

멀티레벨 변조방식에서 LDPC 복호 알고리즘

준회원 이인기*, 정회원 정지원*, 준회원 최덕군*,
정회원 최은아**, 장대익**, 오덕길**

LDPC Decoding Algorithm for Multi-level Modulation Scheme

In-Ki Lee*, Ji-Won Jung*, Duk-Gun Choi*, Ean-A Choi**,
Dae-Ig Chang**, Duk-Gil Oh** *Reguler Member*

요 약

8PSK 이상의 멀티 레벨 변조 방식에서는 LDPC 복호를 위해서는 수신 심볼의 Inphase와 Quadrature 성분을 이용하여 각각의 비트로 분리하여야 하며, 성능은 각각의 비트의 거리와 관계가 있기 때문에 분리 하는 방식이 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 기존의 유클리디언 거리를 이용하여 분리하는 방식을 분석하고 이는 하드웨어 구현 관점에서 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 약간의 성능 감소를 가지더라도 섹터를 이용하는 방식을 제안한다. 또한 DVB-S2에서는 BC(Backward Compactible) 모드를 제공한다. BC 모드에서는 변조방식이 계층적 변조 방식인데 즉 변조시 심볼의 위상이 non-uniform 하게 분포되는데 본 연구에서는 non-uniform한 위상 분포에서 각각 인접한 심볼의 위상의 각도에 따른 LDPC 성능을 분석하였다.

Key Words : LDPC, DVB-S2, Multi-level Modulation Scheme, BC mode

ABSTRACT

For LDPC decoding, received symbols are splitted bit by bit based using the received in-phase and quadrature components. The method of bit-splitting is affected on decoding performance because its method depend on distance over symbol constellation. Therefore this paper propose the bit split method using the sector information with sacrifice a little performance loss compared to Euclidean distance method. Futhermore DVB-S2 specification supports BC(Backward Compactible) mode which using the hierarchical modulation method, this paper also analyze the decoding performance according to deviation angle of 8PSK constellation for various LDPC coding rates.

I. 서 론

고화질의 방송 서비스나 초고속 멀티미디어 방송, 데이터 방송, 인터넷 접속을 포함한 다양한 형태의 서비스 제공을 요구하고 있어 이를 수용할 수 있는 광대역 방송 서비스를 위해서 위성의 주파수 대역은 Ka 대역으로 높아지고 있다. 따라서 강우 감쇠에 능동적으로 대처하기 위한 적응형 부호화 변조 방

식 중심으로 활발히 연구되고 있다. 그러나 Ka 대역에서의 위성 방송 서비스시, 강우 감쇠, 비선형성 등에 의한 신호 품질 저하는 매우 심각한 문제로 신호 손실을 효율적으로 보상하여 방송 서비스를 지속적으로 제공할 수 있는 전송 기술 개발이 필요하다. 이를 위한 오류 정정 방식으로 실제적인 복호 알고리즘에서 샤논의 채널 용량 한계에 근접한 LDPC (Low Density Parhity Check) 코드방식이 관심의 대

* 한국해양대학교 전파공학과 위성통신 연구실(popularity1@bada.hhu.ac.kr),

** 한국전자통신연구원 통신위성연구그룹

논문번호 : KICS2004-11-269, 접수일자 : 2004년 11월 08일

$$P_{M_Address} = P_{M_Address} \oplus i_k (k=1,2,\dots,K)$$

단계 3. B submatrix인 Low Triangular parity check Matrix를 구하기 위해 마지막으로 다음과 같은 공식을 적용시킨다.

$$P_n = p_n + p_{n-1} (n=1,2,\dots,M-1)$$

단계 2에서 M_Address는 각 M개의 각 정보비트 별 "1"의 위치를 저장해 놓은 어드레스를 나타내며, 이는 참고문헌 [1]에 나타내었다. DVB-S2에서 제공하는 각 부호화에 따른 부호화어 크기 N, 정보원의 크기 N은 아래 표 1과 같다.

