
LLR 기반의 MPE-FEC 상위계층 복호 방식

김철승* · 김민혁* · 김남수* · 정지원*

A New Upper Layer Decoding Algorithm for MPE-FEC based on LLR

Chul-seung Kim* · Min-hyuk Kim* · Tae-doo Park · Nam-soo Kim* · Ji-won Jung*

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.(계약번호 UD070054AD)
본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음
(IITA-2009-C1090-0902-0010)
이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을
받아 연구되었음(KRF-2008-313-D00698).

요 약

이동체에 대해서 위성을 이용한 통신 방식을 규정하고 있는 DVB-SSP 표준화에서는 Physical Layer 와 Upper Layer 의 두 단계로 부호화 및 복호화를 한다. 수신단에서 Physical Layer의 복호 방식인 LDPC 복호 후 Upper Layer 의 erasure RS 복호를 위해, CRC 검사를 수행하여 수신된 데이터에서 1 bit 의 오류발생에도 IP 패킷 모두를 삭제함으로써 복호 시 비효율성을 증가시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 LDPC 복호기에 출력되는 LLR 값을 이용하여 IP 패킷 전체를 삭제하는 것이 아니라 LLR 값이 낮은 비트만 선택적으로 삭제하는 방식을 제안하며, 이를 시뮬레이션 하여 기존의 CRC 방식과 비교하였다.

ABSTRACT

DVB-SSP is a new broadcasting system for hybrid satellite communications, which supports mobile handheld systems and fixed terrestrial systems. An upper layer, including erasure Reed-Solomon error correction combined with cyclic redundancy check. However, a critical factor must be considered in upper layer decoding. If there is only one bit error in an IP packet, the entire IP packet is considered as unreliable bytes, even if it contains correct bytes. If, for example, there is one real byte error, in an IP packet of 512 bytes, 511 correct bytes are erased from the frame. Therefore, this paper proposed upper layer decoding methods; LLR-based decoding. By means of simulation we show that the performance of the proposed decoding algorithm is superior to that of the conventional one.

키워드

DVB-SSP, LLR, LDPC CODE, MPE-FEC

I. 서 론

차세대 위성통신은 소형 이동형 지상과 방송 및 고정형 지상과 방송과 위성과의 융합에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 특히 위성을 이용한 쌍방향 통신, 즉 무선 인터넷과의 융합, 이동체에 대한 위성 방송 및 인터넷 통신을 하기 위한 연구가 제안되고 있다. 이동체에 대한 위성방송 및 인터넷 서비스를 지속적으로 제공하기 위해 기존의 DVB-S2 표준화에 DVB-H(Digital Video Broadcasting for Handhelds terminal) [1]와 DVB-T(Digital Video Broadcasting for Terrestrial) [2]를 결합한 새로운 DVB-SSP(Digital Video Broadcasting for Satellite Services to Portable) [3][4], 표준화에 대한 연구와 함께, 이는 이동체에 대해서 위성을 이용한 통신 방식을 규정하고 있으며, PL(physical layer) 와 UL(upper layer)의 두 단계로 부호화 및 복호화 하는 방식인 cross layer 부호화 방식을 적용하고 있다. PL에서 정정하지 못한 오류를 UL에서 정정함으로써 오류 정정 능력이 뛰어나음을 알 수 있다.

이동중인 물체에 대해 IP(Internet Protocol) 데이터를 전송하기 위한 DVB-SSP 시스템에서 적용되고 있는 부호화 방식은 UL-FEC로는 G. Faria et al.[2]의 논문에서 erasure RS(e-RS) 부호와 virtual interleaver를 결합한 DVB-H의 MPE-FEC(Multi-Protocol Encapsulation-Forward Error Correction) 구조를 사용한다. e-RS 부호의 장점은 기존의 RS 부호보다 더 많은 오류 정정이 가능하다는 점이다. PL-FEC로는 N=16200인 LDPC 부호를 적용하고 있다. 기존의 방식 경우, e-RS 부호 후 CRC(cyclic redundancy check)를 포함하여 virtual interleaver를 한 후에 LDPC 부호화되어 전송된다. 수신측에서는 LDPC 복호후 CRC 검사를 수행하여 수신된 데이터에서 1 bit의 오류에도 IP 패킷 모두를 삭제하게 된다. 이것은, 만약 IP 패킷의 크기가 512 바이트라면, 512 바이트의 IP 패킷 중에서 만약 1바이트의 오류가 존재한다고 판단되어지면, 1바이트를 제외한 나머지 511 바이트의 정상적인 데이터도 삭제됨을 뜻한다. 이는 e-RS 복호시 복호 능력의 한계 안에 있음에도 불구하고, 오류 한계를 벗어나는 원인이 될 수 있으므로 복호의 비효율성을 나타낼 수 있으며 또한 성능 열화의 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 LLR(Log-Likelihood Ratio)값을 이용한 상위계층 부호화 방식을 제안한다. 이는 LDPC 복호기에 출력되는

