

# 광대역 이동 채널에서 적응형 OFDM 시스템을 위한 변조 기술에 관한 연구

## A Study on the Modulation Technique for Adaptive OFDM System in Broadband Mobile Channel

안종구\*, 추형석\*

Chong-Koo An\*, Hyung-Suk Chu\*

### 요약

OFDM은 심볼간 간섭에 대한 강인성으로 인하여 4세대 광대역 이동통신에 적합한 변조방식으로 활발히 연구되고 있다. OFDM 전송 기술은 신호 대 잡음비에 따라서 각 부반송파의 변조기법을 적응적으로 적용할 수 있다. 본 논문에서는 광대역 이동 채널에서 OFDM 시스템을 위한 적응적 변조기법을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 목표 BER의 SNR 임계값을 이용하여 각 부반송파에 초기 비트를 할당하고, Chow 알고리즘을 적용하여 전체 비트수를 목표 비트수와 같게 제어한다. 또한, 제안한 알고리즘은 부반송파들을 블록으로 구성함으로써 부반송파의 비트할당을 위한 시그널링 오버헤드를 줄였다. 제안한 알고리즘은 광대역 이동채널에서 블록내의 부반송파의 수, 목표 BER, 그리고 도플러 주파수에 대한 적응형 OFDM 시스템의 성능을 평가하였다.

### Abstract

OFDM is one of the promising modulation candidates for a fourth generation broadband mobile communication system because of its robustness against inter-symbol interference(ISI). The OFDM transmission technique has the inherent flexibility to adapt the modulation scheme on each subcarrier according to the signal-to-noise ratio(SNR). In this paper, the adaptive modulation scheme of OFDM system is proposed in broadband mobile channel. The proposed algorithm allocates initially the number of bits in each subcarrier using the threshold SNR according to the target BER and controls the total number of target bits using the well-known algorithm of Chow et al. In addition, the subcarriers of the proposed algorithm are clustered in blocks, that the signalling overhead can be reduced for the bit allocation of subcarriers. For the simulated experiments, this paper presents an evaluation for the effects of target BER, the various numbers of subcarriers in the subband block, and Doppler frequency on the performance of adaptive OFDM in broadband mobile channel.

**Key words** : OFDM, adaptive modulation, signaling overhead

## I. 서론

변조기술에서 중요하게 요구되는 점은 다중경로 페이딩 채널에서 생기는 심볼간 간섭(ISI: Inter-Symbol Interference)에 대하여 강인성을 갖는 것이다. 여기서 OFDM과 같은 다중반송파 변조 방식은 각 부반송파에서의 심볼주기를 부반송파의 수만큼 확장시킬 수 있기 때문에 다중경로에 의한 심각한 주파수 선택적 페이딩 채널을 잘 대처할 수 있다[1][2][3]. 이러한 OFDM 방식은

단일 주파수망이 가능하여 디지털 오디오 방송(DAB: Digital Audio Broadcasting)과 디지털 지상 텔레비전 방송(DVB-T: Digital Video Broadcasting-Terrestrial)의 표준 방식으로도 채택되었다. 최근에 4세대 이동통신, 무선 인터넷 액세스, 무선 멀티미디어 시스템에서는 무선 채널에서 고속의 데이터 전송을 위하여 OFDM에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4][5][6]. 대부분의 OFDM 시스템들은 모든 반송파에 대하여 고정된 변조방식을 쓰고 있다. 그러나 OFDM 시스템의 각 반송파는 채널환경에 따라서 BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM 등과 같이 다른 변조기법을 적용할 수 있으며, BER(bit error rate)에 대한 적절한 변조방식의 선택은 주파수 효율성을 최대로 높일 수 있다. 따라서 적응적 변조기술은 수신률을 향상시키는 효율적인 방법 중의 하나이다[7][8].

\*울산대학교 전자공학과

접수 일자 : 2005. 2. 16      수정 완료 : 2005. 4. 25

논문 번호 : 2005-1-5

※본 논문은 2004년도 울산대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

R. Steele, W. Webb, S. Sampei는 협대역 페이딩 채널의 시변 Shannonian 채널용량과 가변 연결 코딩 기법(variable concatenated coded scheme)을 이용하여 버스트 단위 적응적 QAM(burst by burst adaptive QAM)을 제안하였다[2]. T. Yamamura는 적응적 변조를 위하여 채널 추정 알고리즘을 제안하였다. T. Yoshiki는 전력제어 방식을 갖는 적응적 QAM을 제안하였다[2].

