



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

비균일 오류 확률 기반 다중 밴드 FTN 전송
기법 연구

A Study on Multiband FTN Method Based on Unequal
Error Probability



指導教授 鄭智元

2019年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

徐正洙

本 論文을 徐正滋의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 : 工學博士 趙 炯 來 (印)

委 員 : 工學博士 金 基 萬 (印)

委 員 : 工學博士 鄭 智 元 (印)



2019年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

徐 正 滋

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iii
Abstract	iv
제 1 장 서론	1
제 2 장 FTN 전송 기법	3
2.1 FTN 신호 모델링	3
2.2 단일 밴드 FTN 전송 기법	4
2.3 다중 밴드 FTN 전송 기법	6
2.4 FTN 신호 복호를 위한 터보 등화 기법	9
제 3 장 UEP 기반의 FTN 전송 기법 송수신 모델 제안	13
3.1 UEP 기반의 FTN 전송 기법 송수신 모델	13
3.1.1 HSS 기반의 LDPC 복호 방식에 의한 UEP 설정 방식	16
3.2 OFDM 기법과 결합한 FTN 전송 기법	22
제 4 장 모의실험 결과 분석	26
4.1 UEP 기반의 FTN 전송 기법 성능 비교 분석	26
4.2 다중 경로 채널에서의 UEP 기반의 OFDM-FTN 성능 분석	32
제 5 장 결론	38
감사의 글	40
참고문헌	41

List of Tables

Table 3.1	Number of N_{G_B} connected to N_{G_C}	21
Table 4.1	Simulation parameters	27
Table 4.2	UEP parameters setting I ($\tau'=25\%$)	28
Table 4.3	UEP parameters setting II ($\tau'=25\%$)	28
Table 4.4	UEP parameters setting III ($\tau'=37.5\%$)	28
Table 4.5	UEP parameters setting IV ($\tau'=37.5\%$)	28
Table 4.6	UEP setting parameters ($\tau'=37.5\%$)	32



List of Figures

Fig. 2.1	FTN signaling	4
Fig. 2.2	The transceiver structure of single band FTN model	5
Fig. 2.3	The transceiver structure of multiband FTN model	7
Fig. 2.4	Frequency domain of multiband	8
Fig. 2.5	The structure of iterative decoder based on turbo equalization ·	9
Fig. 2.6	Trellis diagram of basic method	10
Fig. 2.7	Trellis structure and metirc calculation	11
Fig. 3.1	The transceiver structure of FTN model based on UEP algorithm	14
Fig. 3.2	The UEP setting according to N_p	15
Fig. 3.3	LDPC HSS decoding flow	17
Fig. 3.4	The Order of bit nodes group with or without UEP algorithm	19
Fig. 3.5	Frequency domain of FDM method and OFDM method	23
Fig. 3.6	The transceiver structure of OFDM-FTN model	24
Fig. 4.1	The performance of FTN method based on UEP algorithm	30
Fig. 4.2	Channel impulse response	33
Fig. 4.3	The performance of FTN and OFDM-FTN in multipath channel	34
Fig. 4.4	The performance of OFDM-FTN method based UEP algorithm	36

A Study on Efficient Transmitter Structure of FTN Method Based on Unequal Error Probability

Seo, Jung Hyun

Department of Radio Communication Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In next generation satellite broadcasting system, requirement of high throughput efficiency has been increasing continuously. To increase throughput efficiency and improve bit error performance, FTN (Faster Than Nyquist) method is employed in new satellite standard, DVB-S3 (Digital Video Broadcasting - Satellite - Third Generation) system and FOBTV(Future of Broadcast Television) system.

FTN is a method of transmitting information at a rate higher than the allowed Nyquist limit. In order to improve the transmission efficiency by applying the FTN method, according to increasing the interference rate. However, performance degrade arising from ISI(Inter-symbol interference). The other attempt is MIMO(Multiple Input Multiple Output)-FTN transmission method, which combines the MIMO and FTN methods to improve throughput, can maximize the improvement of throughput, however its decoding method and removal of interference is

difficult, the research about which is under developed yet. And MIMO-FTN method requires accurate channel estimation for each channel, yet does not improve performance compared to the SISO (Single Input Single Output)-FTN method.

Therefore, in this thesis, proposed an unequal error probability (UEP) based multiband FTN transmission method that transmits the FTN interference differently applied to each band of multiband to each one. This method, by classifying band depending on the importance of the encoded bits of a channel encoder, improves performance in the same overall interference by allocating less FTN interference to the band to which important bits belong and more FTN interference to the band to which unimportant bits belong.

Lastly, proposed an OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)-FTN method based on UEP algorithm in multipath channels as in massive mobile communication networks such as 5G. The OFDM method divides data into multiple carrier signals, and multiplexes and transmits them by adding orthogonality to minimize the interval between divided carrier signals. Since OFDM with high spectrum efficiency is efficient in a frequency selective fading channel environment and a multipath channel environment, it can maximize the band efficiency by applying the FTN method and also guarantee the performance in multipath channels.

KEY WORDS: Faster-Than Nyquist; Inter-symbol interference; Unequal Error Probability; multipath channels; Orthogonal Frequency Division Multiplexing;

제 1 장 서 론

차세대 위성 방송/통신 및 5G 기반의 이동통신은 한정된 대역폭에서 전송률에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다[1]. 이에 전송률을 높이기 위한 여러 방안들이 연구되고 있다. 전송률과 성능의 향상은 서로 trade-off 관계이므로 두 가지를 모두 충족시키는 것은 많은 어려움이 있다. 그러므로 성능을 최대한 유지하며 전송률을 향상시킬 수 있는 방식들을 연구하는 것이 중요하다. Nyquist 전송 속도보다 더 빠르게 전송하는 FTN (Faster Than Nyquist) 기법을 이용한 방안이 차세대 위성 방송시스템의 표준안인 DVB-S3(Digital Video Broadcasting-Satellite-Third Generation) 및 지상파 방송의 표준안인 FOBTV(Future of Broadcast Television)의 표준안으로 대두되고 있다[2]. FTN 기법은 차세대 무선 통신에서 주어진 채널 대역폭에 대해 전송 효율을 향상시키기 위해 사용되었다. 이는 기존 Nyquist 속도보다 빠르게 신호를 전송하여 동일한 채널 대역폭에서 전송 효율을 극대화 할 수 있다[3-5]. 그러나 FTN 기법의 적용으로 인접 심볼 간의 간섭(ISI : Inter-Symbol Interference)을 야기하여 성능 저하가 발생하므로 전송 효율을 극대화 할 수 있는 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위해 인접 채널 간 간섭을 최소로 유지하면서 전송 효율을 극대화 할 수 있는 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 기법과 FTN 기법을 결합한 MIMO-FTN 전송 기법이 연구되었다[5-7]. MIMO-FTN 전송 기법은 전송률 향상을 극대화 할 수 있지만 복호 방식 및 인접 심볼 간의 간섭 및 채널간의 간섭을 제거하기 어려워 이에 대한 연구는 아직 미미한 단계이다. 논문 [6]에서는 MIMO-FTN 전송 기법에 대한 효율적인 복호 방식으로 인접 채널간의 간섭을 제거하기 위해 계층적 시공간 부호화 방식을 적용하여 복호기에서 제거하는 방안과 W-ZF (Weighted-ZeroForcing)를 적용하여 각 송신 안테나로부터 전송되는 신호를 분리하고 FTN으로 발생하는 간섭량을 BCJR(Bahl, Cocke, Jelinek

and Raviv) 복호기[8]를 통하여 제거하는 방안을 제안하였다. 그러나 각 채널간의 채널 추정이 정확해야 하며 단일 밴드 FTN 전송 기법보다는 성능이 개선되지 않는다. 또한, 시공간 부호화 기법의 적용으로 인하여 전송 효율적인 측면에서는 개선되지 않는다.

본 논문에서는 단일 밴드 FTN 전송 기법보다 성능을 개선하기 위한 송수신 구조를 제안한다. 송신부에서 LDPC(Low-Density Parity-Check) 부호화기를 통과한 부호어의 중요도를 우선 순위 알고리즘을 사용하여 FTN 간섭 비율을 부호어의 중요도에 따라 서로 다르게 설정하여 전송하는 비균일 오류 확률(UEP : Unequal Error Probability) 기반 FTN 전송 기법을 제안한다. 채널 부호화기의 부호화된 비트의 중요도에 따라 나누어 중요한 비트에는 FTN 간섭량을 적게, 중요하지 않은 비트에는 간섭량을 많이 할당함으로써 전체적으로 동일한 간섭량에서 성능을 향상시키는 기법이다.

마지막으로 5G와 같은 massive 이동 통신망에서와 같이 다중 경로가 존재하는 채널에서 FTN 전송 기법을 적용시키기 위한 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)[9-11] 기반의 FTN 적용 방안을 제시한다. OFDM 기법은 데이터를 여러 개의 반송파로 분할하고, 분할된 방송파 간의 간격을 최소화하기 위해 직교성을 부가하여 다중화해 전송하는 기법으로써 높은 스펙트럼 효율과 주파수 선택적 페이딩 채널 환경 및 다중 경로 채널 환경에서 효율적이므로 FTN 기법의 적용으로 인한 대역 효율성을 극대화 할 수 있으며, 아울러 다중 경로 채널에서 성능 또한 보장 할 수 있는 방식이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 1장의 서론에 이어 제 2장에서는 Nyquist 전송 속도보다 더 빠르게 전송하는 FTN 신호 모델링을 제시하고, 기존의 단일 밴드 FTN 전송 기법과 단일 밴드와 비교하여 주파수 선택적 페이딩에 강한 다중 밴드를 적용시킨 FTN 전송 기법 송수신 모델을 제시한다. 제 3장에서는 UEP 기반의 FTN 전송 기법의 송수신 모델을 제시하고, 다중 경로가 존재하는 채널에서 다중 밴드보다 효율적인 OFDM-FTN 기법을 제시한다. 제 4장에서는 시뮬레이션을 통해 UEP 기반의 FTN 전송 기법의 성능과 다중 경로가 존재하는 채널에서 OFDM-FTN 전송 기법의 UEP 설정 유무에 따른 성능을 분석하였다. 그리고 제 5장의 결론으로 본 논문의 끝을 맺는다.

제 2 장 FTN 전송 기법

FTN 기법은 1975년 미국의 Bell Labs에서 최초 제안되었으나, 당시 기술력으로는 수신부 구현이 불가능하여 크게 주목 받지 못하다가 21세기에 이르러서야 재조명 받기 시작했다. 이는 차세대 무선 통신에서 주어진 채널 대역폭에 대해 전송 효율을 향상시키기 위해 사용되었으며, 기존 Nyquist 속도보다 빠르게 신호를 전송하여 동일한 채널 대역폭에서 전송 효율을 극대화 할 수 있다. 그러나 이는 인접 심볼 간의 간섭을 야기하여 성능 감소를 초래한다.

본 장에서는 동일한 채널 대역폭에서 전송 효율을 향상시키기 위한 FTN 신호 모델링, 단일 밴드에서의 FTN 전송 기법과 단일 밴드 FTN 전송 기법 적용으로 인한 간섭을 최소화하기 위해 부호화된 비트를 여러 밴드에 나누어 할당하며, 각 밴드에서 샘플 수의 증가로 간섭을 최소화 하여 성능을 향상시키는 다중 밴드 FTN 전송 기법을 사용하였다.

2.1 FTN 신호 모델링

Fig. 2.1은 Nyquist 속도로 신호를 전송한 경우와 FTN 전송 기법을 적용하여 전송한 신호를 나타낸다.

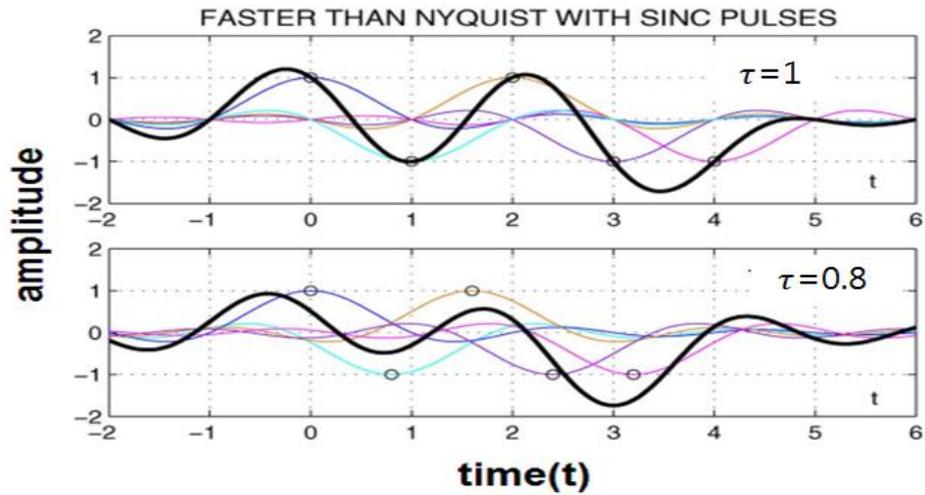


Fig. 2.1 FTN signaling

Fig. 2.1은 SRRC (SRRC : Square-Root Raised Cosine) filter를 사용하여 각 시점 t 에서의 Nyquist 및 FTN 신호의 파형을 나타낸 것이다. τ 는 FTN 전송 기법으로 인해 Nyquist 속도 보다 얼마만큼 빠르게 보내는 간섭 시점을 나타낸다. Fig. 2.1에서 $\tau=1$ 인 경우에는 Nyquist 속도로 전송되므로 인접 심볼 간의 간섭이 생기지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 $\tau=0.8$ 인 경우에는 Nyquist 속도보다 신호를 빠르게 전송하는 FTN 전송 기법을 적용함으로써 인접 심볼 간의 간섭이 발생하여 파형의 변화를 있음을 알 수 있다. 인접 심볼 간의 간섭으로 인해 신호의 파형이 왜곡되지만 이를 해결할 수 있다면 동일한 시간에 전송률을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

2.2 단일 밴드 FTN 전송 기법

단일 밴드에서의 FTN 전송 기법에 대한 송수신 모델은 Fig. 2.2과 같다.

