

Cross-layer 개념을 바탕으로 한 광 CDMA 시스템을 위한 Delay-Throughput 분석

Delay-Throughput Analysis Based on Cross-Layer Concept for Optical CDMA Systems

김 윤 현*, 김 승 종*, 오 영 철**, 이 성 춘**, 김 진 영*

Yoon Hyun Kim, Seung Jong Kim, Oh Young ChSang Hun Kim, Jin Young Kim

Abstract

In this paper, the network performance of a turbo coded optical code division multiple access (CDMA) system with cross-layer, which is between physical and network layers, concept is analyzed and simulated. We consider physical and MAC layers in a cross-layer concept. An intensity-modulated/direct-detection (IM/DD) optical system employing pulse position modulation (PPM) is considered. In order to increase the system performance, turbo codes composed of parallel concatenated convolutional codes (PCCCs) is utilized. The network performance is evaluated in terms of bit error probability (BEP). From the simulation results, it is demonstrated that turbo coding offers considerable coding gain with reasonable encoding and decoding complexity. Also, it is confirmed that the performance of such an optical CDMA network can be substantially improved by increasing the interleaver length and the number of iterations in the decoding process. The results of this paper can be applied to implement the indoor optical wireless LANs.

Keywords : IM/DD, Optical CDMA, Turbo code, Cross layer design, PPM modulation

1. 서 론

부호분할 다중접속 (CDMA : Code Division Multiple Access) 시스템은 비동기 접속 능력, 정확한 도달 시간 측정, 사용자 할당의 유연성, 변화하는 비트율과 갑자기 증가하는 통화량을 지원하는 능력, 보안, 항재밍 성능 등의 많은 장점[1-5]을 가지고 있어서 무선 통신 및 광 네트워크 응용분야에서 많은 주목을 받고 있다. 또한 부호분할 다중접속은 시간이나 주파수 조절이 필요하지 않기 때문에 시분할 다중접속 (TDMA : Time Division Multiple Access) 및 파장분할 다중접속 (WDMA : Wavelength Division Multiple Access)에 비해서 네트워크를 디자인하는데 더욱 유연하다. 특히, 시분할 다중접속은 칩비율의 역다중화와 네트워크의 정확한 시간 동기화가 필요하고, 파장분할 다중접속은 매우 정확한 파장 안정성이 요구된다. 더욱이, 단일 모드 광 섬유의 넓은 전송 대역폭은 기본적으로 광 (Optical) 부호분할 다중접속 시스템에 적합하다.

OOK (On-Off-Keying)와 펄스위치변조 (PPM : Pulse Position Modulation)는 광 통신에서의 변조방식으로 사용되었다[6-7]. 무선 광 채널과 같은 전력 제한적인 광 채널에서는 전력 효율성 때문에 펄스위치변조가 OOK 보다 더 적합하다. 데이터를 송신하기 위해 펄스위치변조에서는 펄

스위치변조 심볼에 따라서 레이저 펄스가 이미 지정된 펄스 위치 중의 하나로 이동한다.

다중 사용자 검파나 채널 부호화 같은 광 부호분할 다중접속 시스템의 성능을 개선하기 위한 많은 연구가 있었다[8-10]. 최근, 채널 부호화 분야에서 Berrou 등에 의해 1993년에 제안된 터보 (Turbo) 부호에 대한 관심이 높아졌다[8]. AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널뿐만 아니라 무선 채널에서의 부호분할 다중접속 시스템에서 터보 부호는 상당한 부호화 이득은 제공함을 확인하였다[9]. 또한 터보 부호화된 광 통신 시스템의 성능이 최근 여러 연구에서 입증되었다[11-12].