표 1. DVB-S2에서 제공하는 각 부호화에 따른 파라미터

Coding rate R	Coded Word N	Information Size K	Row weight	column weight
1/2	64800	32400	8	7
2/3	64800	43200	13	10
3/4	64800	48600	12	14
4/5	64800	51840	11	18
5/6	64800	54000	13	22
7/8	64800	57960	4	24
8/9	64800	57600	4	27
9/10	64800	58320	4	30

2.2 복호화 알고리즘

LDPC 복호기는 전송 되어진 심볼을 비트 노드와 체크 노드에서 각각의 확률 값을 구하여 반복을 통해 전송되어진 비트를 결정하는 것이다. DVB-S2에 제시한 복호 알고리즘은 기존의 Log Domain에서의 복호 알고리즘과 거의 동일하나, LUT를 만드는 방법 및 Check Node 확률을 구하는 방법상에서 약간의 차이를 가진다. LDPC의 복호 순서는 다음 그림 2와 같이 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 수신비트에다가 채널 추정 값을 구하는 초기화 과정,

정, Check node 확률을 구하는 CNU(check Node Update), 비트 확률을 구하는 BNU(Bit Node Update)로 세 가지 단계로 나눌 수 있다.

단계 1. 초기화 과정

채널이 AGWN이고 ISI memory less 채널이라고 하면 Channel transmit 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(r | x_n = b) = P(r_n = b | x_n = b)$$

여기서, r_n 은 received vector r의 특정위치 n에 위치한 원소를 뜻한다. $x_n=0,1$ 일 때 각각 1,+1로 매핑하는 BPSK 변조를 한다면 $P(r_n = b | x_n = b)$ 은 가우시안 PDF를 이용해 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

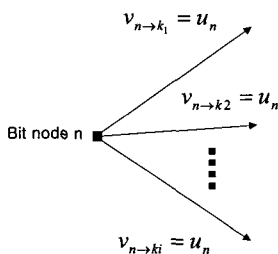
$$f_n^b = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(r_n + (-1)^b)^2}{2\sigma^2}\right)$$

이를 구현을 위해 log-domain으로 바꾸면 다음과 같다.

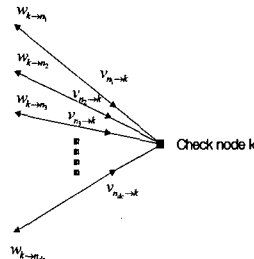
$$u_n = -L_c \cdot r_n (L_c = \frac{2}{\sigma^2}), \quad n=(0,1,\dots,N-1) \quad (2)$$

단계 2 : Check Node Update(CNU)

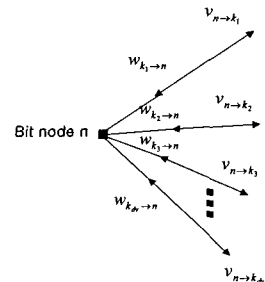
다음 그림 2는 Check node 확률을 구하는 CNU에서 하나의 체크 노드에서 올 수 있는 비트들의 확률을 구하는 그림이다. n_{dc} 개의 row weight를 가진다고 가정할 때, 각각의 체크 노드로 들어오는 비트들의 확률 $w_{k \rightarrow n_1}, w_{k \rightarrow n_2}, \dots, w_{k \rightarrow n_{dc}}$ 은 아래 식과 같이 유도된다.



(a) 초기화 과정



(b) CNU 과정



(c) BNU 과정

그림 2. LDPC 복호화 과정

$$w_{k \rightarrow n_i} = g(v_{n_1 \rightarrow k}, v_{n_2 \rightarrow k}, \dots, v_{n_{i-1} \rightarrow k}, v_{n_{i+1} \rightarrow k}, \dots, v_{n_{dc} \rightarrow k})$$

$$g(a, b) = \text{sign}(a) \times \text{sign}(b) \times \{\min(|a|, |b|)\} + LUT_g(a, b)$$

$$LUT_g(a, b) = \log(1 + e^{-|a+b|}) - \log(1 + e^{-|a-b|})$$

실제로 $LUT_g(\cdot)$ 는 Look up table로 구현될 수 있다.

단계 3. Bit Node Update(BNU)

CNU에서 각 체크 노드로 연결된 비트들에 대한 업데이트가 이루어진 후, 각 비트노드에 연결된 d_v 개의 확률, 즉, 각 컬럼에 해당하는 d_v 개의 비트 노드, $v_{n \rightarrow k_1}, v_{n \rightarrow k_2}, \dots, v_{n \rightarrow k_{d_v}}$ 의 확률을 다음 식에서 구한다.

$$v_{n \rightarrow k_i} = u_n + \sum_{j \neq i} w_{k_j \rightarrow n} \quad (3)$$

그림 3에서 성능분석을 하였다. 모든 부호화율에서 반복횟수는 40으로 동일하게 설정하였으며, 변조 방식은 BPSK를 적용하였다. R=1/2인 경우 약 0.8~0.9dB에서 QEF(Quasi Error Free)한 성능을 얻을 수가 있었다.