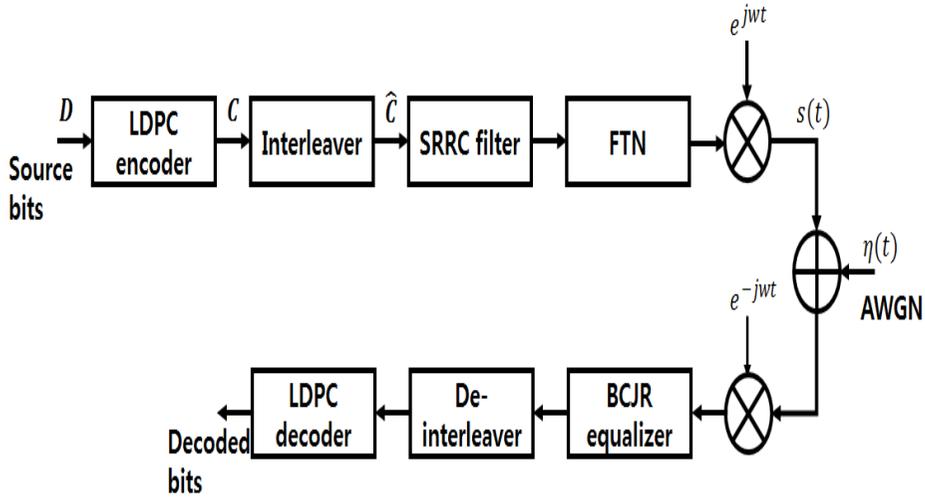


Fig. 2.2 The transceiver structure of single band FTN model

d_k 는 입력된 신호라고 할 때 입력 신호의 집합은 아래의 식과 같이 D 로 나타낼 수 있다.

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_K\} \quad (1)$$

이때, K 는 입력 데이터의 길이를 나타낸다.

C 는 LDPC 부호화기를 통과한 부호어를 나타내며 식(2)와 같다.

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\} \quad (2)$$

이때, N 은 부호어의 길이를 나타낸다.

부호어 C 는 균집 오류(burst error)를 산발 오류(random error)로 바꾸기 위한 interleaver를 수행한다. \hat{C} 는 interleaver를 수행한 후 나오는 데이터를 나타내며 아래의 식 (3)과 같다.

$$\hat{C} = \{\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_N\} \quad (3)$$

FTN 기법은 Nyquist 속도 보다 빠르게 신호를 전송하기 때문에 필연적으로 인접 심볼 간의 간섭이 발생하게 된다. FTN 전송 기법을 적용하여 인접 심볼 간의 간섭이 발생된 전송 신호 $s(t)$ 는 식(4)와 같다.

$$s(t) = \sum_n \hat{c}_n h(t - n\tau T), \tau < 1 \quad (4)$$

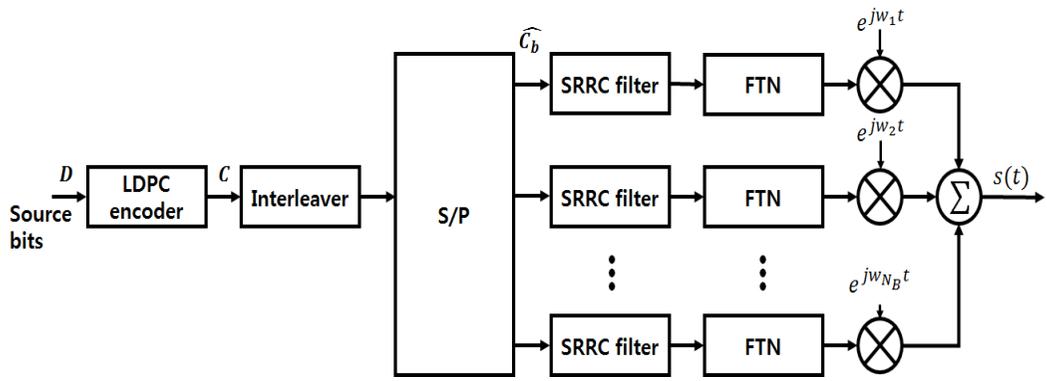
$h(t - n\tau T)$ 는 필터 응답, T 는 주기를 나타낸다. τ 은 Nyquist 속도보다 얼마만큼 신호를 빠르게 보내는 간섭 시점을 나타낸다. 간섭 비율 τ' 은 전송률 향상을 의미하며 식(5)와 같다[12].

$$\tau'(\%) = 100 \times (1 - \tau) \quad (5)$$

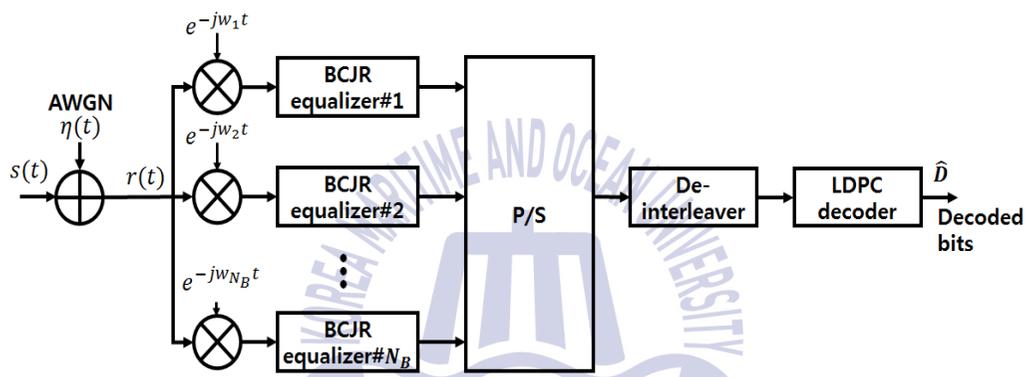
수신단에서는 송신된 신호는 인접 심볼 간의 간섭을 제거하는 BCJR 등화기를 수행한다. BCJR 등화기는 인접 심볼 간의 간섭을 제거하는 알고리즘으로 BM(Branch matrix), FSM(Forward State Matrix), BSM(Backward State Matrix)를 구하는 격자도를 이용하여 신호의 간섭을 제거한다. BCJR 등화기의 출력 값은 deinterleaver를 수행한 후 복호기에 입력되어 복호 과정을 수행한다.

2.3 다중 밴드 FTN 전송 기법

단일 밴드 FTN 전송 기법보다 효율을 향상시키기 위한 방법으로 MIMO 방식과 FTN을 연접한 MIMO-FTN 전송 기법을 제안하였다[6, 7]. 논문[6]에서는 시공간 격자 부호를 적용하였으나 전송률의 손실을 가져오며, 논문[7]에서는 W-ZF 기법을 적용하여 성능과 전송률의 향상을 가져오나 여전히 단일 밴드 FTN 전송 기법과의 성능 차이가 발생한다. 따라서 단일 밴드 FTN 전송 기법과의 성능 차이를 줄일 수 있는 방법으로 다중 밴드와 FTN 전송 기법을 결합한 다중 밴드 FTN 전송 기법을 제안한다.



(a) Transmitter



(b) Receiver

Fig. 2.3 The transceiver structure of multiband FTN model

Fig. 2.3은 다중 밴드 FTN 전송 기법의 송수신 모델을 나타낸다. 입력 신호의 집합 D 와 부호어의 집합 C 는 Fig. 2.2의 식(1), 식(2)와 동일하다.

부호화된 데이터는 interleaver를 통과한 후, N_B 개의 밴드에 균일하게 데이터를 나누어 분배하며 식(6)과 같다.

$$\widehat{C}_b = \{\widehat{c}_1, \widehat{c}_2, \dots, \widehat{c}_{N/N_B}\}, (b = 1, 2, \dots, N_B) \tag{6}$$

균일하게 나누어진 데이터는 SRRC filter를 통과하고 FTN 기법을 적용하여 송신되며, 송신 신호 $s(t)$ 는 아래의 식과 같다.

$$s(t) = \sum_{b=1}^{N_B} \sum_n \hat{c}_b(n) h(t - n\tau T_{N_B}) e^{jw_b t}, \tau < 1 \quad (7)$$

식(7)은 $N_B > 1$ 인 다중 밴드 FTN 전송 기법의 송신 신호를 나타낸다. 다중 밴드 FTN 전송 기법은 밴드 수 N_B 에 따라 비트 당 샘플 수를 증가시켜 단일 밴드 FTN 전송 기법의 전송 신호 대역폭과 동일하게 전송한다. 따라서 주기 T_{N_B} 는 $N_B=1$ 인 식(4)의 T 보다 밴드의 수 N_B 에 비례하여 증가한다. 각 밴드에서 송신되는 신호의 주파수 영역은 Fig. 2.4와 같다. 단일 밴드의 대역폭을 B 라 하였을 때 다중 밴드의 각각의 대역폭은 B/N_B 가 된다.

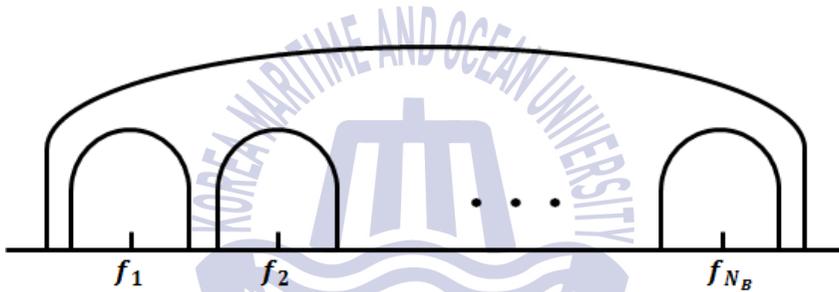


Fig. 2.4 Frequency domain of multiband

수신된 신호는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r(t) &= s(t) + \eta(t) \\ &= \sum_{b=1}^{N_B} \sum_n \hat{c}_b(t) h(t - n\tau T_{N_B}) e^{jw_b t} + \tilde{\eta}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

$\eta(t)$ 은 AWGN을 나타낸다. 인접 심볼 간의 간섭을 제거하기 위한 BCJR 등화기를 통과한 신호는 P/S(Parallel to Serial) 후 deinterleaver를 통해 신호를 재배치한다. Deinterleaver의 출력 값은 LDPC decoder를 통해 복호된 데이터 \hat{D} 을 얻는다.

2.4 FTN 신호 복호를 위한 터보 등화 기법

BCJR 기법을 이용하여 연관정 값을 LDPC 복호기에 입력하여 반복 구조로 구성된 터보 등화 기법을 사용하는 방식이다.

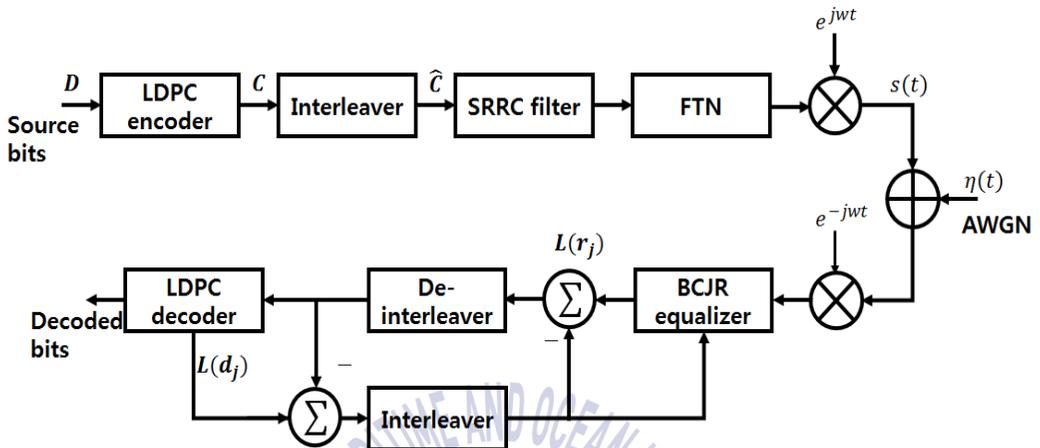


Fig. 2.5 The structure of iterative decoder based on turbo equalization

Fig. 2.5의 블록도와 같이 LDPC 부호화기를 통과하고 인터리버에서 재배열한 뒤 FTN 간섭 비율을 설정하여 FTN 송신 신호를 생성한다. 송신 신호는 AWGN 채널을 통과하고 BCJR 기반의 비터비 등화기를 이용하여 FTN으로 인해 발생하는 인접 심볼간의 간섭량을 보상해주고 디인터리빙한 후에 LDPC 복호기에서 신호를 복호한다. 터보 등화 기법은 LDPC 복호기의 LLR값을 다시 인터리빙하여 BCJR 등화기에 입력시켜줌으로써 반복 복호하여 성능을 향상시킨다.

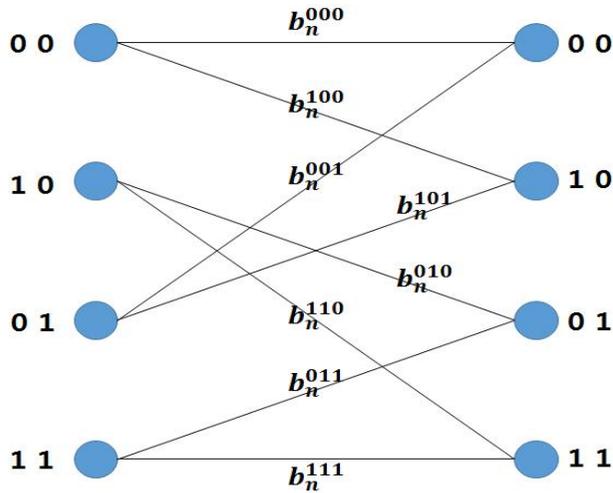


Fig. 2.6 Trellis diagram of basic method

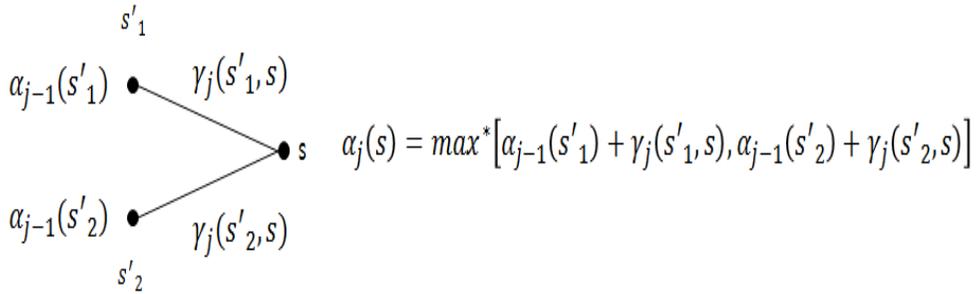
Fig. 2.6은 비터비 등화기의 격자도를 나타낸 그림이며 상태는 00, 10, 01, 11로 4가지이며 데이터에 따라 BM이 나뉘게 된다. 예를 들어 현재의 상태가 00이고 다음 데이터 0이라고 가정하였을 때 BM값은 000이고 위의 그림에서와 같이 b_n^{000} 으로 표시하게 된다. 따라서 b_n^{abc} 에서 a, b, c는 그림의 좌측의 상태를 나타내며 이의 값은 간섭량에 따라 BM값을 가지게 된다.