터보 복호화는 반복적으로 수행된다[13]. 부호화기는 병렬로 연결된 두 개의 요소 부호기와 인터리버로 구성되어 있다[14]. 전송될 정보 시퀀스는 인터리버에 의해 시간 순서가 바뀐 후 두 번째 부호기의 입력으로 사용된다. 터보 부호는 인터리버의 길이가 증가할수록 성능이 향상되고, 복호화 복잡도가 선형적으로 증가하며, 큰 블록 길이의 복호가 가능하다는 것이 알려져 있다[13]. 터보 복호는 최대 우도 (ML : Maximum Likelihood) 복호가 아니라, 반복적인 방법으로 최대 우도 복호에 근접하도록 하는 복호 방법이다. 모든 반복 복호마다, 채널을 통해 수신된 정보와 다른 복호기에 의해 생성된 신뢰성 있는 정보를 이용하여 단일 복호가 수행된다.

본 논문에서는 물리 계층과 네트워크 계층의 계층간 교차 (Cross-Layer) 개념을 적용하여 터보 부호화된 펄스위치변조-광 부호분할 다중접속 시스템의 네트워크 성능을

접수일자 : 2009년 8월 07일
최종완료 : 2009년 8월 07일
*광운대학교 전파공학과
교신저자, E-mail : jinyoung@kw.ac.kr
**KT 인프라연구소

분석하고 실험하였다. 광 채널에서는 강도변조 (IM : Intensity Modulation) 및 직접검파 (DD: Direct Detection) 하는 시스템으로 모델링하였다. 네트워크의 성능은 비트 오류확률 (BER : Bit Error Probability) 측면에서 분석되었다. 터보 복호 과정에서는 최대 사후 확률 (MAP : Maximum a Posteriori Probability) 알고리즘과 이것의 변형된 형태인 Max-Log-MAP 알고리즘 및 연관성 출력 비터비 알고리즘 (SOVA : Soft Output Viterbi Algorithm)이 사용되었다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제 II장에서는 광 부호분할 다중접속 네트워크 및 송·수신기 모델을 소개하였고, 제 III장에서 터보 부호기와 복호기의 구조 및 복호 알고리즘을 제시하였다. 제 IV장에서는 시스템 성능을 분석하였으며, 모의 실험 결과를 제 V장에서 나타내었다. 마지막으로 본 논문의 결론을 제 VI장에서 제시하였다.

II. 시스템 모델

1. 광 부호분할 다중접속 네트워크 모델

그림 1은 본 논문에서 고려한 광 부호분할 다중접속 네트워크 구조를 나타낸다. 그림 1에서 광 부호분할 다중접속 네트워크의 송신단에는 K 명의 사용자가 존재한다. 각 사용자에게는 자신들을 구분하기 위한 고유한 광 펄스 시퀀스가 할당된다. 광 부호분할 다중접속 네트워크는 파장 조절 없이 간단한 펄스 레이저를 사용할 수 있고, 협대역 광 여파기 없이 표준 광대역 광자 검파기를 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 모든 사용자는 각각 독립적으로 동작하고 사용자들의 송신기를 동기화시키기 위한 공통의 클럭이 필요하지 않다. 각 사용자는 시간 슬롯의 시작점에서 각각의 메시지를 송신하고, 중심국으로부터 Acknowledgement (ACK) 신호가 자신들에게 송신되기를 기다린다. 물리 계층에서 이러한 네트워크는 전통적으로 수동적인 Star Topology 광 네트워크인 반면에, 논리적인 레벨에서 이 구조는 Broadcast-and-Select 네트워크이다.

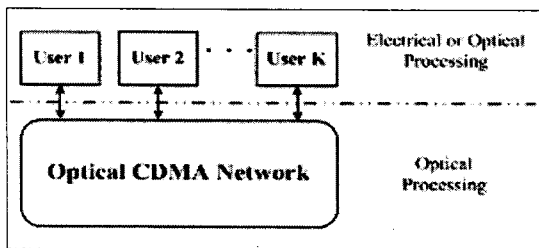


그림 1. 광 부호분할 다중접속 네트워크 구조
Fig. 1. Structure of an optical CDMA network.

