로써 더 많은 코드를 정정할 수 있다. 참고로 RS(Reed-Soloman)코드의 정정률은 정정 코드를 2바이트당 1바이트를 정정한다.

4. FECA 알고리즘

성공적인 패킷 전송은 ack 패킷의 도착으로, 패킷 손실은 타임아웃(timeout)으로 알 수 있을 때, FECA는 여러 개의 FEC 단계 중에서 채널 상태에 알맞은 단계를 적응적으로 결정한다. FECA가 알맞은 FEC 단계를 바로 변경하지 않는 이유는 수신자가 기존 FEC 알고리즘을 통해서 수신된 패킷의 손상된 바이트의 수를 정확하게 계산하여 송신자에게 알려줄 수 없기 때문이다.

Ack 패킷의 도착 유무에 의해서 채널의 상태를 파악하여 알맞은 FEC 단계를 선택하는 문제는 RLM(Receiver-driven Layered Multicast)[12] 문제와 유사하다. RLM 알고리즘은 패킷 손실률에 근간하여 수신단에 이용 가능한 대역폭을 결정하고 이에 알맞은 멀티캐스트 그룹 수를 결정한다. 이때 멀티캐스트 그룹들의 전송 속도 합은 FECA가 찾으려는 FEC 단계에 대응된다.

그러나, 이 둘 알고리즘은 적용하려는 변화의 지속 시간이 상이하다는 점에서 알고리즘 구조가 달라진다. RLM은 천천히 변화하는 1초 이상 지속되는 저주파 대역폭 변화에 적용하는 반면에, FECA는 빠르게 변화하는 고주파 BER 변화에 적응해야 한다. 또한 RLM은 다른 노드의 알고리즘의 변화가 사용 가능한 대역폭의 영향을 미치나, FECA는 다른 노드의 FEC 단계의 변화

가 자신 채널의 상태 변화에 영향을 미치지 않는다.

이러한 차이점을 바탕으로 FECA는 패킷 손실이 발생했을 때 바로 다음 상위 단계 FEC 단계를 채택한다. 그러나 패킷 손실에 대한 즉각적인 반응은 RTT보다 빠르게 변화하는 고주파의 BER에도 변화하게 되어 계속적으로 과중한 정정 코드를 사용하게 된다. 이러한 과반의 영향을 최소화하기 위해 임의의 시간 동안에 패킷 손실이 발생하지 않으면 FECA는 하위 FEC 단계로 되돌아간다.

FECA에는 하위 단계로 하향하는 적절한 탈퇴시간을 결정하기 위해, 모든 FEC 단계에 DT(Drop Timer)가 있고 이 DT는 지수적 백오프(exponential back-off) 알고리즘에 의해 관리된다. 패킷이 손실될 때마다 FECA는 상위 단계에 가입하게 되면, 이때 채택된 새로운 상위 단계의 DT는 가중치 $\alpha (>1)$ 를 곱하여 최대 T_{max} 까지 지수적으로 증가시킨다. 이러한 동작은 FECA가 어느 한 단계를 빈번히 채택하면, 이 단계의 DT 시간이 증가되어 FECA는 패킷 손실이 없는 상황에서는 이 단계로 안정화된다. 즉 α 와 T_{max} 의 값은 사용중인 FEC 단계에서 하향하여 채널 상태가 개선되었는지를 검색하는 검색 빈도수를 결정한다. α 값이 작으면 현재 사용하는 FEC 단계에서 빈번히 하향되며, 크면 천천히 하향되는 효과가 있다.

FECA에는 현재 채택되지 않은 모든 FEC 단계들의 DT를 지수적으로 감소시키는 한 개의 검사 타이머(PT: Polling Timer)가 있다. 가입된 FEC 단계의 DT를 증가하는 것은 학습에 해당되며, 다른 FEC 단계들의 DT 값을 감소하는 것은 과거의 학습 내용을 잊는 것에 해당된다. 이를 위하여, PT가 매 T_p 를 초과할 때마다, 현재 사용중인 FEC 단계를 제외한 다른 단계의 DT를 붕괴 가중치(decay factor), $\beta (<1)$ 만큼 지수적으로 감소하여 최소 T_{min} 까지 감소시킨다. FECA의 다섯 개의 변수 α , β , T_{max} , T_{min} , T_p 값은 현재는 실험을 바탕으로 정해지게 되는데, 본 논문에서는 실험을 통해 α 와 β 는 2와 3/4로 정하며, T_{min} 와 T_p 는 사용하는 네트워크의 RTT값으로 정하며 마지막으로 T_{max} 은 T_{min} 의 2⁵배로 정하였다.

