

# BICM-OFDM 시스템을 위한 적응 비트 할당 기법

정회원 박 동 찬\*, 김 석 찬\*

## Adaptive Bit-loading Technique for BICM-OFDM Systems

Dong Chan Park\*, Suk Chan Kim\* *Regular Members*

### 요 약

이 논문에서는 BICM-OFDM(Bit Interleaved Coded modulation-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템을 위한 비트 할당 기법에 대하여 연구한다. 부채널의 상태에 따라 부반송파의 전송 매개 변수를 조절하면 OFDM 시스템의 성능을 크게 개선시킬 수 있다. 여기서는 BICM-OFDM 시스템을 위한 적응 전송 기법으로 데이터 전송률을 일정하게 유지하면서 비트 오류율이 최소가 되도록 부반송파에 비트를 할당한다. 또한, 할당하는 비트 수가 정수인 제한 조건 하에서 최적의 해를 얻기 위해 이산 라그랑지 승수 방법을 사용한다. 모의실험을 통해 제안한 비트 할당 기법의 계산량이 크지 않으며, BICM-OFDM 시스템에 제안한 기법을 사용하면 약 2~3 dB의 신호대 잡음비의 이득을 얻을 수 있음을 보인다.

**Key Words** : Adaptive bit-loading, BICM-OFDM, discrete resource allocation.

### ABSTRACT

We consider an adaptive bit-loading technique for bit interleaved coded modulation-orthogonal frequency division multiplexing(BICM-OFDM) systems. By adjusting transmission parameter of each subcarrier adaptively depending on the subchannel state, the performance of OFDM system can be improved dramatically. In this paper, the number of bits for each subcarrier is allocated to minimize bit error rate keeping the constant throughput for the adaptive transmission technique of BICM-OFDM system which can be applied to real time transmission. Also, We use the discrete Lagrange multiplier method to get the optimum solution under the integer bit allocation constraint. Simulation results show that computational amount of the proposed bit allocation technique is not high and BICM-OFDM system using the proposed technique can get the SNR gain by 2~3 dB over nonadaptive one.

### 1. 서 론

최근 문자 뿐만 아니라 음성, 그림, 동영상 등이 혼합된 다양한 멀티미디어 서비스를 언제 어디서나 실시간으로 제공받고자 하는 사용자의 요구가 급속도로 증가하고 있다. 그러나 무선통신 환경에서는 수신된 신호의 세기가 시간에 따라 혹은 주파수 성분에 따라 심하게 변하는 다중경로 페이딩 현상으

로 인해 고속으로 데이터를 전송하기가 어렵다. 이러한 무선통신 환경에서 고속의 데이터 전송을 위해 다양한 연구가 이루어져 왔다.

부호화 변조는 채널 부호와 변조 방식을 함께 고려하여 비트 오류율과 데이터 전송률을 동시에 향상시키고자 하는 방식이다. 특히 비트 단위로 인터리빙하는 BICM은 페이딩 채널에서 TCM(Trellis coded modulation)보다 더 큰 채널 용량을 가지며,

\* 부산대학교 전자공학과 통신시스템연구소(sckim@pusan.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-04-141, 접수일자 : 2005년 4월 6일

※이 연구는 부산대학교 신입교수 학술연구조성비(연구정착금)의 지원으로 이루어졌습니다.

낮은 복잡도를 가지는 부호기와 복호기로 구현될 수 있다는 장점을 가진다<sup>[1]</sup>.

OFDM은 직교하는 여러 부반송파에 병렬로 데이터를 전송하여 다중 경로에 의해 발생하는 ISI (Inter Symbol Interference)를 효과적으로 제거하는 전송 방식이다. 그러나 페이딩을 심하게 겪은 부반송파로 전송된 데이터는 오류가 발생할 확률이 높으므로, OFDM 방식을 사용하는 통신 시스템에서 채널 부호화는 반드시 필요하다. 이때, BICM을 OFDM 방식의 부호화 변조로 사용한 통신 시스템을 BICM-OFDM 시스템이라 하며, 다중 경로 채널에서 높은 데이터 전송률을 필요로 하는 통신 환경에 적합하다. 따라서 무선랜, 지상파 디지털방송 등의 여러 고속 무선통신 표준에 사용되고 있다<sup>[2],[3]</sup>.