FTN 전송 기법으로 인한 인접 심볼 간의 간섭을 포함하는 송신 신호는 간섭 비율에 의해 얼마만큼의 간섭량을 가지는지 알 수 있기 때문에 수신 측에서 예측이 가능하다. BCJR 기반의 등화기는 이 데이터를 이용하여 BM을 구하고 BSM, FSM의 과정을 수행한 후에 LLR값을 구하여 인접 심볼간의 간섭을 보상한다.

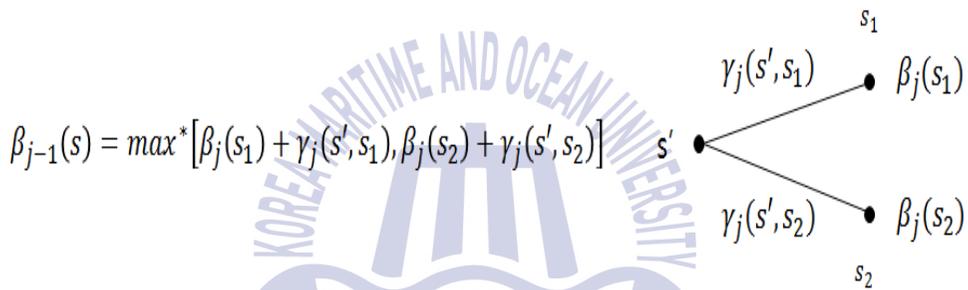
Fig. 2.7에서 j 를 시점이라고 하였을 때 $\alpha_j^{S_j}$ 과 $\beta_j^{S_j}$ 은 각각 j 시점에서의 상태 S_j 에 대한 FSM과 BSM의 계산값을 나타내고 $\gamma_j^{S_j}$ 는 BM값에 대한 계산을 나타내며, Fig. 2.7의 (a)와 (b)와 같이 나타낼 수 있다. \max^* 는 식 (9)으로 정의된다.

$$\max^*(x, y) = \max(x, y) + \log(1 + e^{|x-y|}) \quad (9)$$

Fig. 2.7에서 s_i 의 i 는 상태의 수를 나타내며, 본 논문에서는 세 개의 비트를 가지고 격자도를 그리기 때문에 s_i 는 8번째 상태 s_8 까지 존재하게 된다.



(a) FSM



(b) BSM

Fig. 2.7 Trellis structure and metric calculation

Fig. 2.7의 (a)와 (b)의 식을 일반화하면 다음과 같다.

$$\alpha_j(S^j) = \max^* [\alpha_{j-1}(S^j) + \gamma_j(S^{j-1}, S^j)] \quad (10)$$

$$\beta_{j-1}(S^{j-1}) = \max^* [\beta_j(S^j) + \gamma_j(S^{j-1}, S^j)] \quad (11)$$

이에 따라, LLR값을 계산하면 식 (12)과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned}
L(r_j) &= \max^*[\alpha_{j-1}^{S^{j-1}} + b_j^{S^{j-1}S^j} + \beta_j^{S^j}](S^{j-1}, S^j) : d_j = 0 \\
&\quad - \max^*[\alpha_{j-1}^{S^{j-1}} + b_j^{S^{j-1}S^j} + \beta_j^{S^j}](S^{j-1}, S^j) : d_j = 1
\end{aligned}
\tag{12}$$

식 (12)에서 구한 $L(r_j)$ 는 BCJR 등화기의 LLR 출력값을 구한 것으로 이 값이 LDPC 복호기의 입력값으로 들어가게 된다.

$L(d_j)$ 는 LDPC 복호기의 LLR값으로, 반복 복호를 하면서 더해지는 외부 입력값이 된다. 이 값은 식 (13)과 같이 일괄적으로 더하여 BM에 업데이트 되어 진다.

$$\hat{b}_j^{S^{j-1}S^j} = b_j^{S^{j-1}S^j} + L(d_j) \tag{13}$$

이렇게 외부 입력값이 더해진 BM을 이용하여 식(12)와 같이 LLR값을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
L(r_j) &= \max^*[\alpha_{j-1}^{S^{j-1}} + \hat{b}_j^{S^{j-1}S^j} + \beta_j^{S^j}](S^{j-1}, S^j) : d_j = 0 \\
&\quad - \max^*[\alpha_{j-1}^{S^{j-1}} + \hat{b}_j^{S^{j-1}S^j} + \beta_j^{S^j}](S^{j-1}, S^j) : d_j = 1
\end{aligned}
\tag{14}$$

Fig. 2.5의 블록도에 따라 식 (14)에서 구한 LLR값에서 외부 입력 정보를 다시 빼주어 반복 복호하여 성능을 향상시킨다.

제 3 장 UEP 기반의 FTN 전송 기법 송수신 모델 제안

다중 밴드 FTN 전송 기법은 FTN 기법의 적용으로 인한 간섭을 최소화하기 위해 부호어를 다수의 밴드에 나누어 할당하는 방법이다. 하지만 각 밴드에서 샘플 수의 증가로 인한 잡음 평균 효과로 성능이 향상되나 샘플 수의 증가로 인해 전송률의 손실을 초래할 수 있다. 본 장에서는 단일 밴드 FTN 전송 기법보다 성능을 향상시키기 위해 우선 순위 알고리즘을 사용한 UEP 기반의 FTN 전송 기법을 제안한다. 다중 밴드 FTN 전송 기법의 경우 각각의 밴드에 할당되는 FTN 간섭 비율을 모두 동일하게 설정하여 신호를 전송하였다. 그러나 UEP 설정 방법은 다중 밴드 FTN 전송 기법과는 다르게 임의로 할당할 간섭 비율의 개수를 설정하여 그에 맞게 부호어를 나누고, 나뉜 부호어에 간섭 비율을 다르게 설정하는 방법이다. 즉, UEP 설정 방법은 할당할 임의의 간섭 비율의 개수를 설정한 후 우선 순위 알고리즘을 사용하여 부호어의 중요도를 판단하여 간섭 비율을 다르게 설정하는 방법이다. 또한 5G와 같은 massive 환경에서 일어나는 다중 경로 간섭에서 성능을 도출하기 위해 주파수 선택적 페이딩에서 단일 밴드와 비교하여 보다 효율적인 다중 밴드를 사용하였지만 성능을 도출하지 못했다. 따라서 다중 경로가 존재하는 채널에서 효율적인 OFDM 기법을 FTN 전송 기법과 결합한 OFDM-FTN 전송 기법을 사용하였다. 또한, OFDM-FTN 전송 기법의 성능을 보다 향상시키기 위해 UEP 설정을 한 OFDM-FTN 전송 기법을 제안한다.

3.1 UEP 기반의 FTN 전송 기법 송수신 모델

본 장에서는 전송되는 신호의 중요도를 판단하는 우선 순위 알고리즘을 이용하여 부호어의 중요도를 판단하고, 부호어의 중요도에 따라 FTN 간섭 비율을 다르게 함으로써 단일 밴드 FTN 전송 기법보다 성능을 향상시키는 UEP 기반

의 FTN 전송 기법 송수신 모델을 제안한다. 우선, UEP 설정을 위해 LDPC 부호화 과정을 수행한 부호어의 중요도를 판단해야 한다. 부호어의 중요도를 판단하기 위해 LDPC 복호 과정에서 사용되는 HSS (Horizontal Shuffle Scheduling) 기반의 LDPC 복호 방법[13]을 이용하여 중요도를 판단하였다. 논문 [14]에서의 HSS 기반의 LDPC 복호 방법은 기존 LDPC 복호 방법에서 보다 고속화를 위한 방법으로 사용하였으나, 본 논문에서는 HSS 기반의 LDPC 복호 과정을 이용하여 우선 순위 알고리즘을 구성하였다. 우선 순위 알고리즘은 부호어의 중요도를 판단하고, 그에 따라 부호어를 재배치하는 알고리즘이다. Fig. 3.1은 본 논문에서 제안하는 UEP 기반의 FTN 신호 송수신 모델이다.

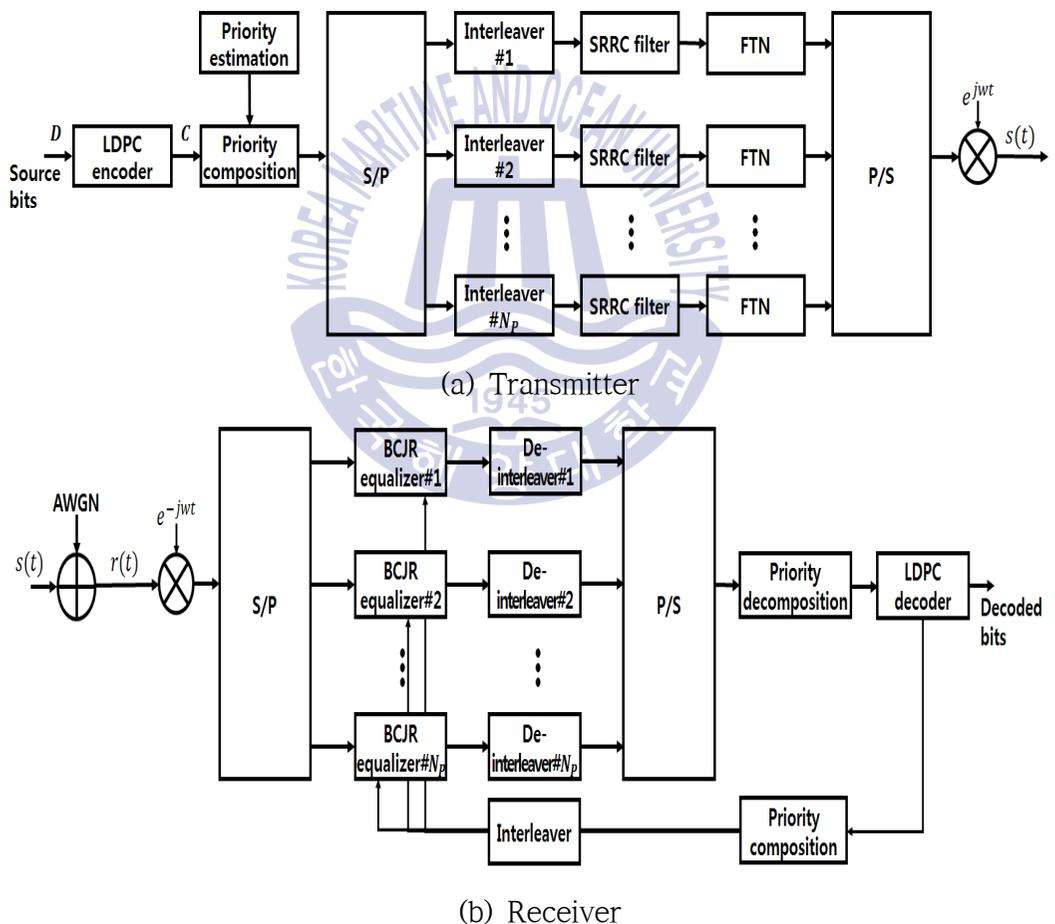


Fig. 3.1 The transceiver structure of FTN model based on UEP algorithm

Fig. 3.1에서 N_p 는 UEP 설정 시 사용되는 간섭 비율의 개수이다. 그림과 같이 UEP 기반의 FTN 전송 기법의 송수신 과정은 송신부에서 source bits를 입력받아 LDPC 부호화 과정을 수행한다. UEP 설정을 위한 우선 순위 알고리즘은 송신부의 부호화 과정에서 사용되는 LDPC 부호화기의 부호화율과 동일한 H-matrix를 이용하여 수신부에서의 HSS 기반의 LDPC 복호 과정에서 우선적으로 사용되는 비트 노드들의 중요도를 판단한 후 사용하고자하는 간섭 비율의 개수에 맞게 나누어 배치한다. 각각의 부호화된 비트들의 우선 순위에 따라 우선 순위가 높다면 복호 시 성능을 좌우하는 중요한 비트이므로 FTN 간섭 비율을 낮게 설정하고, 우선 순위가 낮은 비트는 성능에 크게 영향을 끼치지 않으므로 FTN 간섭 비율을 높게 설정하여 전체적으로 단일 채널에서의 FTN 전송 방식의 간섭 비율과 동일하거나 높게 하여 전송 효율을 동일하거나 향상시키면서 성능을 기존 방식보다 향상시키는 알고리즘이다. UEP 설정 시 각각 적용하는 서로 다른 간섭 비율 $\tau'_1, \tau'_2, \dots, \tau'_{N_p}$ ($\tau'_1 < \tau'_2 < \dots < \tau'_{N_p}$)의 평균값이 단일 채널 FTN 전송 기법의 간섭 비율과 동일하게 설정하였다.

