

저속 무선 개인 영역 네트워크를 위한 FEC의 성능 분석

김민수, 김종태
 성균관대학교 휴대통신학과, 성균관대학교 정보통신공학부

Performance Analysis of Forward Error Correction for Low Data-Rate Wireless Personal Area Networks

Min-Su Kim, Jong-Tae Kim
 Department of Mobile Communication System in Sungkyunkwan University,
 School of Information and Communication Engineering in Sungkyunkwan University

Abstract - IEEE 802.15.4a의 UWB(ultra-wide band) 방식에서 PHY(physical layer) 시스템에 사용되는 FEC(forward error correction)는 RS(Reed-Solomon) 조직적(systematic) 블록 부호와 1/2의 부호율을 가진 조직적 길쌈 부호의 연결 형태로 이루어져있다.[1] UWB 신호를 이용한 시스템은 연속적이지 않은 임펄스(impulse) 기반의 신호를 사용하기 때문에 정밀도 면에서 뛰어난 장점을 가진다. 본 논문에서는 IEEE P802.15.4a 표준에 명시되어 있는 FEC를 구현하여 AWGN(adaptive white gaussian noise) 채널에서의 SNR(signal to noise ratio)에 따른 BER(bit error rate)을 구함으로써 성능을 분석하였다. 실험에서의 정확한 결과를 얻기 위해 15.4a의 UWB에서의 변조 방식에 따라 신호를 변조한 후 잡음을 삽입하여 결과를 도출하였다.

1. 서 론

유비쿼터스 시대가 다가오면서 실내에서 통신이 가능한 WPAN(wireless personal area networks) 시스템이 주목받고 있다. 이 중에서 UWB 기술은 저비용, 저전력으로 통신뿐만 아니라 실내나 음영 지역에서 정밀한 위치 인식 및 추적 기능을 할 수 있어 유비쿼터스 시대를 구축하기 위한 핵심 기술로 인식되고 있다. 저속 WPAN Alternate PHY에 대한 표준인 IEEE 802.15.4a는 저소비 전력으로 통신과 거리 측정이 동시에 가능하도록 하는 PHY를 구현한 표준으로서, CSS(chirp spread spectrum)와 UWB가 모두 PHY 기준 방식에 포함되어 있다.[2]

UWB 무선 기술은 중심 주파수의 20% 이상의 점유 대역폭을 차지하거나 500MHz 이상의 점유 대역폭을 차지하는 기술을 말하며, 이 기술은 기존 협대역 시스템이나 광대역 CDMA 기술과 비교하였을 때 매우 넓은 스펙트럼 대역에서 상대적으로 낮은 전력 스펙트럼 밀도를 가지기 때문에 기존의 여러 통신시스템과 양립할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 또한 주파수 대역을 점유하는 범위가 매우 넓은 특성을 이용하여 낮은 전력으로 실내나 음영지역에서 통신을 할 수 있고, 비교적 좁은 영역 안에서는 정밀한 통신을 가능하게 한다.[2]

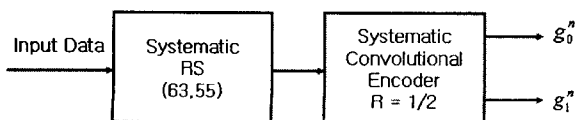
IEEE 802.15.4a의 UWB PHY에서 전반적인 신호의 흐름을 살펴보면, 송신단에서는 RS 부호기, 길쌈 부호기, 심볼 매퍼(mapper), 프리앰블(preamble) 삽입기, 펄스 shaper, RF단, 안테나를 거쳐 채널로 나아가게 되어 있다. 수신단에서는 RF를 통해 들어온 신호를 펄스 shaper, 동기화 블록, 데이터 복조기, 길쌈 복조기, RS 복조기를 거쳐 송신 신호를 복원한다. UWB 방식의 PHY의 데이터 변조는 BPSK와 BPM(burst position modulation)의 혼합한 변조 방식을 사용한다. 심볼 매퍼 블록에서 FEC를 통과한 데이터의 변조를 수행하며, LFSR(linear feedback shift register)를 사용하여 확산 코드를 만들어 burst의 hopping 위치를 결정하는 역할을 수행한다.