데이터 전송률을 높이기 위한 또 다른 방법으로 채널의 상태에 따라 송신 전력, 부호율, 변조 방식 등의 전송 매개 변수를 변화시키는 적응 전송 기법이 있다<sup>[4]</sup>. 이러한 적응 전송 기법은 채널의 상태가 좋을 때는 데이터 전송률을 높이고 채널의 상태가 나빠지면 데이터 전송률을 낮추어서 평균 데이터 전송률을 크게 증가시킨다. 특히 변조 방식을 채널의 상태에 적응시켜 사용자에게 일정한 통신 품질을 보장하고 높은 데이터 전송률을 제공하는 적응 전송 기법을 적응 변조라고 한다. 적응 변조에 관한 연구로, 채널 상태에 따라 QAM 변조 방식을 변화시키는 기법이 제안되었으며, 변조 방식과 송신 전력을 동시에 적응시키는 적응 변조의 성능이 페이딩 채널에서의 최대 채널 용량에 근접할 수 있음이 밝혀졌다. 또한, 일정 수준 이상으로 전송 매개 변수의 자유도를 증가시키는 것은 성능 향상에 그다지 영향을 주지 않는다는 사실도 확인되었다<sup>[5],[6]</sup>.

이러한 적응 변조는 OFDM 시스템에서 부반송파의 매개 변수를 변화시키는 부반송파별 적응 변조 방식으로 응용되었다. 부반송파별 적응 변조의 복잡도를 줄이기 위해 부반송파를 몇 개의 그룹으로 묶어 그룹별로 적응시키는 방법이 제안되었으며, 채널 추정치의 오류보다는 채널 상태 정보의 시간 지연이 적응 변조를 사용하는 OFDM 시스템의 성능에 더 큰 영향을 미친다는 결과도 발표되었다<sup>[9],[10]</sup>.

OFDM방식을 포함하는 다중 반송파 시스템에서 적응 변조와는 별도로, 전 부반송파에 할당하는 총 비트수를 고정시켜 데이터 전송률을 일정하게 유지하는 적응 전송 기법이 연구되어 왔다<sup>[11]-[14]</sup>. 이 기법은 부반송파의 비트수와 전력을 부채널의 상태에 따라 다르게 할당하여 시스템의 성능을 향상시키는

기법으로 비트 및 전력 할당 기법이라 하며, 채널용량을 이용하여 반복적으로 비트와 전력을 할당하는 기법이 ADSL등의 다중 반송파를 사용하는 고속 모뎀에서 사용되고 있다. 대표적인 비트 및 전력 할당 기법으로는, 채널용량을 사용하여 반복적으로 부반송파에 비트 및 전력을 할당하는 방법과, 부반송파의 신호 대 잡음비가 최대가 되도록 비트 및 전력을 할당하는 방법, 그리고 라그랑지 최적화 기법을 이용한 방법 등이 있다.

이 논문에서는 BICM-OFDM 시스템에서 라그랑지 최적화 기법을 적용한 비트 할당 기법에 대해 연구하였다. 이 기법은 부반송파에 할당하는 비트수가 정수일 때 최적의 비트수를 찾아낼 수 있으며, 그 계산량이 적다는 장점을 가진다. [14]에서는 전체 송신 전력을 제한조건으로 두고 데이터 전송률이 최대가 되도록 비트 및 전력을 할당하는 방법과 일정한 데이터 전송률을 유지하며 전체 송신 전력이 최소가 되도록 할당하는 두 가지 방법을 제안하였지만, 무선통신 환경에서는 채널이 시간에 따라 변하므로 비트 할당의 계산에 소요되는 시간이 작은 것이 바람직하다. 따라서 여기서는 전력 할당은 사용하지 않으며, 가변 데이터 전송률 방식에 비해 시스템의 복잡도가 작은 고정 데이터 전송률의 비트 할당 방법을 사용한다. 또한 부호화 변조 방식인 BICM의 영향을 고려하여 BICM-OFDM 시스템의 비트 오류율이 최소가 되도록 비트를 할당하는 기법을 제안한다. 이러한 고정 데이터 전송률을 가지며 비트 오류율을 최소화하는 비트 할당기법은 가변 데이터 전송률 방식과 달리 버퍼가 필요하지 않으므로 송수신기의 구조가 간단해지며, 충분한 전송 품질로 일정한 데이터 전송률을 사용자에게 제공할 수 있으므로 실시간 무선 통신 환경인 차세대 휴대전화, 이동 인터넷 등에 적합한 적응 전송 기법이다. 이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서 비트 할당 기법을 사용하는 BICM-OFDM 시스템에 대해 설명하고, III장에서 이 시스템을 위한 비트 할당 기법을 제안한다. IV장에서 모의실험을 통해 제안한 적응 기법의 성능을 평가하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모형