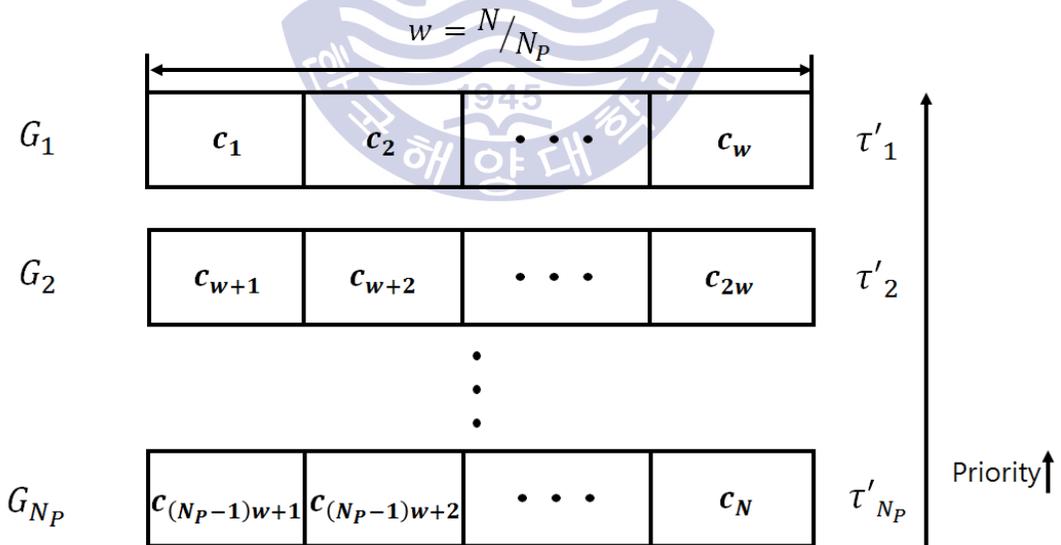


Fig. 3.2 The UEP setting according to N_p

Fig. 3.2는 N_p 에 따른 UEP 설정을 그림으로 나타내었다. N_{G_p} 는 부호어들이 나뉜 부호어 그룹의 수를 나타내고, G_p 는 각 그룹에 할당되는 비트의 수를 나타낸다. 예를 들어 $N_p=4$ 인 경우 간섭 비율의 개수는 4개이므로 각 간섭 비율들이 적용될 그룹의 수 $G_p=4$ 가 되며 각 그룹에 속한 비트의 수 w 는 부호어의 길이가 $N=64800$ 라고 가정하였을 때 간섭 비율의 수 N_p 로 나누어 16200개가 된다. 또한, Fig. 3.2에서의 간섭 비율은 $\tau'_1 < \tau'_2 < \dots < \tau'_{N_p}$ 인 경우를 나타내므로 부호어 그룹인 각각의 G_p 의 중요도는 $G_1 > G_2 > \dots > G_{N_p}, P=1, 2, \dots, N_p$ 가 된다. 그 후 SRRC filter를 이용하여 중요도를 판단한 N_{G_p} 에 FTN 간섭 비율을 다르게 설정하여 FTN 신호를 생성한다. AWGN 채널을 통과한 송신 신호는 복조 과정을 거쳐 인접 심볼 간의 간섭을 제거하는 BCJR 등화기를 통과한다. 통과한 신호는 de-interleaver를 수행하고 우선 순위 알고리즘에 따라 배치된 비트들을 역 순으로 재배치 후 HSS 기반의 LDPC 복호 과정을 수행한다. 복호된 신호는 터보 부호 기반의 복호기를 통해 반복하여 수행한다.

3.1.1 HSS 기반의 LDPC 복호 방식에 의한 UEP 설정 방식

기존 다중 밴드 FTN 전송 기법의 경우 다수의 밴드를 사용하여 송신하지만 각 밴드에 할당되는 FTN 간섭 비율은 모든 밴드가 동일하다. 하지만 UEP 기반의 FTN 신호를 생성하기 위해선 다중 밴드와 같이 부호화된 신호를 임의의 개수로 나눈 후 각각의 FTN 간섭 비율을 다르게 할당해야 한다. 이 과정에서 각 비트의 중요도를 판단하는 과정을 수행하는 우선 순위 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 비트의 중요도를 판단하는 우선 순위 알고리즘은 LDPC 복호 방법 중 HSS 기반의 LDPC 복호 방법의 과정을 이용하여 구성하였다. Fig. 3.2는 HSS 기반의 LDPC 복호 방법의 흐름도를 나타낸다.

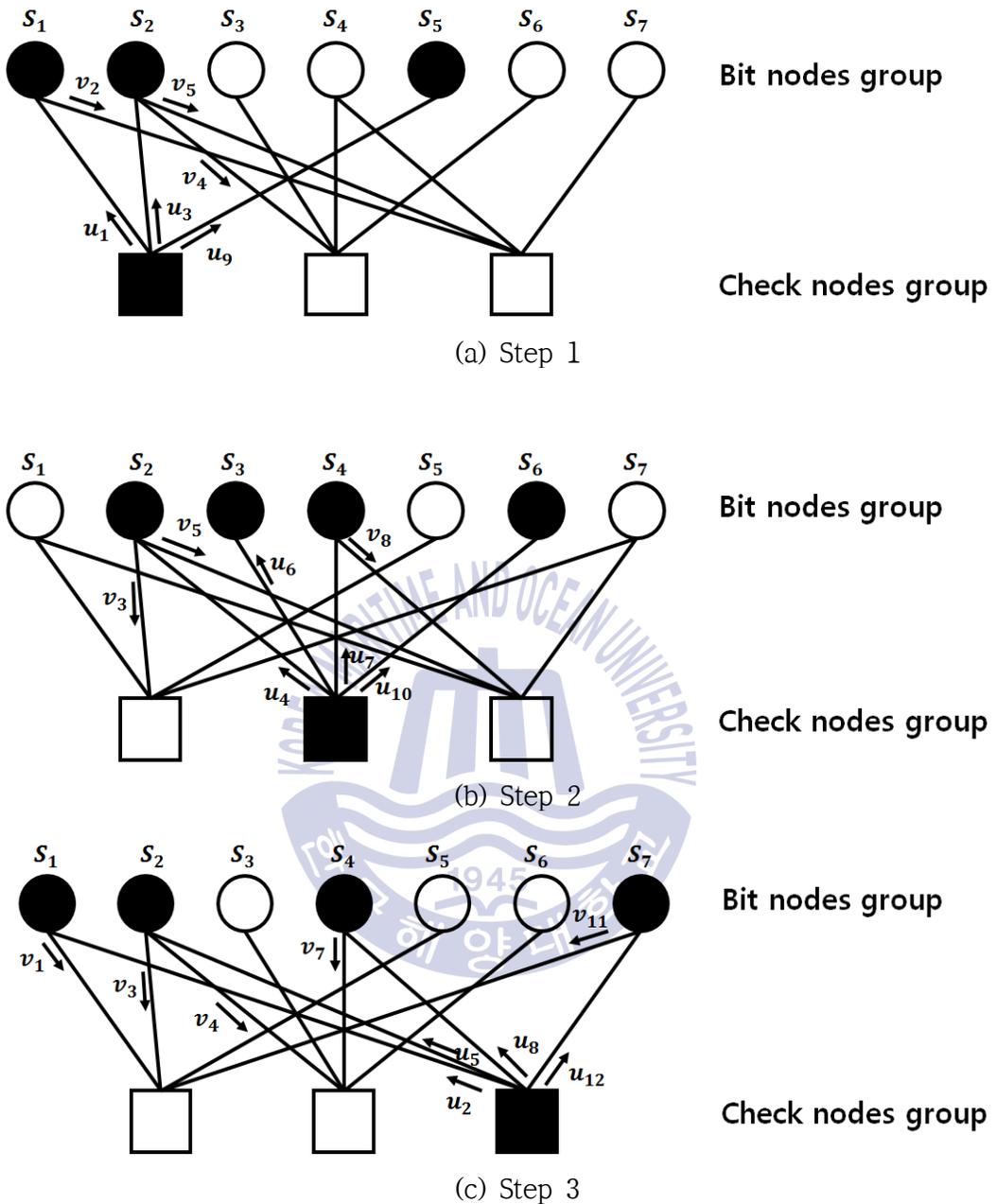


Fig. 3.3 LDPC HSS decoding flow

HSS 기반의 LDPC 복호 과정은 Fig. 3.3의 흐름과 같이 설명될 수 있다. 비트 노드들의 초기 값은 수신 신호를 나타내며, Step 1에서 구한 업데이트된 비트 노드들은 step 2에서 다른 체크 노드들의 값을 구하기 위한 값으로 적용된다.

Step 3에서 구하는 체크 노드들의 값들은 이전의 step들에서 업데이트된 비트 노드 값들을 적용하기 때문에 적은 반복으로 성능을 동일하게 도출할 수 있다. 비트 노드의 각 node 값을 이용하여 각 비트의 값을 아래의 식 (15)과 같이 구하여 결정할 수 있다.

$$S_i = LLR_i + \sum_{i=1}^{d_v} u_i \quad (15)$$

S_i 는 i 번째 비트 노드의 최종 값을 나타내고, LLR_i 는 i 번째 수신 데이터를 나타낸다. d_v 는 비트 노드에 연결된 가지의 수이고, u_i 는 체크 노드의 업데이트를 통해 얻어진 각 가지의 값이다. 체크 노드 업데이트 값 u_i 는 아래의 식과 같다.

$$u_i = \bigoplus_{k=1, k \neq i}^{d_c} v_k \quad (16)$$

v_k 는 k 번째 비트 노드에서 i 번째 체크 노드로 향하는 가지를 나타내고 d_c 는 i 번째 체크 노드에 연결되는 가지의 수를 나타내고, 위의 수식에서 \bigoplus 는 논문 [14]를 참고하였다. HSS 기반의 LDPC 복호 과정을 통해 최종 비트 노드 값인 S_i 을 구하는 방법이며 그 과정에서 체크 노드 업데이트 값인 u_i 가 필요하게 되고 우선적으로 구해야한다. 따라서 위의 수식들을 통해 HSS 기반의 LDPC 복호 과정은 체크 노드들이 순서적으로 업데이트를 수행하며 반복하게 된다. 아래의 그림은 UEP 설정을 위한 우선 순위 알고리즘을 그림으로 나타내었으며 N_{G_c} 는 체크 노드 그룹의 개수를 의미하고 N_{G_b} 는 비트 노드 그룹의 개수를 의미한다.

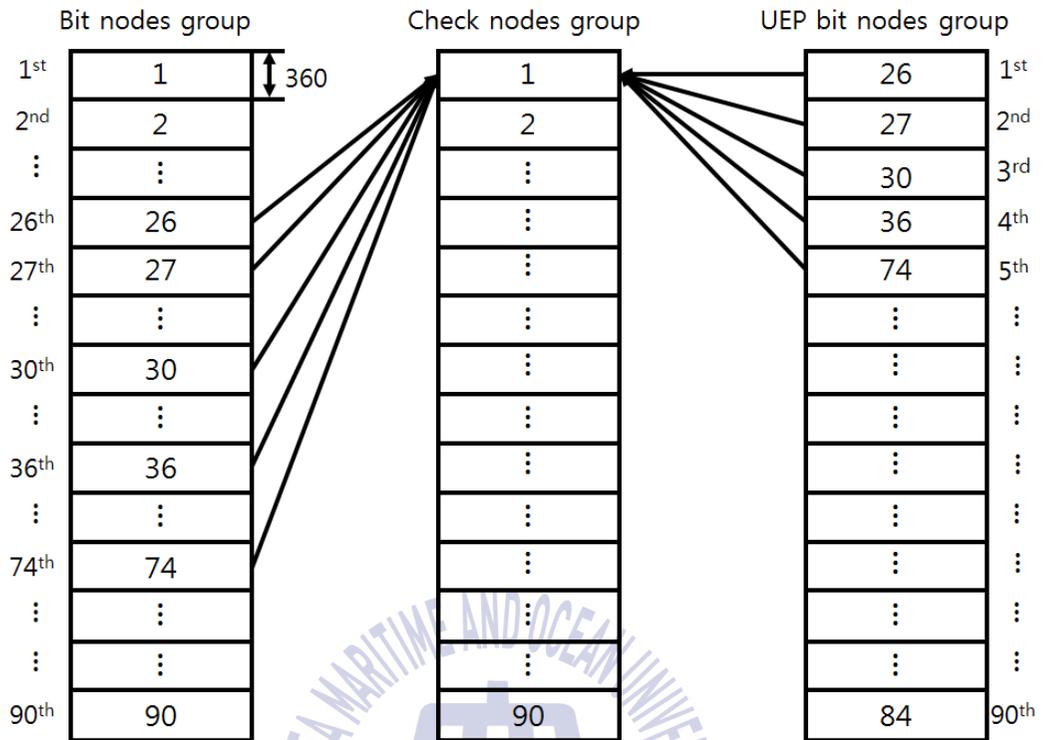


Fig. 3.4 The order of bit nodes group with or without UEP algorithm

Fig. 3.4는 UEP 설정의 유무에 따른 비트 노드의 배치를 예시로 나타내었다. $N=64800$ 개를 가지는 DVB-S3 표준안의 LDPC 채널 부호화 방식에서 부호화율은 $1/2$ 이고 한 그룹은 360개의 데이터를 가진다. N_{G_c} 는 체크 노드의 개수가 32400개이므로 90개이며 N_{G_b} 는 parity 부분을 제외한 데이터 부분만을 사용하여 $K=32400$ 이므로 90개이다. 기존의 LDPC 복호 방법에서 각 비트 노드들은 부호화율에 맞는 H-matrix에 따라 체크 노드들과 가지를 통해 연결된다. 위의 그림에서 왼쪽은 블록은 기존 방식에서 전송되는 비트 노드들의 순서를 나타낸다. 26, 27, 30, 36, 74번째의 비트 노드들이 1번째 체크 노드들과 연결되게 되는데 앞서 그림으로 보았던 HSS 복호 흐름도와 같이 HSS 알고리즘을 사용한 LDPC 복호 방법에서는 체크 노드들의 순서대로 복호를 수행하기 때문에 기존의 방법과 같은 순서로 FTN 신호를 전송하게 되면 체크 노드들에 들어가는 신호가 각각의 다른 간섭 비율을 가지고 들어오기 때문에 성능에 영향을 받을 수

있다. 따라서 우선 순위 알고리즘을 통하여 오른쪽 블록과 같이 HSS 알고리즘의 LDPC 복호 과정에 따라 순차적으로 복호되는 체크 노드들과 연결되는 비트 노드들을 우선적으로 배치하여 전송한다. 또한, 배치의 순서는 비트 노드들이 중복되지 않도록 설정한다. 아래의 표는 $N=64800$ 개를 가지는 DVB-S3 표준안에 제시된 부호화율 1/2인 H-matrix에서 각 체크 노드들과 연결되는 비트 노드들의 순서와 우선 순위 알고리즘을 통한 비트 노드들 배치 순서를 나타낸다.