LLR 값을 이용하여 IP 패킷 전체를 삭제하는 것이 아니라 LLR 값이 낮은 비트만 선택적으로 삭제하는 방식을 제안하며, 이는 512 바이트의 IP 패킷 중에서 만약 1바이트의 오류가 존재한다 하더라도 512 바이트의 전체를 삭제하는 것이 아니라 해당 바이트만 삭제할 수 있는 방법이다. 그리고 이를 시뮬레이션 하여 기존의 CRC 방식과 비교하였다.

II. DVB-SSP 시스템 모델

DVB-SSP에서 제안한 시스템 블록 다이어그램은 다음 그림 1과 같다. 그림 1에서 UL interleaver는 가상 인터리버(virtual interleaver)를 의미하며, 각 블록도의 세부기술을 다음 각 절에서 설명한다.

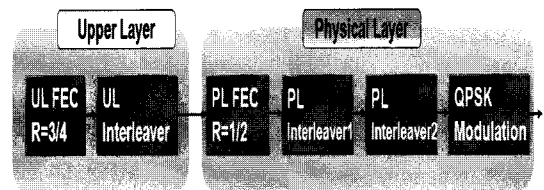


그림 1. 시스템 블록 다이어그램
Fig. 1 System block diagram

2.1. e-RS 부호

UL의 부호화 방식으로는 RS 부호에서 삭제 기능을 가지는 e-RS 부호를 이용한다. 기존 RS 부호에서는 에러 정정 능력을 t 라 두면 $t = (n - k)/2$, $t < k$ 일 경우 에러 정정이 가능하다.

e-RS 부호의 경우, 삭제에러 복구 능력을 t 라 두면 $t = n - k$, $t < k$ 일 경우 삭제에러 정정이 가능하게 된다. 본 논문에서 사용하고자 하는 e-RS(255,192,64)는 최대 64개의 삭제된 심볼의 경우, 삭제된 심볼안에 오류가 발생한 심볼이 모두 포함될 경우 64개 모두 오류 정정이 가능한데 비해, 64개의 심볼을 제외한 수신 심볼이 오류가 발생하면 정정이 불가능하다. 따라서 e-RS 부호는 삭제에러 복구 능력이 강한 대신 삭제 위치를 정확하게 알지 못할 경우 그 성능이 RS 부호보다 성능이 저하될 수 있다.

2.2. Virtual Interleaver

그림 2는 MPE-FEC 프레임을 나타낸다. MPE-FEC 메모리는 DVB-H의 입력인 IP 데이터가 입력되는데 IP 데이터의 최대 길이는 헤더를 포함한 4080 바이트이며, UL-FEC 후에 12 바이트의 헤더와 4 바이트의 CRC를 포함한 최대 4096 바이트이다. 프레임을 구성하는 하나의 심볼은 8 비트로 구성되며, 열의 개수는 255 개의 심벌로 고정되어 있고, 행의 길이는 최고 1024 개의 심벌까지 유동적으로 설정 가능하다. 따라서 총 프레임의 크기는 최대 약 2M 비트를 가질 수 있다. 191개의 심벌로 이루어진 프레임 왼쪽의 부분은 정보 비트 부분이고, 64개의 심벌로 이루어진 프레임의 오른쪽 부분은 RS 부호화 과정으로 생겨난 RS 패리티 부분이다. 전송되는 IP 데이터는 RS 부호 후 CRC 헤더를 붙여 PL-FEC로 전송된다.