비트 할당 기법을 사용하는 BICM-OFDM 시스템은 그림 1과 같이 BICM 부분과 OFDM 부분으로 이루어져 있다. BICM 부분은 송신기에서 부호

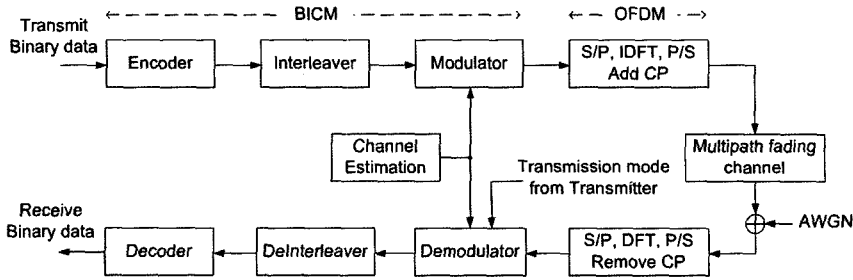


그림 1. 비트 할당 BICM-OFDM 시스템의 블록도

기, 인터리버, 변조기로 구성되고, 수신기에서 복호기, 디인터리버, 복조기로 구성된다. 전송하려는 이진 데이터열은 길쌈 부호화와 비트 인터리빙을 거쳐 변조기에 입력된다. 변조기에서는 추정된 채널 상태 정보를 이용하여 부분송파의 변조 방식을 결정하고, 이에 따라 부분송파에 부호비트를 할당한다. 즉, 어떤 부분송파의 변조방식이  $M$ -QAM으로 결정되었다면 이 부분송파에는  $m = \log_2 M$  비트를 할당한다. 부분송파의 변조 방식을 결정한 후에 변조기에 입력된 이진 부호열은 그림 2와 같은 Gray 레이블에 따라 QAM 심벌로 바뀐다. 이러한 변조 방식 결정과 데이터 심벌 전송은 적응 구간마다 이루어진다. 전력 할당을 하지 않으므로, 부분송파의 전력을 모두 동일하게 고정시키기 위해 QAM 심벌의 평균 전력을 정규화한다. 표 1에 QAM 정규화 상수를 나타내었다. 부분송파의 수를  $N$ 이라고 하면, 변조기에서 출력된  $N$ 개의 QAM 심벌은 S/P, IDFT, P/S 변환 후에 CP(Cyclic Prefix)를 추가하여 OFDM 심벌로 전송된다. 수신기는 채널을 통해 수신된 OFDM 심벌에서 CP를 제거하고 S/P, DFT, P/S 변환을 통해  $N$ 개의 QAM을 얻는다. ISI와 ICI(Inter Carrier Interference)가 없다고 가정하면, 부분송파는 각각의 부채널 감쇄와 잡음을 가지게 되므로, OFDM 부분의 부분송파에 대한 신호 모형은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>15)</sup>.

$$y_k = h_k x_k + n_k, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

여기서  $x_k, y_k$ 는 각각  $k$ 번째 부분송파를 통해 송신, 수신된 QAM 심벌,  $h_k$ 는  $k$ 번째 부채널의 감쇄,  $n_k$ 는 평균이 0, 분산이  $\sigma^2$ 인  $k$ 번째 부분송파의 복소 정규 잡음을 나타낸다.

복조기는 수신된 QAM 심벌과 추정된 채널 상태

정보 및 송신기에서 알려준 전송 매개 변수를 이용하여 다음과 같이 BICM의 복호를 위한 비트 매트릭을 계산한다<sup>11)</sup>.

$$\lambda^i(y_k, \hat{h}_k, b) = \min_{z \in x_b^i} |y_k - \hat{h}_k z|^2, \quad i = 1, 2, \dots, m_k \quad (2)$$

