FTN 채널에서의 효율적인 비터비 등화기 연구

김태훈¹ · 이인기² · 정지원^{1*}

A Study of Efficient Viterbi Equalizer in FTN Channel

Tae-hun Kim¹ · In-ki Lee² · Ji-won Jung^{1*}

^{1*}Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

²Satellite and Wireless Convergence Research Department, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-700, Korea

요 약

본 논문은 인접 심볼 간의 간섭이 발생하지 않는 최대 데이터 전송률인 Nyquist rate 보다 빠르게 데이터를 전송하여 전송량을 증가시키는 FTN(Faster than Nyquist) 기법을 이용하여 효율적인 복호 방식을 분석한다. FTN 신호 전송 시 발생하는 ISI(Inter-Symbol Interference)를 최소화하기 위해 간섭량을 비터비 등화기의 가지 정보로 활용하여 비터비 등화기 모델을 제안한다. 본 논문에서는 FTN 신호를 복호하기 위해 BCJR 기법을 이용한 비터비 등화기와 LDPC 복호기간의 반복으로 이루어진 터보 등화 기법을 이용하여 복호한다. BCJR 복호시 트래버스 구조를 본 논문에서는 유클리디언 거리를 최대화 함으로써 기존의 방식보다 성능이 향상됨을 알 수 있으며, 이에 따른 FTN 신호의 전송량 증가별 성능을 비교한다.

ABSTRACT

In this paper, we analyzed efficient decoding scheme with FTN (Faster than Nyquist) method that is transmission method faster than Nyquist theory and increase the throughput. we proposed viterbi equalizer model to minimize ISI (Inter-Symbol Interference) when FTN signal is transmitted. the proposed model utilized interference as branch information. In this paper, to decode FTN signal, we used turbo equalization algorithms that iteratively exchange probabilistic information between soft Viterbi equalizer (BCJR method) and LDPC decoder. By changing the trellis diagram in order to maximize Euclidean distance, we confirmed that performance was improved compared to conventional methods as increasing throughput of FTN signal.

키워드 : FTN(Faster than Nyquist), BCJR 기법, 비터비 등화기, LDPC 코드, 터보 등화 기법, 인접 심볼 간의 간섭(ISI)

Key word : FTN (Faster than Nyquist), BCJR method, Viterbi Equalizer, LDPC codes, Turbo Equalization, ISI (Inter-Symbol Interference)

접수일자 : 2014. 02. 21 심사완료일자 : 2014. 03. 18 게재확정일자 : 2014. 04. 04

* Corresponding Author Ji-won Jung(E-mail:jw.jung@kmou.ac.kr, Tel:+82-51-410-4920)

Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.6.1323>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

DVB-S2 표준안이 발표된 10년이 경과된 현 시점에서 새로운 위성 방송 표준안의 필요성이 대두되고 있으며, 이는 DVB-S3라는 표준안의 개발이 활발히 이루어지고 있다. DVB-S3 표준안 개발에 앞서 DVB-S2X 표준안에서 DVB-S2의 성능 향상을 위해 유럽의 각 회사에서는 표준안 채택을 위해 다양한 알고리즘들을 제안하고 있다. 이러한 가운데 LDPC 복호 속도를 개선시켜 전송률을 높이는 방안 보다는 FTN (Faster Than Nyquist) 방식[1-3]을 이용하여 전송율을 높이는 방안들이 대두되고 있다.

기존의 DVB-S2 표준안에서는 복호 방식을 LDPC (Low Density Parity Check) 부호화 방식을 적용하고 있으나 이는 FTN 기법 적용으로 인한 ISI (Inter-Symbol Interference) 를 해결하기 어려움이 있다. 따라서 차세대 DVB-S3에서는 FTN 적용으로 인한 위해서 비터비 등화기를 이용하여 LDPC 복호기와 연결한 터보 등화기법[4]을 시도하고 있다. 적용되는 비터비 등화기는 이미 널리 알려진 것과 같이 출력 비트가 경판정된 비트가 출력되므로 이를 LDPC 복호기 입력으로 사용되면 성능 저하를 초래한다.