Table 3.1 Number of N_{G_B} connected to N_{G_C}

N_{G_C} number	N_{G_B} number	N_{G_C} number	N_{G_B} number
1	26, 27, 30, 36, 74	46	1, 5, 18, 22, 81
2	10, 10, 20, 37, 41	47	7, 21, 33, 71, 82
3	4, 16, 27, 38, 51	48	0, 26, 50, 65, 83
4	2, 6, 16, 39, 68	49	0, 10, 14, 35, 84
5	9, 24, 33, 40, 82	50	0, 5, 29, 33, 85
6	3, 13, 24, 30, 41	51	1, 11, 12, 60, 86
7	14, 21, 32, 42, 76	52	1, 3, 21, 85, 87
8	4, 28, 34, 43, 89	53	5, 17, 73, 87, 88
9	16, 18, 30, 44, 87	54	10, 23, 40, 68, 89
10	21, 24, 45, 58, 79	55	0, 3, 6, 8, 83
11	1, 4, 5, 37, 46	56	1, 25, 30, 53, 88
12	8, 19, 20, 32, 47	57	2, 6, 28, 30, 42
13	15, 26, 33, 48, 78	58	3, 3, 12, 26, 60
14	8, 16, 46, 49, 66	59	4, 4, 23, 29, 35
15	0, 18, 50, 63, 67	60	5, 17, 29, 44, 54
16	13, 23, 30, 51, 63	61	6, 12, 21, 38, 57
17	6, 11, 52, 59, 73	62	7, 12, 31, 61, 70
18	8, 27, 49, 53, 56	63	8, 12, 12, 35, 65
19	14, 23, 25, 54, 81	64	1, 1, 9, 29, 34
20	2, 15, 28, 38, 55	65	3, 10, 18, 23, 33
21	11, 19, 31, 56, 74	66	11, 13, 17, 47, 72
22	0, 8, 11, 57, 67	67	7, 12, 15, 24, 81
23	19, 31, 58, 71, 85	68	9, 13, 30, 34, 49
24	3, 9, 19, 45, 59	69	6, 14, 31, 32, 43
25	4, 17, 35, 52, 60	70	15, 22, 26, 79, 84
26	19, 24, 27, 61, 78	71	1, 13, 16, 20, 32
27	2, 29, 52, 62, 83	72	2, 17, 17, 24, 28
28	7, 13, 34, 63, 66	73	2, 18, 34, 39, 53
29	18, 25, 32, 45, 64	74	18, 19, 27, 35, 62
30	5, 6, 14, 35, 65	75	9, 9, 20, 22, 75
31	20, 22, 47, 66, 86	76	21, 22, 23, 69, 77
32	3, 4, 46, 67, 80	77	14, 22, 26, 29, 54
33	6, 17, 25, 64, 68	78	7, 23, 24, 28, 36
34	15, 16, 35, 40, 69	79	13, 15, 24, 41, 44
35	11, 12, 70, 77, 88	80	2, 22, 25, 48, 82
36	14, 22, 28, 36, 71	81	2, 13, 26, 64, 80
37	5, 21, 25, 51, 72	82	16, 27, 34, 72, 76
38	4, 10, 31, 61, 73	83	0, 9, 28, 34, 55
39	7, 10, 37, 50, 74	84	7, 27, 29, 33, 62
40	20, 26, 48, 55, 75	85	11, 18, 28, 30, 69
41	15, 20, 70, 75, 76	86	9, 10, 29, 31, 33
42	17, 31, 57, 58, 77	87	8, 23, 31, 32, 32
43	16, 20, 27, 78, 86	88	11, 25, 33, 42, 84
44	14, 21, 59, 79, 89	89	5, 7, 15, 34, 56
45	8, 19, 25, 39, 80	90	0, 19, 32, 35, 43

각 체크 노드들과 연결된 비트 노드들의 순서는 위의 Table 3.1과 같으며, $N=64800$ 개를 가지는 DVB-S3 표준안에 제시된 LDPC 채널 부호화기에서 부호화율 1/2일 때 check node와 bit node는 각각 360개씩 그룹지어진다. 체크 노드들의 수는 90개, 비트 노드 그룹의 수는 180개가 된다. 180개의 비트 노드 그룹에서 패리티 부분인 90개는 데이터 부분의 90개 그룹을 우선적으로 복호한 뒤에 복호 과정을 수행하기 때문에, 데이터 부분인 90개의 위치만 사용하여 우선 순위 알고리즘을 통해 UEP 설정을 하게 되며 나머지 패리티 부분의 90개는 기존의 순서와 같이 전송하게 된다. 예를 들면 UEP 설정을 하지 않았을 경우 보내어지는 신호는 비트 노드 그룹들이 순서적으로 전송되어지나, 우선 순위 알고리즘을 통해 UEP 설정을 하여 보내게 될 경우 Fig. 3.3과 같이 1번째 비트 노드 그룹이 아닌 26번째 비트 노드 그룹부터 전송을 하게 된다. 따라서 UEP 설정을 위한 우선 순위 알고리즘은 전송하고자하는 부호화율의 H-matrix에서 체크 노드들과 연결된 비트 노드 그룹들의 위치를 이용하여 N_p 에 맞게 우선 순위를 판정하여 배치한다.

3.2 OFDM 기법과 결합한 FTN 전송 기법

단일 밴드 FTN 전송 기법과 같이 단일 반송파로 고속 통신을 할 경우 인접 심볼 간의 간섭을 야기하여 성능의 저하를 초래한다. 따라서 단일 밴드 FTN 전송 기법의 고속 통신은 고속화로 인하여 발생하는 간섭으로 인해 한계가 있음을 알 수 있다. 따라서 다수의 반송파를 사용하여 데이터를 저속으로 통신을 하며 전송 효율을 향상시킬 수 있는 방법으로 OFDM 기법이 제시되었다. OFDM은 고속의 송신 신호를 다수의 직교하는 협대역 반송파로 다중화시키는 변조 방식을 말한다. OFDM은 데이터를 다수의 부반송파를 사용하여 전송하는데 따라서 다중의 채널로 동시에 전송한다.

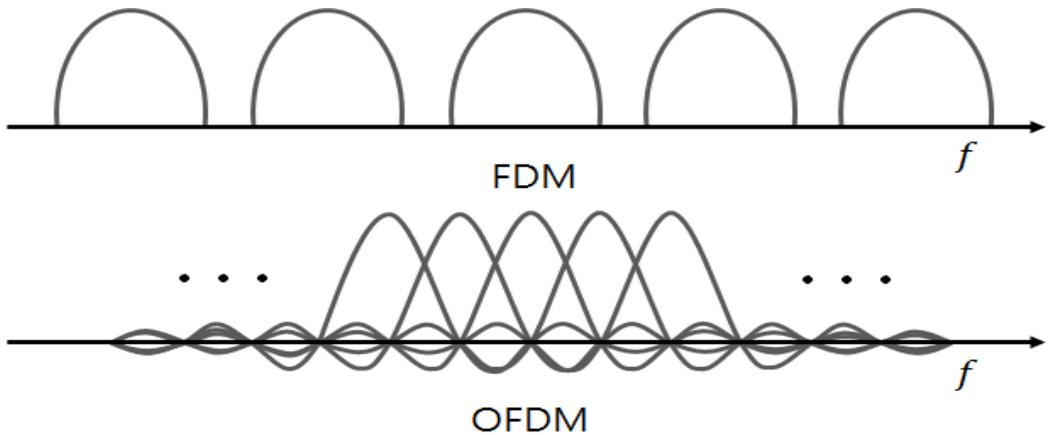
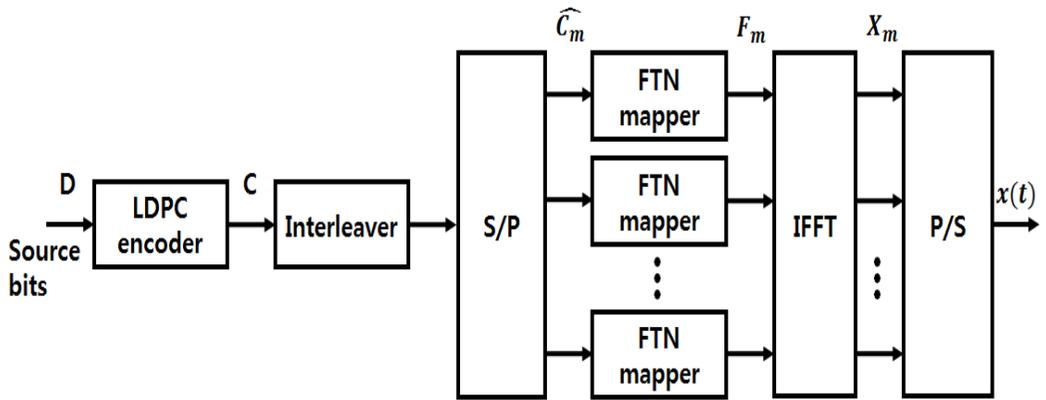


Fig. 3.5 Frequency domain of FDM method and OFDM method

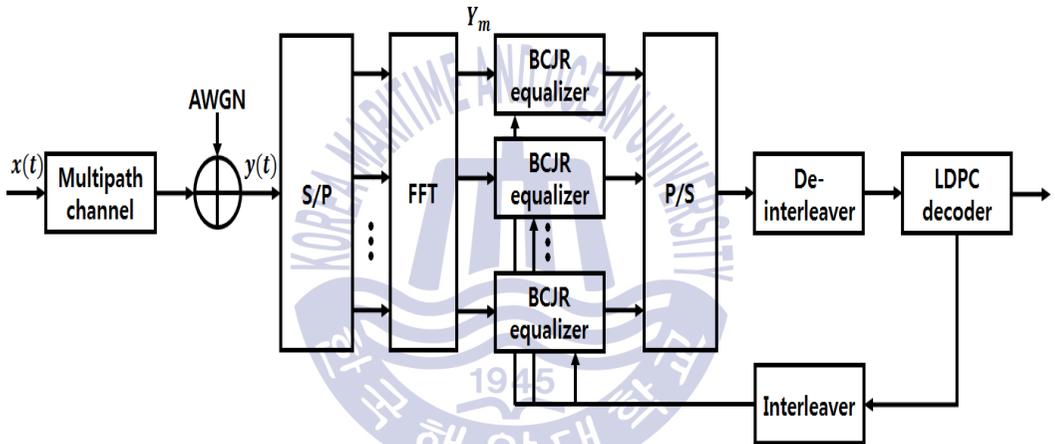
Fig. 3.5를 통해 OFDM 기법과 FDM 기법을 비교하였을 때 가장 큰 차이점은 OFDM 기법은 직교성을 가지는 것이다. 다수의 부반송파가 모두 직교성을 가져 각각의 부반송파간의 간섭이 발생하지 않는다. 따라서 OFDM 기법을 사용하여 전송을 할 경우 수신단에서 부반송파간의 직교성이 유지된다면 송신 신호를 정확히 복조 할 수 있으며, FDM 기법의 경우 각 채널간의 간섭을 막기 위해 guard band를 사용하였지만 OFDM 기법의 경우 직교성으로 인해 각 부반송파 사이에 guard band를 사용하지 않아 스펙트럼 효율적으로 우수함을 알 수 있다.

또한 OFDM 기법은 다중 경로가 존재하는 채널에서 효율적이다. OFDM 기법에서 다중 경로로 인한 성능 저하를 막기 위해 guard interval 또는 CP(Cyclic Prefix) 방법을 사용한다. Guard interval은 OFDM 기법을 사용하여 신호를 전송하였을 때 guard 구간을 배치하여 인접 심볼 간의 간섭이 생기지 않도록 하며 guard 구간의 크기는 다중 경로 지연시간보다 커야 한다. 다른 방법으로 CP 방법이 존재하며 이는 다중 경로로 의해 발생하는 지연을 막기 위해 전송되는 신호의 뒷부분의 일정 심볼을 가져와 앞의 신호로 배치하는 방법이다.

본 장에서는 스펙트럼 효율이 좋으며 다중 경로 채널에서 효과적인 OFDM 기법과 FTN 전송 기법을 연접한 OFDM-FTN 전송 기법을 사용하였으며 송수신 구조는 아래의 그림과 같다.



(a) Transmitter



(b) Receiver

Fig. 3.6 The transceiver structure of OFDM-FTN model

Fig. 3.6은 OFDM-FTN 송·수신 모델이다. 전송하고자 하는 원 신호 비트열 D 와 부호화기를 통과한 부호화 된 데이터 C 는 식(1), 식(2)과 동일하다. 부호화 된 데이터는 인터리버를 통과한 후, S/P에 의해 부반송파의 개수 M 개씩 나누며 아래의 식 (17)과 같이 \hat{C}_m 로 나타낸다.

$$\hat{C}_m = \{\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_{N/M}\} \quad (17)$$

\hat{C}_m 은 FTN mapper를 통과하며, X_m 은 각 FTN mapper에 설정된 간섭 비율을 적용하여 생성된 신호이다. X_m 은 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 통과하며 송신 신호는 아래의 식 (18)와 같다.

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} X_m(t) e^{j2\pi t m/M} \quad (18)$$

송신 신호는 L 개의 다중 경로를 가진 다중 경로 채널과 AWGN 채널을 통과한다. 수신 신호는 아래의 식 (19)과 같다.

$$y(t) = \sum_{l=0}^{L-1} s(t-l) h_l(t) + \eta(t) \quad (19)$$

L 은 전체 다중 경로의 개수를 나타내며 l 은 전체 다중 경로 중 l 번째 경로를 의미한다. $h_l(t)$ 은 l 번째 경로에 있는 채널 응답 계수를 나타낸다.

수신 신호 y_j 는 S/P에 의해 M 개씩 나누어 FFT(Fast Fourier Transform)를 통과한다. FFT를 통과한 신호 $Y_m(t)$ 는 아래의 식과 같다.

$$Y_m(t) = \sum_{m=0}^{N/M-1} y(t) e^{-j2\pi t m/M} \quad (20)$$

FFT를 통과한 신호 $Y_m(t)$ 는 P/S 통과 후 역-인터리버를 수행한다. 역-인터리버를 수행한 신호는 LDPC 복호기를 통해 복호된 데이터를 얻는다.