본 논문에서는 광대역 이동 채널에서 OFDM 시스템을 위한 적응적 변조 기술 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 비트 할당 방식은  $BER_{target}$ 의 SNR 임계값을 이용하여 각 부반송파에 초기 비트 수를 할당하고, 전체 부반송파의 비트 수를 목표 비트 수와 같게 하는 과정은 현재 DMT(Digital Multi-Tone)에서 많이 이용되고 있는 적응적 변조기술인 Chow의 알고리즘[3] 방식을 이용하였다. 또한 인접한 부반송파의 SNR값과 채널 환경은 강한 상관성을 갖고 있으므로 한 블록내의 부반송파들에 같은 변조 방식이 할당되어도 성능저하는 크게 생기지 않을 것이라 기대된다. 따라서 제안한 알고리즘에서는 여러 개의 부반송파를 한 개의 블록으로 구성함으로써 부반송파의 비트할당을 위한 시그널링 오버헤드를 줄였다. 제안한 알고리즘을 적용한 적응적 변조기술의 성능을 알아보기 위하여 광대역 이동 채널 환경에서  $BER_{target}$  블록화된 부반송파의 수, 그리고 도플러 주파수(Doppler frequency)를 다르게 하여 실험하였다. 또한, 고정된 변조방식을 이용하였을 경우의 결과와 제안한 알고리즘을 적용한 결과를 비교하였다.

서론에 이어 II절에서는 SNR 측정 방법에 대하여 개략적으로 언급하였고, III절에서는 실험을 위한 다중경로 페이딩 채널 모델과 본 논문에서 제안한 블록화된 부반송파 및 비트할당방법을 이용한 적응형 OFDM 시스템에 대하여 설명하였다. IV절에서 제안한 알고리즘의 실험결과에 대하여 언급하였고, V절에서 결론을 맺었다.

## II. SNR 추정 알고리즘

적응변조기법은 채널에 대한 정확한 정보가 필요하며, 각 부반송파에 대한 신호대잡음비의 측정은 수신신호에서 노이즈의 양을 측정함으로써 추정할 수 있다. 그러므로 신호대잡음비의 손실은 BER을 높이는 결과로 나타난다. 그림 1-1에서 SNR을 추정하는 알고리즘을 보였다. 채널을 통과한 수신신호에서 노이즈는 두가지 방법으로 측정할수 있다. 첫 번째 방법은 미리 알고있는 파일럿 심벌을 기준신호로 이용하는 것으로서 가장 빠르고 안정적으로 측정할 수 있다. 두 번째 방법은 복조된 데이터를 다시 변조하여 얻은 신호를 기준신호로 이용한다. 이 방법은 파일럿 심벌과 같은 다른 신호가 필요없으나 SNR

을 정확하게 측정하기 위해서는 BER이 충분히 낮아야하는 한계가 있다. SNR은 노이즈를 측정한후에 수신신호와 노이즈 전력의 비로서 구한다. 여기서  $\langle |x|^2 \rangle$ 는 신호전력,  $\langle |y|^2 \rangle$ 는 잡음전력을 의미한다.

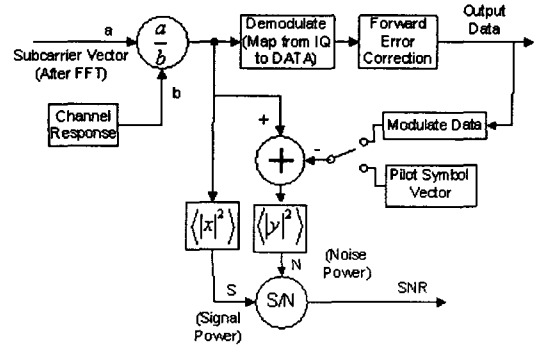


그림 1-1. SNR 추정 알고리즘  
Fig. 1-1. SNR estimation algorithm

## III. 블록화된 부반송파와 적응형 비트 할당 알고리즘을 이용한 OFDM 시스템

### 1. 적응형 OFDM 시스템 구조

그림 2-1에 128개의 부반송파를 갖는 OFDM에서 적응형 변조를 위한 시뮬레이션 모델을 보였다. 전송단에서 입력 데이터는 우선 다중경로 페이딩 채널에서 OFDM 신호의 전송에 효율적인 컨벌루션 코더(convolutional coder)를 이용하여 코딩한다. 여기에서 부호율(code rate)은  $R=1/2$ , 제한길이(constraint length)는  $K=7$ 로 하였다. 코딩된 직렬의 비트들은 병렬형태로 바뀌고, 수신단의 궤환정보(Feedback Information)를 이용하여 128개 각 부반송파의 변조 심벌로 매핑된다. OFDM 시간 신호는 IFFT를 통하여 만들어지고, 보호구간(Guard Interval)을 첨가한 후에 전송된다. 전송채널은 18개의 경로로 구성되며 주파수 선택적이면서 시변성을 갖는 Rayleigh fading 채널을 이용하였다. 수신단에서는 직렬로 수신된 신호를 병렬 시퀀스로 변환하고 보호구간을 제거한후에 FFT를 이용하여 주파수 신호로 전환한다. 이와 같은 주파수 신호에서 파일럿 신호를 이용한 채널추정 알고리즘 적용하여 궤환정보를 구하고, 직렬형태의 시퀀스로 복조되어진 이진 데이터들은 Viterbi soft decoding 알고리즘을 이용하여 디코딩되어 출력 데이터를 얻는다. 한 개의 패킷은 128개의 부반송파와 64개의 OFDM 심벌(파일럿 신호수:  $N_p=4$ , 데이터 수:  $N_d=60$ )로 구성된다.

