
주파수 오프셋을 고려한 Turbo OFDM 시스템의 성능 개선에 관한 연구

이영춘* · 박기식**

A Study on the Performance Improvement of Turbo
Coded OFDM Systems Considering Frequency Offset

Young-Chun Lee* · Ki-Sik Park**

요 약

본 논문에서는 우선 반송파 주파수 오프셋이 OFDM/M-ary PSK 시스템에 미치는 성능 열화를 분석하기 위해 오율식을 유도하였다. 그리고 Turbo 부호화 기법을 OFDM/M-ary PSK 시스템에 적용하여 성능 개선 정도를 평가하였다. 최종적으로 Turbo Coded OFDM/M-ary PSK 시스템에서 요구하는 BER 성능을 만족시키기 위해 허용 가능한 최대 주파수 오프셋을 결정하였다. 성능 해석 결과 ary 수가 커질수록 BER 성능이 열화됨을 알 수 있었고, 음성 서비스의 QoS (Quality of Service) 조건인 $BER = 10^{-3}$ 을 만족시키려면 QPSK, 8PSK, 16PSK 변조 방식의 경우, 각각 약 7 dB, 9 dB, 17 dB의 E_b/N_0 가 요구됨을 알 수 있었다. 그리고 E_b/N_0 가 10 dB와 15 dB인 경우, $BER = 10^{-3}$ 을 달성하기 위해서는 주파수 오프셋을 각각 0.05, 0.075 이하로 유지해야 함을 알 수 있었다. 한편, OFDM/M-ary PSK 시스템에 Turbo 부호를 적용하면 ary 수가 낮을수록 Turbo 부호의 성능 개선 효과가 크게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 16 ary 이하의 PSK 변조 방식에 Turbo 부호화 기법을 적용한 경우, 데이터 서비스의 QoS 조건인 $BER = 10^{-5}$ 을 만족시키려면 약 8 dB 이하의 E_b/N_0 가 요구됨을 알 수 있었다. 또한 Turbo 부호화 기법을 적용하면 매우 낮은 E_b/N_0 값으로 음성 서비스를 충분히 지원할 수 있음을 알 수 있었고, 데이터 서비스는 주파수 오프셋 허용치에 관계없이 약 8 dB 정도의 E_b/N_0 로 충분히 지원할 수 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, it is analyzed theoretically that the performance degradation, caused by carrier frequency offset, in an OFDM/ M-ary PSK system. Then, when Turbo coding is adopted to an OFDM/M-ary PSK system, the degree of performance enhancement is evaluated. Finally, the maximum frequency offset is calculated to satisfy the BER performance required in a Turbo coded OFDM/M-ary PSK system.

As results of analysis, it is shown that the more the number of M-ary is, the worse the BER performance is. Moreover, 7dB, 9dB, and 17dB of E_b/N_0 are required in QPSK, 8PSK and 16PSK systems, respectively, in order to satisfy the error performance, $BER = 10^{-3}$, for voice communication. If E_b/N_0 are 10dB and 15dB, the frequency offset should be below 0.05 and 0.075, respectively, for voice communication.

* 한국항공대학교

** 인하공업전문대학

접수일자: 2001. 10. 8

When Turbo coding is adopted to an OFDM/M-ary PSK system, the less the number of M-ary is, the greater the performance enhancement of Turbo coding is. If the number of a M-ary system of the system is below 16, it is found that required E_b/N_0 is about 8dB to satisfy $BER=10^{-5}$. Moreover, in the system the Turbo coding scheme, voice communication is available with greatly low E_b/N_0 , and 8dB of E_b/N_0 is enough for data communication regardless of the permission range of frequency offset.

키워드

MC DS-CDMA, BER, Wireless, Turbo Code

I. 서론

급증하는 정보 통신의 수요와 다양한 정보 매체의 이용이 늘어남에 따라서 통신의 서비스는 디지털 및 대용량 고속 서비스를 필요로 하게 되었다. 이러한 정보 통신의 요구 조건을 만족하기 위하여 병렬 채널과 다중 반송파를 이용한 대용량 통신 방식을 고안하게 되었으며, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 방식이 가장 널리 알려진 다중 반송파 시스템의 하나이다[1].

