

M-알고리즘을 이용한 컨벌루션 부호의 복호 성능 평가

정희원 천진영*, 최규호*, 성원진*

Performance Evaluation of the M-algorithm for Decoding Convolutional Codes

Jinyoung Chun*, Kyuho Choi*, Wonjin Sung* *Regular Members*

요약

컨벌루션 부호의 복호를 위한 M-알고리즘은 복호 트렐리스의 매 단계에서 미리 정해진 개수의 생존 경로를 유지하는 방법으로, 구현이 쉽고 고속 데이터의 실시간 처리에 적합하며 최적 복호인 비터비 알고리즘에 비해 복잡도를 크게 감소시킬 수 있다. 반면, 트렐리스 상에서 올바른 경로가 생존 경로에 포함되지 않는 경우 연속된 복호 오류를 생성하는 단점을 가진다. 본 논문에서는 복호 복잡도, 프레임 길이, 부호 구속장의 변화에 따른 M-알고리즘의 성능 분석 결과를 제시하고, 구속장을 확장한 부호와 M-알고리즘을 통한 복호를 결합하여 사용 시 얻을 수 있는 성능 이득을 정량화 하였다. 특히 제한된 프레임 길이를 갖는 전송 시스템에 적용되는 경우, 증가된 부호 자유 거리에 의한 성능 이득 효과가 올바른 경로 손실에 의한 성능 감소 효과에 비해 더 큼을 확인하였다. 길이 $L = 100$ 인 프레임의 오류율이 0.01%일 때, 64개의 생존 경로를 갖는 복호를 사용하여 얻어지는 신호 대 잡음비 이득은 구속장을 $K = 7$ 으로부터 $K = 9, 11, 15$ 로 증가시킴에 따라 각각 0.6, 0.75, 0.8dB가 된다.

ABSTRACT

The M-algorithm for decoding convolutional codes can significantly reduce the complexity of the Viterbi algorithm by tracking a fixed number of survivor paths in each level of the decoding trellis. It is an easily-implementable algorithm suited for real-time processing of high-speed data. The algorithm, however, generates a sequence of catastrophic errors when the correct path is not included in the set of survivor paths. In this paper, the performance of the M-algorithm obtained from using various decoding complexity levels, frame lengths, and code constraint lengths is presented. The performance gain is quantified when the algorithm is used in conjunction with codes of increased constraint length. In particular, it is demonstrated the gain from the increased code free distance overcompensates the loss from the correct path being excluded from the survivors, when the frame length is short to moderate. Using 64 survivor paths, the signal-to-noise ratio gain obtained by increasing the constraint length from $K = 7$ to $K = 9, 11, 15$ is respectively 0.6, 0.75, and 0.8dB, when the frame of length $L = 100$ has the frame error rate of 0.01%.

I. 서론

컨벌루션 부호 (convolutional code)는 이동통신 시스템을 비롯한 다양한 디지털 통신 시스템에서

단독으로, 블록 부호와 연속(concatenation)된 형태로, 또는 터보 부호의 구성 부호 (constituent code) 등으로 널리 사용되고 있고, 현재와 같은 광범위한 사용의 큰 이유 중 하나는 소프트웨어 또는 하드웨어적으로 쉽게 구현 가능한 최적 복호 방법인 비터

* 서강대학교 전자공학과 디지털전송연구실 (wsung@sogang.ac.kr)
논문번호 : 020053-0205, 접수일자 : 2002년 2월 5일

비(Viterbi) 알고리즘^[1]이 존재한다는 것이다. 비터비 알고리즘은 잘 알려진 바와 같이 트렐리스(trellis) 구조를 사용하여 복호열의 길이에 선형적으로 증가하는 복잡도를 가지고, 복호 시 buffer-overflow 문제가 없으며, 반복적인 연산으로 인해 효율적인 구현이 이루어지는 등의 장점이 있다. 반면 복잡도가 구속장 (constraint length)의 길이에 대해 지수 함수적으로 증가함으로 인해, 사용 가능한 구속장의 길이에는 현실적인 제한이 있게 된다. "NASA code" 라고도 불리는 구속장 $K = 7$ 부호는 70년대 후반 Voyager호 등의 space mission에 본격적으로 사용되기 시작하여, 셀룰러 시스템, 디지털 위성방송, 최근의 IEEE 802.16 무선 랜 표준에 이르기까지 널리 사용되고 있으며, IS-95 표준 등에는 $K = 9$ 부호가 쓰이고 있다. $K = 11$ 이상의 구속장은 제한적인 경우에 대해서만 사용되고 있다.