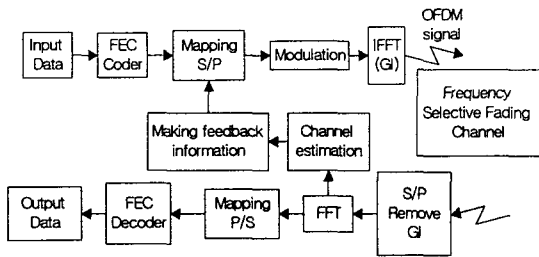


그림 2-1. 시뮬레이션 시스템 구조  
Fig. 2-1. Simulation system structure

2. 다중경로 페이딩 채널 모델

L개의 경로를 갖는 다중경로 페이딩 채널환경에서 N개의 부반송파를 가지는 OFDM 시스템을 가정하자. OFDM 시스템에서의 페이딩 채널은 L개의 탭을 가지는 FIR 필터로 모델링할 수 있다. 다중경로 페이딩 채널을 통과한 신호  $r(t)$ 는

$$r(t) = h(\tau, t)s(t) + n(t), \quad (1)$$

여기서  $s(t)$ 는 전송신호,  $n(t)$ 는 복소 가우시안 잡음으로 영평균과  $\sigma_n^2$ 의 분산을 가진다.

l번째 경로의 복소값을 가지는 페이딩 계수인  $h(\tau, t)$ 는

$$h(\tau, t) = \sum_{i=1}^L \beta_i e^{j2\pi(f_c + f_d)t - \theta_i} \delta(t - \tau_i) \quad (2)$$

여기서  $\beta_i, \theta_i$ 는  $\tau_i$ 만큼 지연이된 후에 생기는 i번째 경로의 진폭과 위상이고,  $f_c$ 는 부반송파의 주파수,  $f_d$ 는 도플러 주파수를 나타낸다. 또한 각 경로의 페이딩계수는 영평균을 가지는 복소 가우시안 랜덤 변수로 독립적으로 모델링한다.

그림 3-1에 페이딩 채널에 대한 블록선도를 보였다.

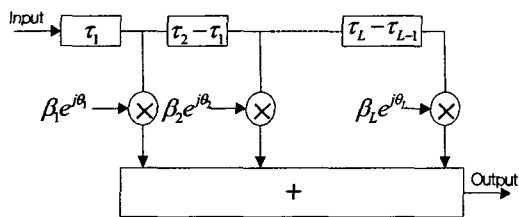


그림 3-1. 다중경로 페이딩 채널에 대한 블록선도  
Fig. 3-1. Block diagram for multipath fading channel

3. 제안한 적응형 변조 알고리즘

본 논문에서는  $BER_{target}$ 의 SNR 임계값을 이용하여 각 부반송파에 초기 비트 수를 할당하고, 전체 부반송파의 비트 수를 목표 비트 수와 같게 하는 과정은 Chow의 알고리즘 방식을 이용하는 적응적 변조 알고리즘을 제안하였다. 또한 제안한 알고리즘에서는 여러 개의 부반송파

를 한 개의 블록으로 구성함으로써 부반송파의 비트할당을 위한 시그널링 오버헤드를 줄였다. 여기서 인접한 부반송파의 SNR값과 채널환경은 강한 상관성을 갖고 있으므로 한 블록내의 부반송파들에 같은 변조 방식이 할당되어도 성능저하는 크게 생기지 않을 것이라 기대된다. 그림 3-2에 제안한 알고리즘의 순서도를 보였다.