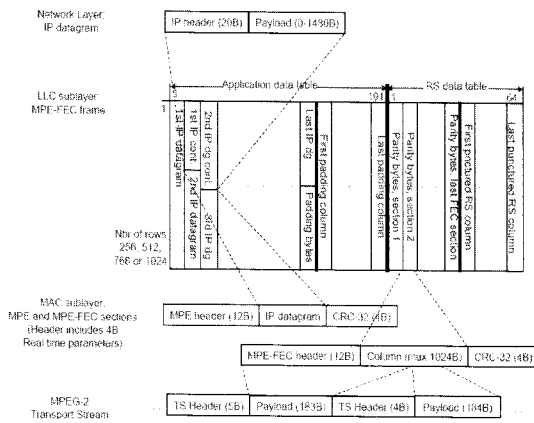


그림 2. MPE-FEC 메모리
Fig. 2 MPE-FEC memory

RS 부호화 과정의 전후로 하여 interleaver와 de-interleaver 과정을 수행하지만, 프레임으로 입력되는 순서와 출력되는 순서가 같아 가시적으로 interleaver 과정이 들어나지는 않기 때문에 이를 'virtual interleaver'라고 한다.

2.3. LDPC 부호

최근 모든 무선 통신 분야에서 관심이 되고 있는 채널 부호화 방식인 LDPC 부호화 방식은 터보 부호에 비해 부호화의 복잡도가 낮을 뿐 아니라 좋은 거리 특성으로

오류마루 현상이 나타나지 않고, 완전 병렬 처리로 고속 처리가 가능한 장점이 있다. 본 논문에서는 PL-FEC로는 DVB-S2에서 제안하는 부호화 비트수 $N=16200$ 이며 정보화 비트 수 $K=8100$ 을 가지는 부호화율 1/2인 LDPC 부호를 적용하였다[6]. LDPC 부호는 복호 부분 보다는 부호화기 구성에의 복잡도를 가지고 있는데, DVB-S2에서는 parity 부분을 address를 지정하여 쉽게 부호화하고 있다[5][6].

III. 제안한 LLR 기반의 상위계층복호 방식

수신측에서는 LDPC 복호 후 CRC 검사를 통해 오류가 있는 경우 IP 패킷을 모두 삭제시켜 e-RS 복호를 수행한다. 이는 비록 수신된 데이터에서 1 비트의 오류가 있을 지라도 IP 패킷 모두를 삭제함으로써 복호시 비율성을 나타낼 수 있다. 그림 3에서는 CRC 기법의 시스템 구조와 IP 패킷 전체가 삭제된 MPE-FEC 메모리 형태를 나타낸다.

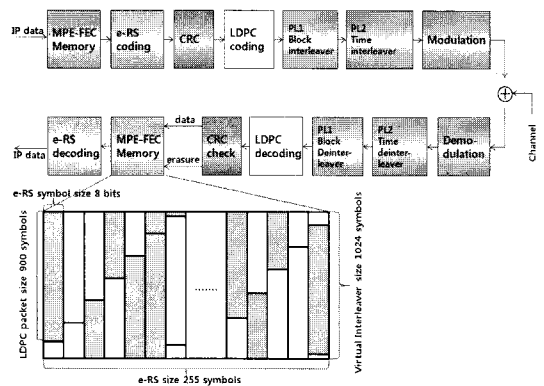


그림 3. CRC 기법의 시스템 구조 및 삭제된 MPE-FEC 메모리 형태
Fig. 3 System structure of CRC method and memory structure of deleted MPE-FEC

따라서 본 논문에서는 기존의 방식에서 CRC를 제외한, LDPC 복호기에서 출력되는 LLR 값을 이용하여 IP 패킷 전체를 삭제하는 것이 아니라, LLR 값이 낮은 비트만 삭제하여 패킷에서 삭제된 비트가 포함된 심벌단

위의 삭제 방식을 제안한다. 그림 4는 제안한 LLR 기법의 수신단 구조와 IP 패킷에서 심볼 기반의 삭제된 MPE-FEC 메모리를 나타낸다.