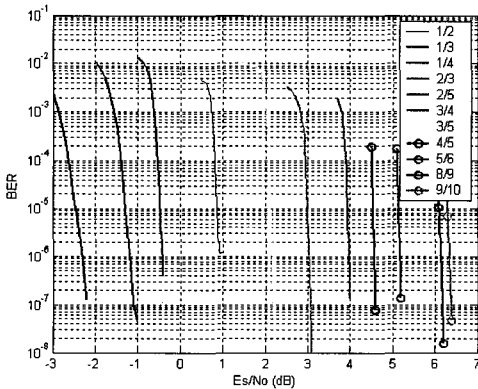


그림 3. 각 부호화율에 따른 LDPC 복호기 성능(반복횟수 = 40, BPSK)

III. 8PSK와 결합한 LDPC 복호알고리즘

8PSK 신호일 때의 송신단에서는 부호기의 출력을 세 비트로 묶어서 변조기로 보내어 지고, 복호부에서는 각 심볼당 세 비트씩을 복조부로 보내기 위해서 수신된 I/Q채널을 이용하여 만들 수 있어야 한다. 아래 그림 4는 LDPC 복호를 위한 8PSK 신

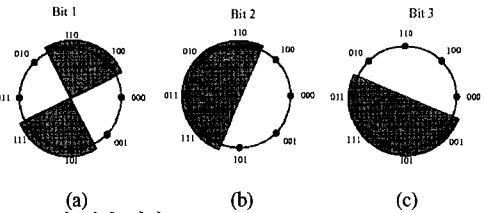


그림 4. LDPC 복호를 위한 8PSK 블록도

호에 대한 그림이다. 그림에서 복호된 I,Q심볼을 LDPC복호를 위해 세비트로 split하여야 한다. 다음 각 절에서는 복조된 I/Q 심볼을 각각의 비트로 분리하는 방법에 대해 논한다.

3.1 Euclidean 거리를 이용한 복호 방식

심볼은 그림 5에서 보는 것과 같이 gray code로 되어 있으며, 송신단에서는 부호기의 출력을 세비트로 묶어서 변조기로 보내어 지고, 복호부에서는 각 심볼당 세비트씩을 복조부로 보내기위해서 수신된 I/Q채널을 이용하여 만들 수 있어야 한다. 그림 5에서 각각의 비트는 정상도에서 하나의 심볼로 할당되며, 각각의 비트(Bit 1, Bit 2, Bit 3)가 “0” 일때와 “1”일때의 경계선을 나타낸다.



(a) Bit 1에 대한 정상도
(b) Bit 2에 대한 정상도
(c) Bit 3에 대한 정상도

그림 5. Euclidean거리 이용시 8PSK 정상도

Ungerboeck partitioning을 이용하여 세 비트를 출력하는 방법은 다음과 같은 식을 사용하여 판정 할 수 있다.

$$d = \sqrt{(r_x - S_{m_I})^2} + \sqrt{(r_y - S_{m_Q})^2}$$

x, y 는 수신된 I채널, Q채널 값이고 S_{m_I}, S_{m_Q} 는 그림 5의 각 정상도에서의 매핑점이다. 즉, 그림 6의 Bit 1에 대해서 첫 번째 비트는 정상도에서 볼 수 있듯이 1일 때 d_1, d_2, d_5, d_6 의 유클리드 거리를 구하고 0일 때 d_0, d_3, d_4, d_7 의 유클리드 거리를 구하여 최단거리를 구한다. 두 번째 비트는 1일 때 d_2, d_3, d_4, d_5 0일 때 d_0, d_1, d_7, d_6 의 유클리드 거리를 구하여 최단거리를 구한다. 세 번째 비트는 1일 때 d_4, d_5, d_6, d_7 0일 때 d_0, d_1, d_2, d_3 의 유클리드 거리를 구하여 최단거리를 구한다. 다음 식과 같이 최소값을 구할 수 있다.