제안한 알고리즘은 첫 번째 단계에서 전체 부반송파의 수( $K$ ), 블록당 부반송파의 수( $b$ ), 전체 부반송파에 할당되는 평균 비트 수( $m$ ), 그리고  $BER_{target}$ (target bit error rate)에 의한 SNR 임계값을 초기화 한다. 한 개의 OFDM 심벌에 할당되는 전체 비트수는  $R_{target} = mK$ 와 같다. 두 번째 단계에서는 II절에서 언급하였던 SNR 추정 방법을 이용하여 수신 신호의 블록화된 부반송파에서 각 부반송파의 SNR값을 계산하고, 각 부반송파의 SNR값을 이용하여 평균 SNR값( $snr(i)$ )을 구한다. 평균 SNR값을 이용하여  $BER_{target}$ 에 따라서 각 블록에 대한 변조방식( $m(i)$ )을 선택하고, 선택된 변조방식의 평균 SNR값과  $BER_{target}$  임계값과의 차이( $diff(i)$ )를 구한다. 각 부반송파에 할당된 전체 비트수는  $R_{total} = \sum m_i \cdot b$ 와 같다.

$diff(i)$ 는 식 (3)와 같다.

$$diff(i) = BER_{target}(i) - snr(i) \quad (3)$$

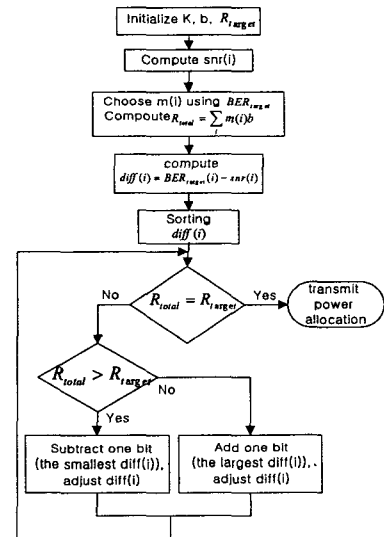


그림 3-2. 제안한 알고리즘의 순서도  
Fig. 3-2. The flowchart of the proposed algorithm

세 번째 단계에서는  $R_{target}$  비트수와  $R_{total}$  비트수가 다를 경우에  $diff(i)$  값에 대한 정렬 연산을 수행하여  $R_{target}$  비트수와  $R_{total}$  비트수가 같을 때까지 다음 과

정을 반복적으로 수행한다.  $R_{total}$  비트수가  $R_{target}$ 보다 크면 가장 작은  $diff(i)$  값을 갖는 블록에 대한 변조방식 ( $m(i)$ )에서 한 개의 비트를 빼고,  $R_{total}$  비트수가  $R_{target}$  비트수 보다 작으면 가장 큰  $diff(i)$  값을 갖는 블록에 대한 변조방식 ( $m(i)$ )에서 한 개의 비트를 더한다. 여기서 전체 부반송파의 비트 수를 목표 비트 수와 같게 하는 과정은 현재 DMT(Digital Multi-Tone)에서 많이 이용되고 있는 적응적 변조기술인 Chow의 알고리즘[3] 방식을 이용하였다.

Chow 알고리즘을 단계별로 설명하면 다음과 같다.

1단계: N 개의 부 채널(subchannel)에 대한 SNR(i) 값을 계산한다.

2단계:  $\gamma_{margin} = 0 (dB)$ , IterateCount = 0, 그리고 UsedCarriers = N으로 초기화한다. 여기서  $\gamma_{margin}$ 은 system performance margin, N은 전체 반송파의 수를 의미한다.

3단계: N 개의 부과송파에 대하여  $b(i)$ ,  $\hat{b}(i)$ ,  $diff(i)$ , 그리고 UsedCarriers를 계산한다.

$$b(i) = \log_2 \left( 1 + \frac{SNR(i)}{\Gamma + \gamma_{margin}(dB)} \right) \quad (4)$$

$$\hat{b}(i) = \text{round}[b(i)] \quad (5)$$

$$diff(i) = b(i) - \hat{b}(i) \quad (6)$$

$$\text{If } \hat{b}(i) = 0, \text{ UsedCarriers} = \text{UsedCarriers} - 1 \quad (7)$$

여기서 식 (4)에서  $\Gamma$ 은 SNR gap을 의미한다.

4단계:  $B_{total} = \sum_{i=1}^N \hat{b}(i)$ 를 구한다.  $B_{total}$  은 계산된 전체 비트수를 의미한다.

5단계: 다음 식을 이용하여  $\gamma_{margin}$ 을 개선한다.

$$\gamma_{margin} = \gamma_{margin} + 10 \log_{10} \left( 2^{\frac{B_{total} - B_{target}}{\text{UsedCarriers}}} \right) \quad (8)$$

여기서  $B_{target}$ 은 목표 비트수를 의미한다.

6단계: IterateCount를 1 증가 시킨다.

7단계:  $B_{total}$ 과  $B_{target}$ 이 같고 IterateCount가 MaxCount 보다 작은 조건을 만족하면, UsedCarriers를 N으로 초기화하고, 3단계로 돌아간다. 조건이 만족되지 못하면, 8단계로 넘어간다.