UWB 방식의 저속 WPAN Alternate PHY를 설계하기 위해 구현한 FEC의 성능을 분석하고자 한다. UWB PHY의 변조 방식인 BPSK와 BPM를 사용하여 FEC의 출력 데이터를 변조하였고, 송신단과 수신단 사이에는 AWGN 채널을 적용하였다. 합리적인 결과를 도출하기 위해 FEC에서 출력된 데이터를 QPSK로 변조하여 AWGN 채널을 통과한 데이터를 구하여 각각의 상황에 따른 결과를 분석하였다. 모든 블록의 구현 및 성능 분석은 MATLAB을 사용하여 수행하였다.

2. 본 론

2.1 UWB PHY의 FEC 구조

FEC의 구조는 <그림 1>과 같이 조직적 RS 부호기와 1/2의 부호율을 가진 조직적 길쌈 부호기의 연결 형태로 이루어져있다.[2]

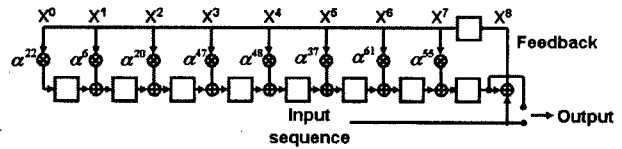


<그림 1> UWB PHY의 FEC 구조

2.1.1 RS 부호

UWB PHY에서 사용하는 조직적 RS 부호는 Galois Field인 GF(2)의 확장 형태인 GF(2^a)를 사용한다. GF(2^a)는 총 64개의 원소로 구성되어 있으며, 각각의 원소는 음, 양의 구분이 없이 a = 010000을 기준으로 a^i로 표현한다. Galois Field의 덧셈 연산은 Exclusive OR 연산을 사용하며, 곱셈 연산 및 나눗셈 연산은 제곱수 자리를 산술 덧셈 및 뺄셈을 이용하여 계산한다.[3]

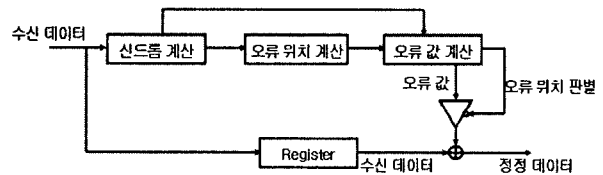
RS 부호기 설계를 위한 생성 다항식(generator polynomial)은 각 Field에 따라 정해져 있으며, 정해진 LFSR 회로 구성에 부호기를 만들기 위해 정해진 Field의 생성 다항식을 적용하여 조직적 RS 부호기를 구현한다. GF(2^a)의 RS 부호기 회로 구조는 <그림 2>와 같이 구현할 수 있다.



<그림 2> LFSR을 이용한 RS 부호기

RS6(63,55) 부호기는 330개의 비트의 집합을 입력받아 입력 비트에 48개의 패리티 비트를 추가하여 378개 비트의 부호어(codeword)를 출력한다. 부호화 과정에서 입력되는 정보 비트의 블록이 330비트가 되지 않을 경우 블록의 앞에 dummy bit인 0을 붙여 입력 비트를 330개로 맞춰준다. 그 후 Dummy bit가 삽입된 비트열을 55개의 심볼로 전환하여 부호화를 시행한다. 부호화된 심볼은 다시 비트로 전환하고 dummy bit를 제거하여 정보 비트에 48개의 패리티 비트가 더해진 형태로 부호화를 수행한다.[2]

RS 부호기는 복호화 수행을 통해 최대 4개의 심볼 오류까지 정정할 수 있는 능력을 가진다. 복호화 과정에서 심볼 단위로 오류 정정을 하기 때문에 연결 잡음에 뛰어난 정정 효과를 가진다. <그림 3>의 구성으로 RS 부호기를 구현 하였다.



<그림 3> RS 복호기 구조

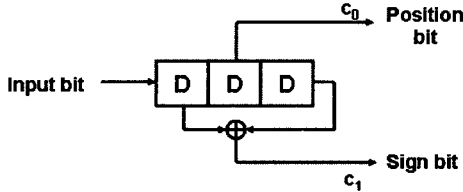
오류 위치와 오류 값을 구하기 위해서는 오류 다항식과 오류 위치 다항식, 그리고 신드롬 계산이 필요하다. 신드롬은 수신된 부호어에 오류가 포함되었는지 결정하기 위해 수신된 신호에 대해 수행한 패리티 검사의 결과이며 Galois Field의 원소로 표현한다. 오류 다항식은 각 위치에 따른 오류 값을 표현한 식이고, 오류 위치 다항식의 근은 오류 다항식의 오류 위치 변조의 역수이다. 오류 위치 다항식 $\sigma(X)$ 는 다음과 같이 정의하고 있다.