여기서  $\hat{h}_k$ 는  $k$ 번째 부채널 감쇄의 추정값이고,  $m_k$ 는  $k$ 번째 부분송파에 할당되는 부호 비트의 수이며,  $x_b^i$ 는  $2^{m_k}$ -QAM의 모든 심벌들 중에서  $i$ 번째 비트의 값이  $b$ 인 심벌들을 나타낸다.  $b$ 는 0 또는 1이므로 수신된 하나의 QAM 심벌에서  $2m_k$ 개의 비트 매트릭이 계산된다. (2)의 비트 매트릭 계산식은 log-sum 근사를 사용하여 ML(Maximum Likelihood) 비트 매트릭의 계산량을 줄인 것이다. 무선통신 환경에서는 추정된 채널값에 추정 오차가 존재하고, 추정 시점과 추정값을 사용하는 복호 시점 간의 시간차에 의한 채널 정보의 시간 지연이 발생하므로, 적응 구간마다 채널 상태의 추정값을 사용하여 변조 방식을 결정하는 적응 전송 기법은 성능이 나빠질 수 있다. 그러나 무선랜과 같이 이동성이 그다지 크지 않은 통신 환경에서는 채널 추정 오차와 채널 정보의 시간 지연에 의한 성능 저하는 아주 작기 때문에, 이 논문에서는 송수신기가 채널 상태를 정확히 안다고 가정하였다<sup>10)</sup>.

복조기에서 계산된 비트 매트릭은 디인터리빙 되어 복호기에 입력되고, 복호기는 패스 매트릭이 가장 큰 부호열을 선택한다. 이 패스 매트릭은 디인터리빙된 비트 매트릭의 합으로 구해지며, 이러한 복호 과정은 Viterbi 복호기로 구현될 수 있다. 복조와 복호 과정을 더 간단히 하기 위해 복조기에서  $m_k$ 개의 LLR(Log-Likelihood Ratio)를 계산하고, 이것을 이용해서 이진 Viterbi 복호기로 복호하는

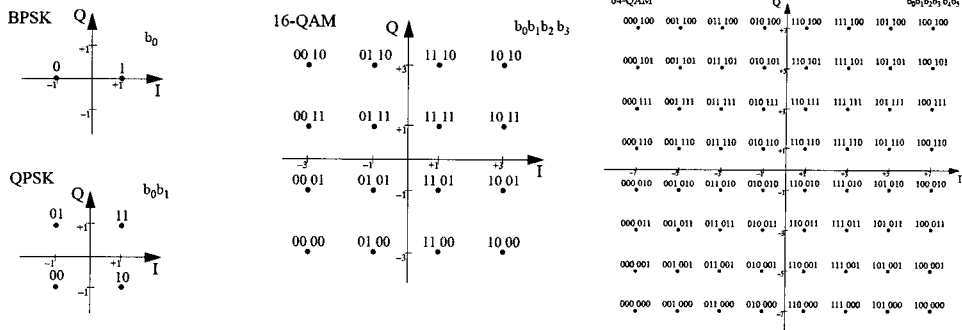


그림 2. QAM 성상도와 Gray 레이블

표 1. QAM 정규화 상수

변조 방식	정규화 상수
BPSK	1
QPSK	$1/\sqrt{2}$
16-QAM	$1/\sqrt{10}$
64-QAM	$1/\sqrt{42}$

방법도 제안되었다<sup>16)</sup>.

### III. 비트 할당 기법

추정된 채널 정보를 이용하여 적응 구간마다 각 부반송파의 변조 방식을 결정하고, 이 변조방식에 따라 해당되는 비트 수를 각 부반송파에 할당한다. 적응 구간이 너무 짧아지면 비트 할당 계산에 따른 부하가 커지고, 너무 길어지면 채널 변화에 민감해 지므로 적응 구간은 통신 채널의 환경과 통신 시스템의 매개 변수 등을 모두 고려하여 결정되어야 한다.

BICM-OFDM 시스템에서 고정 데이터 전송률을 가지며 비트 오류율이 최소가 되도록 부반송파에 비트를 할당하는 문제는 다음과 같은 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{m}}{\text{Min}} P_b, \quad \mathbf{m} = \{m_0, \dots, m_{N-1}\} \\ & \text{subject to } \sum_{k=0}^{N-1} m_k = N_c \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $m_k$ 는 부반송파  $k$ 에 할당하는 부호 비트의 수이며,  $P_b$ 는 비트 오류율이다.  $N_c$ 는 OFDM 심벌로 전송되는 총 부호비트의 수를 나타내며, 고정된 데이터 전송률을 위해서는 이 값을 일정하게 유지

하여야 한다.