8단계:  $B_{total}$ 이  $B_{target}$ 보다 크면, 가장 작은  $diff(i)$  값을 갖는  $\hat{b}(i)$ 에서 1 비트를 빼고,  $diff(i)$  값을 개선한다.  $B_{total}$ 과  $B_{target}$ 이 같을 때까지 8단계를 반복한

다.

9단계:  $B_{total}$ 이  $B_{target}$ 보다 작으면, 가장 큰  $diff(i)$  값을 갖는  $\hat{b}(i)$ 에서 1 비트를 더하고,  $diff(i)$  값을 개선한다.  $B_{total}$ 과  $B_{target}$ 이 같을 때까지 9단계를 반복한다.

본 논문에서 제안한 적응형 변조 알고리즘과 Chow 알고리즘의 차이점은 다음과 같다. Chow 알고리즘은 채널 용량에 따라서  $\gamma_{margin}$ 을 구하여 각 부반송파에 할당할 비트를 계산한다. 여기서 Chow 알고리즘은 시스템이 요구하는 최소한의 BER(bit error rate)을 유지하고, 시스템이 견딜 수 있는 잡음의 양인  $\gamma_{margin}$ 을 구하는 과정에서 계산량이 많이 필요하다. 제안한 알고리즘의 비트 할당 방식은  $BER_{target}$ 의 SNR 임계값을 이용하여 각 부반송파에 비트를 할당한다. 따라서  $\gamma_{margin}$ 을 계산하기 위하여 Chow 알고리즘에서는 많은 계산량이 필요한데 본 논문에서 제안한 알고리즘을 이용하면 계산량이 감소함을 알 수 있다. 또한 Chow 알고리즘은 추정된 비트값과 추정된 비트값에 가장 가까운 정수값과의 차이를 의미하는  $diff(i)$ 을 이용하는 반면에, 제안한 알고리즘에서는 각 부반송파에서 계산된 평균 SNR값과  $BER_{target}$ 에 의한 SNR 임계값의 차이를 나타내는  $diff(i)$ 을 이용하여 각 부반송파에 할당된 전체 비트수와 목표 비트수를 같게 조절한다.

#### IV. 시뮬레이션결과

표 1에서 시뮬레이션 파라미터들을 보였고, 표 2에서는  $10^{-2}$ ,  $5 \times 10^{-3}$ ,  $10^{-3}$ 의  $BER_{target}$ 을 만족시키는 변조 기법들의 SNR 임계값을 보였다. 한 개의 패킷은 128개의 부반송파와 64개의 OFDM 심벌(파일럿 신호수:  $N_p = 4$ , 데이터 수:  $N_d = 60$ )로 구성된다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation parameters

Modulation	BPSK,QPSK,8QAM,16QAM,32QAM
Demodulation	Coherent detection
FFT size	128
Number of carriers	128
Guard interval	25 sample time
Frame size	64 symbols ( $N_p = 4, N_d = 60$ )
FEC	convolutional coding (R=1/2, k=7)
Doppler frequency	10 ~ 100Hz

표 2. SNR 임계값[dB]

Table 2. Threshold SNR[dB]

Mod.	BER of $10^{-2}$	BER of $5 \cdot 10^{-3}$	BER of $10^{-3}$
BPSK	1.5	2.1	3.3
QPSK	3.5	5.3	6.9
8QAM	6.5	8.8	9.4
16QAM	13.5	15.5	18.5
32QAM	22	24.7	28.2

그림 4-1에서는 제안한 알고리즘에서 부반송파 블록의 부반송파의 수를 다르게 하였을 경우에 대한 실험결과를 보였고, 제안한 알고리즘의 실험결과를 고정된 변조방법(16QAM)을 이용하였을 경우의 결과와 비교하였다. 실험에서 제안한 알고리즘은 target BER이  $10^{-2}$ 이고,  $f_d \tau_d$ 는 0.01 일 경우에 BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM으로 구성하였고, 그림 4-1에서 b는 부반송파의 블록을 구성하는 부반송파의 수를 의미하고, 4bpc는 채널당 할당된 평균 비트수를 나타낸다.

제안한 알고리즘에서 블록내의 부반송파의 수를 다르게 하였을 경우에 대한 실험결과를 비교하면, 15dB의 SNR 값에서 부반송파의 수가 1개와 2개일 경우에  $3.5 \times 10^{-4}$ 의 BER을 보였고, 부반송파의 수를 증가 시킬수록 BER은 증가함을 확인하였다. 여기서 블록내의 부반송파의 수를 증가시킬수록 부반송파의 수가 1개일 때의 성능과 비교하여 수신율이 떨어짐을 알 수 있다. 부반송파의 수를 2개로 늘렸을 경우에 부반송파의 수가 1개일 경우와 비교하면 15dB 보다 작은 SNR 구간에서 BER 성능은 비슷하였으나, 22dB의 SNR값에서 부반송파의 수가 2개일 경우는  $10^{-4}$ , 부반송파의 수가 1개일 경우는  $10^{-5}$ 의 BER 성능을 보였다. 여기서 블록내의 부반송파의 수가 1개와 2개일 경우에 같은 BER 성능을 보이는 SNR 구간에서는 부반송파 블록의 부반송파 수를 2개로 구성하면 부반송파의 수가 1개일 경우와 비교하여 BER 성능에는 차이가 없으나, 부반송파의 비트할당을 위한 시그널링 오버헤드를 50% 줄일 수 있음을 알 수 있다.