본 논문에서는 convolutional 부호기의 SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm) 인 BCJR 기법을 이용한다.[5-7] BCJR 기법의 비터비 등화기를 이용하여 LDPC 복호기와 연결한 터보 등화 기법을 사용하는 방식을 제안한다. 또한 비터비 등화기의 격자도에서 가지 정보는 전송되는 ISI의 간섭량인데 본 논문에서는 각 상태에서 다음 상태로 천이되는 간섭량의 유클리디언 거리를 최대화 하기 위해 새로운 격자도를 제안하여 효율적인 비터비 등화기를 구성해 성능을 향상 시켰다. FTN 기법 적용으로 전송율의 향상도에 따라 제안 방식의 성능을 분석 한 결과, 전송률 향상도가 30% 이상일 때는 성능 향상을 가져옴을 알 수 있다.

II. FTN 신호 모델링

FTN 전송 방법은 주파수 대역에 의해 주어지는 Nyquist rate 보다 빠르게 신호를 전송하는 방법이다. 예를 들어 어느 정해진 시간동안 Nyquist rate 에 따라 전

송하면 10000개의 데이터를 전송한다고 했을 때, FTN 방식을 사용하여 50%로 축소하면 동일한 시간동안 20000개의 데이터를 전송할 수 있다. 그로 인해 필연적으로 ISI가 발생하게 된다. 간섭된 신호의 형태는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \sqrt{E_s} \sum a_n h(t - n\tau T), \quad \tau < 1 \quad (1)$$

여기서 수신신호는 아래 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n\tau T) = \sum_k a_k p((n-k)\tau T) + n'(\tau T) \quad (2)$$

τ 는 간섭되는 정도를 의미한다. 그리고 이의 간섭은 오류정정 부호화 방식을 적용하여 보상할 수 있다.

그림 1은 오버샘플링된 데이터와 Nyquist rate 에 따라 전송되는 데이터, 그리고 FTN 을 적용한 데이터를 나타낸다.

그림 1. (a) 오버샘플링된 데이터 (b) Nyquist rate로 필터링된 신호, (c) FTN 모델링 신호

Fig. 1 (a) Oversampling data, (b) The filtered signal to the Nyquist rate, (c) FTN modeling signal

그림 1-(b)를 보면 Nyquist rate 에 따라 전송되면 ISI가 생기지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 1-(c)에서는 FTN 으로 인해 인접 심볼들이 서로 영향을 주어 데이터의 Decision 시점마다 그림 1-(c)의 원으로 표시된 부분이 원 데이터에 첨가 되게 되어 데이터에 영향을 준다. 그림 2는 이와 같은 간섭으로 인한 파형의 변화를

나타낸다.

그림 2. (a) 오버샘플링된 데이터 (b) Nyquist rate로 필터링된 신호 파형, (c) FTN 모델링 신호파형

Fig. 2 (a) Oversampling data, (b) Waveform of filtered signal to the Nyquist rate, (c) Waveform of FTN modeling signal

그림 2에서 알 수 있듯이 그림 2-(a)와 같은 오버샘플링된 데이터를 Nyquist rate에 따라 전송하면 그림 2-(b)와 같이 파형이 형성되지만 FTN을 적용하면 그림 2-(c)처럼 ISI로 인해 신호의 파형이 왜곡되지만 이를 해결할 수 있다면 동일한 시간에 두 배의 데이터를 전송할 수 있음을 알 수 있다. ISI로 인한 왜곡된 신호를 복호할 수 있는 효율적인 복호 모델은 III장에서 제시한다.