비터비 알고리즘의 성능 분석 연구 및 응용과 더불어 비최적(suboptimal) 복호 방법에 대한 연구도 꾸준히 진행되어 왔다^{[2]-[9]}. 비최적 복호 연구의 목적은 비터비 알고리즘에 비해 복잡도를 감소시킴으로써 계산량을 줄이는 것과, 유사한 복잡도를 유지하면서 성능 이득을 얻는 두 가지 방향으로 요약할 수 있다. 비최적 복호는 복호 트렐리스의 일부분을 탐색하는 방법으로서, sequential decoding, Fano 알고리즘과 같은 depth-first 알고리즘과 list decoding, M-알고리즘과 같은 breadth-first 알고리즘^{[2]-[4]} 등이 있다. 이 중 본 논문에서 다루는 M-알고리즘은 복호 트렐리스의 각 단계(level)에서 고정된 수인 M개의 생존 경로 (survivor path)만을 유지하는 복호 방법으로서, 구체적 복호 절차는 Anderson의 논문^[2]에 정의되고 II장에서 설명되는 바와 같다. M-알고리즘의 특징은 비터비 알고리즘과 마찬가지로 채널 조건의 영향을 받지 않는 고정된 계산량을 필요로 한다는 것이며, 이는 복호기의 효율적 구현에 있어 큰 장점이 된다. 또한 구속장의 길이에 무관한 복잡도를 복호기 설계 시 설정함으로써 고속 데이터의 실시간 처리를 가능하게 할 수 있다. M-알고리즘의 이러한 장점을 살린 VLSI 구현 예가 보고되었고^{[5][6]}, 복호뿐 아니라 채널 등화 (channel equalization)에 적용한 연구도 수행되었다^{[7][8]}.

반면 M-알고리즘의 가장 큰 단점은 트렐리스의 제한된 탐색으로 인해 올바른 경로 (correct path)가 손실될 수 있다는 것이고, 일단 손실된 경로는 다시 복원되기 전까지 연속적인 오류 (catastrophic error)를 생성하게 된다. 이는 BER (Bit Error Rate) 값

을 증가시키는 주요 원인으로 작용하게되며, 따라서 경로 손실 확률 (path loss probability)은 복호 성능 분석에 있어 중요한 지표가 된다. 경로 손실 확률의 정확한 값은 알려져 있지 않다^[9]. 특히 트렐리스에서 총 상태(state)의 개수 ($=2^{K-1}$)에 비해 M이 상대적으로 작은 값일 때는 경로 손실이 더 빈번히 일어나고, 이는 복잡도를 크게 감소시키는 방편으로 M-알고리즘이 사용되는 것을 어렵게 하는 요인으로 작용하였다.

본 연구는 경로 손실이 BER을 크게 증가시키는 원인이 되나 L개의 정보 비트 열로 구성된 단위 프레임의 오류 즉 FER (Frame Error Rate) 측면에서는 그 영향이 상대적으로 크지 않음에 착안하였다. 비터비 알고리즘에서 일어나는 오류사건 (error event)과 M-알고리즘에서의 경로 손실 및 오류사건 모두 FER의 측면에서는 동일한 프레임 오류이고, 따라서 구속장이 큰 부호와 M-알고리즘이 결합되어 사용된 부호 시 FER 성능 이득이 있을 것을 예측하고 이를 모의 실험을 통해 실증하였다. 패킷 방식의 고속 데이터 통신 시스템의 중요도가 높아짐에 따라 수신 성능의 중요한 지표가 패킷별 또는 프레임별 오류임을 감안하면, 이와 같은 실험 결과는 M-알고리즘의 효과적 활용 가능성을 제시한다고 할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 M-알고리즘의 복호 절차를 설명하고 비터비 알고리즘과의 복잡도 비교를 하였다. III장에서는 M-알고리즘 성능 실험 결과를 K, M, L의 변화에 따라 나타내고, 유사한 복잡도를 갖는 비터비 알고리즘과의 성능 비교를 수행하였으며, 정량화된 이득을 표로 제시하였다. 또한 K의 변화에 따른 M-알고리즘의 경로 손실 확률을 평가하고 이를 BER 및 FER 성능 추정에 활용하였다. 논문의 결론을 IV장에서 요약하였다.

II. M-알고리즘

1. 복호 절차

비터비 알고리즘에서는 복호 트렐리스의 각 단계에서 2^{K-1} 개의 모든 상태에 대해 ACS (Add-Compare-Select) 연산을 수행하고 그 과정을 프레임의 길이 (또는 정보 비트의 개수)인 L 번 반복한 뒤, trace-back 과정을 거쳐 복호 비트 열을 생성한다. M-알고리즘의 경우 비터비 알고리즘과 매우 유사한 복호 절차를 가지나, 트렐리스의 매 단계에서