OFDM 방식은 변복조시에 고속 푸리에 변환 (FFT : Fast Fourier Transform) 알고리즘을 사용하므로 회로의 규모를 작게 할 수 있고, 또한 전송시에 이용되는 서브캐리어의 수를 변화시킴으로써 전송 용량을 가변시킬 수 있다는 장점이 있다[2]. 그리고 보호 구간을 설치함에 의해 보호 구간 길이 보다 지연 시간이 작은 지연 성분에 의해 발생하는 ISI (Intersymbol Interference)의 영향을 완전히 제거 할 수 있다는 장점이 있다[3]. 그러나 OFDM 시스템은 부 반송파의 협대역화로 인해 작은 주파수 오프셋 (Offset)에 대해 SER (Symbol Error Rate) 성능 열화가 증가하는 단점이 있다[4]~[6]. 특히 광대역 정보를 효율적으로 전송하기 위하여 M-ary PSK 변조 방식을 사용할 경우, 동일한 주파수 오프셋에 대하여 신호 레벨이 증가할수록 이진 (Binary) 변조 방식에 비해 판정 오류가 증가한다.

Turbo 부호는 Berrow et al.에 의해서 처음으로 소개되었고[7], 최근에 그 놀라운 성능을 인정받게 되어 여러 응용 시스템에서 사용될 예정이다. Turbo 부호는 두 개의 RSC (Recursive Systematic Convolutional code)를 병렬로 연결하고, 시간 다이버시티 (time diversity) 효과를 얻기 위하여 그 사이에 인터리버가

위치하고 있다. Berrow et al.이 발표한 논문에 의하면 인터리버 길이를 65535 비트로 할 경우 샤논의 한계 (Shannon-limit error correction performance)에 근접하는 우수한 성능을 보여 주었다. 그러나 인터리버의 길이가 크게 되면 처리상의 지연이 크게 발생하여 실시간을 요구하는 시스템에서는 사용이 불가능하기 때문에 적절한 인터리버 길이로 제한할 필요가 있다.

본 논문에서는 먼저 반송파 주파수 오프셋이 OFDM/M-ary PSK 시스템에 미치는 성능 열화를 분석하기 위해 오율식을 유도한다. 그리고 Turbo 부호화 기법을 OFDM/M-ary PSK 시스템에 적용하여 성능 개선 정도를 평가하고자 한다. 최종적으로 Turbo Coded OFDM/M-ary PSK 시스템에서 요구하는 BER 성능을 만족시키기 위해 허용 가능한 최대 주파수 오프셋을 결정하고자 한다.

II. OFDM 송·수신기 구조 및 스펙트럼

FFT를 사용한 OFDM 송·수신기의 기본 블록도를 그림 1에 나타낸다.

그림 1의 OFDM 송신기에서 높은 전송 속도의 입력 데이터는 S/P (Serial to Parallel) 변환부에 의해 낮은 전송 속도의 병렬 데이터로 변환되고, 변환된 출력은 M-ary PSK Mapper를 통해 다시 부호화 되고 고속 푸리에 역변환 (IFFT) 과정을 거쳐서 OFDM 신호가 만들어진다. 그 다음 IFFT 출력을 RF (Radio Frequency) 주파수로 변환하기 위해 반송파 f_c 가 곱해진 신호는 BPF (Band Pass Filter) 거친 후 공간으로 전송된다. 한편, OFDM 송신기를 거친 신호의 전대역 주파수 스펙트럼은 그림 2와 같다.

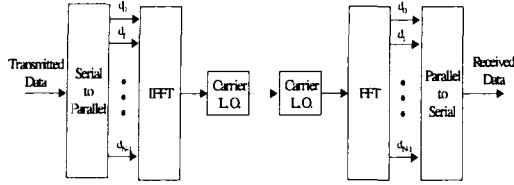


그림 1. OFDM 송·수신기의 블록 다이어그램
Fig. 1 Block diagram of an OFDM transmitter and receiver

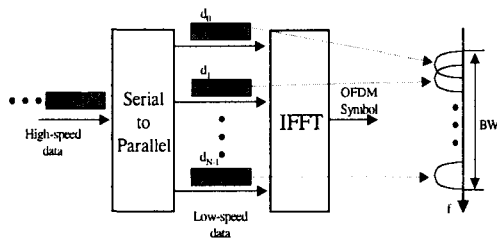


그림 2. OFDM 신호의 주파수 스펙트럼
Fig. 2 Frequency spectrum of OFDM signal.

