

Turbo FEC를 장착한 CDD(Cyclic Delay Diversity)기술의 BER 성능분석.

김동배(kdbworld@korea.ac.kr), 오태원(taewon@korea.ac.kr)
고려대학교 전자통신공학과

BER PERFORMANCE ANALYSIS OF CYCLIC DELAY DIVERSITY (CDD) TECHNIQUE WITH TURBO FEC.

Dong Bae Kim (kdbworld@korea.ac.kr), Tae Won Oh (taewon@korea.ac.kr)
Department of Radio and Communication Engineering, The Graduate School, Korea University

Abstract - OFDM 송수신 시스템에서 채널성능을 개선하기 위해 CDD(Cyclic Delay Diversity) 기술을 적용하면, Frequency Interleaving의 영향으로 인해 burst error가 randomize되어, convolutional code/Viterbi decoding FEC의 BER 성능개선 효과를 배가 할 수 있다. 그러나 차세대 통신시스템에 적극 활용되는 Turbo FEC는 자체 interleaving 구조를 가지고 있으므로, CDD기술과의 결합으로 인한 영향을 증명하기 위하여, 본 논문에서는 Turbo FEC를 사용하는 OFDM CDD시스템을 MATLAB을 이용한 computer simulation을 통해서 BER 성능을 비교분석 하였다.

1. 서 론

무선 통신 시스템에서 심각한 문제를 발생시키는 다중 경로 페이딩(Multi-path fading) 현상을 해결하기 위한 방안으로 송신 다이버시티 기법이 활발하게 연구되고 있다. 특히 두 개 이상의 송신 안테나를 사용하여 송신 다이버시티 효과를 얻는 시공간 부호(Space-Time codes)^[1]와 순환 지연 다이버시티(Cyclic Delay Diversity)^[2] 등의 기법이 여러 표준에 제안되었다.

MIMO systems을 위해 처음에 제안된 Delay diversity 기법^[3]은 다중안테나에서 지연된 같은 신호를 전송하는 기법으로 flat fading 채널에서 제안되었다.^[4] 하지만 이 기술은 delay diversity에 의해 frequency selectivity를 증가시키는 문제로 인해 수신단에서 Equalization 없이는 full diversity를 얻을 수 없었다.^[5] 그리고 채널 변화가 심할 경우 MIMO system 수신단의 설계가 더욱 복잡해져 Equalization을 사용하는게 어려워졌다. 이러한 Delay Diversity의 frequency selectivity현상을 극복하기 위해 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)을 Delay Diversity와 함께 사용하였지만 이 방법은 송신 안테나 수가 증가될 경우 보호구간(Guard Interval)사용에 따른 대역폭 소비를 증가시키는 문제가 있었다.

앞에서 제기한 frequency selective fading channel 환경에서 MIMO-OFDM system의 time delay diversity 기술의 문제점을 극복하기 위해, cyclic delay diversity (CDD)의 새로운 기술이 제안되었다.^[6]

본 논문은 2장에서 터보 코드(Turbo code)와 다중 전송 안테나로 구성된 CDD의 개념을 설명하고 Turbo FEC를 사용하는 OFDM CDD시스템을 MATLAB을 이용한 computer simulation을 통해서 BER 성능을 알아보고 채널 코드로 convolutional code를 사용했을 때와 차이점들을 비교해 보고자한다 마지막으로 3장에서는 간단한 결론을 도출하는 것으로 본 논문을 마칠 것이다.

2. 본 론

2.1 Turbo codes

터보 코드(Turbo code)는 연결 부호(Concatenated code)구조에 부호 열의 복호화(decoding)를 위한 반복(Iterative) 알고리즘을 더한 것으로 볼 수 있다.

부호는 동일한 정보 열을 서로 다르게 인터리빙(Interleaving)하여, 두 개 이상의 구성 부호의 입력으로 사용함으로써 구성한다. 컨볼루션 부호(convolutional code)의 경우, 복호기(decoder)의 최종단계에서 경관정(hard decision) 복호화 심볼을 만든다. 그러나 터보 코드와 같은 연결 부호가 적절히 작동하기 위해서는 복호화 알고리즘이 복호기 사이에 경관정만 전달해서는 안된다. 각 복호기에서 얻은 정보를 가장 잘 이용하기 위해서, 복호화 알고리즘은 경관정보보다는 연관정(soft decision)을 교환하여야 한다. 두 개의 구성 부호를 가진 시스템에서, 터보 복호기의 개념은 하나의 복호기 출력에서 다른 복호기 입력으로 연관정을 전달하고 이러한 과정을 여러 번 반복하여 좀더 신뢰성 있는 결정을 내리는 것이다.