III. 터보 등화기를 이용한 FTN 복호기 제안

기존의 DVB-S2 표준안에서는 복호 방식을 LDPC 부호화 방식을 적용하고 있으나 이는 II장에서 설명한 FTN 기법 적용으로 인한 ISI를 해결하기 어려움이 있다. 따라서 차세대 DVB-S3에서는 FTN 적용으로 인한 위해서 비터비 등화기를 이용하여 LDPC 복호기와 연접한 터보 등화 기법을 시도하고 있다. 적용되는 비터비 등화기는 이미 널리 알려진 것과 같이 출력 비트가 경관정된 비트가 출력되므로 이를 LDPC 복호기 입력으로 사용하면 성능 저하를 초래한다. 따라서 본 논문에서는 BCJR 기법을 이용하여 비터비 등화기를 구성하였으며, 비터비 등화기의 출력값인 연관정 값을 LDPC 복호기에 입력하여 반복구조로 구성된 터보 등화 기법을 사용하는 방식을 제안하며, 이는 그림 3과 같다.

그림 3. BCJR 기법을 이용한 비터비 등화기와 터보 등화 기법을 포함한 부복호기 구조

Fig. 3 Structure of encoder and decoder included Viterbi Equalizer based on BCJR method and Turbo Equalization

그림 3의 블록도에서 LDPC 부호화기로 데이터를 부호화시키고 인터리버를 통과한 뒤 FTN mapper를 이용하여 τ 만큼 간섭량 발생하여 AWGN(Additive White Gaussian noise) 채널을 통과한다. τ 만큼 간섭량의 의미는 τ 만큼 전송률이 증가됨을 의미한다. 그리고 BCJR 기법을 이용한 비터비 등화기를 이용하여 FTN으로 인한 ISI를 보상해준 다음 디인터리빙하고 LDPC 복호기를 이용해 복호한다. 그리고 반복을 통하여 성능을 향상시킨다. 여기서 FTN mapper는 송신하려는 데이터를 τ 만큼 FTN에 의한 ISI를 첨가시키는 부분을 의미한다.

AWGN 통과 전의 FTN에 의한 ISI만을 포함하는 데이터는 수신 측에서 예측이 가능하다. 그 이유는 τ 에 따

라 표 1에서처럼 ISI로 인해 어느 정도의 값을 가지게 되는지 알 수 있기 때문이다. BCJR 기법을 이용한 비터비 등화기는 이 데이터를 이용하여 BM(Branch Metric)을 구하고 BSM(Backward State Metric), FSM(Forward State Metric), 그리고 LLR(Log Likelihood Ratio)을 구하여 ISI를 보상한다.

표 1은 양 옆의 ISI로 인해 가운데 비트가 얼마나 영향을 받는지를 나타낸다. 그리고 현재 사용한 필터 탭 수가 1이고, 최대 50%의 FTN을 사용하였기 때문에 양 옆에 하나씩의 비트에게만 영향을 받기 때문에 경우의 수가 8가지가 된다. 예를 들어 표 1의 첫 번째에서 $S_{t+1}S_tS_{t-1}$ 이 “000” 일 때 현재의 신호 S_t 는 이전 신호와 다음 신호인 $S_{t-1}S_{t+1}$ 의 간섭을 받게 된다. 현재의 신호 S_t 가 “0” 이므로 실제 전송은 “-1”을 전송하더라도 $S_{t-1}S_{t+1}$ 이 “00” 이므로 “-1 -1”의 간섭을 받게 되어 실제 전송되는 신호는 -1.39임을 알 수 있다. 본 논문에서 적용된 필터는 SRRC(Square Root Raised Cosine) 필터로써 roll-off 계수가 0.35이다.