제 4 장 모의실험 결과 분석

본 장에서는 두 가지의 제안한 방법을 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 첫째, 우선 순위 알고리즘을 이용하여 부호화된 데이터의 중요도를 판단하여 각각의 FTN 간섭 비율을 다르게 함으로써 단일 밴드 FTN 전송 기법보다 성능을 향상시키는 UEP 기반의 FTN 전송 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 둘째, 5G와 같은 massive 이동 통신망에서와 같이 다중 경로가 존재하는 채널에서 효율적인 OFDM 기법을 FTN 전송 기법과 결합한 OFDM-FTN 전송 기법이 실제 다중 경로가 존재하는 채널에서 효율적인가를 판단하고, 보다 성능을 향상시키기위해 UEP 설정을 추가한 UEP 기반의 OFDM-FTN 기법의 성능을 UEP 설정 유무에 따라 시뮬레이션을 통해 성능을 비교 분석하였다.

4.1 UEP 기반의 FTN 전송 기법 성능 비교 분석

FTN 전송 기법의 사용함으로써 필연적으로 발생하는 간섭을 각 밴드에 샘플 수의 증가로 간섭을 최소화하는 다중 밴드 FTN 전송 기법을 사용하여 단일 밴드 FTN 전송 기법보다 성능을 향상시키고자 하였다. 하지만 밴드의 수를 늘림으로써 수신 SNR 측면에서는 성능이 향상되나 입력 SNR 기준의 시뮬레이션 결과 성능이 동일하였다. 따라서 단일 밴드 FTN 전송 기법보다 성능을 향상시키기위해 우선 순위 알고리즘을 사용하여 송신부에서 LDPC encoder를 수행한 부호화된 비트들의 중요도를 판단하여 재배치한 UEP 기반의 FTN 전송 기법을 시뮬레이션을 통해 성능을 비교 분석하였다. 아래의 표는 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다.

Table 4.1 Simulation parameters

Total number of data	10^6
Channel coding	LDPC(HSS algorithm)
Coding rate	1/2
Modulation	BPSK
Number of sampling bits(SRRC filter)	32
Roll off factor	0.35
Interference rate(τ')	25%, 37.5%
LDPC inner iteration	60
Number of N_p	4

시뮬레이션의 환경은 위의 Table 4.1의 파라메타를 이용하였다. UEP 설정 과정에서 $N_p=4$ 로 설정하였으며 $N=64800$ 개인 DVB-S3 표준안에 제시된 LDPC 채널 부호화 기법에서 부호화율 1/2인 H-matrix를 사용하였다. UEP 설정 시 64800개의 부호화된 신호에서 우선 순위 알고리즘을 사용하여 N_p 의 개수에 맞게 배치하여 각각의 서로 다른 간섭 비율을 설정하여 전체 N_p 의 간섭 비율 평균이 25% 또는 37.5%로 설정하였으며, 단일 채널 FTN 전송 기법의 경우 부호화된 신호에 25% 또는 37.5%의 간섭 비율로 고정시켰다. 시뮬레이션은 UEP 유무에 따른 성능과 UEP 설정 과정에서 각각의 N_p 에 할당되는 간섭 비율에 따른 성능을 분석하였다. Table 4.2에서 Table 4.5는 UEP 설정 과정에서 각각의 N_p 에 할당되는 간섭 비율을 나타내었으며, Table 4.2와 Table 4.3은 전체 간섭 비율의 평균 값이 25%로 같으나 Table 4.3의 간섭 비율이 Table 4.2의 간섭 비율보다 25% 기준으로 폭을 더 크게 설정하여 UEP 설정 시 간섭 비율의 폭에 따른 성능을 분석하였다. Table 4.4와 Table 4.5 또한 간섭 비율의 평균이 37.5%이며 간섭 비율의 폭에 따른 성능을 분석하였다.

Table 4.2 UEP parameters setting I ($\tau'=25\%$)

	Interference rate(%)			
	τ'_1	τ'_2	τ'_3	τ'_4
Type1	18.75	21.875	28.125	31.25
Type2	18.75	28.125	21.875	31.25
Type3	31.25	28.125	21.875	18.75
Type4	31.25	21.875	28.125	18.75

Table 4.3 UEP parameters setting II ($\tau'=25\%$)

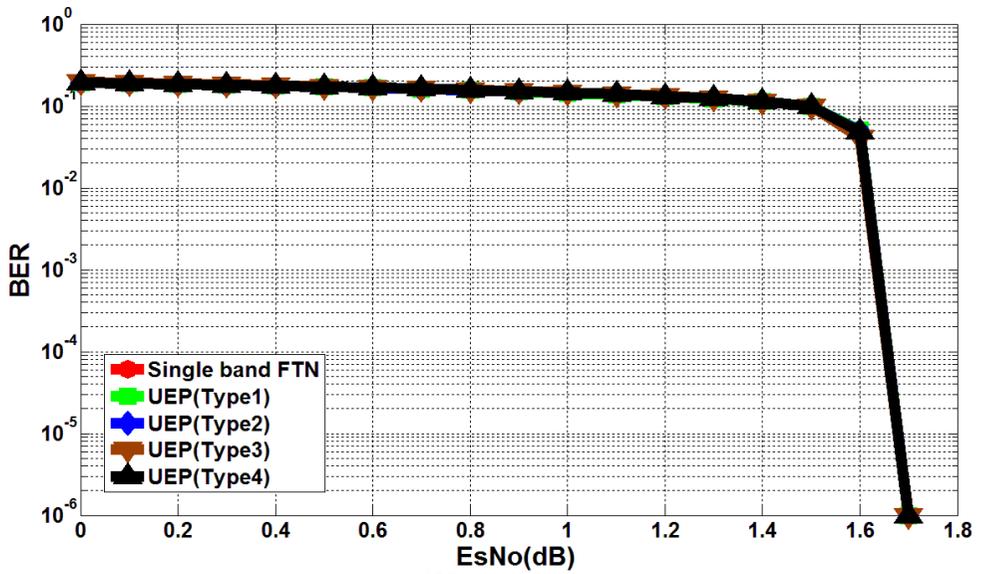
	Interference rate(%)			
	τ'_1	τ'_2	τ'_3	τ'_4
Type1	6.25	9.375	40.625	43.75
Type2	6.25	40.625	9.375	43.75
Type3	43.75	40.625	9.375	6.25
Type4	43.75	9.375	40.625	6.25

Table 4.4 UEP parameters setting III ($\tau'=37.5\%$)

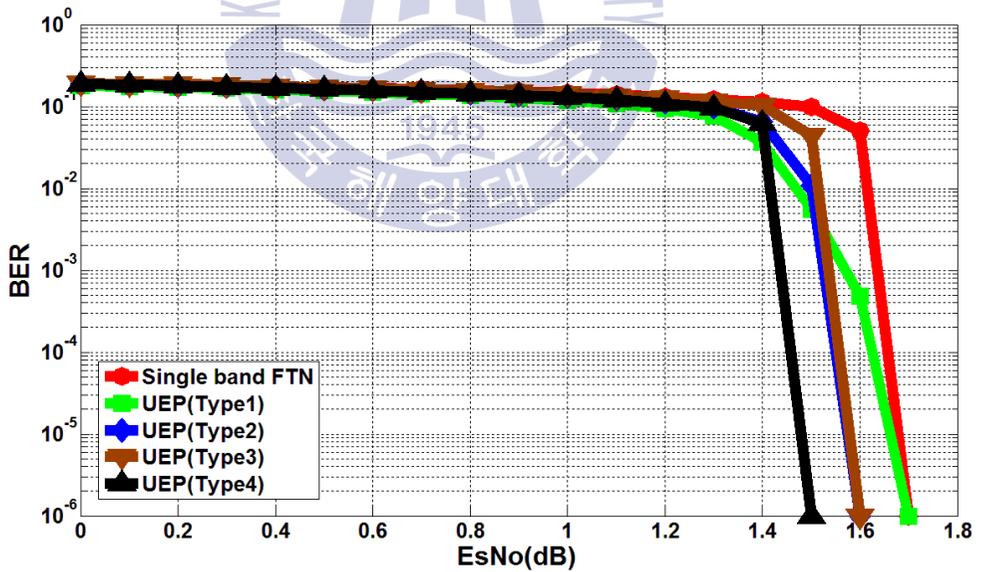
	Interference rate(%)			
	τ'_1	τ'_2	τ'_3	τ'_4
Type1	31.25	34.375	40.625	43.75
Type2	31.25	40.625	34.375	43.75
Type3	43.75	40.625	34.375	31.25
Type4	43.75	34.375	40.625	31.25

Table 4.5 UEP parameters setting IV ($\tau'=37.5\%$)

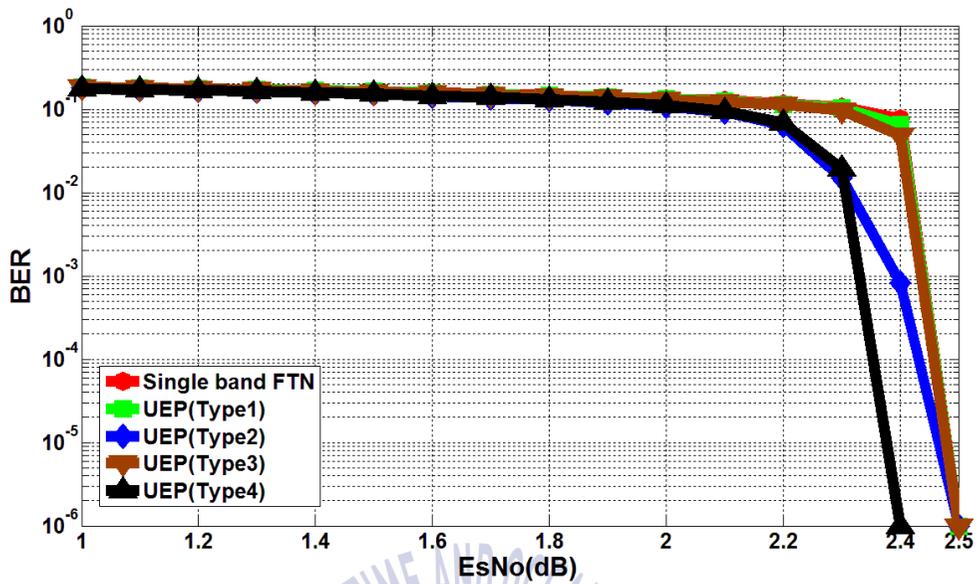
	Interference rate(%)			
	τ'_1	τ'_2	τ'_3	τ'_4
Type1	25	28.125	46.875	50
Type2	25	46.875	28.125	50
Type3	50	46.875	28.125	25
Type4	50	28.125	46.875	25



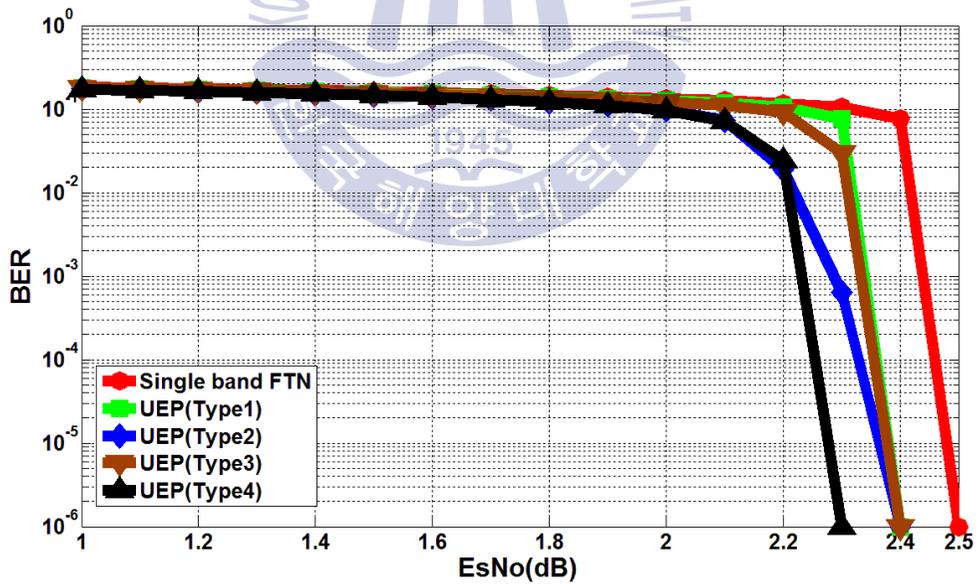
(a) The performance for Table 4.2 ($\tau'=25\%$)



(b) The performance for Table 4.3 ($\tau'=25\%$)



(c) The performance for Table 4.4 ($\tau'=37.5\%$)



(d) The performance for Table 4.5 ($\tau'=37.5\%$)

Fig. 4.1 The performance of FTN method based on UEP algorithm

Fig. 4.1은 UEP 설정 유무에 따른 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 빨간색의 BER 곡선은 단일 밴드 FTN 전송 기법에서 간섭 비율 25% 또는 37.5%로 설정한 성능을 나타낸다. UEP 설정에 따른 성능은 부호화된 64800개의 비트를 N_p 의 개수인 4개로 나누어 Table 4.2에서 Table 4.5와 같이 각각의 N_p 에 간섭 비율을 설정하였다. 우선 순위 알고리즘을 통해 각 N_p 의 중요도를 판단하여 최적의 간섭 비율을 설정하기 위해 각 N_p 에 할당되는 간섭 비율을 다르게 설정하여 비교하였다. 간섭 비율을 단일 채널 FTN 전송 기법의 간섭 비율과 비교하여 간섭 비율 폭이 크게 또는 적게 할당하여 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 N_p 에 간섭 비율을 할당하는 방법을 4가지로 하여 Type1, Type2, Type3, Type4로 설정하였다. Type에 따른 간섭 비율 할당 방법은 각각의 N_p 에 할당되는 간섭 비율을 τ'_{N_p} 라고 하면 다음과 같다. 각 Type들의 간섭 비율의 할당 방법은 임의로 설정하였다. Type1의 경우 $\tau'_1 < \tau'_2 < \tau'_3 < \tau'_4$, Type2는 $\tau'_1 < \tau'_3 < \tau'_2 < \tau'_4$, Type3은 $\tau'_4 < \tau'_3 < \tau'_2 < \tau'_1$, Type4는 $\tau'_4 < \tau'_2 < \tau'_3 < \tau'_1$ 로 설정하였다. Fig. 4.1 (a)와 (c)는 단일 채널의 FTN 전송 기법의 간섭 비율을 기준으로 Fig. 4.1 (b)와 (d)과 비교하여 간섭 비율의 폭을 적게 하였다.

