

LT 부호 부호화를 위한 결정론적 차수 분포의 성능에 관한 연구

홍석범, 신범규, 박호성, 노종선

서울대학교 뉴미디어통신공동연구소

{fousbyus, thechi, lovepark98}@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr

A Study on Performance of Deterministic Degree Distribution for LT Codes Encoding

Seokbeom Hong, Beomkyu Shin, Hosung Park, Jong-Seon No

INMC, Seoul National Univ.

요 약

LT 부호에서 주로 사용되는 차수 분포인 Robust Soliton 분포는 프레임 오류 확률 측면에서는 좋은 성능을 가지지만 비트 오류 확률 측면에서는 성능에 약점을 가지고 있다. 본 논문에서는 비트 오류 확률 측면에서 성능을 크게 개선시킬 수 있는 결정론적 기법을 적용한 새로운 차수 분포를 제안하였다. 또한 본 논문에서 제안한 차수 분포는 채널 환경이 우수한 경우에는 프레임 오류 확률 측면에서도 Robust Soliton 분포에 비해 우수한 성능을 나타낸다.

I. 서 론

기존의 통신시스템에서는 전송 시에 발생하는 오류 및 데이터의 소실을 복원하기 위해 주로 오류정정부호를 적용하거나, 전송이 실패한 패킷에 대해서만 재전송을 요청하는 방법(ARQ)을 이용해 왔다. 그러나 인터넷 환경에서 동시에 다수의 사용자에게 정보를 전송할 시에는 이러한 기법들로 효율적이고 안정적인 전송을 달성하는 것은 쉽지 않다. 고정된 부호율(rate)을 사용하는 기존의 오류정정부호를 적용하는 경우, 채널 환경이 변화하는 상황에서 이상적인 부호율을 찾는 것은 매우 어려운 일이다. 만약 너무 낮은 부호율을 사용할 경우 전송의 효율성이 떨어지고, 반대로 너무 높은 부호율을 사용할 경우에는 전송이 실패할 확률이 높아지게 된다. 또한 ARQ 기법을 사용하는 경우에도, 수많은 사용자가 서로 다른 패킷에 대하여 재전송 요청을 보내기 때문에 이를 처리하기 위해 송신단과 네트워크에 걸리는 부하가 급증하게 된다.

이에 따라 대안으로 제시된 것이 파운틴 부호(fountain code)이다.[1] 파운틴 부호는 부호율이 결정되어 있지 않으므로 무부호율(rateless) 부호라고도 불린다. 파운틴 부호에서는 송신단에서 소스 데이터 패킷을 부호화하고 부호화된 패킷을 전송하는 과정이 잠재적으로 무한히 이루어진다. 이러한 과정은 전송이 완료되었다는 피드백을 받거나 미리 지정된 최대 전송 횟수에 도달할 때까지 계속 진행된다. 파운틴 부호는 소실 채널에 적합하게 설계된 부호로서, 패킷 소실 채널로 모델링되는 인터넷 환경에서 다수의 사용자에게 정보를 전송할 시에 적용하기에 매우 적합하다.

널리 사용되는 파운틴 부호는 LT 부호[2]와 Raptor 부호[3]가 있다. LT 부호의 부호화는 주어진 차수 분포에 따라 선택된 소스 데이터 패킷

에 XOR 연산을 수행하여 이루어지며, 메시지 전달(message passing) 기법을 이용하여 복호화가 이루어진다. Raptor 부호는 높은 부호율을 갖는 외부 연결 부호와 LT 부호를 연결하여 생성되는 부호다.

LT 부호에서 주로 사용되는 차수 분포는 M. Luby가 제안한 Ideal Soliton(IS) 분포와 Robust Soliton(RS) 분포이다.[2] 그런데 이 분포를 사용하여 패킷 소실 채널에서 정보를 전송하는 경우, 충분한 수의 낮은 차수 패킷이 확보되지 않아 프레임 오류 확률(FER)이 비교적 낮은 경우에도 비트 오류 확률(BER) 측면에서는 상대적으로 성능이 좋지 않다.