전송된 신호 $s(t)$ 는 다음 식과 같다[3].

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} R [c_{ki} e^{j2\pi f_k (t-iT_s)}] f(t-iT_s) \quad (1)$$

여기서 f_k 는 k 번째 반송파 주파수로서

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \quad (2)$$

가 되며, f_0 는 가장 낮은 반송파 주파수이고 $f(t)$ 는 펄스 파형으로서 다음과 같은 값을 갖는다.

$$f(t) = \begin{cases} 1 & (-t_g \leq t \leq t_s) \\ 0 & (t < -t_g, t > t_s) \end{cases} \quad (3)$$

여기서 t_g 와 t_s 는 보호 구간과 유효 심볼 구간이고, 심볼 주기는 $T_s = t_g + t_s$ 이다. 전송 신호 $s(t)$ 는 심볼 주기가 T_s 인 M-ary PSK 신호들의 합이며 반송파간의 주파수 간격은 $1/T_s$ 이 된다. 전송 신호 $s(t)$ 는 다중 경로 페이딩과 부가성 백색 가우시안 잡음(AWGN)에 의해 방해를 받게 되어 수신 신호 $r(t)$ 는 다음 식과 같이 된다[3].

$$r(t) = \int_0^{\infty} s(t-\tau)h(\tau,t) + n(t) \quad (4)$$

여기서 $h(\tau,t)$ 는 시간 t 에서의 채널 임펄스 응답이

며, $n(t)$ 는 부가성 백색 가우시안 잡음이다.

수신기에서 수신된 신호 $r(t)$ 는 BPF에 의해 필터링 되고, 국부 반송파에 의해 IF (Intermediate Frequency)로 변환된다. 그 다음 OFDM 복조를 하기 위해 FFT 과정을 거친 후 P/S 변환부에 의해 높은 전송 속도의 데이터가 복원된다.

III. 반송파 주파수 오프셋을 고려한 OFDM/M-ary PSK 시스템의 해석 모델

AWGN 채널에서 반송파 주파수 오프셋을 고려한 OFDM/M-ary PSK 시스템의 해석 모델은 그림 3과 같다.

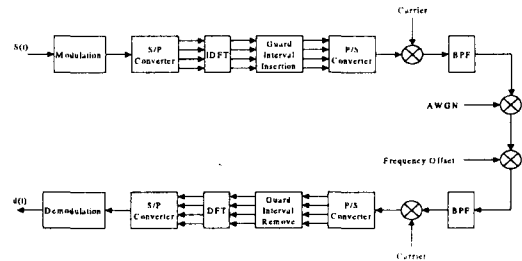


그림 3. 반송파 주파수 오프셋을 고려한 OFDM/M-ary PSK 시스템의 해석 모델
Fig. 3 Analysis model of OFDM/M-ary PSK system considering carrier frequency offset.

OFDM/M-ary PSK 송신 신호는 다음 식과 같다.

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot e^{j2\pi \frac{k}{T} t} \quad (5)$$

단, N ; OFDM 시스템의 부 반송파 수,

T ; OFDM 심볼 구간,

x_k ; M-ary PSK의 심볼 신호.

AWGN 채널을 거쳐 수신된 신호는 주파수 오프셋 ΔF 을 고려해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$\begin{aligned} r(t) &= s(t)e^{j2\pi \Delta F t} + \tilde{n}(t) \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{j2\pi (\frac{k}{T} + \Delta F)t} + \tilde{n}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\tilde{n}(t)$ 는 AWGN이다.

수신단에서 프레임 동기가 이상적으로 이루어진다 고 가정하면 샘플링된 수신 신호는 다음 식과 같이 나

타내진다[8].

$$y_k = \frac{1}{N} \sum_{k'=0}^{N-1} x_{k'} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi(k-k'-\Delta f)t} \frac{n}{N} + n_k \quad (7)$$

단, $\Delta f \cdot T = \Delta f$: 부 반송파의 심볼 구간으로 정규화된 주파수 오프셋.

위의 식에서 k' 와 k 는 각각 수신단과 송신단의 부 반송파를 나타낸다. 만약 $k = k'$ 이면 수신단에서 정확한 신호를 수신한 경우이고, $k \neq k'$ 이면 수신 신호가 왜곡된 경우이다.