제안한 알고리즘의 실험결과와 고정된 변조방법(16QAM)의 실험결과를 비교하면, SNR값이 증가함에 따라서 고정된 변조방법의 BER은 최대  $10^{-3}$ 까지 떨어지고, 제안한 알고리즘의 BER은 20dB에서  $10^{-5}$ 까지 떨어짐을 보여 제안한 알고리즘의 수신율이 좋음을 알 수 있다. 따라서 제안한 알고리즘은 SNR값이 증가함에 따라서 채널 용량도 넓어지기 때문에 적은 비트수를 전송하는 BPSK, QPSK에서 16QAM, 32QAM과 같이 많은 비트수를 전송할 수 있는 변조 방식을 이용하여 전송 비트 수를 늘림으로서 채널상황에 잘 적응함을 보여준다.

Chow 알고리즘을 적용한 실험은 BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM으로 구성된 적응적 변조 방법을 이용하

고 채널당 평균 비트 수를 4비트로 할당하였다. 여기서 채널 추정 결과를 이용하여 부반송파에 비트를 할당하는 방법은 Chow 알고리즘이 적용되었다. 제안한 알고리즘의 실험결과와 Chow 알고리즘을 적용한 실험결과와의 비교에서는 10dB보다 작은 SNR 구간에서는 비슷한 BER 성능을 보이나 SNR값이 커질수록 Chow 알고리즘의 BER이 제안한 알고리즘의 BER 보다 더 작음을 확인하였다. 여기서 제안한 알고리즘과 Chow 알고리즘의 비교에서 비슷한 BER 성능을 보이는 SNR 구간에서는 블록화된 부반송파를 이용함으로써 Chow 알고리즘과 비교하여 제안한 알고리즘의 시그널링 오버헤드를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

그림 4-2의 실험에서 제안한 알고리즘은  $f_d \tau_d$ 는 0.01 일 경우에 BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM으로 구성하였고, 채널당 할당된 평균 비트수를 4비트로 할당하였다. 여기서  $BER_{target}$ 을 다르게 하였을 경우에 제안한 알고리즘의 성능을 비교하였다.

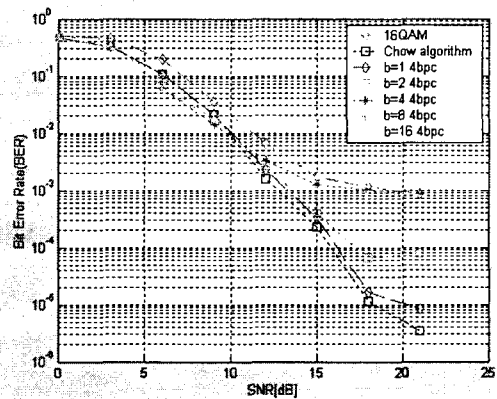


그림 4-1. 제안한 알고리즘의 성능비교

Fig. 4-1. The comparison of the performance of the proposed algorithm

실험결과에서 BER이 0.01일 경우에  $10^{-3}$ 과  $5 \times 10^{-3}$ 의  $BER_{target}$ 을 갖는 제안한 알고리즘의 성능이  $10^{-2}$ 의  $BER_{target}$ 을 적용하였을 때의 성능과 비교하여 0.8dB 정도의 SNR 성능이 향상됨을 확인하였다. SNR값이 증가할수록  $10^{-2}$ 의  $BER_{target}$ 을 갖는 제안한 알고리즘의 BER 성능이  $10^{-3}$ 과  $5 \times 10^{-3}$ 의  $BER_{target}$ 을 적용하였을 경우의 BER 성능과 비교하여 향상됨을 확인할 수 있다. 여기서 제안한 알고리즘은 SNR값이 낮을 경우에  $10^{-3}$ 의  $BER_{target}$ 을 적용함으로써 상대적으로 더 작은 비트수를 전송하여 노이즈에 강하게 하고, SNR값이 증가함에 따라서 상대적으로 더 많은 비트수를 전송하는  $10^{-2}$ 의  $BER_{target}$ 을 이용하여 향상된 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