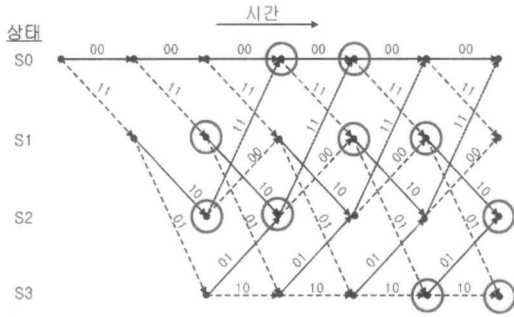


그림 1. M-알고리즘의 복호 트렐리스 예

$M (\leq 2^{K-1})$ 개 생존 경로 (survivor path)만을 유지하는 점이 다르다. 부호율이 $R = 1/n$ 인 컨벌루션 부호의 복호 트렐리스에서, 단계 t 에 M 개의 생존 경로가 있다고 가정하여 보자. M 개의 생존 경로에서 연결되는 가지(branch)들은 단계 $t+1$ 에서 새로운 $2M$ 개의 경로로 확장된다. $2M$ 개의 경로가 가지는 메트릭(metric)을 계산하여 그 중 M 개의 최소 메트릭을 가지는 경로를 정렬(sorting)에 의하여 가려낸 후, 나머지 경로들은 제거한다. 일반적으로 M 은 2의 멱에 해당하는 값이 선택되며, 트렐리스의 시작점에서 M 개 이하의 경로가 생길 때까지는 계속 경로를 확장한 뒤, 그 이후부터는 다음과 같은 과정이 수행된다.

- 1) M 개의 경로 각각에 대해 정보 비트 0 또는 1에 해당하는 2개의 가지 메트릭을 계산한 뒤, 확장된 $2M$ 개의 경로 메트릭 목록을 저장한다.
- 2) 목록에서 메트릭 값이 작은 M 개 경로를 선택하고 나머지 M 개의 경로는 제거한다.
- 3) 위 1,2번 과정을 트렐리스의 마지막 단계까지 반복한 뒤, 최소의 메트릭을 갖는 경로를 선택하고 trace-back으로 복호 비트 열을 생성한다.

그림 1은 부호율 $R = 1/2$, 구속장 $K = 3$ 부호의 복호 트렐리스에서 $M = 2$ 인 경우에 M 개의 경로를 선택하는 간단한 예를 나타낸 것이다. 시간 축을 따라 다음 단계로 진행하면서 생성되는 4개의 경로에서 최선의 2개만을 선택하는 과정을 반복하게 된다. 그림에서 원으로 표시된 상태는 생존 경로가 존재하는 상태이다.

2. 비터비 알고리즘과의 비교

언급된 바와 같이 구속장의 길이에 지수 함수적으로 증가하는 비터비 알고리즘의 복잡도와 달리, M -알고리즘은 생존 경로의 개수 M 의 선택에 따라

결정되는 복잡도를 가진다. 비터비 알고리즘은 트렐리스의 한 단계에서 다음 단계로 진행될 때 $2 \cdot 2^{K-1}$ 개의 경로 메트릭 계산, 2^{K-1} 번의 이진(binary) 비교와 선택이 필요하다. 반면 M -알고리즘은 $2M$ 개의 경로 메트릭 계산과 그 중 M 개 경로의 선택이 필요하다. 필요한 메모리의 경우, N 단계에 해당하는 생존 경로를 저장하기 위해 (프레임 전체를 저장하는 경우 $N = L$, truncation하는 경우 $N \approx 5K$) 요구되는 양은 비터비 알고리즘은 $N \cdot 2^{K-1}$, M -알고리즘은 $N \cdot M$ 비트이다. 연산 복잡도와 저장량을 결정하는 중요한 요소는 생존 경로의 개수이며, III장에서의 성능 비교에서도 생존 경로의 개수가 동일한 비터비 알고리즘과 M -알고리즘을 비교하는 방식을 취하였다.

부호의 구속장을 증가시키면서 M 의 값을 변화시키지 않는 경우, 부호의 복잡도와 저장량은 동일하게 유지하면서 증가된 자유거리 (free distance) 측면에서의 성능 향상이 일어나게 된다. 반면 전체 상태 개수 2^{K-1} 에 비해 M 의 값이 상대적으로 매우 작을 경우 경로 손실이 일어날 가능성이 높아지고 이는 역으로 성능 열화의 요인이 될 수 있다. M -알고리즘의 성능 평가 결과를 다음 장에서 논의한다.

III. 성능 실험 및 분석

1. M-알고리즘의 성능 평가

성능 평가를 위해 사용된 부호는 부호율 $R = 1/2$ 이고 구속장 $K = 7, 9, 11, 15$ 인 컨벌루션 부호이다. 생성 다항식 (generator polynomial)은 주어진 구속장 길이에서 최대 자유거리를 갖도록 선택되었고^[10], 프레임 길이는 $L = 200, 100, 50, 25$ 의 변화하는 값을 사용하였다. 실험 환경은 BPSK 변조와 AWGN 채널을 사용하였다. 그림 2는 길이 $L = 100$ 인 정보 비트 열이 $K = 9$ 부호로 부호화 되고 채널을 통과한 뒤, M -알고리즘을 이용한 복호로 얻어지는 BER을 도시한 것이다. BER 성능을 생존 경로의 개수인 M 의 변화에 대해 나타내었으며, $M = 256$ 의 경우가 비터비 알고리즘의 성능에 해당되고 M 값을 절반씩 감소시킴에 따라 성능 열화 정도가 증가함은 쉽게 예상할 수 있는 바와 같다. M 이 전체 상태 개수의 $1/2, 1/4, 1/8$ 일 때 최적 성능으로부터의 차이는 10^{-4} BER을 기준으로 약 0.1, 0.3, 0.7 dB이다. 그림 3은 같은 실험을 수행하여 FER 성능을 나타낸 것으로써, M 값을 감소시킴에