식 (3)에서, N 이 매우 크다면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi(k-k'-\Delta f)t} \frac{n}{N} \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \exp[-j2\pi \frac{k-k'-\Delta f}{T} t] dt \quad (8) \end{aligned}$$

따라서 수신기에서 복조된 신호는 다음 식과 같이 나타내진다.

$$\begin{aligned} y_k &= \exp(j\pi\Delta f) \cdot \text{sinc}(\Delta f)x_k \\ &- \exp(j\pi\Delta f) \cdot \text{sinc}(\Delta f) \sum_{\substack{k'=0 \\ k \neq k'}}^{N-1} \left[\frac{x_{k'}}{\frac{k-k'}{\Delta f} - 1} \right] \quad (9) \\ &+ n_k \end{aligned}$$

첫 번째 항은 k 번째 부 반송파로 전송되는 희망 정보 신호이고, 두 번째 항은 인접 부 채널간의 간섭을 나타내며, 마지막 항은 잡음 성분이다. 각 항에는 $e^{j2\pi\Delta f}$ 의 위상 성분과 $\text{sinc}(\Delta f)$ 의 진폭 감쇠 성분이 포함되어 있다.

IV. 위상 왜곡에 따른 OFDM/M-ary PSK 시스템의 해석 모델

그림 4는 반송파 주파수 오프셋에 따른 판정 거리 변화율을 나타낸다.

반송파 주파수 오프셋을 고려한 경우의 판정 거리 s_0 와 s_1 은 다음 식과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} s_0 &= \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{n} + \theta_k\right) \\ s_1 &= \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{n} - \theta_k\right) \quad (10) \end{aligned}$$

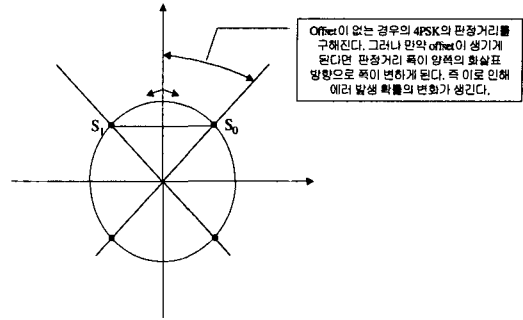


그림 4. 반송파 주파수 오프셋에 따른 판정 거리 변화
Fig. 4 Variation of decision distance according to carrier frequency offset.

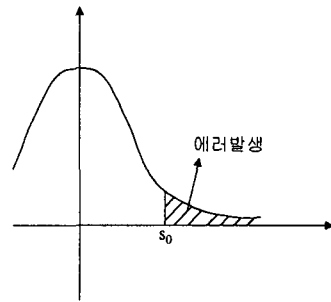


그림 5. 에러 판정
Fig. 5 Error decision.

만약 판정 거리를 초과하면 에러가 발생하는데 에러가 발생할 수 있는 방향은 두 방향이므로 그림 5로부터 다음 식과 같이 구해진다[8].

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2 \log_2 M} \\ &\times \left[\left\{ \text{erfc}\left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\log_2 M \cdot \frac{E_b}{N_0}} \sin\left(\frac{\pi}{n} + \theta_k\right)\right) \right\} \right. \\ &\left. + \left\{ \text{erfc}\left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\log_2 M \cdot \frac{E_b}{N_0}} \sin\left(\frac{\pi}{n} - \theta_k\right)\right) \right\} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

반송파 주파수 오프셋에 의한 위상 왜곡을 고려하면 OFDM/M-ary PSK 시스템의 최종 오율 식은 다음과 같이 구해진다.

$$P_e = \int_{-\pi}^{\pi} P \cdot p(\theta) d\theta \quad (12)$$

V. 터보 부호화 기법

그림 6은 터보 부호기의 블록 다이어그램을 보여준다.

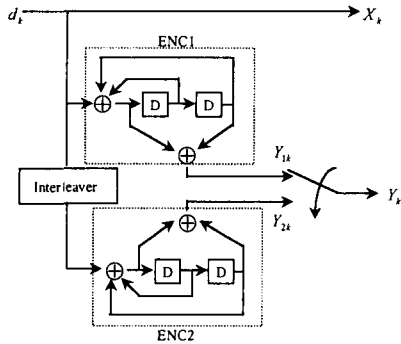


그림 6. 터보 부호기의 블록 다이어그램
Fig. 6 Block diagram of turbo encoder.