터보 부호의 부호기(encoder) 구조에서 systematic 형태는 병렬 연결시 전체 부호율(code rate)을 높여 주어 주파수 효율을 좋게 해주고 복호기에서의 복호화 복잡도 또한 낮추어 준다. 터보 코드의 recursive 형태는 인터리버(Interleaver)의 성능을 극대화 하여 터보 코드의 성능을 높이는 중요한 요소이다.

2.2 Cyclic Delay Diversity

송신 안테나의 수가 n_T 개 이고 수신 안테나의 수가 n_R 개인 다중입력 다중 출력(MIMO) 채널을 가정한다. 이 경우 시간 t 에서 송신 안테나 n 으로부터 수신 안테나 m 으로 전송되는 채널의 임펄스 응답(channel impulse response)을 다음과 같이 $1 \times N_s$ 벡터로 정의 한다.^[7]

$$h_t^{(nm)} = [h_t^{(nm)}(0), \dots, h_t^{(nm)}(D), 0, \dots, 0]$$

여기서 D 는 송신 안테나 n 에서 수신 안테나 m 으로 전송되는 부채널(subchannel)의 메모리 수이고 N_s 는 OFDM 시스템의 FFT 크기이다. 그리고 $h_t^{(nm)}(0)$ 는 복소 가우시안 확률 변수이며 모든 송신 안테나는 동일한 전력 지연 분포(power delay profile)를 가진다고 가정한다. 또한 하나의 OFDM symbol을 전송하는 동안 채널은 일정하게 유지되고 반송파간 간섭은 없으며 각각의 수신 안테나에서는 가산성 백색 가우시안 잡음(AWGN)이 더해진다고 가정한다.

채널 임펄스 응답을 주파수 영역으로 변환한 채널의 전달함수(transfer function)는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$H_k^{(nm)} = [H_k^{(nm)}(0), \dots, H_k^{(nm)}(N_s - 1)]$$

CDD 기법은 전체적인 채널의 전달 함수(channel transfer function)를 변화시킨다.^[8] m 번째 수신 안테나에서 수신되는 k 번째 OFDM symbol의 d 번째 부반송파의 채널 주파수 응답은 다음과 같이 주어진다.

$$H_k^{(m)}(d) = \sum_{n=1}^{n_T} H_k^{(nm)}(d) e^{-j2\pi d \Delta_n / N_s}$$

주파수 선택적 채널(frequency selective channel)에서 채널 코딩 기법을 사용하면 송신 다이버시티효과를 얻을 수 있다고 알려져 있다.^{[2][7]} 위 식에서 $H_k^{(nm)}(d)$ 가 평평한 페이딩 채널(flat fading channel)이라고 가정할 경우 적절한 Cyclic Delay 값을 사용하면 전체적인 채널의 전달함수인 $H_k^{(m)}(d)$ 를 주파수 선택적인 채널로 바꿀 수 있다.

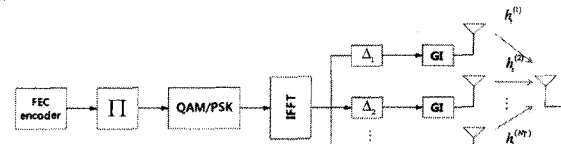


그림 1. CDD를 적용한 다중 안테나 OFDM 시스템의 블록도.

위 그림은 CDD 기법을 적용한 다중 안테나 OFDM 시스템의 블록도를 나타낸다. 입력데이터는 오류 정정 부호(FEC)에 의하여 부호화되고 인터리버를 통하여 인터리빙된다. 인터리빙된 부호는 QAM/PSK 심볼로 변조되고 나서 입력 심볼은 크기가 N_s 인 IFFT를 이용해서 OFDM 신호로 변환된 뒤에 송신 안테나별로 정해진 지연 값 $\Delta_n, 0 \leq n \leq n_T$ 를 사용하여 OFDM 신호를 순환 이동한다. 다음으로 보호 구간(guard interval)을 삽입한 후에 각각의 송신 안테나를 통해 전송한다. 이때 Δ_n 은 최소한 채널 메모리 D 보다 커야 다이버시티 효과를 최대화할 수 있으며, D 가 알려져 있지 않을 때는 다음의 조건을 만족하는 Cyclic Delay 값을 선택한다.^[7]

$$\Delta_n \text{ (cyclic delay value)} = \frac{N_s(n-1)}{n_T} = \frac{N_s}{n_T} + \Delta_{n-1}$$