시뮬레이션 결과 Fig. 4.1 (a)와 Fig. 4.1 (b)는 간섭 비율의 평균값을 25%로 설정하였으며 간섭 비율 간의 폭을 Fig. 4.1 (a)는 적게, Fig. 4.1 (b)는 크게 설정하였다. 시뮬레이션 결과 Fig. 4.1 (a)의 경우 UEP 설정을 하였음에도 단일 밴드 FTN 전송 기법과 성능이 동일함을 확인하였고, Fig. 4.1 (b)는 단일 밴드 FTN 전송 기법과 비교하여 Type1과 Type2의 경우 10^{-4} 에서 약 0.1dB 성능이 향상되었고, Type3과 Type4의 경우는 10^{-4} 에서 약 0.2dB 성능이 향상됨을 확인하였다. Fig. 4.1 (c)와 Fig. 4.1 (d)는 간섭 비율의 평균값을 37.5%로 설정하였으며 Fig. 4.1 (c)는 간섭 비율 간의 폭을 적게, Fig. 4.1 (d)는 크게 설정하였다. Fig. 4.1 (c)의 경우 UEP 설정 방식에서 Type1과 Type2는 10^{-4} 에서 단일 밴드 FTN 전송 기법과의 성능이 동일하였고, Type3과 Type4는 10^{-4} 에서 약 0.1dB 성능이 향상됨을 확인하였다. Fig. 4.1 (d)는 UEP 설정으로 인해 단일 밴드 FTN 전송 기법보다 성능이 향상되었으며 Type1과 Type2의 경우 10^{-4} 에서 약 0.1dB

성능이 향상되었고, Type3과 Type4의 경우 10^{-4} 에서 약 0.2dB의 성능이 향상됨을 확인하였다.

시뮬레이션을 통해 각각의 N_p 에 설정되는 간섭 비율에 따라 성능이 달라졌으며 Type4과 같이 설정할 경우 가장 효율적임을 확인하였다. 또한, 단일 채널 FTN 전송 기법의 간섭 비율을 기준으로 간섭 비율의 폭을 적게 설정하는 방법보다 크게 설정하는 방법을 적용함으로써 성능이 향상됨을 확인하였다. 이는 간섭량을 제거하는 BCJR 알고리즘에서 간섭량이 클수록 각 트렐리스에 할당되는 branch metric의 차이가 크므로 효율적임을 알 수 있다. 우선 순위 알고리즘 측면에서는 부호화된 비트들의 중요도를 판단하여 간섭 비율을 중요도가 높은 비트들에 적은 간섭 비율을 할당하고 중요도가 낮은 비트들에는 큰 간섭 비율을 할당함으로써 기존의 FTN 전송 기법보다 성능이 향상되어 효율적임을 알 수 있다. 또한, 중요한 비트들에 보다 적은 간섭 비율을 설정함으로써 성능을 좌우하는 비트들에 간섭이 적어져 성능을 향상시킴을 확인하였다.

4.2 다중 경로 채널에서의 UEP 유무에 따른 OFDM-FTN 성능 분석

다중 경로가 존재하는 채널에서 효율적인 OFDM 기법과 전송률 향상을 위한 FTN 전송 기법을 연접한 OFDM-FTN 전송 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 시뮬레이션 파라메타는 아래의 표와 같다.

Table 4.6 UEP setting parameters ($\tau'=37.5\%$)

Total number of data	10^6
Channel coding	LDPC(HSS algorithm)
Coding rate	1/2
Modulation	BPSK
Number of sampling bits(SRRC filter)	32
Roll off factor	0.35
Interference rate(τ')	37.5%
Number of N_p	4
Number of M	4, 8, 16, 32

Table 4.6은 UEP 기반의 OFDM-FTN 전송 기법의 성능을 분석하기위한 시뮬

레이션의 파라메타를 나타낸다. $N=64800$ 개인 DVB-S3 표준안에 제시된 LDPC 채널 부호화 기법을 사용하였다. 부호화율은 $1/2$ 이며 따라서 입력 비트의 개수 $K=32400$ 이며 시뮬레이션은 총 31번의 반복을 통해 10^6 개의 데이터에 대한 확률을 나타낸다. 간섭 비율의 개수 $N_p=4$, 부반송파의 개수 $M=4, 8, 16, 32$ 로 설정하였으며 송신 신호는 다중 경로가 존재하는 채널을 통과한다.

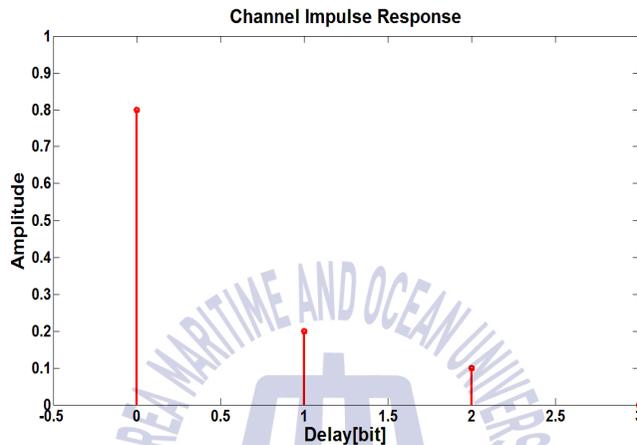


Fig. 4.2 Channel impulse response

Fig. 4.2는 시뮬레이션에서 사용된 다중 경로 특성을 나타낸다. 다중 경로의 개수 $L=3$ 이며 각각의 다중 경로의 세기는 $h(0)=0.8$, $h(1)=0.2$, $h(2)=0.1$ 로 설정하였다.

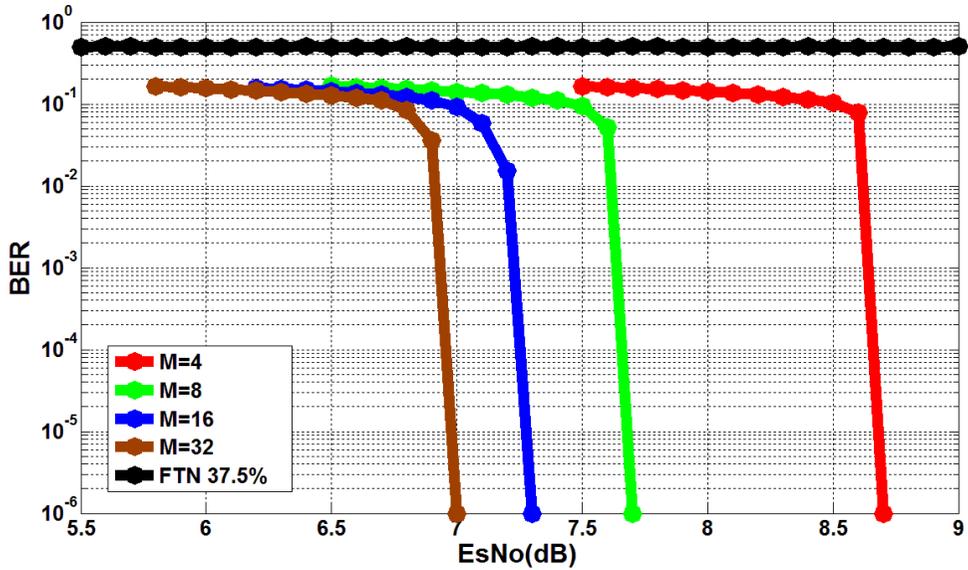
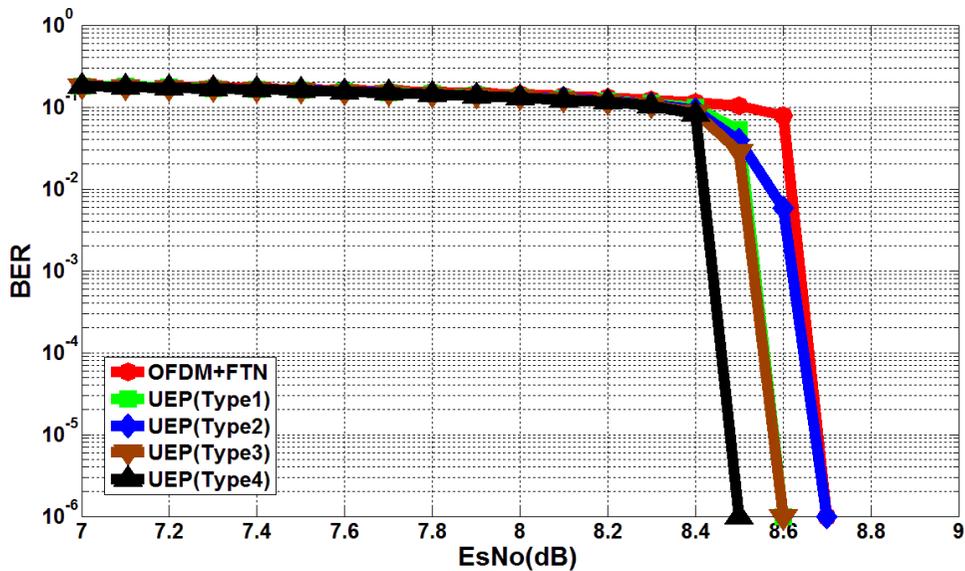


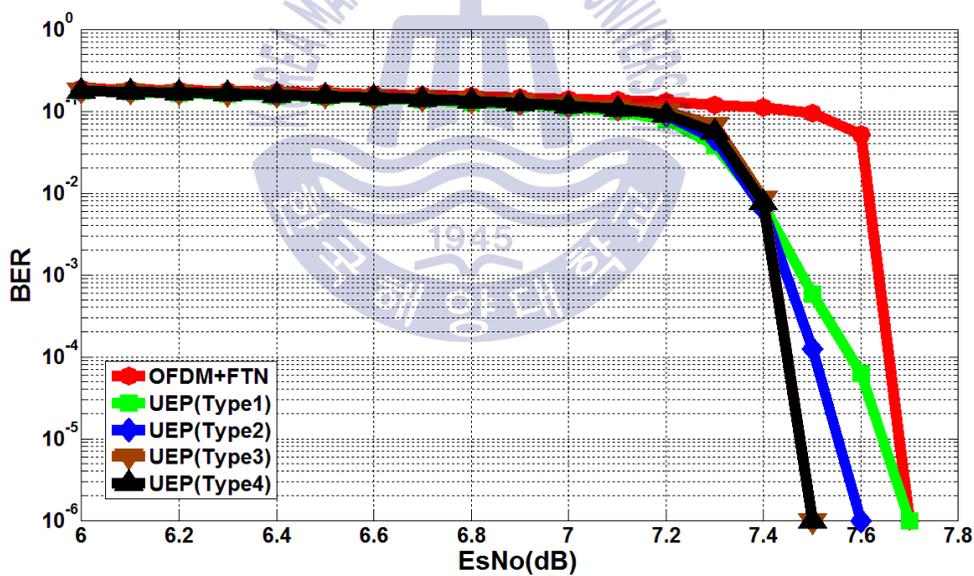
Fig. 4.3 The performance of FTN and OFDM-FTN in multipath channel

Fig. 4.3는 기존의 FTN 전송 기법과 OFDM-FTN 전송 기법을 다중 경로가 존재하는 채널에서 시뮬레이션을 수행하여 성능을 비교 분석하였다. 단일 밴드 FTN 전송 기법과 OFDM-FTN 전송 기법의 FTN 간섭 비율은 37.5%로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 기존의 FTN 전송 기법은 다중 경로가 존재하는 채널에서 성능이 오류 마루 현상 (error floor)을 나타내며, OFDM-FTN 전송 기법 적용시 성능을 도출하였다. 또한 OFDM에서 M 의 수의 증가에 따른 성능 향상을 확인할 수 있다. $M=4$ 와 비교하여 $M=8$ 인 경우 약 1dB의 성능 향상이 있으며, $M=16$ 인 경우 약 1.4dB의 성능이 향상되었고, $M=32$ 인 경우 약 1.7dB의 성능 향상을 가져왔다. 따라서 다중 경로가 존재하는 채널에서 OFDM-FTN 전송 기법이 효율적임을 알 수 있다.

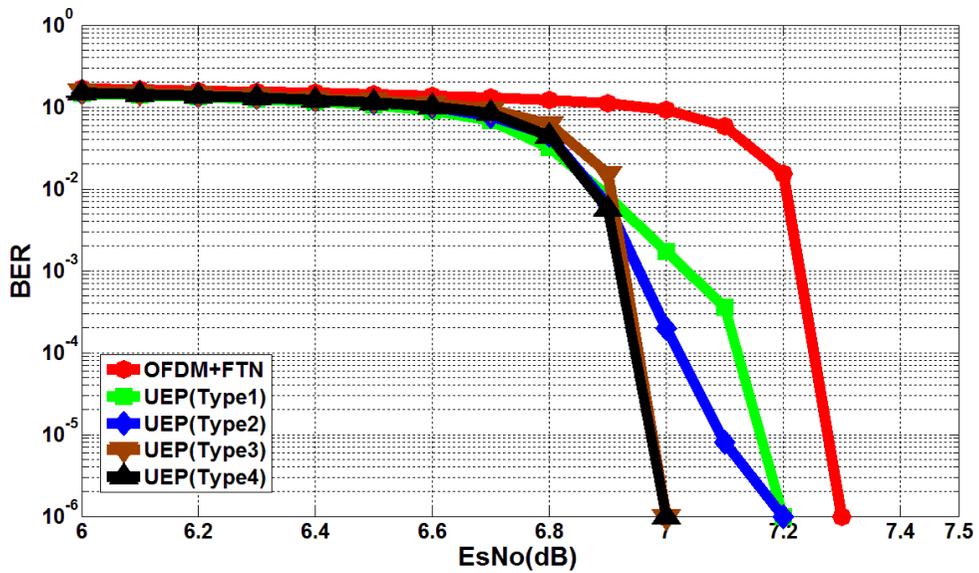
다중 경로가 존재하는 채널에서 성능을 더욱 향상시키기 위해 OFDM-FTN 전송 기법에 UEP를 설정하였다. 시뮬레이션 파라메타는 Table 4.6과 동일하며 UEP 설정 방법 네가지 Type으로 설정하였으며 UEP 설정 방식은 4.1장의 Table 4.5와 같다.