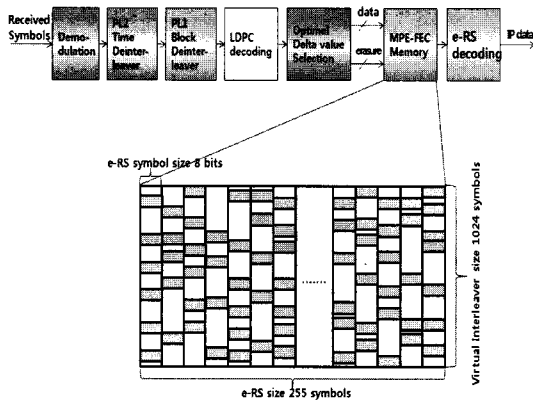


그림 4. LLR 기법의 수신단 구조 및 삭제된 MPE-FEC 메모리 형태

Fig. 4 Receiver structure of LLR method and memory structure of deleted MPE-FEC

PL-FEC의 LDPC 복호기에서는 N개의 비트 노드 및 $M(= N - K)$ 개의 체크 노드에서의 정보를 상호 교환하면서 이를 반복함으로써 성능을 향상시키는데, 최종 반복 후, LDPC 복호기가 출력인 LLR 값은 식(1)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 LLR &= \ln\left(\frac{q_n}{p_n}\right) = \ln\left(\frac{f_n^0}{f_n^1}\right) + \ln\left(\prod_{m \in A(n)} r_{1^{m,n}}^{0^{m,n}}\right) \\
 &= L_{f_n} + \sum_{m \in A(n)} \ln\left(\frac{r_{1^{m,n}}^{0^{m,n}}}{r_{1^{m,n}}^{1^{m,n}}}\right) \\
 &= L_{f_n} + \sum_{m \in A(n)} L_{r_{m,n}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

q_n, p_n 은 n 번째 비트 노드에서의 0과 1의 사후 확률, f_n^0, f_n^1 은 0과 1의 채널 전송 확률, $r_{m,n}^0, r_{m,n}^1$ 은 n 번째 비트 노드에서 m 번째 체크노드를 연결하는 edge에서의 0과 1의 패리티 노드의 확률, L_{f_n} 은 채널 전송 확률의 LLR, $L_{r_{m,n}}$ 은 패리티 노드 확률의 LLR 을 나타낸다. 결국 최종적으로 출력되는 LLR 값은 각각의 0과 1의 확률 값에 로그를 취한 비율에 의해 나타내어진다. 여기

서 LLR 값의 절대치가 작다는 의미는 0의 확률과 1의 확률의 차이가 적다는 의미이며 또한 오류 확률이 높다는 의미이다. 반대로 LLR 값의 절대치가 크다는 의미는 0의 확률과 1의 확률이 차이가 크다는 의미이며 오류 확률이 낮다는 의미가 된다. 이러한 점에서 PL-FEC의 LDPC 복호기에서 출력되는 LLR 값의 삭제 여부를 판단하는 기준인 LLR threshold delta는 식(2)와 같이 적용된다.

$$\begin{aligned}
 &If, r_s \geq \delta, \text{ preservation} \\
 &If, r_s < \delta, \text{ erased}
 \end{aligned} \tag{2}$$

r_s 는 LLR값의 절대값이며 delta값은 매우 중요한 역할을 한다. 만약 delta 값이 너무 크게 되면 각 IP 패킷에서 삭제되는 심볼의 개수가 e-RS의 정정능력을 초과하게 되고 오류가 아닌 심볼을 삭제 할 수 있게 된다. 반대로 delta 값이 너무 작으면 e-RS에서 오류정정에 실패하게 된다. 따라서 delta 값의 결정이 시스템의 성능에 매우 영향을 주는 것을 알 수 있다.

그림 5는 LDPC 복호 후 LLR 값의 분포도이다. UL-FEC의 e-RS 복호를 위해 오류라 판단되는 심볼의 삭제를 위해서는 그림 5의 LLR 값 분포도에서 적절한 레벨에서의 삭제를 위한 LLR값의 범위를 정하는 것이 중요하다.

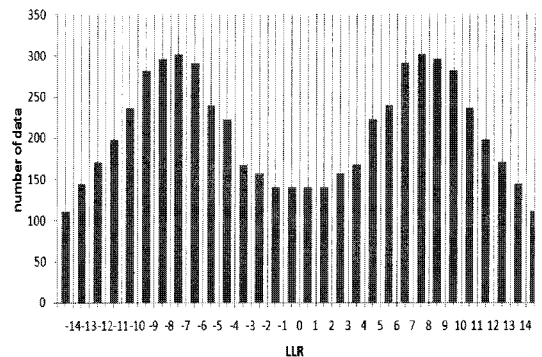


그림 5. LDPC 복호 후 LLR값 분포도
Fig. 5 LLR value distribution chart after LDPC decoding

그림 6은 delta 값에 따른 성능을 시뮬레이션 한 결과이다. 시뮬레이션 결과 delta=4일 때 최적임을 알 수 있으

며, 이는 LDPC 복호기의 LLR 값의 절대값이 4 이하인 심볼만 삭제시키는 것이 최적임을 알 수 있다.