2. 송신기 모델

그림 2는 본 논문에서 고려한 광 부호분할 다중접속 시스템의 송신기 구조를 나타낸다. 각 사용자의 정보 비트는 터보 부호기에 의해 부호화 된다. 부호화된 비트 스트림은 펄스위치변조 방식으로 변조되는데, 여기서 부호화된 비트 스트림 $\log_2 M$ 비트가 M 심볼로 블록화된다. 그리고 송신기는 펄스 시퀀스를 M 시간 슬롯 중에서 한 슬롯에 전송한다. 여기서 슬롯은 M -ary 펄스위치변조 신호 형태에서 각 심볼의 구간을 나타낸다.

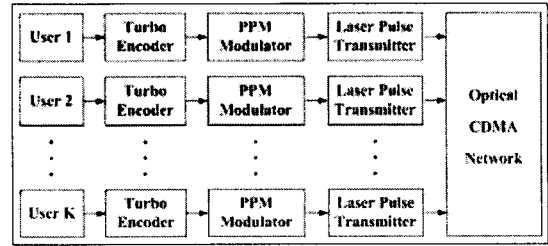


그림 2. 광 부호분할 다중접속 시스템의 송신기 구조
Fig. 2. Transmitter structure of an optical CDMA system.

3. 수신기 모델

그림 3은 본 논문에서 고려한 광 부호분할 다중접속 시스템의 수신기 구조를 나타낸다. 수신된 신호는 먼저 광 상관기에 의해 처리되는데, 광 상관기는 펄스 위치에 대응하는 광 지연 선의 집합이다. 본 논문에서 레이저 빛은 비동기식으로 가정하기 때문에, 사용자들의 광 신호들은 강도가 더해진다. 원하는 신호가 광 상관기를 통과하면, 상관기 출력은 광자 검파기에서 전기 신호로 바뀐다. 그리고, 펄스위치복조기에서 가장 큰 출력을 가진 위치가 송신된 심볼이 존재하는 위치로 선택된다. 이 검파과정을 거친 후 펄스위치복조기 출력은 송신된 정보 비트를 추정하기 위해 터보 복호기에 의해 복호화된다.

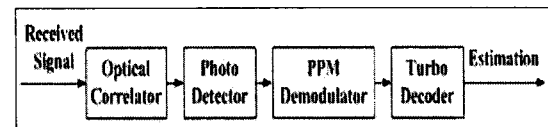


그림 3. 광 부호분할 다중접속 네트워크 구조
Fig. 3. Structure of an optical CDMA network.

4. 패킷 처리율과 지연

터보코드 시스템의 BER 성능을 시험했던, 우리는 광 CDMA 네트워크의 고레벨 성능 특성의 분석을 시작하였다. 이렇게 함으로써, 우리는 아래와 같이 간단한 가정을 만들었다.

- 1) 광 네트워크는 슬롯된 CDMA 네트워크로 모델이다.
- 2) 한정된 수, 터미널의 K 는 네트워크에서의 터미널이다.
- 3) 각 송신단은 각각의 터미널에 동일한 세기로 수신된다.
- 4) 각 패킷은 터보코드의 코드워드로 이루어진다.
- 5) 네트워크는 터미널 사이의 필히 센터 기지국을 해야 하는 통신안에서 중심이 된다.
- 6) 센터 기지국으로부터 피드백 메시지는 에러가 없다.

슬롯되어진 네트워크에서, 각 터미널은 사전의 패킷이 성공적으로 송신되었는지 여부에 따라 각 슬롯의 시작에 블록 또는 언블럭 되어진다. 각 슬롯에서, 오직 언블럭되어진 터미널은 새로운 패킷을 P_n 확률로 생성할 수 있으며, 반면, 블럭된 터미널은 쌓아둔 패킷을 P_r 확률로 재전송할 수 있다. 각 슬롯 끝에는, 센터 기지국이 모든 터미널에 동시에 피드백 메시지를 전송한다.

네트워크의 원동력은 상태를 블럭된 터미널의 숫자로 표현하는 Markov Chain으로써 모델이 되어질 수 있다.