그림 3은 현재 사용하는 FEC 단계 L_{cut} 가 채널의 변화에 따라 적응적으로 변화하는 것을 보여준다. 처음에 FECA는 세 개의 패킷들이 연속적으로 손실되는 $3T_r(T_r$: 링크계층의 재전송 타임 아웃시간)동안에는 L_{cut} 을 0에서 3으로 증가한다. 다음은 데이터 패킷이 성공적으로 전송되고 FECA는 단계 3의 DT가 타임 아웃될 때까지 단계 3을 유지한다. S_3 시간 뒤에 DT가 초과되면 채널상태가 점검하기 위해 L_{cut} 을 단계 2로 낮춘다. 이때 패킷 손실이 다시 발생하게 되면, FECA는 L_{cut} 을

단계 3으로 복원하고 단계 3의 DT 값을 α 배수만큼 증가한다. 참고로 그림 3에는 나타나 있지 않지만 이 동작과 병행하여 PT는 T_p 가 초과했을 때마다 주기적으로 다른 단계들의 DT값을 β 배만큼씩 감소시킨다.

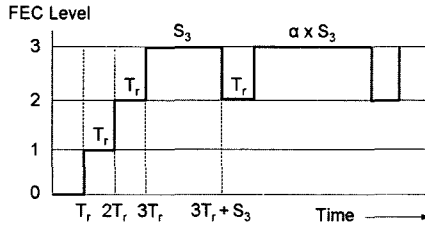


그림 3 FECA의 동작 예

5. 이론적 무선 채널 평가 방식

본 절에서는 패킷 시뮬레이터[13,14]에서 사용되는 세 가지 전파 오류 모델링 방식을 소개한다. 첫째, 수식에 의한 모델링 방식으로, 현재 ns-2 2.1b9[14]에는 세 개의 광대역 페이딩 모델(자유 공간, 두 신호 지면 반사(two-ray ground reflection) 그리고 섴도잉(shadowing) 모델)과 하나의 협대역 페이딩 모델(Ricean 분포)[15]이 구현되어 있다. 이러한 모델을 이용하여 ns-2는 수신된 패킷들의 평균 신호 전력을 계산하고, 계산된 값과 수신 임계치(threshold)를 비교하여 패킷 손실을 결정한다. 그러나, 이 방법은 전파 오류와 패킷 크기의 관계를 무시한 것으로, 이 방식을 이용할 경우에는 무선 네트워크에서 사용하는 패킷 크기가 클 수록 성능이 향상된다는 잘못된 결론에 도달할 수 있다. 이 문제를 위해서 Holland는 패킷의 전송 지연 시간이 협대역 페이딩 지속 시간보다 큰 경우에는, 협대역 지속 시간이 초과할 때마다 Ricean 분포 확률을 이용해서 수신 신호 세기를 계산하였다.

다른 두 방식은 실제 무선 채널에서 수집한 데이터를 기반으로 하는 테이블 기반(table-driven) 방식[16]과 비트단위로 시뮬레이션할 수 있는 채널 시뮬레이터[17,18]를 이용하는 방식이다. 이 방식들은 손상된 비트의 위치와 손상된 비트 수 등 비트 오류를 상세히 시뮬레이션 할 수 있다. 그러나, 전자는 어느 특정한 네트워크의 데이터를 기반으로 채널 오류를 모델링했기 때문에 다른 무선 네트워크에는 적용되지 않고, 채널 시뮬레이터는 계산량이 과도하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 전파 오류의 모델링을 위해서 Gilbert 채널 모델인[19] 두 상태 Markov체인과 센서 네트워크에서 수집한 전파 오류 데이터를 이용하였다. Markov 체인은 기존의 연구자들이[6,20] 링크 계층의 ARQ와

FEC를 연구할 때 무선 채널을 모델링할 때 사용되었다. 두 상태 Markov체인은 버스티 오류를 모델링 하는 데 적합한 것으로, 한 상태는 짧은 기간 동안 오류율이 높은 상태를 다른 상태는 긴 기간 동안 오류율이 낮은 상태를 나타낸다.

6. FECA 시뮬레이션 평가

본 절에서는 이론적 오류 모델과 센서 네트워크에서 수집한 오류 데이터로 무선 채널을 모델링했을 때 FECA를 적용한 IEEE 802.11b 성능을 평가하였다.