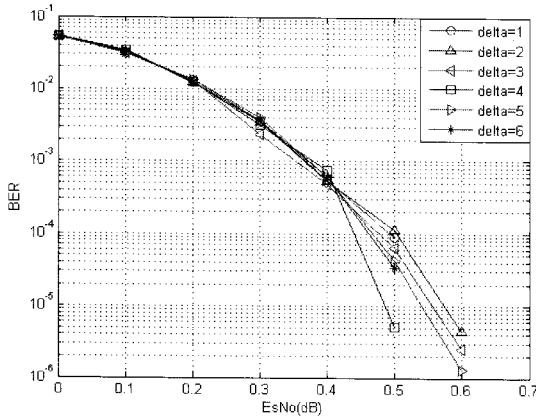


그림 6. Delta 값에 따른 LLR 방식의 성능 곡선
Fig. 6 LLR method BER curve by delta value

그림 7은 delta 값이 4인 경우의 삭제된 LLR 값의 분포도이다.

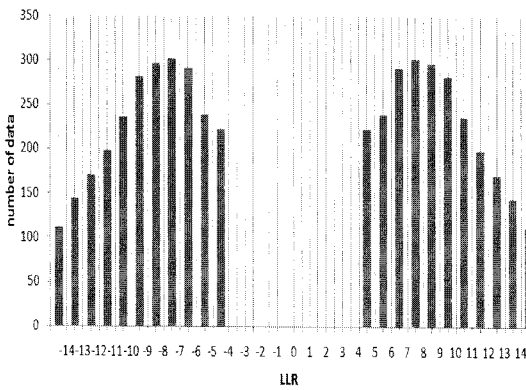


그림 7. LDPC 복호 후 delta=4 일 때 삭제된 LLR값 분포도

Fig. 7 Deleted LLR value distribution chart when delta=4 and after LDPC decoding

IV. Train interruption (TI) 채널 모델링[9]

본 논문에서 연구하고자 하는 기차선로의 단면을 그림 8에 나타내었다. 기차가 선로 위를 달릴 때, electronic line supporter에 의해 위성의 신호의 감쇄가 일어나게 되는데, 그 때의 신호의 상태는 그림 9와 같고, electronic line supporter의 주기인 50m마다 신호의 감쇄가 발생한다고 가정한다. 본 논문에서 채널 모델은 터널 환경이 아니라 달리는 선로 위에서 또는 기차의 속도가 감쇄되는 기차역 부근이라 가정한다.