$$\text{Bit1} = \min(d_1, d_2, d_5, d_6) - \min(d_0, d_3, d_4, d_7)$$

$$\text{Bit1} = \min(d_1, d_2, d_5, d_6) - \min(d_0, d_3, d_4, d_7)$$

$$\text{Bit1} = \min(d_1, d_2, d_5, d_6) - \min(d_0, d_3, d_4, d_7)$$

이렇게 구하여진 각 비트에 대한 거리는 각 비트가 양수 혹은 음수에 따라 LDPC 복호기로 입력되어지는 값 자체 역시 양수 혹은 음수로 입력되어짐을 알 수 있다. 그러나 위의 알고리즘은 거리를 구하기 위해 $\sqrt{\cdot}$ 와 제곱이 있어 하드웨어 설계 시 복잡한 단점을 갖고 있다.

3.2 Sector를 이용하는 복호 방식

유클리디언 거리를 이용하는 방식이 하드웨어 설계시 복잡하다는 단점을 갖고 있으므로 본 절에서는 간단한 절대치만을 이용하여 수신신호가 어느 분면에 있는지를 이용하여 bit를 split하는 방식을 제안한다.

섹터를 이용하여 수신된 I/Q 채널을 이용하여 세 비트를 출력하는 방법에 대해 성상도는 그림 6과 거의 흡사하다. 첫 번째 비트, Bit 1은 Q축을 중심으로 배치하고 Bit 1은 I축을 중심으로 그리고 Bit 3는 각분면내에 각각을 할당하였다. 따라서 Bit 1은 I축을 중심으로 배치하였기 때문에 수신신호의 I성분인 r_x 자체가 되며, Bit 2는 Q축을 중심으로 배치하였기 때문에 수신신호의 Q성분인 r_y 자체가 된

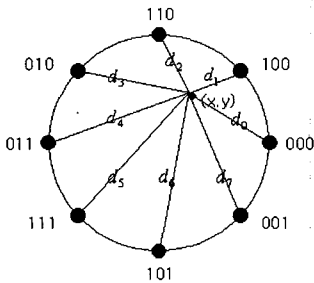


그림 6. 각 비트들에 대한 Euclidean 거리

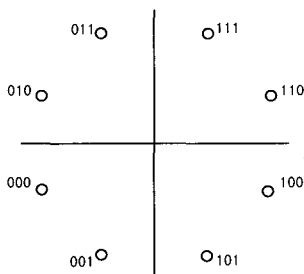


그림 7. Sector방식을 이용하기 위한 8PSK 성상도

다. 세 번째 비트 Bit 3는 아래 표 2와 같이 할당하였다. 따라서 섹터에 의한 분리 방법은 아래 식과 같다.

표 2. LIB 신호 할당

Sector	Bit 3
1	$r_y - r_x$
2	$r_x + r_y$
3	$r_x - r_y$
4	$-(r_x + r_x)$

$$\text{bit1} = r_x$$

$$\text{bit2} = r_y$$

$$\text{bit3} = \begin{cases} r_y - r_x & r_x \geq 0, r_y \geq 0 \\ r_x + r_y & r_x < 0, r_y \geq 0 \\ r_x - r_y & r_x < 0, r_y < 0 \\ -(r_y - r_x) & r_x \geq 0, r_y < 0 \end{cases}$$

따라서 각 bit로 split하기 위해서 단순히 절대치와 덧셈만 있으면 가능하다. I/Q채널을 이용하여 세 비트를 출력하는 방법과 Ungerboeck partitioning을 이용하여 최소거리계산으로 세 비트를 출력하는 방법의 성능을 보면 다음 그림 8과 같다. Euclidean 거리를 이용한 방법이 0.1dB정도 개선되었음을 알 수 있으나, 하드웨어 설계 관점에서는 약 0.1dB의 성능을 손해보더라도 섹터 방식의 복호 방식이 효율적임을 알 수 있다.