먼저 그림 4는 정지 무선 채널을 on-off Markov체인으로 모델링했을 때 FECA의 성능을 보여준다. 정지 채널 모델링을 위해서 높은 BER의 on상태는 (20% BER, 10ms)로, 낮은 BER의 off상태는 (x BER, 1s)로 결정하고 x는 0에서 최대 15%으로 변환하였다. FECA는 0, RS(140,124), RS(179,124), 그리고 RS(218,124) 단계 중 한 단계를 동적으로 선택하며, FECA의 다섯 개의 파라미터 α , β , T_{max} , T_{min} , T_p 들은 각각 2, 0.8, 100ms, 6ms, 6ms로 정하였다. 이때 T_p 를 6ms를 선택한 이유는 6ms가 이 실험의 802.11b 네트워크 구조에서 최소 재전송 타임 아웃 시간이기 때문이다.

그림 4에서의 네 개의 곡선은 802.11b에 각각 FECA, ARQ, 그리고 세 개의 정적 FEC 코드(RS(140,124), RS(179,124), RS(218,124))[21]들을 적용했을 때의 성능을 보여준다. 참고로 RS(Reed-Solomon)코드는 RS(n,k)형태로 표현하는데, 데이터는 k개의 심벌, 정정코드는 (n-k) 심벌을 의미한다. 이때 (n-k)의 정정 코드로 $2 * (n-k)$ 개의 오류 심벌을 정정할 수 있다. 그림 4의 y축에 표시된 성능 비율은 각 알고리즘에서 전송한 총 데이터의 비트 수를 오류가 없을 때의 최대 전송 비트 수로 나눈 비율이다. 시뮬레이션 네트워크 구조는 송신자가 1,024바이트 패킷을 512kbps의 무선 802.11b MAC채널을 통해서 200초 동안 수신자에게 계속해서 전달하는 구조이다. 그림 4의 각 곡선은 5번 시뮬레이션한 평균값을 나타내고 측정치 편차는 1%보다 작기 때문에, 컨피던스 간격(confidence interval)은 표시하지 않았다.

그림 4에서 off상태 BER이, 즉 x축 값이 증가함에 따라 FEC 코드를 채택하지 않은 802.11b 성능은 급격하게 감소되는데, 이는 BER이 0.1 이상이 되면 평균적으로 1023비트 크기의 프레임(frame)에서 1 비트가 손상되기 때문이다. 이에 반해 세 정적 FEC 알고리즘들은 정정 코드의 부하로 인해서 x값이 0.1%미만일 때는 ARQ에 비해 성능이 떨어진다. 그러나 오류율이 0.1% 이상일 때는 RS(140,124)와 RS(179,124)의 성능은 각각 3%와 10%의 하락(cutoff)지점 전까지는 일정하다. 마치

막으로 RS(218,124)는 다른 코드에 비해 오류율이 낮을 때는 성능이 저하되나, 오류율이 증가될 때는 성능이 일정하다.

FECA와 다른 알고리즘들을 비교할 때, FECA는 주기적인 짧은 기간 동안 지속되는 높은 BER의 변동에도 불구하고 FEC 단계를 무선 채널의 평균 BER의 변화에 알맞게 선택한다. 즉, 네 개의 구간, [0, 0.5%], [0.5%, 3%], [3%, 10%], [10%, 15%]에서 각각 802.11, RS(140,124), RS(179,124), RS(218,124)의 정정능력을 선택하게 된다. 이들 네 개의 알고리즘의 최상의 성능보다 FECA의 약간의 성능 저하는 FECA의 적응 부하에 기인한다. 즉, FECA는 변화된 상태에 알맞은 FEC 단계를 선택하기 위한 부하가 발생한다.

그림 5는 Markov체인으로 모델링한 이동 채널에서 BER의 지속 시간 변환에 따른 FECA의 성능을 평가한다. 이동 무선채널은 두 개의 두 상태 Markov체인을 (20% BER, 5ms), (0.1% BER, t_b) 그리고 (20% BER, 5ms), (15% BER, t_b)으로 각각 정하였다. 그림 5의 x

축 변수인 t_b 는 10ms에서 1s범위의 값을 가지며, 두 개의 Markov체인간의 전이 확률은 0.7로, 같은 Markov 체인에 머물 확률은 0.3으로 정하였다.