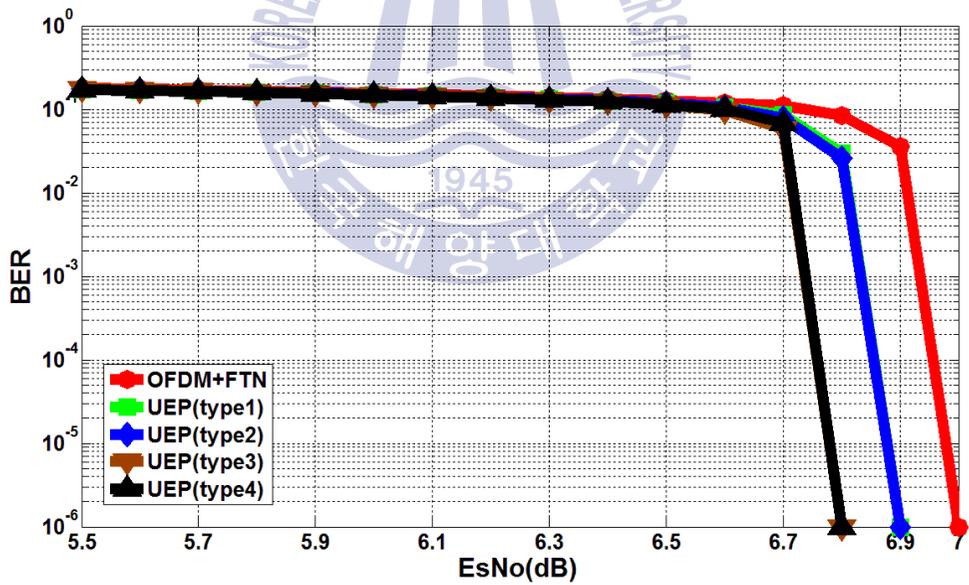
(a) $M=4$



(b) $M=8$



(c) $M=16$



(d) $M=32$

Fig. 4.4 The performance of OFDM-FTN method based UEP algorithm

Fig. 4.4는 OFDM-FTN 전송 기법의 $M=4, 8, 16, 32$ 이고 간섭 비율 37.5%를 기준으로 UEP 설정에 따른 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 64800개의 부호화된 비트들을 16200개씩 4개로 나누어 Table 4.5와 같이 UEP 설정을 하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4.4 (a)에서 BER 10^{-4} 에서 UEP 유무에 따른 성능을 분석하면 Type1의 경우 UEP 설정을 하지 않은 OFDM-FTN과 성능이 거의 동일하였고 Type2와 Type3은 약 0.1dB, Type4는 약 0.2dB의 성능 향상을 확인하였다. Fig. 4.4 (b)에서는 BER 10^{-4} 에서 Type1의 경우 약 0.15dB의 성능 향상을 확인하였고 Type2, Type3, Type4는 0.2dB 이상의 성능 향상을 확인하였다. Fig. 4.4 (c)는 Type1의 경우 BER 10^{-4} 에서 약 0.2dB 성능 향상되었고 Type2의 경우 약 0.3dB, Type3과 Type4의 경우 약 0.4dB의 성능이 향상됨을 확인하였다. Fig. 4.4 (d)에서는 BER 10^{-4} 에서 Type1과 Type2는 약 0.1dB, Type3과 Type4는 약 0.2dB 성능이 향상되었다. 시뮬레이션을 수행하여 M 과 UEP 유무에 따른 성능의 차이를 확인하였다. $M=4, 8, 16, 32$ 로 설정하였으며 M 의 값이 증가함에 따라 성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 또한, UEP 설정 시 N_p 에 할당된 간섭 비율에 따라 성능이 달라짐을 확인하였으며, N_p 에 할당하는 간섭 비율을 우선 순위 알고리즘을 통해 중요도를 판단한 부호화된 비트들을 적절히 나누어 중요도가 높은 비트들에 적은 간섭 비율을 설정하였다. 그로인해 성능을 좌우하는 중요도가 높은 비트들에 간섭을 줄임으로써 다른 Type들과 기존 OFDM-FTN 전송 기법보다 성능이 향상됨을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

제 5 장 결론

위성 및 방송 통신에서 데이터의 고전송률에 대한 요구는 계속 늘어나고 있는 반면, 대역폭이 한정되어 있어 효율적으로 전송률을 높이기 위한 여러 방안들이 연구되어지고 있다. 따라서 DVB-S2에서 고 전송효율을 갖는 위성 방송 전송을 위해 LDPC 채널 부·복호화의 고속화 등 전송기술 고도화를 위한 연구에 대한 관심이 집중되고 있다. 그러나 이러한 복호 속도를 개선시켜 전송률을 높이는 방안은 목표로 하는 고전송률에 한계를 갖고 있다. 또한, 전송률과 성능의 향상은 서로 trade-off 관계이므로 두 가지를 모두 충족시키는 것은 많은 어려움이 있다. 그러므로 성능을 최대한 유지하며 전송률을 증가시킬 수 있는 방식들을 연구하는 것이 가장 중요하다. 이에 현 시점에서 새로운 위성 방송 표준안의 필요성이 대두되고 있으며, 이는 DVB-S3라는 표준안의 활발한 개발을 요구하고 있다. 이러한 가운데 DVB-S3에서는 고전송률을 위해 LDPC 복호 속도 개선, 고부화율, 고차 변조방식을 적용시켜 전송률을 높이는 방안 보다는 주파수 대역에서 주어지는 Nyquist 속도보다 빠르게 신호를 전송하여 전송률을 향상시키는 FTN 방식을 이용한 방안들이 대두되고 있다.

본 논문에서는 기존의 단일 밴드에서의 FTN 전송 기법보다 성능을 향상시키기 위해 UEP 기반의 FTN 전송 기법을 제안하였다. UEP 설정을 위해 우선 순위 알고리즘을 사용하여 부호화된 비트들의 중요도를 판단하여 중요도에 따른 FTN 간섭 비율을 다르게 설정하였다. 그리고 다중 경로가 존재하는 채널에서 기존 단일 밴드 FTN 전송 기법의 경우 성능을 도출하지 못하여 다중 경로에 효율적인 OFDM 기법을 연접한 OFDM-FTN 전송 기법을 제안하였으며, OFDM-FTN 전송 기법에서 성능을 향상시키기 위해 UEP 설정을 하였다.

제안한 UEP 기반의 FTN 전송 기법의 성능을 비교하기 위해 기존의 단일 밴드 FTN 전송 기법의 간섭 비율과 동일하도록 UEP 기반의 FTN 전송 기법의

간섭 비율을 설정하였다. 시뮬레이션 결과 UEP 설정 시 간섭 비율간의 폭을 늘림으로써 기존과 비교하여 약 0.2dB의 성능 향상을 확인하였다. 또한, UEP 설정의 방법을 4가지로 설정하여 가장 효율적인 UEP 설정 방법을 알 수 있다.

다중 경로가 존재하는 채널에서 성능을 도출하기 위한 OFDM-FTN 전송 기법을 다중 경로가 존재하는 채널에서 기존 FTN 전송 기법과 시뮬레이션을 통해 기존 FTN 전송 기법의 경우 성능을 도출하지 못하였지만 OFDM-FTN 전송 기법은 성능을 도출함으로써 다중 경로 채널에서 효율적임을 확인하였고, M 의 개수에 따른 성능의 차이를 확인하였다. OFDM-FTN 전송 기법의 성능을 향상시키기 위해 UEP 설정을 하였으며 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다. 시뮬레이션에서 UEP 설정의 Type을 4가지로 설정하여 분석하였으며, UEP 설정 시 가장 효율적인 UEP 설정 방법을 확인하였다.

향후 연구 방안으로는 다양한 FTN 전송 기법의 간섭 비율에서 UEP 방식의 효율성을 검증한다.



감 사 의 글

한국해양대학교에 입학하여 공부한지 어느덧 8년이라는 시간이 지났습니다. 제가 이렇게 많은 성장을 할 수 있도록 많은 도움을 주신 분들께 진심으로 감사드립니다.

먼저, 제가 이렇게 공부를 할 수 있도록 항상 도와주시고 격려해주신 아버지, 어머니께 그리고 동생에게 진심으로 감사드리고 사랑한다는 말 전하고 싶습니다. 그리고 미흡한 저에게 부족한 부분들을 채울 수 있도록 이끌어 주시고, 힘든 기간 동안 많은 격려를 해주신 정지원 교수님께도 감사드립니다. 교수님의 지도와 많은 가르침으로 저의 부족했던 부분들을 보완해가며 성장할 수 있었습니다. 또한, 저의 졸업 논문의 부족한 부분들을 지적해 주시고 보다 논문의 완성도를 높일 수 있도록 도와주신 조형래 교수님, 김기만 교수님께 감사드립니다. 제가 학부시절부터 많은 가르침을 주신 김동일 교수님, 민경식 교수님, 강인호 교수님, 윤영 교수님께도 감사드립니다.

2년이라는 어떻게 보면 짧은 시간동안 제가 좀 더 성장할 수 있도록 많은 도움을 준 창욱이형, 그리고 많은 시간을 함께 보내지 않았지만 여러 도움을 준 건웅이형, 태석이형, 하현이형에게도 고맙습니다. 연구실에서 생활하며 제가 부족하여 힘들었던 시간들도 있지만 덕분에 큰 어려움이 없이 더욱 성장할 수 있었습니다. 또한, 실험실에 같이 들어와 함께 많이 공부했던 희수에게 감사하고, 아현이에게도 고맙다는 말 전합니다. 위성 통신·설계 실험실 모두 하는 일마다 잘 되길 바라며 무궁한 발전을 기원합니다. 다른 실험실이지만 같이 들어와 졸업하는 웅진이와 조금 늦게 들어와 조금 늦게 졸업하는 태웅이, 그리고 DSP, MMIC 실험실 분들에게도 감사의 말을 전합니다. 학부 때부터 같이 지내온 11학번 동기들과 선·후배들 모두 고맙다는 말 전하고 싶습니다.

마지막으로 옆에서 항상 힘이 되어준 민기, 성호, 윤근이, 평길이, 현대 등 친구들에게 깊은 감사를 드리며, 모두 성공하길 바랍니다.

저는 이제 2년간의 석사 생활을 끝내고 새로운 시작을 하려고 합니다. 많은 분들의 관심과 격려를 받으며 제가 성장한 것에 대하여 가슴 깊이 감사를 드립니다. 많은 분들의 관심과 격려를 잊지 않으며 성실하게 살아가겠습니다. 감사합니다.

참고문헌

- [1] L. M. Hwang, B. J. Lee, B. G. Yeo, J. P. Cho, and K. S. Kim, “ Link Relay H-ARQ mode for Throughput improvement in a Satellite Communication network,” J. Inst. Internet Broadcast. Commun., vol. 16, no. 1, pp. 121-127, 2016.
DOI : <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.1.121>
- [2] M. El Hefnawy and H. Taoka, “Overview of Faster-Than-Nyquist for Future Mobile Communication Systems,” In Proceeding 77th IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1-5, Dresden, Germany, Jun. 2013.
- [3] J. E. Mazo, “Faster than Nyquist signaling,” Bell System Technical Journal, vol. 54, no. 8, pp. 1451-1462. Oct. 1975.
- [4] A. D. Liveris, “Exploiting Faster-Than-Nyquist Signalling.” IEEE Transactions On Communication, vol. 51, no. 9, Sep. 2003.
- [5] J. Fan, S. Guo, X. Zhou, Y. Ren, G. Y. Li and X. Chen, “Faster-than-Nyquist signaling: An overview,” IEEE Access, vol. 5, pp. 1925-1940, 2017.
- [5] M. Yuhas, Y. Feng and J. Bajcsy, “On the Capacity of Faster-than-Nyquist MIMO Transmission with CSI at the Receiver,” IEEE Globecom Workshops, pp. 1-6, Dec. 2015.
- [6] G. W. Park and J. W. Jung, “A Study of MIMO FTN Scheme Based on Layered Space Time Code using Turbo Code,” Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, vol. 20, no. 5, pp. 895-901, May. 2016.

- [7] Y. M. Kim, P. P. Shang and S. Y. Kim, "Estimation of Soft Decision Channel Gain for Coded MIMO System," The Journal of the Korean Institute of Communication Sciences, vol. 36, no. 6, pp. 577-586, Jun. 2011.
- [8] T. H. Kim, I. K. Lee and J. W. Jung, "A Study of Efficient Viterbi Equalizer in FTN Channel," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, vol. 18, no.6, pp. 1323-1329, June 2014.
- [9] R. W. Chang, "Synthesis of Band-Limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission," Bell Sys. Tech. J., vol. 46, no. 12, Dec. 1966, pp. 1775-96.
- [10] J. A. C. Bingham, "Multicarrier Modulation for Data Transmission: An Idea Whose Time Has Come," IEEE Commun. Mag., vol. 28, no. 5, May 1990, pp. 5-14.
- [11] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM," IEEE Transactions On Communication, vol. 45, no. 12, pp. 1613-1621, Dec. 1997.
- [12] F. Rusek and J. B. Anderson, "Multistream Faster than Nyquist Signaling," IEEE Transactions On Communication, vol. 57, no. 5, pp. 1329-1340, May 2009.
- [13] H. C. Kwon, T. H. Kim and J. W. Jung. "A Study on High Speed LDPC Decoder Algorithm based on dc saperation," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, vol. 17. no. 9, pp. 2041-2047, Sep. 2013.
- [14] B. S. Lim, M. H. Kim and J. W. Jung. "A Study on Horizontal Shuffle Scheduling for High Speed LDPC decoding in DVB-S2," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, vol. 16, no. 10, pp. 2143-2149, Oct, 2012.