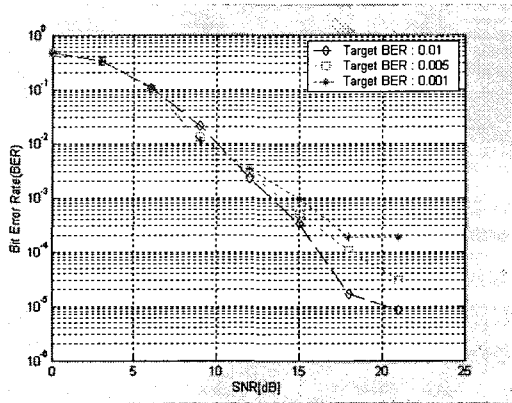


그림 4-2.  $BER_{target}$ 을 다르게 적용하였을 경우에 대한 제안한 알고리즘의 성능 비교

Fig. 4-2. The comparison of the performance of the proposed algorithm using different  $BER_{target}$

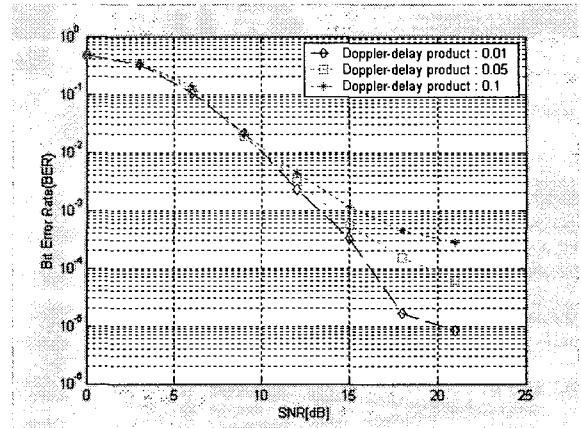


그림 4-3. 도플러 주파수와 지연 시간을 다르게 하였을 경우에 대한 제안한 알고리즘의 성능 비교

Fig. 4-3. The comparison of the performance of the proposed algorithm using various  $f_d\tau_d$

그림 4-3의 실험에서 제안한 알고리즘은  $BER_{target}$ 은  $10^{-2}$  일 경우에 BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM으로 구성하였고, 채널당 할당된 평균 비트수를 4 비트로 할당하였다. 여기서  $f_d\tau_d$ 를 다르게 하였을 경우에 제안한 알고리즘의 BER 성능을 보였다.  $f_d$ 는 도플러 주파수,  $\tau_d$ 는 feedback delay 이고,  $f_d\tau_d$ 가 0.01일 경우는 실내 환경과 같이 채널의 상황이 크게 변하지 않음을 말하고,  $f_d\tau_d$ 가 0.1일 경우는 채널의 변화가 심한 실외환경을 의미한다.

실험결과에서  $f_d\tau_d$ 가 0.01, 0.05, 그리고 0.1일 경우에 제안한 알고리즘의 BER은 21dB의 SNR값에서 각각  $10^{-5}$ ,  $3 \times 10^{-5}$ , 그리고  $2 \times 10^{-4}$ 을 보였으며,  $f_d\tau_d$ 이 커질수록 제안한 알고리즘의 BER은 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 실험결과에서 제안한 알고리즘은 채널 상태의 변화가 빠른 환경에서는 실내 환경과 비교하여 상대적으로 BER 성능이 떨어짐을 알 수 있다. 제안한 알고리즘은  $BER_{target}$ 의 SNR 임계값을 이용하여 각 부반송파에 비트를 할당하는 반면에, Chow 알고리즘은 채널 용량에 따라서  $\gamma_{margin}$ 을 구하여 각 부반송파에 할당할 비트를 계산하므로 초기 비트 할당 방식에서 차이를 보인다.

따라서 본 논문에서 제안한 알고리즘과 Chow 알고리즘의 계산량에 대한 고려는 초기 비트 할당 단계에서 곱셈과 나눗셈의 연산수와 비교 연산수를 비교하였으며, 표 3에서 곱셈과 나눗셈의 연산수와 비교 연산수를 비교하였다. 표 3에서  $K$ 는 전체 부반송파의 수,  $I_1$ 는  $\gamma_{margin}$  계산을 위한 반복횟수,  $d$ 는  $\gamma_{margin}$  계산에 필요한 곱셈과 나눗셈의 연산수를 의미한다. 또한  $n_B$ 는 제안한 알고리즘에서 이용되는 부반송파의 블록의 수,  $L$ 은 SNR 임계값의 수를 나타낸다. 계산량 비교 결과를 보면 비교 연산에서는 Chow 알고리즘의 복잡도가 제안한 알고리즘보다 낮으나, Chow 알고리즘의 곱셈과 나눗셈의 연산수에 대한 복잡도는 제안한 알고리즘보다 크게 증가함을 알 수 있다. 여기서 제안한 알고리즘의 전체 계산량에 대한 복잡도가 Chow 알고리즘보다 낮음을 알 수 있다.