문헌 [7]에서 소개된 터보 부호는 단순히 두 개의 RSC (Recursive Systematic Convolutional)를 병렬로 연결하고, 두 부호기 (ENC1과 ENC2)의 출력 시퀀스를 다르게 하기 위해서 두 부호기를 인터리버로 나누어 놓은 형태를 취하고 있다. 데이터 시퀀스가 프레임 단위로 전송된다면 터보 부호기는 메모리가 v 인 두 개의 RSC로 이루어진 블록 코드로써 생각할 수 있다. 또한, RSC 부호기(ENC1)의 모든 상태를 0으로 만들기 위해서 v 개의 정보 비트를 한 프레임 끝에 붙인다. 따라서 두 개의 RSC 사이에 놓인 인터리버 n 은 데이터 프레임과 테일 비트(tail bit) v 가 더해진 길이이다. 이 때, 터보 부호기에서는 시스템 시퀀스(systematic sequence)와 패리티 시퀀스(parity sequence)로 구성된 부호 시퀀스로 부호화된다. 또한, 대역 효율을 위해서 패리티 프레임(parity frame)을 펀처링(puncturing)한다. 따라서 그림 6의 터보 부호기의 부호율 $R_c = 1/2$ 이 된다. 그림 6에서 $b_k = (X_k, Y_k)$ 이고 이들은 시간 k 인 순간에 터보 부호기에서 발생된 시스템 시퀀스와 패리티 시퀀스에 각각 대응하여 수신된다.

터보 부호에서 대부분의 시간 지연은 인터리버에서 발생되며, 모든 시간 지연이 100 ms 이내이면 실시간 음성 통신이 가능하다. 9.6 kbps의 데이터율에서 인터

리버 길이가 400 비트이면 약 83.3 ms의 시간 지연이 발생된다[9]. 이러한 시간 지연은 송·수신기의 처리 지연까지 고려할 때 음성통신까지도 가능하다.

터보 부호에 대하여 심볼 당 에너지를 다음과 같이 비트 당 에너지로 바꿀 수 있다.

$$E_s = E_b R_c \frac{n-v}{n} \quad (13)$$

여기서, R_c 는 부호율이고, $(n-v)/n$ 는 부호기를 종료시키기 위해서 v 개의 테일 비트를 사용한 것을 고려하기 위해 곱해지는 상수이다. 모두 0인 시퀀스가 보내어져서 그 중 잘못된 부호어(codeword)를 복호할 때 적어도 2 비트의 정보에 에러가 발생하게 된다. 그러므로 터보 부호의 에러 확률에 관한 하한(lower bound)은 다음과 같이 주어진다[10].

$$P_b \geq \frac{2}{n-v} P_e \quad (14)$$

VI. 수치 계산 및 검토

그림 7은 AWGN 환경에서 부 반송파가 1024개, 주파수 오프셋이 0.05인 경우 ary 수에 따른 OFDM/M-ary PSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 그림으로부터 ary 수가 커질수록 BER 성능이 열화됨을 알 수 있다. 예를 들어, 음성 서비스의 QoS (Quality of Service) 조건인 $BER = 10^{-3}$ 을 만족시키려면 QPSK, 8PSK, 16PSK 변조 방식의 경우, 각각 약 7 dB, 9 dB, 17 dB의 E_b/N_0 가 요구됨을 알 수 있다.

그림 8은 AWGN 환경에서 부 반송파가 1024개인 경우 주파수 오프셋에 따른 OFDM/8PSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 그림으로부터 특정한 E_b/N_0 에서 기준 BER을 달성하기 위해 허용되는 최대 주파수 오프셋 값을 알아낼 수 있다. 예를 들어 E_b/N_0 가 10 dB와 15 dB인 경우, $BER = 10^{-3}$ 을 달성하기 위해서는 주파수 오프셋을 각각 0.05, 0.075 이하로 유지해야 함을 알 수 있다.

그림 9는 AWGN 환경에서 부 반송파가 1024개, 주파수 오프셋이 0.05인 경우 Turbo 부호화 기법 적용시 ary 수에 따른 OFDM/M-ary PSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 그림으로부터 ary 수가 낮을수록 Turbo 부호의 성능 개선 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 16 ary 이하의 PSK 변조 방식에 Turbo

부호화 기법을 적용한 경우, 데이터 서비스의 QoS 조건인 $BER = 10^{-5}$ 을 만족시키려면 약 8 dB 이하의 E_b/N_0 가 요구됨을 알 수 있다.