$$\sigma(X) = (1 + \beta_1 X)(1 + \beta_2 X) \dots (1 + \beta_n X) \\ = 1 + \sigma_1 X + \sigma_2 X^2 + \dots + \sigma_n X^n$$

신드롬의 자기회기(autoregressive)특성과 오류 위치 다항식을 이용하여 처음 4개의 신드롬으로 다음 신드롬을 예측하는 모델을 만들어 위치를 구하고, 계산을 통해 구해진 위치의 값을 오류 다항식에 대입하여 오류의 위치에 따른 오류의 값을 구한다.[3] 오류 위치 및 그 값을 구하기 위해 만들어진 연립방정식의 계산은 식을 행렬 모델로 만들어 역행렬을 구해 근을 구하는 방법을 사용하였다.

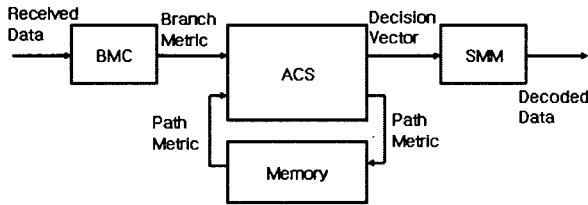
2.1.2 길쌈 부호

UWB PHY의 FEC는 길쌈 부호화를 위해 구속 길이가 K=3이고 생성 다항식(generator polynomial)은 $g_0=[010]$, $g_1=[101]$ 인 (2,1) 길쌈 부호기를 사용한다. g_0 로 계산하여 출력되는 비트는 burst의 위치를 정하는 비트로서 position bit라고 한다. 또한 이 비트열은 입력을 그대로 유지하여 출력하므로 systematic bit라고도 부른다. g_1 로 구성된 생성기에서 출력되는 비트는 burst의 부호를 정하는 역할을 하며 sign bit라고 부른다. 이 비트열은 systematic bit에 추가되어 오류를 검사하는데 사용되므로 parity bit라고도 한다.[2] 구속 길이에 따라 레지스터 3개를 사용하며, 그 구조는 <그림 4>와 같다.



<그림 4> 조직적 길쌈 부호기

길쌈 복호기는 최대 가능성 복호화를 수행하는 비터비 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘은 각 상태에 입력되는 경로들과 수신된 신호와의 유사성을 비교하여 유사성이 가장 큰 하나의 생존 경로(survivor path)를 선택하는 것이다.[4] 비터비 알고리즘의 구현은 <그림 5>와 같이 BMC(branch metric calculation), ACS(add-compare-selection), SMM(survivor path memory management), Memory의 네 부분으로 구성하였다.

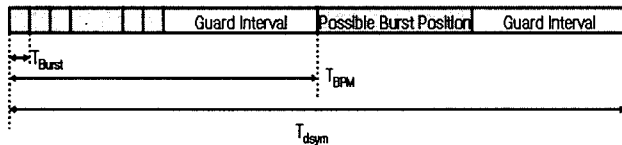


<그림 5> 비터비 복호기 구조

2.2 UWB PHY의 변조 방식

UWB PHY의 변조방식은 한 심볼당 2개의 비트 정보를 전송한다. FEC 부호기를 통해 생성된 position bit와 sign bit는 burst의 위치에 따라 정보를 전송하는 BPM방식과 burst의 구성에 따라 정보를 전송하는 BPSK방식을 혼합한 방식으로 변조된다. 또한 $g(D) = 1 + D^{14} + D^{15}$ 의 형태를 가진 생성 다항식으로 만든 LFSR을 사용하여 시간 hopping과 확산 코드를 동시에 생성한다.[1] LFSR에 의해 출력된 정보를 통해 burst의 세부 위치를 결정하고, 시간에 따라 변화하는 확산 코드를 이용하여 신호를 확산시킨다.