푸리에 변환에서 시간 축에서의 순환 이동은 주파수 축에서의 위상 변화로 나타나므로 주파수 축 상에서 위상을 변화시키는 위상 다이버시티는 CDD와 개념적으로 동일한 기법이다. 하지만, 구현에 있어서 위상 다이버시티 기법은 n_T 번의 IFFT 연산을 수행해야 하지만, CDD는 한 번의 IFFT 연산만 수행하면 되므로 구현 복잡도가 낮다는 장점이 있다.

2.3 Equivalence Between CDD and Frequency Interleaver.

이전 장에서 설명한 CDD의 frequency interleaving 효과를 고려해보자. 그림 2에서는 평평한 페이딩 채널(flat fading channel) 환경에서 CDD를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대해 각각 시간축과 주파수 축에서의 오류 분포를 나타내고 있다.

CDD은 전체적인 채널의 전달 함수(channel transfer function)를 변화시켜 채널을 Frequency selective하게 만들고 이 효과로 인하여 오류 분포를 변화 시켜준다는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 CDD와 Frequency Interleaver는 비슷한 효과를 가지고 있다.^[6]

다음 장에서는 CDD의 Frequency Interleaving 효과가 터보 부호에서 사용된 Interleaver의 성능에 어떤 영향을 주는지 살펴보고 CDD를 convolutional code/Viterbi decoding FEC와 결합했을 때와 어떤 성능 차이를 보이는지 비교해 보고자 한다.

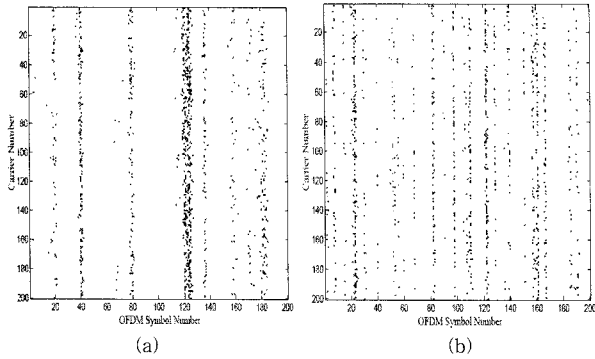


그림 2. (a)Uncoded Error Distribution without CDD (Error), (b)Uncoded Error Distribution with CDD (Error)

2.4 SIMULATION RESULTS

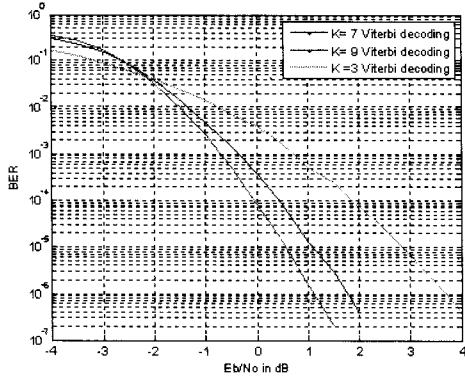


그림 3. CDD 효과 (2 Tx X 1 Rx with BPSK, Rate 1/2 convolution code, Rayleigh channel)

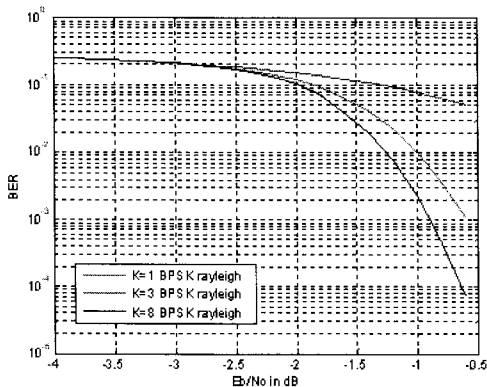


그림 4. CDD 효과 (2 Tx X 1 Rx with QPSK, Rate 1/2 Turbo code, constraint length 3, interleaver size 592, Decoder : Log-MAP Algorithm, Rayleigh channel)

CDD(Cyclic Delay Diversity)와 FEC 합성에 따른 BER 성능분석하기 위하여 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험에서 FFT 크기Ns