먼저 BICM-OFDM 시스템의 비트 오류율을 구해보자. 격자의 같은 상태에서 출발해서 임의의 상태에서 다시 서로 만나는 두 부호열을  $c$ 와  $\hat{c}$ 이라고 하자. 전송된 부호열이  $c$ 일 때 Viterbi 복호기에서  $\hat{c}$ 을 선택할 확률을 짝 오류 확률  $P(c \rightarrow \hat{c})$ 이라 한다. 짝 오류 확률은 두 부호열의 해밍 거리  $d$ , 레이블 방식  $\mu$ , 그리고 변조 방식  $\chi$ 에 따라 달라 지므로  $f(d, \mu, \chi)$ 로 나타낼 수 있다<sup>1)</sup>.

짝 오류 확률이 주어지면 길썬 부호의 비트 오류율은 다음과 같이 합 상한(union bound)으로 주어진다.

$$P_b \leq \sum_{d=1}^{\infty} W_I(d) f(d, \mu, \chi) \quad (4)$$

여기서  $W_I(d)$ 는 해밍 거리  $d$ 에서 오류 사건의 총 입력 가중치이며 사용하는 길썬 부호에 따라 정해지는 상수이다.

BICM 방식의 정확한 짝 오류 확률을 단편 형태로 구하기는 어려우므로 짝 오류 확률에 대한 Chernoff 상한을 이용하였다<sup>17)</sup>. Gray 레이블과 QAM을 사용한 BICM의 짝 오류 확률의 Chernoff 상한은 다음과 같이 구해진다.

$$f(d, \mu, \chi) \leq E \left[ \exp \left( - \sum_{n=1}^d \frac{|h'_n|^2}{4\sigma^2} |x_n - \hat{z}_n|^2 \right) \right] \quad (5)$$

여기서  $n$ 은 오류 비트의 순서를 나타내는 인덱스,  $x_n$ 은 이 오류 비트가 전송된 심벌이다.  $h'_n$ 은  $x_n$ 에 대한 감쇄이며, 부호비트가 하나의 부반송파로 전송되

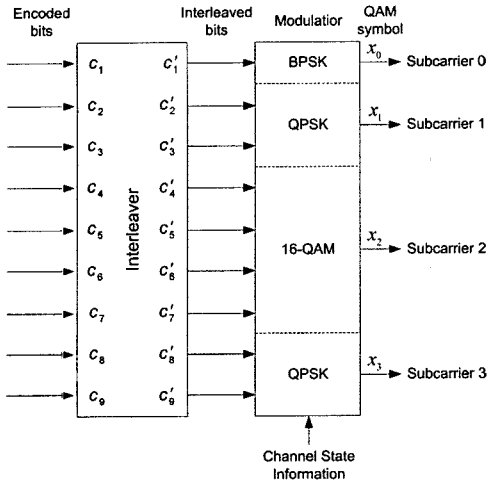


그림 3. 비트 할당 BICM-OFDM 시스템의 인터리빙과 변조

므로  $h_n$ 은  $N$ 개의 부채널 감쇄  $h_0, h_1, \dots, h_{N-1}$  중의 하나이다. 변조 방식으로 QPSK, 16-QAM, 64-QAM 등의 정사각형 QAM을 사용한다고 할 때,  $\hat{z}_n$ 은 전송 심벌과 한 비트 다른 신호들 중 가장 가까운 거리에 있는 심벌을 나타낸다.

그림 3은 비트 할당 BICM-OFDM 시스템에서의 인터리빙과 변조 과정의 예를 보여준다. 9개의 부호 비트가 4개의 부반송파에 할당되며, 부반송파의 변조방식은 채널 상태 정보를 이용하여 각각 BPSK, QPSK, 16-QAM, QPSK로 결정되었음을 알 수 있다. 따라서 부반송파에는 각각 1, 2, 4, 2개의 인터리빙 된 비트가 할당된다. 부반송파  $k$ 의 변조 방식이  $2^{m_k}$ -QAM으로 결정되었다고 하자. 만약 이 상적인 인터리빙을 가정하면, 부호기 출력의 한 부호 비트가 부반송파  $k$ 로 전송될 확률은  $m_k/N_c$ 가 된다.  $m_k$ 가 큰 부반송파일수록 부호비트가 인터리빙과 변조를 거쳐 그 부반송파로 전송될 확률이 커진다. 만약 비트 할당을 하지 않고 부반송파가 모두 같은 변조 방식을 사용한다고 하면, 한 부호 비트가 부반송파로 전송될 확률은 모두 같다.