Markov Chain의 상태 공간은 $\{0, 1, \dots, K\}$ 이며, 다시, 여기서 K 는 네트워크에서의 활동 터미널의 전체 수이다. 하나의 상태에서 다른 것으로 전환은 새롭게 성공하지 못한 송신단의 수와 성공적으로 재전송된 수 사이의 차이로써 결정되어진다. 성공한 새로운 전송과 성공적이지 않는 재전송은 시스템 상태에 영향을 주지 않는다.

주어진 슬롯에서, $N_t = N_n + N_r$ 가 있다. N_n 와 N_r 는 각각 새로운 패킷과 쌓여진 패킷을 표시한다. N_n 와 N_r 은 Bernoulli의 랜덤 변수로 독립적이다.

$$Q_n(l|i) = \Pr\{N_n = l | X_k = i\} = \binom{K-i}{l} p_n^l (1-p_n)^{K-i-l}$$

그리고

$$Q_r(l|i) = \Pr\{N_r = l | X_k = i\} = \binom{i}{l} p_r^l (1-p_r)^{i-l}$$

여기서, X_k 는 슬롯 k 의 시작에서 블록된 터미널의 수를 나타낸다.(ie X_k 는 k 시간에 Markov chain의 상태이다). 게다가, 패킷의 전체 숫자의 분포는 다음과 같이 주어진다.

$$Q_r(l|i) = \Pr\{N_r = l | X_k = i\} = \sum_{m=0}^l Q_n(m|i) Q_r(l-m|i)$$

슬롯 k 에 Markov chain의 한 단계 변화 확률은, $P_{i,j} = \Pr\{X_{k+1} = j | X_k = i\}$, 이는 다음과 같이 주어진다.

$$P_{i,j} = \begin{cases} 0, j < i-1 \\ Q_n(0|i) \sum_{l=i}^j Q_r(l|i) P_s(l), j = i-1 \\ Q_n(k+1|i) \sum_{l=0}^k Q_r(l|i) P_s(l+k+1) + Q_n(k|i) \sum_{l=0}^k Q_r(l|i) [1-P_s(l+k)], j \geq i \end{cases}$$

여기서 $i = 0, 1, 2, \dots, K$, $j = 0, 1, 2, \dots, K$ 그리고 $P_s(i)$ 은 i 간섭 패킷이 있을 경우 조건 패킷 성공확률이다.

위에서 언급한 컨벌루션 코드상태와 비슷하게, N 보다 훨씬 많은 구성되어진 ν 크기, $1/3$ 터보코드는 $(3N, N-2\nu)$ 블록 코드와 동일하다. 이는 시작점에서 끝까지 동시에 이루어진 코드의 zero 상태 길이가 $3N$ 의 터보코드의 열이다. 블록 코드의 오류 정정 용량은 코드 안의 코드 시퀀스의 모든 쌍 사이 최소 거리에 의존한다. 컨벌루션 코드에서 독단적으로 긴 진로의 상태 내에서 최소거리는 밋나가며 재결합을 최소 자유거리 혹은 간단히 자유거리라 불려진다.

터보코드에서 효과적인 자유 거리는 규정으로 아래에 주

어진 컨벌루션 코드에서의 자유 거리와 비슷하게 행해진다.

$$d_f = 2 + 2z_{\min}$$

여기서 z_{\min} 는 2개의 가중치를 수반한 정보 시퀀스에 의해 생성된 여러 상황에서 패리티 체크의 최소 가중치이다. 여러 정정 용량 e 의 터보코드는 e 혹은 $3N$ 비트 사이에서 훨씬 적은 에러를 정정할 수 있다. 게다가, 패킷은 오직 만약 수신된 패킷에서 적어도 $3N-e$ 가 있다면 성공적으로 수신되어진다

CDMS 패킷 네트워크에서, 수신단은 비록 간섭 패킷이 겹쳐지더라도 다른 간섭 패킷이 패킷 캡처 시간후에 도달 하더라도 성공적으로 첫 번째 패킷을 수신할수 있다. 패킷 캡처 시간은 패킷 캡처를 보증하기 위한 도착 패킷들 사이에 필요한 최소 시간이다.