이에 따라 본 논문에서는 확률 분포에 의해서만 결정이 되던 기존의 차수 분포에 결정론적(deterministic) 기법을 결합하여, 간단하면서도 BER을 크게 낮출 수 있는 새로운 차수 분포를 제안하였다.

II. LT 부호

LT 부호는 최초로 개발된 파운틴 부호로, 부호화 및 복호화가 간단하면서도 패킷 소실 채널에서 우수한 성능을 갖는다. LT 부호의 성능에는 어떤 차수 분포를 사용하는지가 큰 영향을 미친다.

1. 부호화 및 복호화

LT 부호의 부호화 및 전송은 패킷 단위로 이루어지며, 복호화는 k 개의 패킷으로 구성되는 프레임 단위로 이루어진다. LT 부호의 부호화 과정은, 매 전송 시 먼저 주어진 차수 분포 $\rho(d)$ 에 따라 각 패킷의 차수 d 를 결정한다. 그리고 d 개만큼 무작위로 선택된 소스 데이터 패킷에 XOR 연산을 수행하여 전송할 패킷을 생성하게 된다.

LT 부호의 복호화는 일반적으로 메시지 전달 기법을 이용하여 이루어

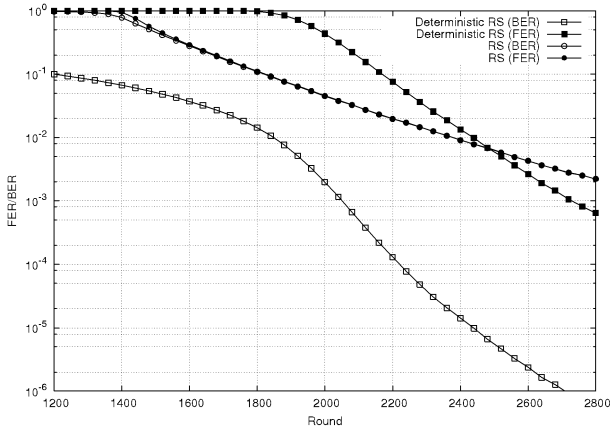


그림 1. 채널 소실 확률 $\epsilon = 0.1$ 인 경우의 성능

진다. 먼저 차수가 1인 패킷을 찾아서 복호를 수행한 뒤, 복호된 소스 데이터 패킷이 XOR 합에 포함되어 있는 패킷들에서 소스 데이터의 값을 빼준다. 이와 같은 과정을 모든 소스 데이터 패킷이 복호될 때까지 반복하면 복호화가 완료된다.

2. 차수 분포

LT 부호의 가장 널리 알려진 차수분포는 IS 분포와 RS 분포이다. 소스 데이터 패킷의 개수가 k 일 때, IS 분포 $\rho(i)$ 의 차수 분포는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho(1) &= 1/k \\ \rho(i) &= 1/i(i-1) \quad (i = 2, 3, \dots, k) \end{aligned}$$

IS 분포는 이론적으로 오버헤드 및 복호화 연산량 측면에서 가장 이상적인 분포이다. 그러나 차수가 1인 패킷의 수가 너무 적기 때문에 실제 복호화 성능은 좋지 않은 편이다. 이러한 문제점을 보완하여 만든 차수 분포가 RS 분포인데, 이 분포는 채널의 소실 확률이 비교적 높은 경우에도 좋은 성능을 보인다. RS 분포 $\mu(i)$ 의 차수 분포는 다음과 같다.