는 256이며 QPSK 변조를 사용하였다. 또한 채널 부호화 기법으로는 구속장(constraint length)이 3, 7, 9으로 구분하고 부호율이 1/2인 컨벌루션 부호(convolutional code)와 constraint length 3이고 interleaver size가 592이고 Rate이 1/2인 터보 부호(Turbo code)를 사용하였으며 디코더는 비터비 알고리즘을 사용하였고 터보 부호의 디코더는 Log-MAP Algorithm을 사용하였으며 iteration 1, 3, 8 번으로 나누어 실험을 수행하였다. 채널환경으로 레일리 채널(Rayleigh channel)을 고려하였고, 채널 추정은 완벽하다고 가정하였다.

위 그림3, 4는 2개의 송신 안테나를 사용하여 레일리 채널(Rayleigh channel)을 통하여 송신 하는 경우 컨벌루션 부호 기법과 터보 부호 기법의 성능을 보여 준다. CDD 기법을 적용하고 구속장(constraint length)이 3인 컨벌루션 부호의 경우 BER이 10⁻²일 때 E_b/N_0 가 약 -0.8dB이고 이와 비교해 iteration이 3인 터보 부호의 경우 BER이 10⁻²일 때 E_b/N_0 가 약 -1dB를 나타내고 있다.

단위 대역폭에서 그 이하로는 오류 없이 정보를 보낼 수 없고, 그 이하로는 무한 대역폭도 한정된 정보율을 지원 할 수 없는 $E_b/N_0 = -1.6dB$ 라는 색인의 한계 값이 존재한다. 실제로 색인의 한계에 이르는 것은 불가능하다. 하지만 오늘날 약속된 성능 향상의 대부분은 터보 부호의 사용으로 실현이 가능하다는 점에서 위와 같은 모의실험 결과는 CDD 기법을 적용하지 않은 터보 부호와 컨벌루션 부호의 성능차이가 현저하게 나는 걸 고려해 볼 때 컨벌루션 부호 역시 CDD와 결합하게 되면 터보부호와 같은 좋은 성능을 얻을 수 있는 중요한 결합임을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 FEC를 사용하는 OFDM CDD시스템을 MATLAB을 이용한 computer simulation을 통해서 BER 성능을 비교분석하였다. 채널 코딩을 사용여부는 오늘날의 통신 시스템은 항상 채널 코딩을 사용하기 때문에 채널 코딩이 선택 사항이 아니다. 그렇기 때문에 차세대 통신시스템에 적극 활용되는 Turbo FEC와 CDD기술과의 결합을 모의실험을 통해 성능을 확인하고 잘 알려진 컨벌루션 부호와 비교해 검증해 보았다. 모의실험 결과 CDD의 Frequency interleaving 효과는 터보부호와 결합하여 어느 정도 성능 향상을 시켰지만 CDD와 convolutional code/Viterbi decoding 기술과 조화를 이루어 burst error를 randomize하여 BER 성능개선 효과를 배가 할 수 있다는 점과 비교해 모든 채널 코드에서 같은 성능 향상을 시키는 것이 아니라는 것을 본 논문에서 확인하였다.

[참고문헌]

- [1] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication I: performance criterion and code construction," *IEEE Trans. Information Theory*, vol.44, no. 2, pp.744-765, March 1998.
- [2] A. Dammann and S. Kaiser, "Standard conformable antenna diversity techniques for OFDM systems and its application to the DVB-T system," in *Proc. IEEE Globecom 2001*, pp. 3100-3105.
- [3] Jun Tan, Gordon L. Stuber, "Multicarrier Delay Diversity Modulation for OFDM Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 3, No. 5, September 2004. pp. 1756-1763
- [4] Michael J. Turpin, "An Investigation of a Multiple-Input Multiple-Output Communication System with the Alamouti Space-Time Code," Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, June 2004.
- [5] Erwin Kreyszig, "Advanced Engineering Mathematics, Fourth Edition," John Wiley & Sons, New York, 1979.
- [6] M. Bossert et al., "On Cyclic Delay Diversity in OFDM Based Transmission Schemes," in *proc. 7th International OFDM Workshop*, Hamburg, Germany, September 2002.
- [7] G. Bauch, and J.S. Malik, "Cyclic delay diversity with bit-interleaved coded modulation in orthogonal frequency division multiple access," *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol.5, no.8, pp.2092-2100, Aug. 2006.