표 3. 제안한 알고리즘과 Chow 알고리즘의 계산량 비교

Table 3. The comparison of the computational complexity between the proposed algorithm and Chow's algorithm ;  $K$ =number of subcarriers,  $I_1$ =number of  $\gamma_{margin}$  iterations,  $d$ =number of multiplications/divisions for  $\gamma_{margin}$ ,  $n_B$ =number of subcarrier blocks,  $L$ =number of SNR thresholds,

	Chow et al.	The proposed algorithm
Number of multi- plications/divisions	$K \cdot I_1(2d-1)$ 5376	$n_B + 1$ 65
Number of com- parisons	0	$n_B \cdot L$ 768

V. 결론

본 논문에서는 광대역 이동 채널에서 OFDM 시스템을 위한 적응적 변조 기술 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 비트 할당 방식은  $BER_{target}$ 의 SNR 임계값을 이용하여 각 부반송파에 초기 비트 수를 할당하고, Chow 알고리즘 방식을 이용하여 전체 부반송파의 비트 수를 제어한다. 실험에서 제안한 알고리즘은 SNR 값에 따라서  $BER_{target}$ 의 SNR 임계값과 부반송파의 변조 방식을 적절히 조절함으로써 채널 상황에 잘 적응함을 확인하였다. 또한 제안한 알고리즘에서는 여러 개의 부반송파를 한 개의 블록으로 구성함으로써 부반송파의 비트 할당을 위한 시그널링 오버헤드를 줄였다. 향후과제로는 채널 상태의 변화가 빠른 환경에서 채널 추정에 대한 연구를 하고자 한다.

참고 문헌

[1] Grunheid, R., Bolin, E., Rohling, H., "A blockwise loading algorithm for the adaptive modulation technique in OFDM systems," Proc. the 54th IEEE Vehicular Technology Conference, 2001. Volume: 2, 2001, pp. 948-951.

[2] Ahn, C.-J., Sasase, I., "The effects of modulation combination, target BER, Doppler frequency, and adaptation interval on the performance of adaptive OFDM in broadband mobile channel," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 48, No. 1, Feb. 2002, pp. 167-174

[3] Chow, P.S., Cioffi, J.M, Bingham, J.A.C., "A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels," IEEE Transactions on Communications, Vol. 43, No. 2, Feb. 1995, pp. 773-775.

[4] Pahlavan, Kaveh, Wireless information networks, Wiley, 1995.

[5] J.A.C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come," IEEE Commun. Mag., Vol. 28, Mar. 1990, pp. 17-25.

[6] H. Sari, G. Karam, and I. Jeanclaude,

"Transmission techniques for digital terrestrial TV broadcasting," IEEE Commun. Mag., Vol. 33, Feb. 1995, pp. 100-109.

[7] U.S. Patent, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, No. 3, 488,455, Jan. 1970.

[8] R. W. Chang, "Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission," Bell Syst. Tech. J., Vol. 46, Dec. 1966, pp. 1775-1796.

[9] R. Steele and W. Webb, "Variable rate QAM for data transmission over Rayleigh fading channel," Proc. in wireless, Calgary, Albet, Canada, 1991, pp. 1-14.

[10] H. Masuoka, S. Sampei, N. Morinaga and Y. Kamio, " Adaptive modulation system with variable coding rate concatenated code for high quality multi-media communication systems," IEEE Proc. VTC'1996, Piscataway, NJ, USA, pp. 815-819.

[11] T. Yamamura, H. Harada, Y. Kamio and M. Fujise, "A study on adaptive modulated high mobility OFDM radio transmission system," IEICE Tech. Report, RCS 1999, July, 1999, pp. 33-40.

[12] T. Yoshiki, S. Sampei and N. Morinaga, "Performance of a Multilevel Transit Power control scheme for the OFDM subcarrier adaptive modulation," IEICE Tech. Reprot, RCS 2000, July, 2000, pp. 63-68.



안 중 구 (Chong-Koo An)  
1977년 서울대학교 전기공학과 졸업  
1979년 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)  
1989년 Univ. of Texas at Austin(공학박사)

1979~1980년 현대중공업주식회사  
1980~현재 울산대학교 전자공학과 교수



추 형 석 (Hyung-Suk Chu)  
1997년 울산대학교 전자공학과 졸업  
1999년 울산대학교 전자공학과(공학석사)  
2003년 울산대학교 전자공학과(공학박사)  
2004년 8월~현재 울산대학교 전자공학과 강의전담 교수