많은 터미널이 주어진 시간 슬롯안에서 전송된 그들의 패킷과 경쟁중일 때, 판별은 센터 기지국으로부터 그들의 거리 때문에 경쟁한 터미널 사이에 존재한다. 지연 캡처 효과를 제거하기 위하여, 우리는 Davis와 Gronemeyer가 제안한 무작위 도착시간(TOA)을 측정하였다. 무작위 과정후에, 경쟁한 패킷의 도착시간은 패킷 캡처 시간을 합친 불확실한 간격을 걸쳐 일정하게 분포되었다. 조건 패킷 성공확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_s(i) = \eta_i \cdot P_{s1}(i)$$

여기서, η_i 은 i 간섭패킷을 수반한 무작위 TOA로 표현되고 다음과 같이 주어진다.

$$\eta_i = \begin{cases} 1, i = 1 \\ (1 - \frac{1}{F})^i, i \geq 2 \end{cases}$$

$P_{s1}(i)$ 는 주어진 슬롯에서 i 간섭 패킷들이 경쟁하고 있을 때 캡처된 패킷이 정확히 캡처될 확률이다. 정정 패킷 캡처 확률 $P_{s1}(i)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_{s1}(i) = Z_{3N-e}(i-1) - \frac{(3N-e)}{(3N-e-1)} Z_{3N-e+1}(i-1) + \dots + (-1)^{3N-(3N-e)} \frac{(3N-1)}{(3N-e-1)} Z_{3N}(i-1),$$

여기서

$$Z_n(i) = \binom{3N}{n} \sum_{l=0}^i \sum_{n_1=0}^l \sum_{n_2=0}^{l-1} [B(n_1, n_2, \frac{1}{2})]^{n-1} \cdot B(i, n_1, K_u) \cdot B(n, l, \frac{1}{2})$$

$$K_u = \frac{w(w-1)}{F-1}$$

그리고 $B(i, j, \rho) = \binom{j}{i} \rho^i (1-\rho)^{j-i}$ 는 이항분포로 표시된다.

위에 Markov chain는 유한한 개체는 가지고 더 이상 단

순화 할 수 없기 때문에, 안정된 상태 분포를 가지며 다음과 같이 표시한다.

$$\mathbf{f} = [f(0), f(1), \dots, f(K)]$$

여기서

$$f(j) = \Pr\{X_\infty = j\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \Pr\{X_{k+n} = j | X_k = i\}$$

안정된 상태 확률은 선형 연립방정식의 시스템을 해결함으로써 찾게된다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{fP}$$

$$\sum_{j=0}^K f(j) = 1$$

여기서 $\mathbf{P} = [P_{i,j}]$ 는 상태이행 행렬이다.

주어진 안정상태 분포에서, 우리는 이득의 양을 계산할 수 있다. 예를 들어, 제공된 트래픽은

$$\bar{G} = \sum_{m=0}^K f(m)[(K-m)p_r + mp_n]$$

안정상태 패킷 처리율은 슬롯당 성공적인 송신 패킷 평균값으로써 정의된다. 이는

$$T_p = \sum_{j=1}^K jS(j) \left[\sum_{m=0}^k f(m)\xi(j|m) \right]$$

여기서 $S(j)$ 는 j 상태에서 성공적인 패킷 전송의 확률로 표시한다. 이는

$$S(j) = \sum_{m=0}^e \binom{3N}{m} [P_b(j)]^m [1 - P_b(j)]^{3N-m}$$

e 는 길이가 $3N$ 블록에서의 에러 정정 용량이며, $P_b(j)$ 는 상태 j 에서의 터보코드화된 BER이다. 그리고 $\xi(j|m)$ 는 합성(새롭게 생성된 것과 재전송된 것) 패킷 도착 분포함수이다.