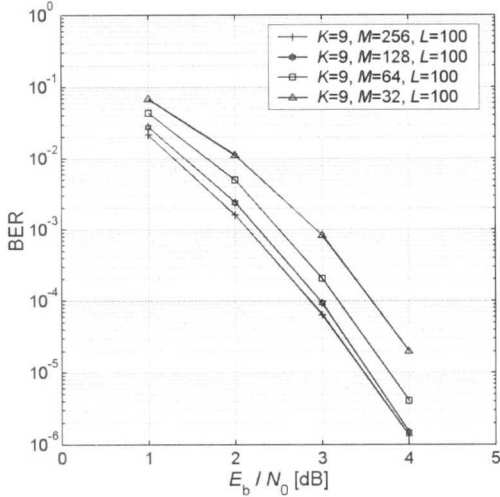


그림 2. M-알고리즘의 복잡도 변화에 따른 K = 9 부호의 BER

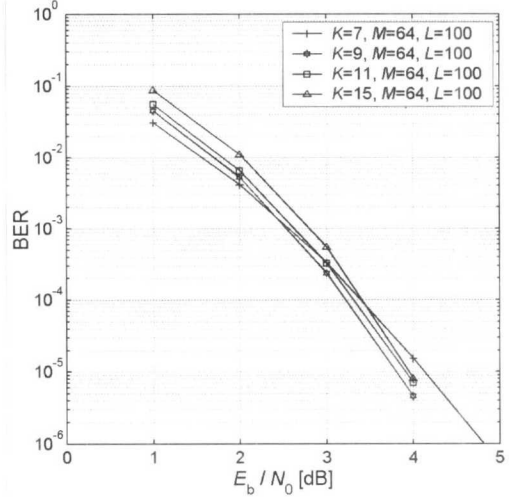


그림 4. 동일한 복잡도를 갖는 M-알고리즘을 이용한 K = 7, 9, 11, 15 부호의 BER

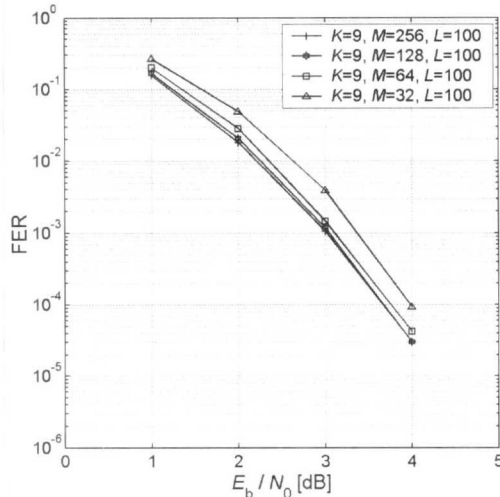


그림 3. M-알고리즘의 복잡도 변화에 따른 K = 9 부호의 FER

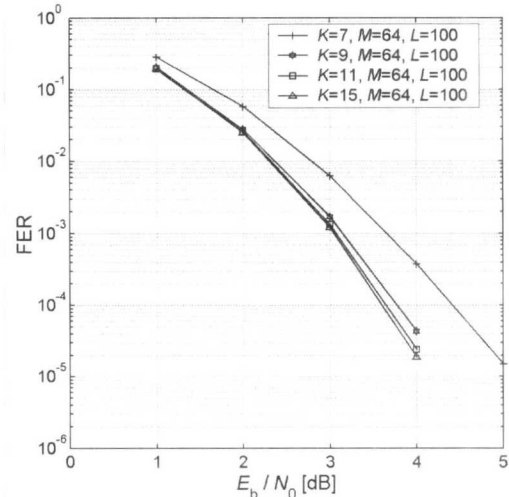


그림 5. 동일한 복잡도를 갖는 M-알고리즘을 이용한 K = 7, 9, 11, 15 부호의 FER

따라 발생하는 최적 성능으로부터의 차이는 BER의 경우에 비해 작으며, 특히 $M = 128, 64$ 의 경우 10^{-4} FER에서 그 차이는 0.1dB 이하이다. 이는 언급된 바와 같이, M-알고리즘에서 M값을 감소시키에 따라 발생하는 경로 손실이 FER 성능에 미치는 영향은 BER 성능에 미치는 영향에 비해 상대적으로 작다고 분석할 수 있다.