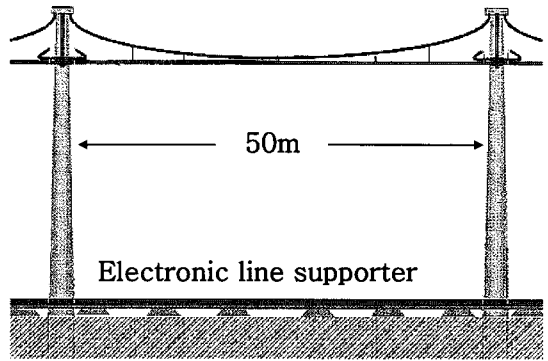


그림 8. 열차 선로 환경
Fig. 8 Train railway environment

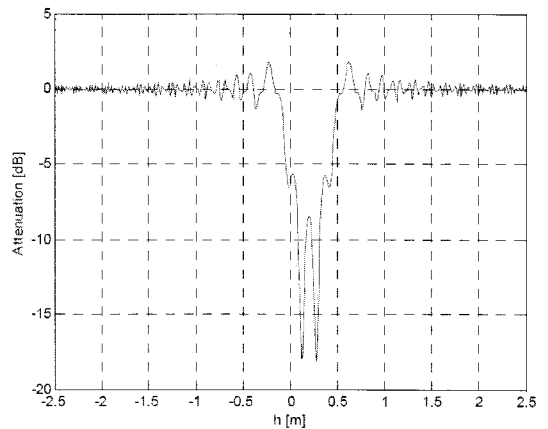


그림 9. TI channel 특성
Fig. 9 Specific of TI channel

기차의 속도가 v km/h라고 한다면 이를 초당 환산을 한 v' m/s 라 하고, 그림 8에서 **electronic line supporter**의 영향을 받지 않는 구간을 l , 영향을 받는 구간을 l' 라 하고, 전송되는 데이터 속도를 d 라 두었을 때, 감쇄가 되는 비트의 수, d_b 는 아래 식(3)과 같다. 이는 시뮬레이션 시에 주기적으로 위의 비트 수만큼을 "0"으로 할당하여 수신부에 전송되어진다.

$$d_b = l' * d / v' \quad (3)$$

V. 시뮬레이션 결과

그림 10는 기존의 CRC 방식을 사용하여 시뮬레이션 한 결과와 본 논문에서 제안한 LLR 값에 따른 방식을 사용한 성능을 비교 분석한 결과이다. MPE-FEC 메모리의 열의 길이를 256 심볼, 행의 길이를 1024 심볼로 고정하여 UL-FEC 로는 e-RS(255,191,64) 부호와 PL-FEC 로는 DVB-S2 규격의 LDPC(N=16200) 부호를 사용하였다. 시뮬레이션 결과로부터 LLR 값에 따른 방식을 사용할 경우 성능이 약 0.2 dB 개선됨을 알 수 있다. 이는 기존의 CRC 방식에서 오류가 존재한다고 판단되는 해당 IP 패킷 전체를 삭제하는 것이 오류가 아닌 데이터를 포함한 모든 데이터를 삭제하기 때문에 비효율성을 나타내기 때문이다.

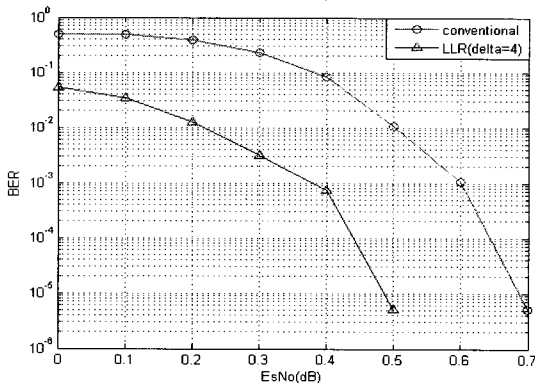


그림 10. CRC 방식과 LLR 방식의 성능 비교
Fig. 10 Compared CRC method and LLR method

그림 11는 TI 채널에서의 성능을 나타낸 그림이다. TI 채널에서는 LLR 방식과 기존의 방식 모두 오류 마루 (error floor)현상이 발생함을 알 수 있다.

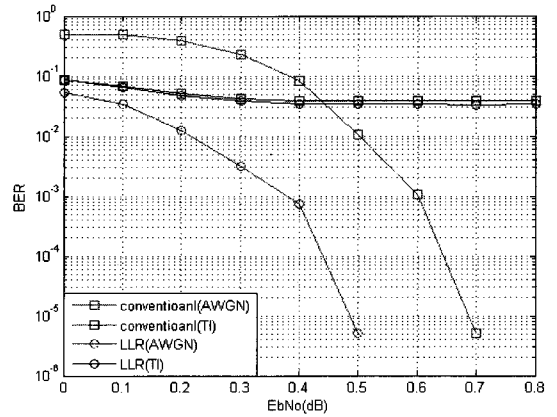


그림 11. TI 채널에서 제안한 복호 알고리즘 성능 분석
Fig. 11 Analysis decoding algorithm performance proposed in TI channel