표 1. $\tau=20\%$ 일 때, 000~111까지의 간섭량 크기

Table. 1 When τ is 20%, Value of Interference on 000~111

$S_{t+1}S_tS_{t-1}$	간섭된 신호
000	-1.390080
001	-1.095634
010	0.801187
011	1.095634
100	-1.095634
101	-0.81187
110	1.095634
111	1.390080

그림 4. 기존방식의 격자도
Fig. 4 Trellis Diagram of Basic method

그림 4는 비터비 등화기의 격자도를 나타낸다. 그림 4에서 0 0, 1 0, 0 1, 1 1 은 상태를 의미하고 다음상태의 데이터에 따라 BM이 나뉘게 된다. 예를 들어 현재의 상태가 “00” 일 때 다음 입력이 “0” 이 입력되면 다음 상태는 “00”으로 천이되며, 이에 따른 BM값은 $S_{t+1}S_tS_{t-1}$ 이 “000”인 -1.39가 되며(표 1 참조), 이를 그림 4에서는 BM000으로 표시하였다. 따라서 그림 4의 BMabc에서 abc는 표1의 좌측 $S_{t+1}S_tS_{t-1}$ 를 나타내며 이의 값은 $S_{t+1}S_tS_{t-1}$ 값에 따른 간섭량인 표 1의 우측 값을 나타낸다. BM 값은 τ 에 따른 간섭량을 표 1과 같이 저장하여 수신데이터와의 유클리디언 거리에 의해 구해지게 된다. 그림 4의 격자도를 이용하여 복호하면, 한 상태로 입력되는 BM 값의 차이가 크지 않아 BCJR 기법을 이용한 비터비 등화기 구성시 성능 저하를 초래한다. 예를 들어 그림 4에서 다음 상태 “00”으로 입력되는 BM은 BM000과 BM001이므로 표에서도 알 수 있듯이 S_t 값이 동일하면 $S_{t-1}S_{t+1}$ 이 다른 비트라도 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 새로운 격자도를 그림 5와 같이 제안한다.

그림 5. 제안하는 방식을 적용한 격자도
Fig. 5 Trellis Diagram of Proposed method

그림 5에서의 방식은 첫 번째 방식과 달리 1 0, 0 1 상태의 값을 반전시켜 다음 상태에서 비교 대상이 되는 BM간의 차이를 크게 만든 것이다. 그림 4와 그림 5의 격자도를 보면, 상태 “01”과 상태 “10”에서 천이되는 BM값을 반전시켜, 한 상태로 입력되는 BM값의 유클리디언 값을 크게 하였다. 이는 FTN mapper에서 역시 001, 101, 010, 110의 상태일 때 값을 반전시킴으로써 간단히 구현될 수 있다. 다음 IV장에서는 각 τ 에 따른 그림 4의 기존 방식과 그림 5의 제안 방식에 따른 성능

비교를 하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 일반적인 AWGN 채널만이 존재할 때의 환경을 고려하였다. III장에 대한 시뮬레이션 결과에 앞서 II장에서 설명하였던 FTN 신호를 AWGN 채널을 통과시킨 뒤 비터비 등화기 없이 오로지 LDPC 복호기만을 이용하여 복호하였을 때의 시뮬레이션 결과는 다음 그림 6과 같다.

그림 6. τ 에 따른 LDPC 성능
Fig. 6 Performance of LDPC decoder according to τ

그림 6을 보면 10% 일 때는 0%와 성능이 거의 비슷하며, 대략 20% 정도의 FTN은 성능은 0.1dB 정도로 성능 차이가 크게 나지 않지만 그 이상의 FTN을 사용하면 성능이 악화되다가 약 40%이상으로 축소하게 되며 과도한 ISI로 인해 EbNo가 커지더라도 복호하지 못하는 것을 알 수 있다. 즉, ISI가 성능에 큰 영향을 끼치게 되므로 이를 보상해주는 것이 필요하다.