그림 4에서는 M값을 고정함으로써 동일한 복잡도를 갖는 복호기를 구축장의 길이가 다른 부호에 대해 적용하는 경우 얻어지는 BER 성능을 보여준

다. $K = 7, M = 64$ 의 경우는 비터비 복호 성능에 해당된다. $K = 9, M = 64$ 의 경우는 총 상태 개수의 1/4에 해당하는 생존 경로를 유지하는 것으로써, $K = 7, M = 64$ 성능과 비교하여 SNR이 2.4dB 이상일 때 BER 성능 이득이 있음을 알 수 있다. 이는 구축장이 더 큰 부호를 M-알고리즘을 통해 복호함으로써, 비터비 알고리즘과 유사한 복잡도를 유지 하면서 성능 이득을 얻을 수 있음을 의미한다. 또한 부호 자유 거리 증가에 의한 성능 이득 정도가 경로 손실에 의한 성능 열화 정도에 비해 더 크다고 해석할

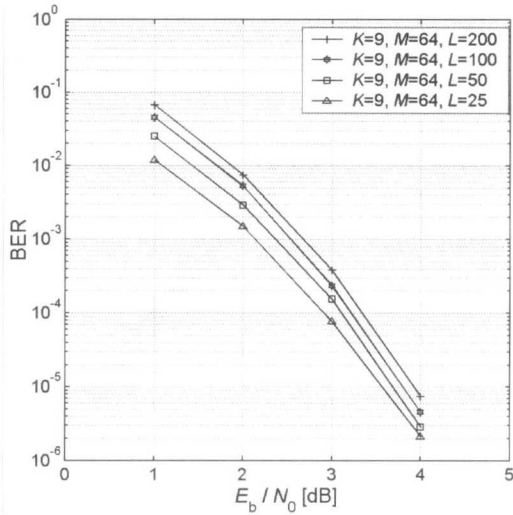


그림 6. 프레임 길이 변화에 따른 $K = 9$ 부호의 BER

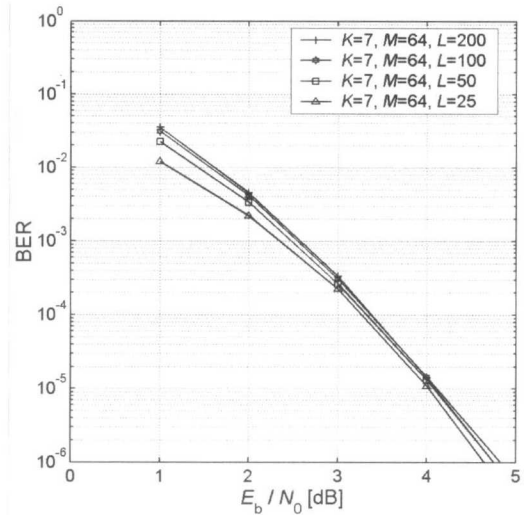


그림 8. 프레임 길이 변화에 따른 $K = 7$ 부호의 BER

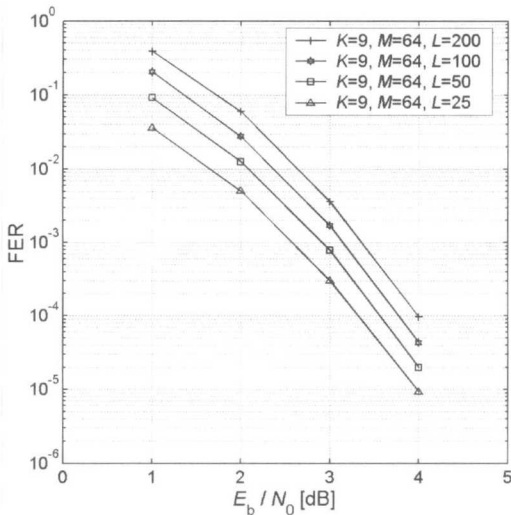


그림 7. 프레임 길이 변화에 따른 $K = 9$ 부호의 FER

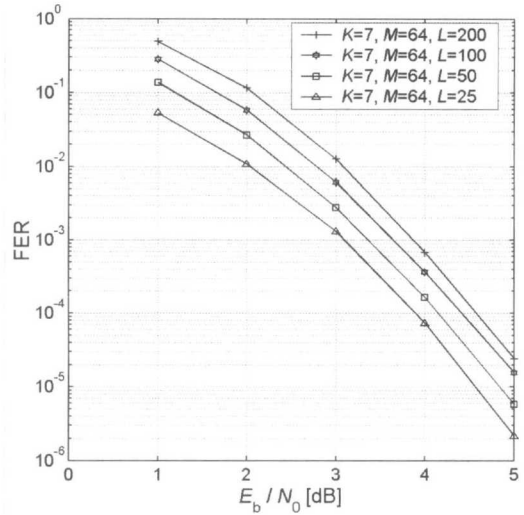


그림 9. 프레임 길이 변화에 따른 $K = 7$ 부호의 FER

수 있다. 2.4dB 이하의 SNR 구간에서는 그 반대의 경우로써 성능 이득이 존재하지 않는다. 또한 성능 이득 여부는 프레임 길이에 의해 좌우되며, 프레임 길이가 매우 길어지는 경우 M -알고리즘은 경로 손실에 의한 큰 BER 값을 갖게되고 따라서 성능 이득은 발생하지 않게 된다. 그림 4에서 구속장의 길이가 $K = 11, 15$ 로 증가함에 따라 $K = 9$ 의 경우에 비해 실험 구간에서의 BER 성능이 열화됨을 볼 수 있다. 이는 총 상태 개수 대비 생존 경로 수가 감소함으로 인한 경로 손실에 의한 BER 증가 결과이다. SNR의 값이 충분히 커질 경우, 구속장이 큰

부호의 경로 손실 확률은 감소되면서 자유 거리 증가에 이한 이득이 나타나 BER 성능 이득이 생길 것으로 예측된다.