VI. 결론

우수한 성능을 만족하면서 가입자가 이동을 하더라도 지속적으로 방송을 제공하기 위해서는 DVB-S2 표준화 등에서 논의되고 있는 LDPC 부호화 방식과 interleaver, 외부 부호와 결합한 새로운 부호화 방식의 연구가 필수적이며, 본 논문에서는 기존의 CRC 검사를 통한 IP 패킷 전체를 삭제하는 것이 아니라, LDPC 복호기에 출력되는 LLR 값을 이용하여 LLR 값이 낮은 비트만 선택적으로 삭제하는 LLR 방식을 제안하였다. 시뮬레이션 환경으로는 UL-FEC 로는 e-RS(255,191,64), PL-FEC는 DVB-S2 규격의 LDPC 부호 (N=16200)를 적용하여 성능 분석 한 결과, 가우시안 채널에서는 LLR 방식에서 delta=4일 때 최적임을 알 수 있으며, CRC 방식과 LLR 방식을 비교한 결과 LLR 방식을 사용할 경우 성능이 0.2dB 개선됨을 알 수 있다. TI 채널에서는 **electronic line supporter**의 영향으로 인해 오류마루 현상이 나타나는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서의 결과는 향후 DVB-SSP 및 DVB-SH 규격 등의 반복부호와 e-RS 부호의 결합이 되는 연접부호 방식에서 유용한 자료가 되리라 사료된다.

참고문헌

[1] ETSI EN 301 210: "Digital Video Broadcasting (DVB): Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and Other Contribution Applications by Satellite". (DVB-S2)

[2] G. Faria et al. "DVB-H: Digital Broadcast Services to Handheld Devices", Proc. Of the IEEE, Vol. 94, No 1, January 2006.

[3] ETSI EN 300 744: "Digital Video Broadcasting (DVB): Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television". (DVB-T)

[4] DVB-TM : Study Mission on Satellite Services to Portable devices (SSP) Draft Technical Report, March 2006.

[5] ETSI EN 301 210: "Digital Video Broadcasting (DVB): Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and Other Contribution Applications by Satellite". (DVB-S2)

[6] Arkko Paavola, Heidi Himmanen "Performance Analysis of MPE-FEC Decoding Methods at the DVB-H Link Layer for Efficient IP Packet Retrieval", IEEE TRANSACTIONS BROADCASTING, Vol 35, No. 1, pp.263-275 March 2007.

[7] Tero Jokela, Jarkko Paavola, Heidi Himmanen and Valery Ipatov "Performance Analysis of Difference Reed-Solomon Erasure Decoding Strategies at the DVB-H Link Layer", The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2006.

[8] D. J. C. Mackay and R. M. Neal, "Near Shannon Limit Performance of Low-Density Parity-Check Codes," Electron. Letter, Vol.32, pp. 1645-1646, Aug, 1996.

[9] V. Schena, G. Losquadro, A. Basili: "'A satellite network for train environment in the FIFTH Demonstration'", IST Mobile & Wireless Telecommunication Summit 2003, Aveiro (Portugal), pp. 603-607. , June 15 ~ 18, 2003

저자소개



김철승(Chul-Seung Kim)

2009년 2월: 한국해양대학교 전과 공학과 (공학사)
 2009년 3월~현재: 한국해양대학교 전과공학과 석사과정

※관심분야: 위성 통신, 이동 통신, 변·복조 기술, 채널 코딩, FPGA 기술 등



김민혁(Min-Huyk Kim)

2006년 2월: 한국해양대학교 전과 공학과(공학사)
 2008년 2월: 한국해양대학교 전과 공학과(공학석사)

2008년 3월~현재: 한국해양대학교 전과공학과 박사 과정

※관심분야: 위성 통신, 이동 통신, 변·복조 기술, 채널 코딩, FPGA 기술 등



김남수(Nam-Soo Kim)

2008년 2월: 한국해양대학교 전과 공학과 (공학사)
 2008년 3월~현재: 한국해양대학교 전과공학과 석사과정

※관심분야: 위성 통신, 이동 통신, 변·복조 기술, 채널 코딩, FPGA 기술 등



정지원(Ji-Won Jung)

1989년 2월 :성균관대학교 전자
공학과(공학사)

1991년 2월 :성균관대학교 전자
공학과(공학석사)

1995년 2월 :성균관대학교 정보공학과(공학박사)

1991년 1월~1992년 2월 : LG 정보통신연구소 연구원

1995년 9월~1996년 8월 : 한국통신 위성통신연구실
선임연구원

1997년 3월~1998년 12월 : 한국전자통신연구원 초빙
연구원

1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 정교수

2001년 8월~2002년 8월 : 캐나다 NSERC Fellowship

(Communication Research Center 근무)

※관심분야: 위성 통신, 이동 통신, 변·복조 기술,
채널 코딩, FPGA 기술 등