본 논문에서는 이를 보상하기 위해 BCJR 기법을 이용한 비터비 등화기를 사용한다. 제안하는 격자도를 가지는 BCJR 기법의 비터비 등화기 성능을 측정하기 위한 시뮬레이션 파라미터는 다음과 같다. LDPC 부호화율이 1/2, 총 데이터량은 10^6 개, 필터는 roll-off factor가 0.35, 샘플링 간격이 24, 필터 탭이 1인 SRRC 필터를 사용했다. 그리고 반복 수는 시뮬레이션 결과 최적이었던 inner iteration (LDPC decoder) 60회, outer iteration

(터보 등화 기법) 4회로 고정하였다. 파라미터에 의한 그림 4의 방식(1번 방식)과 그림 5의 방식(2번 방식)의 τ 에 따른 성능은 다음과 같다. 여기서 τ 가 12.5%는 필터 샘플수가 24개 이므로 3개를 앞당겨 전송하여 ISI를 발생시켰음을 의미하녀 $\tau=50\%$ 이면 12개만큼 빠르게 전송했음을 의미한다.

(a) $\tau = 12.50\%$

(b) $\tau = 20.83\%$

(c) $\tau = 29.16\%$

그림 7. τ 에 따른 비터비 등화기 성능
Fig. 7 Performance of Viterbi Equalizer according to τ

τ 가 낮은 경우 즉 $\tau=12.5\%$ 인 경우에는 기존 방식과 제안 방식의 성능 차이가 나지 않음을 알 수 있으며, τ 가 커질수록 제안 방식이 성능이 향상됨을 알 수 있다. 특히 $\tau=40\%$ 이상일 경우에는 기존 방식은 전혀 복호를 하지 못하는데 반해 제안 방식은 $\tau=0\%$ 에 근접함을 알 수 있다. 이는 τ 가 커질수록 표 1의 BM간의 유클리디언 거리가 커져 제안 방식이 효율적임을 알 수 있다. FTN으로 인해 τ 가 존재할 때 비록 τ 가 없는 기존 신호보다는 0.2dB~0.3dB의 성능 열화가 존재하지만 전송율을 두배 가까이 높임으로써 고속으로 전송시에는 유리한 장점을 갖고 있다.

V. 결 론

LDPC 복호 속도를 개선시켜 전송률을 높이는 방안보다는 FTN(Faster Than Nyquist) 방식을 이용하여 전송율을 높이는 방안들이 대두되고 있다. 이러한 데이터 전송률이 대한 요구는 계속 늘어나는 반면, 대역폭이 제한적이라 FTN 전송기법이 유용한 방법이다. 그러나 FTN 기법 적용으로 인해 ISI가 발생하여 이에 대한 대처기법이 대두되고 있으며, 이를 복호기와 등화기를 이용하여 ISI를 개선시킬 수 있다.

본 논문에서는 FTN 전송기법에서 ISI를 제거하기 위한 비터비 등화기를 이용하여 LDPC 복호기와 연결한 터보 등화 기법을 적용하였다. 그리고 비터비 등화기를 사용함에 있어서 연판정값을 LDPC 복호기로 업데이트 하기 위해 BCJR 기법을 사용하였다. 하지만 기존 방식의 BCJR 격자도를 이용하여 복호하면, 한 상태로 입력되는 BM 값의 차이가 크지 않아 BCJR 기법을 이용한 비터비 등화기 구성시 성능 저하를 초래한다. 그러므로 새로운 방식의 격자도를 제안하였다. 제안하는 방식을 통하여 상태 “01”과 상태 “10”에서 천이되는 BM값을 반전시켜, 한 상태로 입력되는 BM값의 유클리디언 값을 크게 하였다.

제안하는 방식의 격자도와 기존의 격자도의 BCJR 기법을 이용한 비터비 등화기를 부호화를 1/2에서 적용시킨 결과, τ 가 낮은 경우 즉 $\tau=12.5\%$ 인 경우에는 기존 방식과 제안 방식의 성능 차이가 나지 않음을 알 수 있으며, τ 가 커질수록 제안 방식이 성능이 향상됨을 알 수 있다. 특히 $\tau=40\%$ 이상일 경우에는 기존 방식은 전혀 복호를 하지 못하는데 반해 제안 방식은 $\tau=0\%$ 에 근접함을 알 수 있다.