그림 5는 FECA를 제외하고 다른 네 개의 복구 알고리즘들은 t_b 값, 즉 움직임의 속도에 상관없이, ARQ, RS(179,124), RS(140, 124), RS(218, 214)의 순으로 일정한 성능을 보여준다. RS(140, 124)는 RS(179, 124)에 비해 거의 비슷한 성능을 보여주는데, 이는 15% BER 상태에서 이 두 FEC 코드는 같은 수의 패킷만을 복구하기 때문이다. FECA는 t_b 가 커짐에 따라 계속적으로 성능이 향상되는데, 1s지점에서 RS(218,214)보다 최대 15%까지 성능이 향상된다. 이는 변동 BER 상태가 오랜 시간 동안 지속되면, FECA는 각 상태에서 가장 적합한 FEC 단계에 안정적으로 적응되기 때문이다. t_b 가 50ms이하일 때는 BER이 빠르게 진동되어, 알맞은 FEC 단계를 검색하지 못하기 때문에 FECA는 802.11, RS(140,124), RS(179,124) 보다 성능이 높지만 RS(218,124)보다는 성능이 낮다. 참고로 이 네트워크에서는 하나의 패킷을 성공적으로 수신하기 위해서는 약 6ms가 소요되며, 50ms는 약 9개의 패킷을 송신할 수 있는 시간이다. BER이 50ms보다 더 빠르게 진동을 한다면 FECA가 안정화하지를 못하고 기존의 정적인 FEC보다도 성능이 저하된다.

그림 6은 두 개의 모드 사이에서 패킷을 전송할 때 수신한 패킷 오류 데이터를 기반으로 이동 채널을 모델링했을 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이동 채널을 모델링하기 위해 송수신자가 3m, 5m, 7m 떨어져 위치한 곳에서 각 패킷당 오류 비트 수를 1시간 이상 기록하고 이들 데이터를 시간 t_b 만큼씩 섞어 하나의 데이터 파일을 만들었다. 이동 채널을 위해서 이 데이터 파일에서 차례대로 측정된 오류 비트 수를 읽어내어 시

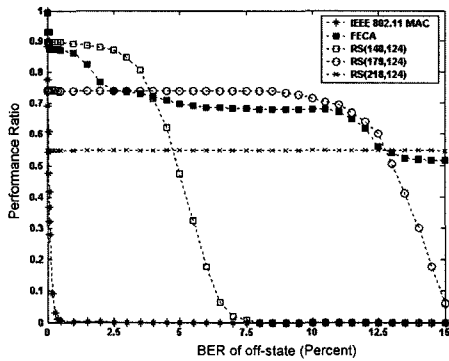


그림 4 정지 무선 채널에서의 다섯 개의 오류 정정 알고리즘의 성능

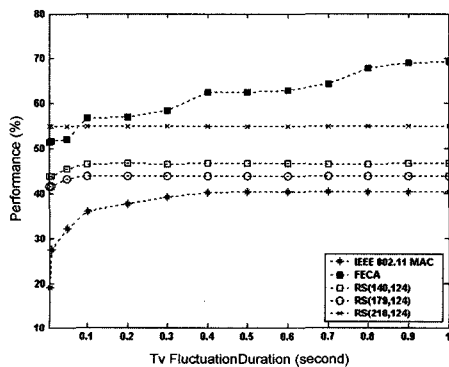


그림 5 이동 무선 채널에서의 다섯 개의 오류 정정 알고리즘의 성능

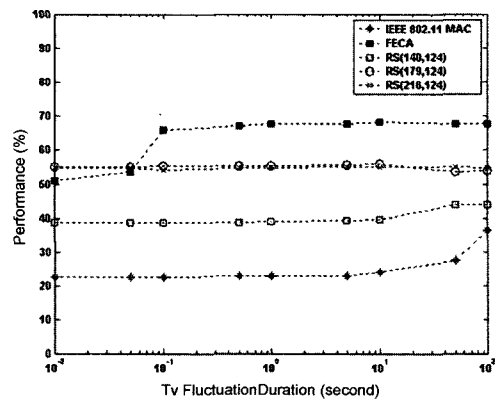


그림 6 패킷 트레이스를 이용한 오류 정정 알고리즘의 성능 비교

물레이션에서 전송되는 패킷들의 오류 비트 수를 결정하였다. 그림 5는 t_b 의 값을 0.01s에서 100s만큼 변화 하면서 FECA의 성능을 측정하였는데, t_b 가 0.01s면 3m, 5m, 7m, 세 장소를 각각 0.01s동안 머물고 다음 장소로 이동하는 것을 의미한다. 그림 5에서와 마찬가지로 지속 시간 t_b 가 커질수록 FECA의 성능이 기존의 정적인 FEC보다 최대 15%정도 향상되며, t_b 가 작을수록 FECA의 적응 부하와 피드백 지연 시간으로 인해 성능이 저하되는 것을 보여준다.