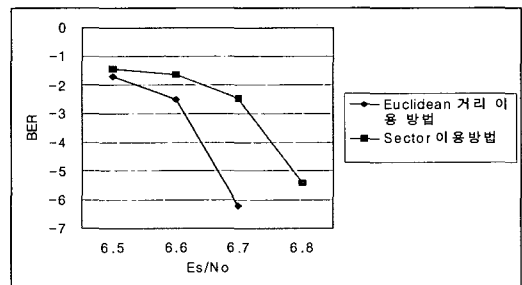


그림 8. BER 성능 비교 곡선

3.3 인터리버에 따른 성능 분석

DVB-S2 규격에서는 64800 비트 단위로 프레임을 구성하고 있으며, 8PSK 변조 방식 이상의 고차 변조방식 적용시 인터리버 사용을 권고하고 있다.

인터리버는 그림 9와 같이 3비트 $N/3+i$, $2N/3+i$, i ($i=0,1,2, \dots, N/3-1$) 은 i 번째 8-PSK 심벌이 된다.

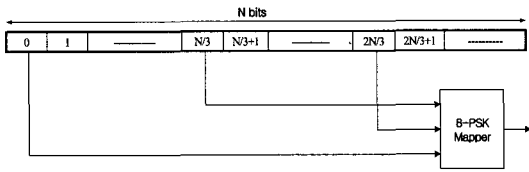


그림 9. 8-PSK Mapper Definition

그리고 이것은 그림 10과 같은 $row=N/3$, $column=3$ 인 블록 인터리버이다.

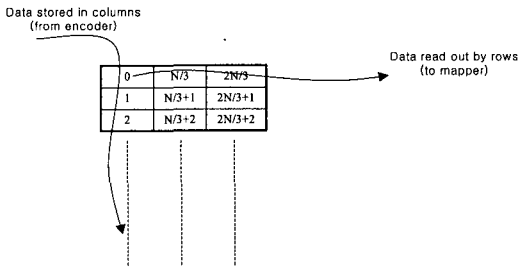


그림 10. 8-PSK Mapper Definition, interpreted as Block interleaver

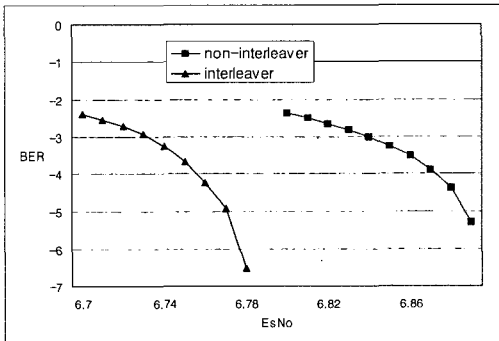


그림 11. Non-interleaver와 interleaver와의 BER 성능 비교 곡선

인터리버를 하였을 때와 하지 않았을 때의 성능을 비교해 보면 그림 11과 같이 약 0.12dB 정도 인터리버 했을 때 성능이 좋음을 알 수 있다.

IV. BC모드에서 LDPC 부호 성능

DVB-S2에서는 BC(Backward Compactible) 모드를 제공한다. 그림 12와 같이 BC 모드는 기존의 가입자가 DVB-S 혹은 DVB-S2 규격의 수신기 중 하나만 가지고 있더라도 수신 가능하게끔 제공하는

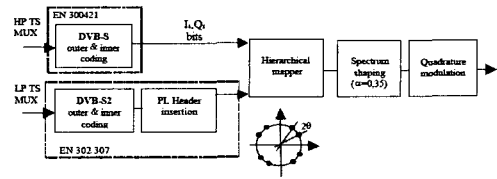


그림 12. DVB-S2 기반 BC모드

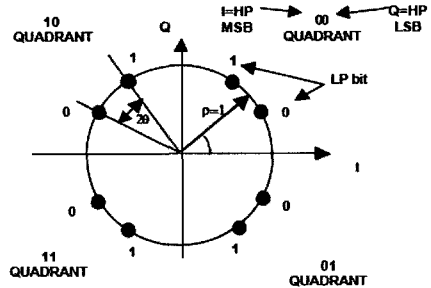
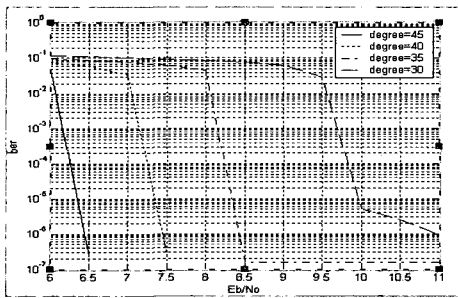