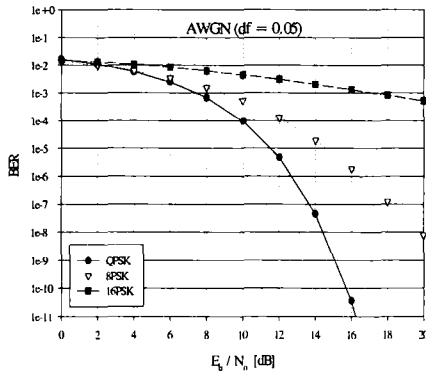


그림 7. AWGN 환경에서 ary 수에 따른 OFDM/M-ary PSK 시스템의 BER 성능 (부 반송파수=1024, 주파수 오프셋=0.05)
 Fig. 7 BER of OFDM/M-ary PSK system according to the number of ary in AWGN environment (the number of sub-carrier=1024, frequency offset=0.05).

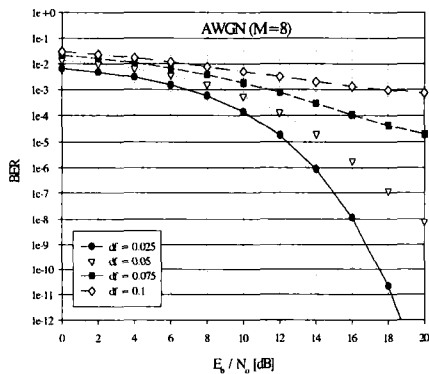


그림 8. AWGN 환경에서 주파수 오프셋에 따른 OFDM/8PSK 시스템의 BER 성능(부 반송파수=1024)
 Fig. 8 BER of OFDM/8PSK system according to frequency offset in AWGN environment (the number of sub-carrier=1024).

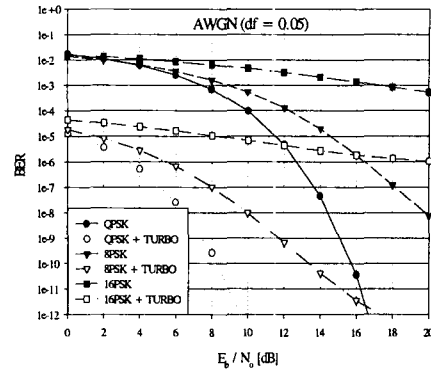


그림 9. AWGN 환경에서 Turbo 부호화 기법 적용시 ary 수에 따른 OFDM/M-ary PSK 시스템의 BER 성능 (부 반송파수=1024, 주파수 오프셋=0.05)
 Fig. 9 BER of OFDM/M-ary PSK system according to the number of ary when turbo coding technique is adopted in AWGN environment (the number of sub-carrier=1024, frequency offset=0.05).

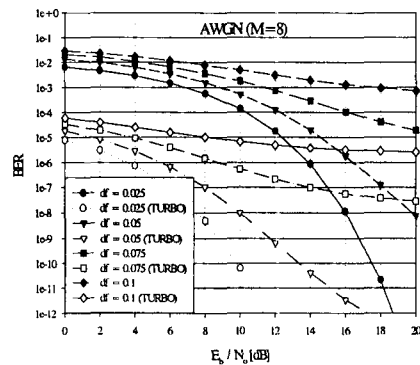


그림 10. AWGN 환경에서 Turbo 부호화 기법 적용시 주파수 오프셋에 따른 OFDM/8PSK 시스템의 BER 성능 (부 반송파수=1024)
 Fig. 10 BER of OFDM/8PSK system according to frequency offset when turbo coding technique is adopted in AWGN environment (the number of sub-carrier=1024).

그림 10은 AWGN 환경에서 부 반송파가 1024개인 경우 Turbo 부호화 기법 적용시 주파수 오프셋에 따른 OFDM/8PSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 그

림으로부터 Turbo 부호화 기법을 적용하면 매우 낮은 E_b/N_0 값으로 음성 서비스 ($BER = 10^{-3}$)를 충분히 지원할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 데이터 서비스 ($BER = 10^{-5}$)는 주파수 오프셋 허용치에 관계없이 약 8 dB 정도의 E_b/N_0 로 충분히 지원할 수 있음을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 우선 반송파 주파수 오프셋이 OFDM/M-ary PSK 시스템에 미치는 성능 열화를 분석하기 위해 오율식을 유도하였다. 그리고 Turbo 부호화 기법을 OFDM/M-ary PSK 시스템에 적용하여 성능 개선 정도를 평가하였다. 최종적으로 Turbo Coded OFDM/M-ary PSK 시스템에서 요구하는 BER 성능을 만족시키기 위해 허용 가능한 최대 주파수 오프셋을 결정하였다.