경로 손실이 FER에 미치는 영향은 BER에 미치는 영향에 비해 작으며, 그림 5에서 보여지는 바와 같이 M 값이 고정된 상태에서 구속장이 증가된 부호를 사용하는 경우 FER 이득이 모든 실험 SNR 구간에서 발생함을 알 수 있다. 구속장이 커질수록 이득이 증가하며, 10^{-4} FER에서 $K = 7$ 부호 대비 $K = 9, 11, 15$ 부호의 성능 이득은 각각 0.6, 0.75, 0.8 dB 이다. 이는 매우 중요한 결과로서, 일반적으로

로 널리 사용되는 $K = 7$ 부호의 비터비 복호와 비교하여 유사한 복잡도의 M-알고리즘이 FER 성능 향상을 가져올 수 있음을 의미한다. 단 구속장이 증가함에 따라 tail bit 수의 증가로 작은 크기의 전송량 손실이 있게 된다.

그림 6에서는 $K = 9, M = 64$ 의 BER 성능을 프레임 길이 L 의 변화에 대해 도시하였다. 프레임 길이가 감소할수록 경로 손실 시 발생하는 비트 오류 수가 감소하므로 BER의 향상을 가져온다. 그림 7은 같은 실험에서 얻어진 FER 값이며, 프레임 길이의 감소는 경로 손실 확률 및 오류 사건 발생 확률을 줄임으로써 FER이 향상된다. 비교를 위하여 그림 8과 9에서 $K = 7, M = 64$ 의 BER과 FER을 나타내었다. 이 경우 경로 손실이 없으므로 BER은 프레임 길이에 크게 영향을 받지 않으나, L 이 감소함에 따라 작은 크기의 BER 감소를 보인다. 이는 비터비 복호 트렐리스의 시작 및 끝 경계 부분에서의 BER이 중간 부분에서의 BER에 비해 작으며 (참고문헌 [11]의 그림 7 참조), L 값의 감소로 트렐리스 중간 부분의 길이가 상대적으로 줄기 때문이다. 그림 9에서 L 이 감소함에 따라 FER이 향상되는 것은 프레임 내의 오류 사건 발생 확률의 감소로 인해서이다.

표 1. 1.0×10^{-5} BER에서 M-알고리즘의 성능 이득

| | $K = 7$ | $K = 9$ | Gain |
|-----------|---------|---------|--------|
| $L = 200$ | 4.13dB | 3.91dB | 0.22dB |
| $L = 100$ | 4.09dB | 3.80dB | 0.29dB |
| $L = 50$ | 4.04dB | 3.68dB | 0.36dB |
| $L = 25$ | 4.02dB | 3.56dB | 0.46dB |

표 2. 1.0×10^{-4} FER에서 M-알고리즘의 성능 이득

| | $K = 7$ | $K = 9$ | Gain |
|-----------|---------|---------|--------|
| $L = 200$ | 4.56dB | 3.98dB | 0.58dB |
| $L = 100$ | 4.41dB | 3.76dB | 0.65dB |
| $L = 50$ | 4.10dB | 3.56dB | 0.54dB |
| $L = 25$ | 3.88dB | 3.31dB | 0.57dB |

표 1은 그림 6과 8에서 나타내어진 BER을 10^{-5} 값에서 비교한 것이다. $K = 7$ 부호의 비터비 복호에 비해 $K = 9$ 부호의 M-알고리즘 복호 ($M = 64$)가 얻는 성능 이득을 L 의 변화에 따라 나타내었고, 프레임 길이가 감소함에 따라 이득이 증가함을 보

여준다. 표 2는 그림 7과 9에서 나타내어진 FER을 10^{-4} 값에서 비교한 것으로써, 약 0.6 dB 내외의 이득을 보여준다.

2. 경로 손실 확률을 이용한 성능 분석

경로 손실 확률은 올바른 경로가 트렐리스의 단계 t 에서 M 개의 생존 경로에 포함되지 않을 확률을 의미한다. 각 단계에서 경로 손실이 일어날 가능성이 있으므로, 경로 손실 확률은 t 가 증가함에 따라 커지게 된다. 그림 10은 프레임 길이 $L = 200$, 생존 경로 수 $M = 64$, SNR = 3dB일 때 $K = 9, 11, 15$ 부호의 경로 손실 확률을 실험적으로 구한 결과이다. 구속장이 커질수록 총 상태 수에서 차지하는 M 값의 비율이 작아짐으로 인해 경로 손실 확률이 증가함을 볼 수 있다.