이는 τ 가 커질수록 표 1의 BM간의 유클리디언 거리가 커져 제안 방식이 효율적임을 알 수 있다. FTN으로 인해 τ 가 존재할 때 비록 τ 가 없는 기존 신호보다는 0.2dB~0.3dB의 성능 열화가 존재하지만 전송율을 두배 가까이 높임으로써 고속으로 전송시에는 유리한 장점을 갖고 있다. FTN을 적용하지 않을 때 보다 성능이 조금 열화되지만 이는 전송률 증가에 비하면 미미하기 때문에 우수한 성능을 나타낸다고 사료된다.

감사의 글

“본 연구는 교육과학 기술부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임”
 “본 연구는 한국 전자통신연구원 위탁연구로 수행된 연구결과 중 일부입니다.”

REFERENCES

- [1] J. E. Mazo, "Faster than Nyquist signaling" *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 54, pp. 1451-1462. Oct. 1975.
- [2] Liveris, Angelos D., and Costas N. Georghiades. "Exploiting faster-than-Nyquist signaling." *Communications, IEEE Transactions on* 51.9 (2003): 1502-1511.
- [3] Rusek, Fredrik, and John B. Anderson. "Multistream faster than Nyquist signaling." *Communications, IEEE Transactions on* 57.5 (2009): 1329-1340.
- [4] C. Douillard et al., "Iterative correction of intersymbol interference: turbo equalization", *Eur. Trans. Telecommun.*, vol. 6, pp. 507-511, Sep./Oct. 1995.
- [5] J. B. Anderson, A. Prlja, and F. Rusek, "New reduced state space BCJR algorithms for the ISI channel," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, Seoul, Korea, Jun. 2009, pp. 889-893.
- [6] J. B. Anderson and A. Prlja, "Turbo equalization and an M-BCJR algorithm for strongly narrowband intersymbol interference," in *Proc. Int. Symp. Inf. Theory Appl.*, Taichung, Taiwan, Oct. 2010, pp. 261-266.
- [7] D. Dasalukunte, F. Rusek, and V. Öwall, "An iterative decoder for multicarrier faster - than - Nyquist signaling systems," in *Proc. IEEE ICC*, May 2010, pp. 1-5.

김태훈(Tae-Hun Kim)

2013년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과(공학사)
 2013년 3월~현재 : 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
 ※관심분야 : 위성 통신, 이동 통신, 수중 통신, 변 · 복조 기술, 채널코딩, FPGA 기술 등

이인기(In-Ki Lee)

2003년 8월 : 한국해양대학교 전파공학과(공학사)
 2005년 8월 : 한국해양대학교 전파공학과(공학석사)
 2005년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 위성방통융합연구팀 선임연구원
 ※관심분야 : 위성 방송 통신, 변 · 복조 기술, 채널코딩, 물리계층 FPGA 구현 기술 등

정지원(Ji-Won Jung)

1989년 2월 : 성균관대학교 전자공학과(공학사)
 1991년 2월 : 성균관대학교 전자공학과(공학석사)
 1995년 2월 : 성균관대학교 정보공학과(공학박사)
 1991년 1월~1992년 2월 : LG 정보통신 연구소 연구원
 1995년 9월~1996년 8월 : 한국통신 위성통신연구실 선임연구원
 1997년 3월~1998년 12월 : 한국전자통신연구원 초빙연구원
 1996년 9월~현재 : 한국해양대학교 전파공학과 정교수
 2001년 8월~2002년 8월 : 캐나다 NSERC Fellowship(Communication Research Center 근무)
 ※관심분야 : 위성 통신, 이동 통신, 수중 통신, 변 · 복조 기술, 채널코딩, FPGA 기술 등