$$R = c \cdot \ln(k/\delta) \sqrt{k}$$

$$\tau(i) = \begin{cases} R/ik & , i = 1, \dots, k/R - 1 \\ R \ln(R/\delta)/k & , i = k/R \\ 0 & , i = k/R + 1, \dots, k \end{cases}$$

$$\mu(i) = (\tau(i) + \rho(i)) / \sum_{i=1}^k (\tau(i) + \rho(i))$$

III. 새로운 결정론적 차수 분포

1장에서도 언급한 바와 같이, RS 분포를 사용하는 경우에 FER 성능은 좋은 편이지만 이에 비해 BER 성능은 좋지 않다. 실제로 모의실험을 통해 RS 분포를 사용할 시에는 FER과 BER이 거의 비슷한 값을 갖는다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 낮은 차수의 패킷이 충분치 않으므로 복호화 시에 많은 패킷들이 서로 연관되어 있고, 이에 따라 모든 패킷에 대한 복호화가 완료되기 직전까지는 대부분의 패킷이 아직 복호되지 않은 상태이기 때문이다.

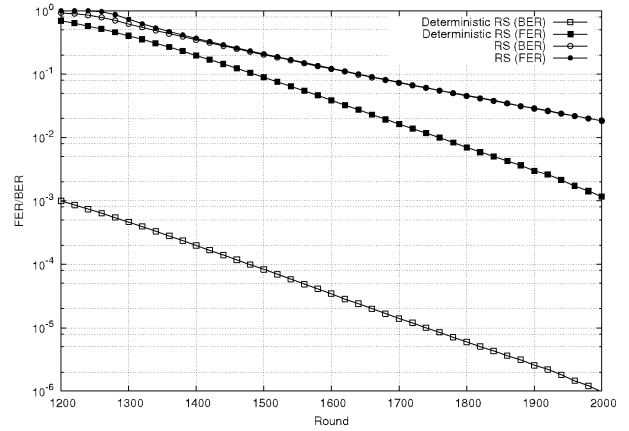


그림 2. 채널 소실 확률 $\epsilon = 0.001$ 인 경우의 성능

이에 따라 본 논문에서는 최대 전송 횟수에 도달할 때까지 복호화에 실패한 경우에도 보다 낮은 BER을 갖도록 하는 변형된 차수 분포를 다음과 같이 제안하겠다.

- i) 초기 k 회의 전송은 차수가 1인 패킷들을 순서대로 한 번씩 전송한다.
- ii) $k+1$ 회부터는 수정된 RS 분포에 따라 패킷들을 전송한다.

여기서 수정된 RS 분포란, 기존의 RS 분포에서 차수가 1인 경우의 확률을 0으로 두고 나머지 경우의 확률의 합이 1이 되도록 정규화(normalize)시킨 분포이다. 본 논문에서 제안하는 새로운 차수 분포는 기존의 분포에 간단한 변형을 적용한 것임에도 BER 측면에서 상당한 성능 향상을 얻을 수 있다.

IV. 모의실험

그림 1, 2는 RS 분포를 사용한 경우(RS)와 본 논문에서 제안한 새로운 차수 분포를 사용한 경우(D_RS)의 FER과 BER을 서로 다른 채널 소실 확률에 대하여 도시한 결과이다. 실험을 수행할 시의 파라미터 설정은 $k = 1200$, $c = 0.01$, $\delta = 0.5$ 이다.

그림에 나타나 있는 바와 같이 본 논문에서 제안한 새로운 차수 분포는 기존의 RS 분포에 비해 BER을 크게 감소시킨다. 그림 1의 경우에는 FER 성능에서 열화가 발생하는 구간도 존재하지만, 그림 2와 같이 채널 상황이 좋은 경우에는 FER 성능도 향상되는 것을 확인할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Mackay, D. J. C. "Fountain codes," IEE Proceedings - Communications, 2005, pp. 1062-1068.
- [2] Luby, M. "LT codes," in Proceedings of 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science(FOCS), 2002, pp. 271-282.
- [3] Shokrollahi, A. "Raptor codes," in Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory(ISIT), 2004, p. 36.