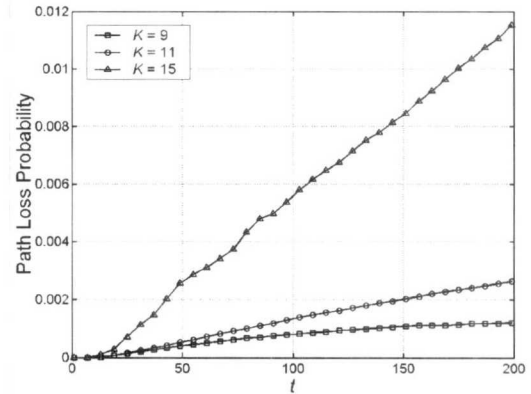


그림 10. M-알고리즘의 경로 손실 확률 ($M = 64$)

M-알고리즘에서 발생하는 비트 오류는 경로 손실로 인한 경우와 오류 사건으로 인한 경우의 두 가지로 분류할 수 있으며, 이 중 오류 사건으로 인한 BER은 비터비 알고리즘에서의 BER과 동일하다. 경로 손실로 인한 BER의 경우, 경로 손실이 일어난 단계 이후의 프레임 위치에서는 약 50%의 확률로 연속적인 복호 비트 오류가 발생하게 된다. $P_{b, vit}$ 를 오류 사건으로 인한 BER, $P_{b, loss}$ 를 경로 손실로 인한 BER로 나타낼 때, M-알고리즘의 BER $P_{b, M}$ 은

$$P_{b, M} = P_{b, vit} + P_{b, loss} \quad (1)$$

가 되고, $P_{loss}(t)$ 를 단계 t 에서의 경로 손실 확률로, $P_{b, loss}(t)$ 를 경로 손실에 의한 프레임 내의 t 번째 비트의 BER로 정의할 때 $P_{b, loss}$ 는 다음과 같은 식

으로 나타낼 수 있다.

$$P_{b,loss} = \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L P_{b,loss}(t) \approx \frac{1}{2L} \sum_{t=1}^L P_{loss}(t) \quad (2)$$

식 (2)에서 $P_{b,loss}(t) \approx (1/2)P_{loss}(t)$ 는 경로 손실이 일어난 위치의 비트는 약 50% BER 값을 갖음을 의미한다. 그림 10의 $P_{loss}(t)$ 값과 식 (2)를 이용하여 $P_{b,loss}$ 를 계산하고, 비터비 알고리즘의 실험 BER $P_{b,vit}$ 와 수식 (1)을 이용하여 $P'_{b,M}$ 을 계산한 결과를 $K = 7, 9, 11$ 부호에 대해 표 3에 나타내었다. 사용된 프레임 길이는 $L = 100$, 생존 경로 수는 $M = 64$, 채널 SNR = 3 dB이고, 표에서 $P_{b,M}$ 은 실험을 통해 얻은 M -알고리즘의 실제 BER이다. $K = 7$ 부호는 총 상태 수와 M 의 값이 같으므로 경로 손실이 없는 경우이다. $K = 11$ 부호의 경우 계산값과 실제값이 유사함을 확인할 수 있다. $K = 9$ 부호의 경우 계산값에 비교하여 실제값이 작으며, 이는 손실된 경로가 우연히 복원 (accidental path recovery)되는 확률을 계산값에서 고려하지 않았기 때문으로 생각할 수 있다. 생존 경로 수 $M = 64$ 와 총 상태 수의 비는 $K = 9$ 의 경우 1/4, $K = 11$ 의 경우 1/16이므로, 손실 경로의 우연한 복원은 $K = 9$ 부호에서 상대적으로 자주 발생하게 된다.

표 3. 실험 결과와 계산을 이용한 M -알고리즘 BER ($M = 64, L = 100, SNR = 3dB$)

| | $K = 7$ | $K = 9$ | $K = 11$ |
|--------------|---------|---------|----------|
| $P_{b,vit}$ | 3.30e-4 | 6.39e-5 | 1.58e-5 |
| $P_{b,loss}$ | 0 | 2.42e-4 | 2.97e-4 |
| $P'_{b,M}$ | 3.30e-4 | 3.06e-4 | 3.13e-4 |
| $P_{b,M}$ | 3.30e-4 | 2.35e-4 | 3.25e-4 |

M -알고리즘의 FER의 경우도 오류 사건에 의한 프레임 오류 $P_{F,vit}$ 와 경로 손실에 의한 프레임 오류 성분 $P_{F,loss}$ 의 합으로 표현하면 다음과 같다.

$$P'_{F,M} = P_{F,vit} + P_{F,loss} \quad (3)$$

여기서 $P_{F,vit}$ 는 비터비 알고리즘을 통해 얻은 FER과 동일하고, $P_{F,loss}$ 는 그림 10에서 $t = L$ 일 때의 값, 즉 $P_{F,loss} = P_{loss}(L)$ 을 사용한다. 식 (3)으로 얻은 값과 실제 모의 실험을 통해 얻은 FER