$$\xi(j|m) = \sum_{i=\max(j-m, 0)}^{\min(j, K-m)} B(i, K-m, p_n) \cdot B(j-i, m, p_r)$$

평균안정 상태 지연은 성공적으로 전송 패킷으로 요구되어진 시간 슬롯의 평균 값으로 정의되어진다. Little's Formula로부터, 평균지연은

$$D_{av} = \frac{B_g}{T_p} + 1$$

여기서 B_g 는 다음식으로부터 계산되어진 예상된 채널 적체량이다.

$$B_g = \sum_{j=0}^K j f(j)$$

IV. 모의 실험 결과

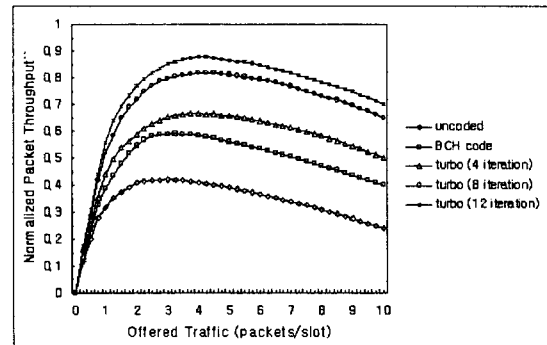


그림 4. 반복 횟수에 따른 패킷 처리량
Fig. 4. Packet throughputs for different numbers of iterations.

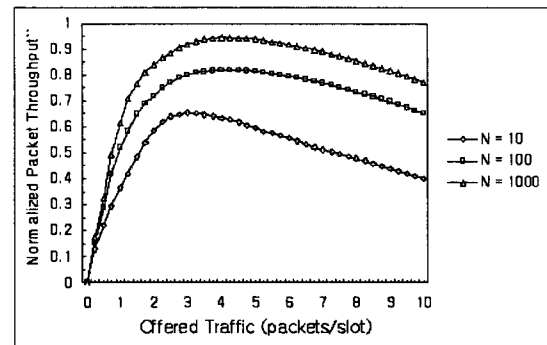


그림 5. 반복 크기에 따른 패킷 처리량
Fig. 5. Packet throughputs for different interleaver sizes.

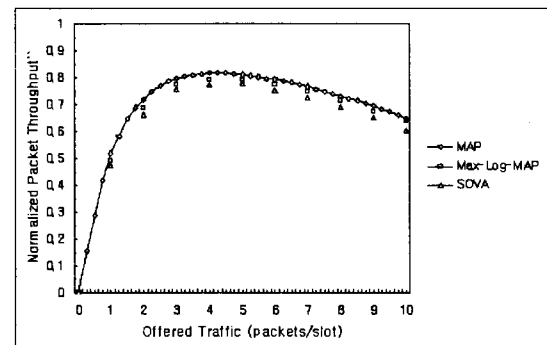


그림 6. 복호 알고리즘에 따른 패킷 처리량
Fig. 6. Packet throughputs for different decoding algorithms.

이번 장에서, 우리는 위에서 분석하고 기술되어진 터보 코드화된 광 CDMA의 성능을 설명한 몇몇 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 예에서, 확산코드 길이 $F=500$, 가중치 $w=5$, 그리고 노이즈 $K_b=40$ 의 평균 photocount로 가정하였다.

터보코드의 구성된 코드에서, 우리는 패리티 비트의 최소 가중치가 $z_{\min}=3$ 이고 기억 크기가 $v=2$ 인 코드 생성기의 다항식이 $(1+D^2, 1+D+D^2)$ 를 지닌 동일한 4-상태 순환 시스템 컨볼루션 코드를 고려하였다

이 생성기 코드가 파국적인 에러 전파를 가지지 않도록 그리고 주어진 코드율과 제한 거리를 위한 최대 자유 거리를 가지도록 하기 위해 다항식들은 선택되어진다. 전체적