그림 13. 계층적 심플 매핑

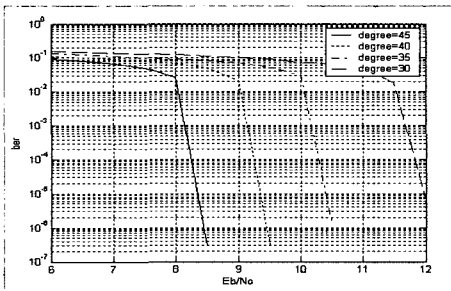
모드이다. DVB-S의 오류정정 부호는(8,7,7) convolutional 부호와(204,188) RS부호를 직렬 연결한 연결부호를 적용하며, DVB-S2는 $N=64800$ 을 가지는 LDPC 부호를 적용시킨다.

BC 모드에서는 변조방식이 계층적 변조 방식인데 그림 4-2와 같은 성상도를 갖는다. 각각의 분면은 세비트로 구성되며, 첫 두비트는 HP(High Priority)를 갖는 DVB-S의 연결부호의 출력 부호화 비트이며, 마지막 비트는 LP(Low Priority)를 갖는 DVB-S2의 LDPC 부호의 출력 부호화비트이다. 그림 13에서 알 수 있듯이 HP는 QPSK 형태를 따르며, LP는 각각의 분면에 할당되어 있다.

그림 13에서 알 수 있듯이 변조시 심플의 위상이 non-uniform하게 분포되는데 인접하는 심플의 위상이 작으면 작을 수록 HP에 대한 성능이 좋을 것이며, 크면 클수록 LP에 대한 성능이 좋을 것임을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 non-uniform한 위상 분포에서 각각 인접한 심플의 위상의 각도에 따른 LDPC 성능을 분석하였다. 성능 분석시 비트를 분리 하는 방법은 III장에서 소개한 섹터를 이용하여 LP 에 대한 비트를 분리 하였다. 그림 14는 그림 13에서 LDPC 부호화 비트에 대한 인접한 심플의 각도(degree)에 따른 성능 그래프이다. 그림 4-1(a)는 부호화율 $R=1/2$ 이고, $N=64800$, $K=32400$, $d_c=8$, $d_v=7$ 일 때의 성능 그래프이며, 그림 4-1(b)는 부호화율 $R=2/3$ 이고, $N=64800$, $K=43200$, $d_c=13$, $d_v=10$ 일 때의 성능 그래프이다. 그림에서 알



(a) $R = 1/2(N=64800, K=32400, d_c = 8, d_v = 7)$



(b) $R = 2/3(N=64800, K=32400, d_c = 13, d_v = 10)$

그림 14. BC 모드에서 R=1/2, 2/3일 때 성능곡선

수 있듯이 각도가 작으면 작을수록 성능이 감소 될 수 있다.

V. 결론

DVB-S2 시스템은 변조 방식이 BPSK, QPSK, 8PSK 등을 지원하고 있으며, 변조방식이 BPSK 나 QPSK 인 경우에는 LDPC 복호기로 입력되는 값이 각각 수신 심볼의 I(Inphase)와 Q(Quadrature) 값 자체이나 8PSK 이상의 멀티 레벨 변조 방식에서는 수신 심볼의 Inphase 와 Quadrature 성분을 이용하여 8PSK 인 경우 세비트를, 16QAM 인 경우 네 비트를 분리하여 LDPC 복호기로 입력하여야 한다. 각각의 비트로 분리시 성능은 각각의 비트의 거리와 관계가 있기 때문에 분리 하는 방식이 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 기존의 유클리디언 거리를 이용하여 분리하는 방식을 분석하고 이는 하드웨어 구현 관점에서 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 약간의 성능 감소를 가지더라도 섹터를 이용하는 방식을 제안한다. 성능분석 결과 Euclidean 거리를 이용한 방법이 0.1dB정도 개선되었음을 알 수 있으나, 하드웨어 설계 관점에서는 약 0.1dB의 성능을 손해보더라도 섹터 방식의 복호 방식이 효율적임을 알 수 있다. 또한 DVB-S2