7. 센서 네트워크에서 FECA의 구현

본 절에서는 모트의 SMAC(Sensor-MAC)[23]에 FECA 구현 방법을 설명한다. SMAC은 802.11b와 유

사한 MAC계층 프로토콜로서, 전력을 절약하기 위해 수신자가 수신할 데이터가 없을 때에는 슬립(sleep) 모드로 전환되는 프로토콜이다. FECA는 그림 7에서 보듯이 SMAC의 하위 계층으로 구현되어, ack 패킷 도착과 제어 패킷 관련 정보를 상위 SMAC과 공유하면서 동작되도록 구현되었다.

또한 FECA가 동작하기 위해 802.11b의 헤더를 변경해야 한다. 그림 8은 FECA를 위해 확장된 802.11b의 네 가지 패킷, RTS, CTS, ACK, 그리고 데이터 프레임 헤더(header)의 모습을 보여준다. 참고로 FEC코드는 RS코드만을 사용하는 것으로 가정한다. RTS, CTS, 그리고 ACK 등의 제어 패킷들은 패킷 크기가 데이터 패킷에 비해서 작기 때문에 손상될 확률이 작으므로 일정

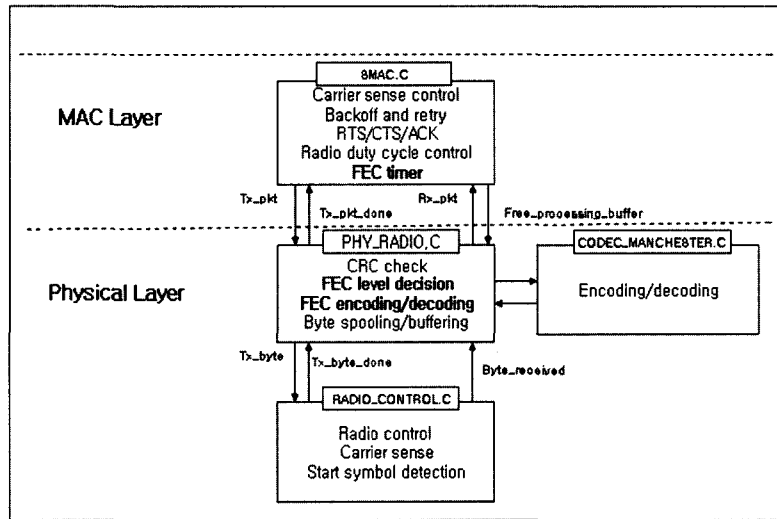
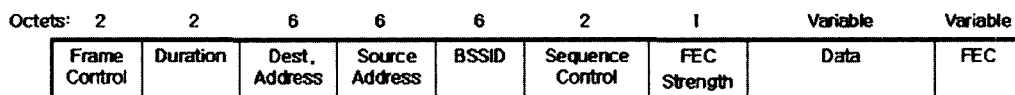
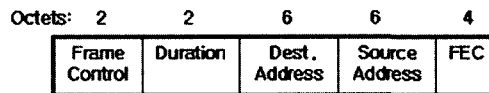


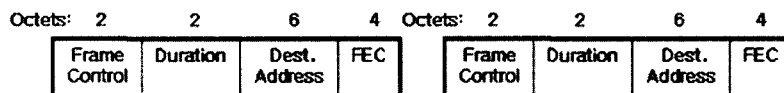
그림 7 FECA 프로토콜 스택 구조와 기능



Data Packet Frame



RTS Frame



CTS Frame

ACK Frame

그림 8 FEC적용 IEEE 802.11 MAC 프레임구조

한 크기의 FEC 정정 코드만을 사용한다. 이에 비해 데이터 패킷의 FEC코드 정정도는 변할 수 있으므로, 정정도를 알려주는 1바이트 FEC 정정도(strength) 필드와 FEC코드를 삽입하는 FEC필드가 첨부되었다. 현재 이 확장 802.11b 프로토콜은 시뮬레이터에도 구현되어 사용하였다.