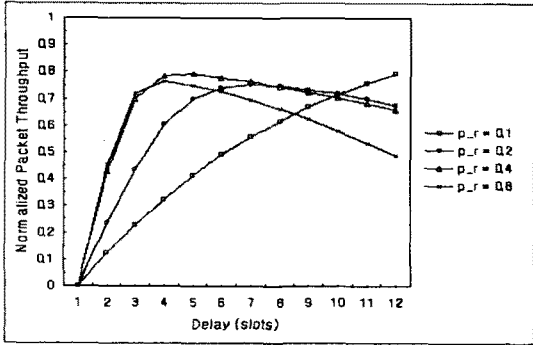


그림 7. 변화하는 패킷 재전송 확률에 따른 패킷 처리량 대 딜레이 특성

Fig. 7. Packet throughput versus delay characteristics with varying packet retransmission probability.

코드율을 각각 소스 데이터 비트가 3코드화된 심볼로 맵핑이 되는 1/3로써 선택했다. 터보 코드에서 1/3 코드율에 엔코더 출력에 3비트는 각 하나의 코드되지 않은 비트와 각 구성된 엔코더로부터의 2개의 패리티 비트 결합으로 해석할 수 있다.

VI. 결 론

BPPM과 터보코딩을 수반한 광 세기변조/직접-검출 CDMA 네트워크의 성능을 분석과 시뮬레이션을 했다. 첫 번째, 터보 코딩으로 비트 에러 확률을 고려하였고, 처리율 지연에 의한 네트워크 성능특징을 실험하였다. 시뮬레이션 결과로부터, 우리는 터보코딩은 적당한 엔코드/디코드 복잡도내에서 코드화 되지 않는 시스템과 비교하여 상당한 코딩 계인을 제공하는 것을 확인하였다. 이 성능은 점차적으로 증가하는 인터리버 길이와 고정된 코드율에서 반복의 수로 인하여 향상된다.

다양한 디코딩 알고리즘의 우리의 비교는 성능과 복잡도에 의하여 MaxLog-MAP 알고리즘은 완벽한 알고리즘이라는 것을 보여준다. 우리는 터보코딩은 패킷 처리율 증가, 주어진 BER 요구를 위한 광 CDMA의 유저의 수 증가에 매우 효과적인 것을 확인하였다. 채널코딩은 완벽하게 전자 도메인에서 이루어지고 외부적으로 광 CDMA 링크에 응용되는 것을 알게 되었다. 시뮬레이션 결과는 터보코딩은 좀더 낮은 BER을 얻을 수 있고, 패킷 처리율 성능은 코드화되지 않은 시스템 그리고 다른 채널 코딩과 비교되는 것을 가르킨다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2007-S-029-03, 가정용/기업용 WiBro 시스템 기술 개발.

[참고 문헌]

[1] A. Nosratinia, T. E. Hunter and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks", *IEEE Communication Magazine*, vol. 42, no. 10, Oct. 2004, pp. 74-80.

[2] J. A. Salehi, "Emerging optical code division multiple communication systems," *IEEE Network*, vol. 3, no. 2, pp. 31-39, 1989.

[3] P. Neusy and M. Kavehrad, "Proposal for an all-optical code division multiple access for local areanetworks," *IEEE lectronics Letters*, vol. 26, no. 18, pp. 1471-1473, Aug. 1990.

[4] J. A. Salehi, "Code division multiple-access techniques in optical fiber networks - Part I and Part II," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 8, pp. 824-842, Aug. 1989.

[5] D. J. G. Mestdagh, *Fundamentals of Multiaccess Optical Fiber Networks*, ArtechHouse, 1995.

[6] P. E. Green, *Fiber Optical Networks*, PrenticeHall, 1993.

[7] M. R. Dale and R. M. Gagliardi, "Channel coding for asynchronous fiberoptic CDMA communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 9, pp. 2485-2492, Sept. 1995.

[8] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding: turbo codes," in *Proc. of the IEEE ICC'93*, pp. 1064-1070, Geneva, Switzerland, June. 1993.

[9] G. D. Forney, *Concatenated Codes*, MIT Press, 1966.