에서는 BC(Backward Compactible) 모드를 제공한다. DVB-S의 오류정정 부호는 (8,7,7) convolutional 부호와 (204,188) RS부호를 직렬 연결한 연접부호를 적용하며, DVB-S2는 N=64800을 가지는 LDPC 부호를 적용시킨다. BC 모드는 기존의 가입자가 DVB-S 혹은 DVB-S2 규격의 수신기 중 하나만 가지고 있더라도 수신 가능하게끔 제공하는 모드인데, 이는 변조방식이 계층적 변조 방식, 즉 변조시 심볼의 위상이 non-uniform 하게 분포되는데 본 연구에서는 non-uniform한 위상 분포에서 각각 인접한 심볼의 위상의 각도에 따른 LDPC 성능을 분석하였다. 성능 분석 결과 각도가 작으면 작을수록 성능이 감소 될 수 있다.

참고 문헌

- [1] Draft ETSI EN 302 307, Digital Video Broadcasting(DVB); Second Generation framing structure, channel coding and modulation for Broadcasting Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications, 2004. 6.
- [2] R. G. Gallager, "Low-Density Parity-Check Codes," IRE trans.informationtheory,vol.8, PP.21-28,1962.
- [3] 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.
- [4] M. Sipser and D. A. Spielman, "Expander Codes," IEEE Trans. Information Theory, vol.42, pp.1720-1722, Aug. 1996
- [5] T. Richardson and R. Urbanke, ""Efficient Encoding of Low-Density Parity Check Codes," IEEE Trans. Information Theory, vol. 47, pp. 638-656, Feb.2001
- [6] J. W. Bond, S. Hui, and H. Schmidt, "Constructing low - density parity - check codes," EURO COMM 2000, Information Systems for Enhanced Public Safety and security. IEEE/AFCEA, pp. 260-262, 2000.
- [7] David J. C. Mavkay "Good Error-Correcting Codes Based on Very Sparse Matrics' IEEE Trans. Information Theory, vol. 45, NO. 2. March 1999.

이 인 기 (In-Ki Lee)

준회원



2003년 8월 한국해양대학교 공학(학사)
 2003년 9월~현재 한국해양대학교 공학 석사과정
 <관심분야> 채널 코딩, 변복조 기술, FPGA 기술, 위성통신 등

최 은 아 (Eun-A Choi)

정회원



1998년 2월 전북대학교 수학과 (이학사)
 2000년 2월 전북대학교 대학원 정보통신공학과(공학석사)
 2000년 4월~현재 한국전자통신연구원 무선접속모뎀연구팀 연구원
 <관심분야> 채널코딩, 디지털통신, 위성통신 등

정 지 원 (Ji-Won Jung)

정회원



1989년 2월 성균관대학교 전자공학(학사)
 1991년 2월 성균관대학교 전자공학(석사)
 1995년 2월 성균관대학교 전자공학(박사)
 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 조교수
 2001년 8월~2002년 8월 캐나다 NSERC Fellowship (Communication Research Center 근무)
 <관심분야> 위성통신, 이동통신, 변·복조기술, 채널 코딩, FPGA 기술 등

장 대 익 (Dae-Ig Chang)

정회원



1986년 한양대학교 전자통신공학사
 1989년 한양대학교 전자통신공학사
 1999년 충남대학교 전자공학박사
 1990년 2월~현재 한국전자통신연구원 책임연구원/과제책임자

2005년 3월~현재 UST대학원대학교 무선이동통신 및 디지털방송공학전공 겸임교수
 1991년 6월~1993년 7월 Canada MPR Tectech. 연구소 연구원
 <관심분야> 위성통신 및 방송시스템, 광대역 변복조, 오류정정부호 등

최 덕 군 (Duk-Gun Choi)

준회원



2004년 8월 한국해양대학교 전파공학(학사)
 2004년 9월~현재 한국해양대학교 전파공학 석사과정
 <관심분야> 변·복조기술, 채널 코딩, FPGA 기술, 위성통신 등

오 덕 길 (Duk-Gil Oh)

정회원



1980년 2월 서울대학교 공과대학 전자공학과(학사)
 1984년 2월 서울대학교 공과대학 전자공학과(석사)
 1996년 2월 서울대학교 공과대학 전자공학과(박사)
 1982년~현재 한국전자통신연구원 광대역무선접속기술연구부 부장

<관심분야> 무선멀티미디어 전송 기술 및 서비스 시스템 등