8. 결론

본 논문은 저출력, 오류가 빈번한 이동 무선 환경에서 전송 성능을 향상하기 위해서 적응적 FEC방식인 FECA를 제안하였다. FECA는 성능을 향상시키기 위해 채널의 상태에 따라 동적으로 FEC 코드의 정정도를 결정하는 알고리즘이다. 실험 결과 이론적 무선 채널과 실제 센서 네트워크에서 수집한 데이터에 기반한 시뮬레이션에서 최대 15% 성능 향상을 보였다. 향후에는 FECA를 새로운 분석적 무선채널 모델[24]을 이용해서 평가하며, 또한 다양한 실제 센서 네트워크에서의 성능을 측정하고, 다양한 무선 네트워크에서 FECA의 다섯 개의 변수를 자동적으로 알맞게 결정하는 알고리즘을 개발한다.

참고 문헌

- [1] J. Heidemann, F. Silva, C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, and D. Ganesan. *Building Efficient Wireless Sensor Networks with Low-Level Naming*, www.cs.ucsd.edu/sosp01/papers/heidemann.pdf SOSP01, October 2001.
- [2] T. S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice Hall, 1996.
- [3] GSM 05.03 Channel coding.
- [4] S. Lin and D. J. Costello, *Error Control Coding*, Prentice Hall, 1983.
- [5] J. C. Bolot, S. Fosse-Parisis, and D. Towsley, *Adaptive FEC-Based Error Control for Internet Telephony*, Infocom'99, pp. 1453-1460, April 1999.
- [6] P. Lettieri and M. B. Srivastava. *Adaptive Frame Length Control for Improving Wireless Link Throughput, Range, and Energy Efficiency*, Proceedings of Infocom'98, pp. 564-571, April 1998.
- [7] G. Wu, C-W. Chu, K Wine, J. Evans, and R. Frenkiel. *WINMAC: A Novel Transmission Protocol for Infostations* 49th IEEE Vehicular Conference Proceeding, pp. 1340-1344, May 1999.
- [8] G. Holland, N. Vaidya, and P. Bahl, *A Rate-Adaptive MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks*, ACM SigMobile, pp 236-250, July 2001.
- [9] Sklar. B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Prentice Hall 2001.
- [10] TR100 Chip manual, <http://www.rfm.com>
- [11] <http://www.csl.sony.co.jp/person/morelos/ecc/codes.html>
- [12] S. McCanne, V. Jacobson, and M. Vetterli. *Receiver-driven Layered Multicast*, Proceedings of the SIGCOMM vol 26, 4 pp.117-130, 1996.
- [13] 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.
- [14] *Wireless and Mobility Extensions to NS-2*, <http://www.monarch.cs.cmu.edu/cmu-ns.html>
- [15] R. J. Punnoose, P. V. Nikitin, and D. D. Stancil, *Efficient Simulation of Ricean Fading within a Packet Simulator* Proceedings of VTC'00, pp. 764-767, September 2000.
- [16] A. Kumar and R. Gupta, *Capacity Evaluation of Frequency Hopping Based Ad-hoc Systems*, Proceedings of SigMetrics01, pp. 133-142, June 2001.
- [17] C. M. Keller, *Generic Channel Simulator*, MIT Lincoln Laboratory Project Report AST-46, August 1997.
- [18] Rappaport, T. S., S. Y. Seidel, and K. Takamizawa., *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.
- [19] M. Zorzi. *Performance of FEC and ARQ Error Control in Bursty Channels under Delay Constraints*, Proceedings of VTC'98, pp. 1390-1394, May 1998.
- [20] E. N. Gilbert, *Capacity of a Burst-Noise Channel*, Bell Syst. Tech. J., vol. 39, pp 1253-1266, Sept. 1960.
- [21] W. Peterson and E. Weldon, Jr., *Error-Correcting Codes*, 2nd Edition, The Massachusetts Institute of Technology.
- [22] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, A. Culler, and K. Pister, *System Architecture Directions for Network Sensors*, Proceedings of the 9th international conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, pp. 93-104, Nov. 2000.
- [23] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. *An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks*. In Proceedings of the IEEE Infocom, pp. 1567-1576. New York, NY, USA, USC/Information Sciences Institute, IEEE. June, 2002.
- [24] 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.

안 종 석

정보과학회논문지 : 정보통신

제 30 권 제 2 호 참조