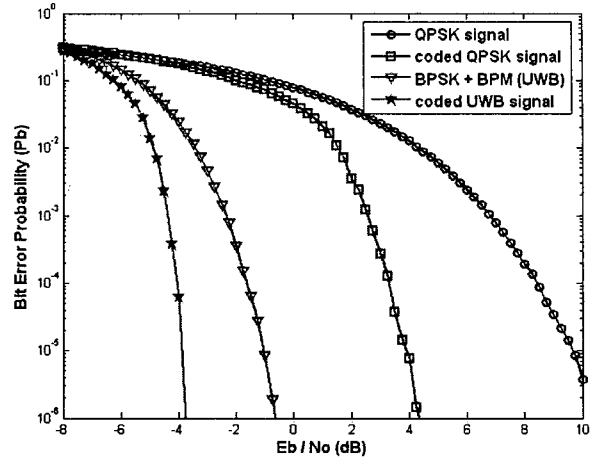
<그림 6>은 UWB PHY의 심볼 구조를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 한 심볼의 길이는 시간 T_{dsym} 이며, 한 심볼은 두 개의 T_{BPM} 의 시간을 가지는 구간으로 구성되어 있다. 한 심볼의 시작 시간을 0이라 할 때, position bit가 0인 경우 $[0, T_{BPM}]$ 구간, 1인 경우에는 $[T_{BPM}, T_{dsym}]$ 구간에 burst가 존재한다. burst의 위치는 시간 hopping을 만드는 LFSR의 결과 값에 따라 결정되며, <그림 6>에서 보는 바와 같이 burst는 T_{BPM} 의 1/2에 해당하는 구간 안에 위치할 수 있다. 나머지 1/2의 시간은 guard interval로서, 멀티패스의 영향에 의한 간섭을 줄이기 위해 설정된 구간이다.[2] UWB PHY가 동작하는 주파수 구간에 따라 심볼에 존재하는 burst 구간의 개수는 8, 32, 128개로 각각 다르다.



<그림 6> UWB PHY 심볼 구조

2.3 성능 분석

UWB PHY를 위한 FEC의 성능 분석을 위해 AWGN 채널에 송신신호를 통과시켜 잡음이 더해질 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. UWB PHY에서의 FEC 성능에 관한 타당한 결과를 도출하기 위해 BPSK+BPM 변조 블록 및 복조 블록을 설계하였고, 시간 오프셋은 생기지 않았다고 가정하기 위해 FEC 출력 비트열을 각각의 벡터로 만들어 따로 변, 복조 하였다. 또한 FEC만의 성능을 알아보기 위해 출력 비트열을 QPSK로 변, 복조를 하여 결과를 비교하였다.



<그림 7> FEC 부호화에 따른 BER 비교

<그림 7>은 MATLAB을 사용하여 각각의 환경에 따른 그래프를 그린 것이다. -4dB 부근에서 BER(bit error rate)이 10^{-6} 에 도달함을 확인하였다. IEEE 802.15.4a에 첨부된 BER 결과 그래프에는 UWB 방식의 BER 비교는 기술되지 않았기 때문에 1Mbps CSS PHY의 결과와 비교를 하였고, 거의 비슷한 결과가 나오는 것을 확인하였다. 또한 UWB 방식 시스템의 신호는 전송시간 중 각 심볼마다 정해진 짧은 시간동안에만 펄스가 존재하기 때문에 QPSK와 BER 비교를 하였을 때 BPSK+BPM방식이 QPSK에 비해 가우시안 잡음에 강한 변, 복조 방식임을 확인할 수 있다.

3. 결론

IEEE 802.15.4a 기반의 저속 WPAN 시스템은 저전력 소비 및 저비용을 목표로 하고 있고, 통신 범위, 강인성, 그리고 이동성 등에서 IEEE 802.15.4-2003보다 향상된 성능을 보여줄 것으로 기대되고 있다. 현재 표준이 완료 및 공개되었기 때문에 빠른 시일 내에 이와 관련한 상용 제품들이 개발될 것이며, 현재 국내의에서 많은 연구가 진행되고 있다.[1]

본 논문에서는 UWB PHY의 오류 정정 기법인 FEC를 MATLAB으로 구현하여 성능 분석 수행 결과를 도출하였다. 도출한 결과를 기초로 본 연구에서 구현된 FEC 자체의 능력이 오류 수정 능력을 충분히 갖추고 있고, 또한 UWB PHY의 변조 및 복조를 수행해 줄 경우 실내 및 음영지역 등의 통신을 하기에 열악한 환경에서도 데이터를 정확하게 주고받을 수 있는 성능을 보유하고 있음을 확인할 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN)", IEEE Std 802.15.4a™-2007, Aug.2007.
- [2] 오미경, 김명중, 김재영, "유비쿼터스 홈 구축을 위한 저속 위치인식 UWB 기술", 전자통신동향분석 제 21 권 제 5호 pp.30-39, 2006년 10월
- [3] Bernard Sklar, "Digital Communications: Fundamentals and Applications", Prentice Hall PTR, 2001
- [4] Peter Sweeney, "Error Control Coding From Theory To Practice", John Wiley & Sons, 2002