[10] S. Benedetto and G. Montorsi, "Design of parallel concatenated convolutional codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, no. 5, pp. 591-600, May 1996.

[11] S. Benedetto and G. Montorsi, "Unveiling turbo codes: Some results on parallel concatenated coding schemes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 42, pp. 409-428, 1996.

[12] R. M. Gagliardi and S. Karp, *Optical Communications*, Wiley, 1976.

[13] L. R. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv, "Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rates," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 20, pp. 284-287, Mar. 1974.

[14] J. Hagenauer and P. Hoehner, "A Viterbi algorithm with soft decision outputs and its applications," in *Proc. of the IEEE GLOBECOM'89*, pp.1680-1686, Dallas, TX, U.S.A, Nov.1989.

[15] F. R. K. Chung, J. A. Salehi, and V. K. Wei, "Optical orthogonal codes: Design, analysis and applications," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 35, pp. 595-604, May 1989.

[16] D. L. Snyder, *Random Point Processes*, Wiley Science, 1975.

[17] J. Y. Kim and H. V. Poor, "Performance of an optical PPM/CDMA system with turbo coding," in *Proc. of the IEEE VTC '99*, pp. 958-962, Amsterdam, Netherlands, Sept. 1999.

[18] A. W. Lam and A. M. Hussain, "Performance analysis of direct-detection optical CDMA communication systems with avalanche photodiodes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, no. 4, pp.810-820, Apr. 1992.

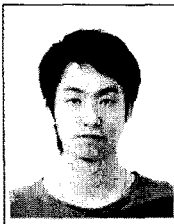
- [19] S. Tasaka, *Performance Analysis of Multiple Access Protocols*, MIT Press, 1986.
- [20] L. Kleinrock, *Queueing Systems, Volume I: Theory*, Wiley Interscience, 1975.
- [21] A. J. Viterbi and J. K. Omura, *Principles of Digital Communications and Coding*, McGraw-Hill, 1979.
- [22] D. H. Davis and S. A. Gronemeyer, "Performance of slotted ALOHA random access with delay capture and randomized time of arrival," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 28, no. 5, pp. 703-710, May 1980.
- [23] C. S. Hsu and V. O. K. Li, "Performance analysis of slotted fiber-optic CDMA packet network," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no.9, pp. 819-828, July 1995.
- [24] J. G. Proakis, *Digital Communications, 3rd Ed.*, McGraw-Hill, 1995.
- [25] S. S. Pietrobon, "Implementation and performance of a turbo/MAP decoder," *International Journal of Satellite Communications*, vol. 16, pp. 23-46, 1998.



김진영
 1998년 서울대 전자공학과 (공학박사)
 2000년 미국 Princeton University, Research Associate.
 2001년 SK텔레콤 네트워크 연구원 책임연구원
 2001년~현재 광운대학교 전자공학과 부교수
 2009년 현재 미국 M.I.T 공대 Visiting Scientist

<관심분야> 디지털 통신, 신호처리, 채널 부호화

<e-mail> jinyoung@kw.ac.kr



김윤현
 2006년 광운대학교 전자공학과 학사 졸업
 2008년 광운대학교 전자공학과 석사 졸업
 2008년~현재 광운대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 디지털통신, MIMO-OFDM, VLC,
 협력통신, 채널 모델링, 채널 부호화

<e-mail> ultrayh1873@kw.ac.kr



김승종
 2009년 청주대학교 정보통신공학과 졸업
 2009년~현재 광운대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 디지털통신, 인지라디오

<e-mail> sj_kim@kw.ac.kr



오영철
 2007년 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
 2007년 ~ 현재 KT 인프라연구소

<관심분야> Femtocell system

<e-mail> ycoh@kt.com



이성춘
 1982년 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1984년 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 2001년 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
 1985년~현재 KT 중앙연구소 무선기술담당 상무

<관심분야> WiBro, Femtocell, 이동성, 모바일 멀티캐스트

<e-mail> lsc@kt.com