성능 해석 결과 ary 수가 커질수록 BER 성능이 열화됨을 알 수 있었고, 음성 서비스의 QoS 조건인 $BER = 10^{-3}$ 을 만족시키려면 QPSK, 8PSK, 16PSK 변조 방식의 경우, 각각 약 7 dB, 9 dB, 17 dB의 E_b/N_0 가 요구됨을 알 수 있었다. 그리고 E_b/N_0 가 10 dB와 15 dB인 경우, $BER = 10^{-3}$ 을 달성하기 위해서는 주파수 오프셋을 각각 0.05, 0.075 이하로 유지해야 함을 알 수 있었다. 한편, OFDM/M-ary PSK 시스템에 Turbo 부호를 적용하면 ary 수가 낮을수록 Turbo 부호의 성능 개선 효과가 크게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 16 ary 이하의 PSK 변조 방식에 Turbo 부호화 기법을 적용한 경우, 데이터 서비스의 QoS 조건인 $BER = 10^{-5}$ 을 만족시키려면 약 8 dB 이하의 E_b/N_0 가 요구됨을 알 수 있었다. 또한 Turbo 부호화 기법을 적용하면 매우 낮은 E_b/N_0 값으로 음성 서비스를 충분히 지원할 수 있음을 알 수 있었고, 데이터 서비스는 주파수 오프셋 허용치에 관계없이 약 8 dB 정도의 E_b/N_0 로 충분히 지원할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] O. Edfors, M. Sandell, J.-J. van de Beek, D. Landstrom and F. Sjoberg, "An introduction to orthogonal frequency-division multiplexing", Research Report TULEA 1996, Division of Signal Processing, Lulea University of Technology, 1996.
- [2] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission : An idea whose time has come", IEEE Commun. Mag., vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.
- [3] S. Hara, M. Mouri, M. Okada, and N. Morinaga, "Transmission performance analysis of multi-carrier modulation in frequency selective fast Rayleigh fading channel", Wireless Personal Commun., vol. 2, pp. 335-356, Jan.-Feb. 1996.
- [4] H. Sari, G. Karam and I. Jeanclaude, "Transmission Techniques for Digital Terrestrial TV Broadcasting", IEEE Commun. Mag., pp. 100-109, February 1995.
- [5] W. D. Warner and C. Leung, "OFDM/FM Frame Synchronization for Mobile Radio Data Communications", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 42, no. 3, pp. 302-313, August 1993.
- [6] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Blind synchronization for OFDM", Electronics Letters, vol. 33, no. 2, pp. 113-114, January 1997.
- [7] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correction coding and decoding : turbo coding", in International Conference on Communications, pp. 1064-1070, 1993.
- [8] 계선형, 유형석, 서종수, "반송파 주파수 오프셋에 따른 OFDM M-ary QAM 시스템의 성능 분석", 한국통신학회논문지, 제24권, 제4B호, pp. 1024-1031, 1999년 6월.
- [9] V. Kuhn, "Evaluation the performance of turbo codes and turbo-coded modulation in a DS-CDMA environment," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 17, no. 12, pp. 2138-2147, Dec. 1999.

- [10] W. J. Blackert, E. K. Hall, and S. G. Wilson,
"An upper bound on turbo code free distance,"
IEEE ICC, vol. 2, June 1996.



이영춘(Young Chun, Lee)
한국방송통신대학교 전자계산학과
공학사
한국항공대학교 항공산업대학원
전파공학과 공학석사
1999년~현재 한국항공대학교 대학원
항공통신정보공학과 박사과정 재학 중

관심분야 : 이동통신, 무선광통신



박기식(Ki Sik, Park)
한국항공대학교 정보통신공학과
공학사
한국항공대학교 정보통신공학과
공학석사
한국항공대학교 정보통신공학과
공학박사

2001년~현재 인하공업전문대학 정보통신과 전임강사
관심분야 : 디지털이동통신, 부호이론, 무선광통신