표 4. 실험 결과와 계산을 이용한 M -알고리즘 FER ($M = 64, L = 100, SNR = 3dB$)

| | $K = 7$ | $K = 9$ | $K = 11$ |
|--------------|---------|---------|----------|
| $P_{F,vit}$ | 6.20e-3 | 1.06e-3 | 2.32e-4 |
| $P_{F,loss}$ | 0 | 7.89e-4 | 1.31e-3 |
| $P'_{F,M}$ | 6.20e-3 | 1.85e-3 | 1.54e-3 |
| $P_{F,M}$ | 6.20e-3 | 1.70e-3 | 1.32e-3 |

$P_{F,M}$ 을 비교하여 표 4에 나타내었다. $K = 9$ 의 경우 경로 손실에 비해 오류 사건이, 반면 자유 거리가 상대적으로 큰 $K = 11$ 의 경우 오류 사건에 비해 경로 손실이 FER의 더 큰 영향을 미침을 알 수 있고, 전체 FER 성능은 두 성분 중 더 큰 영향을 미치는 성분에 의해 좌우되게 된다.

IV. 결론

본 논문에서는 M -알고리즘의 성능을 부호 구속장 K , 복잡도 M , 프레임 길이 L 의 변화에 따라 정량적으로 분석하였다. 이동 무선 통신 등 제한된 프레임 길이를 갖는 시스템에 적용되었을 경우, 증가된 구속장의 길이를 갖는 부호와 결합된 M -알고리즘은 유사한 복잡도의 비터비 복호에 비해 성능 이득을 발생시킴을 실험 결과를 통해 보였으며, $K = 9, M = 64$ 복호의 경우 $K = 7$ 의 비터비 복호와 비교하여 10^{-5} BER 값에서 0.22 ~ 0.46 dB, 10^{-4} FER 값에서 0.54 ~ 0.65 dB의 SNR 이득이 있음을 $L = 200, 100, 50, 25$ 의 값에 대해 확인하였다. 또한 M -알고리즘의 중요한 성능 지표인 경로 손실 확률을 구하고 이를 이용한 오류 추정 및 분석을 수행하였다.

참고 문헌

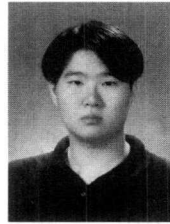
- [1] G. D. Forney, "The Viterbi algorithm," *Proc. IEEE*, vol. 61, pp. 268-278, Mar. 1973.
- [2] J. B. Anderson, "Limited search trellis decoding of convolutional codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 35, no. 5, pp. 944-955, Sep. 1989.
- [3] J. B. Anderson and S. Mohan, "Sequential coding algorithm : A survey and cost analysis," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 32, no. 2, pp.

169-176, Feb. 1984.

- [4] G. J. Pottie and D. P. Taylor, "A comparison of reduced complexity decoding algorithms for trellis codes," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 7, no. 9, pp. 1369- 1380, Dec. 1989.
- [5] L. Gonzalez and E. Boutillon, "Simplified path metric updating in the *M* algorithm for VLSI implementation," in *Proc. ICASSP 2000*, Istanbul, Turkey, June 2000, vol. 6, pp. 3378-3381.
- [6] P. A. Bengough and S. J. Simmons, "Sorting-based VLSI architectures for the *M*-algorithm and T-algorithm trellis decoders," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 514-522, Feb./Mar./Apr. 1995.
- [7] A. Baier and G. Heinrich, "Performance of *M*-algorithm MLSE equalizers in frequency-selective fading mobile radio channels," in *Proc. GLOBECOM '95*, Seattle, WA, June 1995, vol. 3, pp. 1818-1822.
- [8] H. Dou, X. Fan and G. Bi, "A Reduced complexity adaptive soft-output *M*-algorithm for turbo-equalization," in *Proc. VTC 2001 Fall*, Oct. 2001, vol. 2, pp. 1039-1042.
- [9] R. Johannesson and K. S. Zigangirov, "Upper bounds on the probability of the correct path loss for decoding of fixed convolutional codes," in *Proc. Int. Symp. Inform. Theory*, Whistler, BC, Canada, Sept. 1995, pp. 163.
- [10] S. Lin and D. J. Costello, *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983.
- [11] Y.-P. E. Wang and R. Ramesh, "To bite or not to bite - A study of tail bits versus tail-biting," in *Proc. PIMRC '96*, Taipei, Taiwan, Oct. 1996, vol. 2, pp. 317-321.

최 규 호(Kyuho Choi)

정회원



2001년 2월 : 서강대학교 전자공학과 학사
2001년 3월~현재 : 서강대학교 전자공학과 석사과정

<주관심 분야> 오류정정, 무선통신, OFDM

성 원 진(Wonjin Sung)

정회원



1990년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사
1992년 5월 : University of Michigan 전기공학과 석사
1995년 12월 : University of Michigan 전기공학과 박사
1996년 1월~2000년 8월 : Hughes Network Systems사 책임연구원

2000년 9월~현재 : 서강대학교 전자공학과 조교수

<주관심 분야> 디지털통신 이론 및 응용

천 진 영(Jinyoung Chun)

정회원



2001년 2월 : 서강대학교 전자공학과 학사
2001년 3월~현재 : 서강대학교 전자공학과 석사과정

<주관심 분야> 오류정정, modem 신호처리