이상적인 인터리빙에 의해  $x_n, \hat{z}_n, h_n$ 은 모두 독립이므로 (5)의 짝 오류 확률의 Chernoff 상한은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(d, \mu, \chi) \leq \left( \frac{1}{N_c} \sum_{k=0}^{N-1} m_k E \left[ \exp \left( -\frac{|h_k|^2}{4\sigma^2} |x - \hat{z}|^2 \right) \right] \right)^d \quad (6)$$

이 결과에 따르면 (4)의 비트 오류율은  $d = 1$ 일 때의 짝 오류 확률  $f(1, \mu, \chi)$ 에 대한 단조 증가 함수임을 알 수 있다. 따라서 비트 오류율을 최소화하는 것은  $f(1, \mu, \chi)$ 을 최소화 하는 것과 같으며, (3)의 최적화 문제는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{m_0, m_1, \dots, m_{N-1}} \sum_{k=0}^{N-1} m_k E \left[ \exp \left( -\frac{|h_k|^2}{4\sigma^2} |x - \hat{z}|^2 \right) \right] \\ & \text{subject to } \sum_{k=0}^{N-1} m_k = N_c \end{aligned} \quad (7)$$

여기에 라그랑지 승수 방법을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[18]</sup>.

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\mathbf{m}} \sum_{k=0}^{N-1} H_k - \lambda \sum_{k=0}^{N-1} m_k \\ & \text{where } H_k = m_k E \left[ \exp \left( -\frac{|h_k|^2}{4\sigma^2} |x - \hat{z}|^2 \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

할당하는 자원  $m_k$ 에 대해 모든 비용 함수  $H_k$ 가 서로 독립이므로, 위의 식에서 비용 함수의 합을 최소화하는 것은 각각의 비용 함수를 독립적으로 최소화하는 것과 같다. 따라서 (8)은 다음과 같이 간단히 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{m_k} H_k - \lambda m_k, \text{ for all } k \\ & \text{where } H_k = m_k P_k \\ & P_k = E \left[ \exp \left( -\frac{|h|^2}{4\sigma^2} |x - \hat{z}|^2 \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 라그랑지 승수  $\lambda$ 는 (7)에서 주어진 제한 조건을 만족 하도록 결정되어야 한다.

부반송파에 할당하는 자원  $m_k$ 가 이산값이어야 하므로 해석적으로  $\lambda$ 를 찾기는 쉽지 않다. 이러한 이산 자원 할당 문제는 라그랑지 승수가 할당 자원에 대한 비용 함수의 변화율과 같다는  $\lambda$ 정리를 이용하면 쉽게 해결할 수 있다<sup>[14],[18]</sup>.  $\lambda$ 정리를 이용해서 제한 조건을 만족하는 라그랑지 승수를 찾는 방법은 다음과 같다. 라그랑지 승수가  $\lambda$ 로 주어졌을 때, 비용함수  $H_k$ 의 최소값을  $H_k^*(\lambda)$ , 그때 할당된

자원을  $m_k^*(\lambda)$ 로 표시한다.

1. 다음 조건을 만족하는 초기값  $\lambda_1, \lambda_2$ 를 정한다.

$$\sum_{k=0}^{N-1} m_k^*(\lambda_1) \leq N_c \leq \sum_{k=0}^{N-1} m_k^*(\lambda_2), \quad \lambda_1 \leq \lambda_2 \quad (10)$$

2. 다음의 식을 이용하여  $\lambda_{next}$ 를 구한다.

$$\lambda_{next} = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} H_k^*(\lambda_2) - \sum_{k=0}^{N-1} H_k^*(\lambda_1)}{\sum_{k=0}^{N-1} m_k^*(\lambda_2) - \sum_{k=0}^{N-1} m_k^*(\lambda_1)} \quad (11)$$

3.  $\lambda_{next}$ 로  $m_k^*(\lambda_{next})$ 와  $H_k^*(\lambda_{next})$ 를 구한다.

4.  $N_{next} = \sum_{k=0}^{N-1} m_k^*(\lambda_{next})$ 를 계산하고 다음의 조건문을 실행한다.

$$\begin{cases} stop, & N_{next} = N_c \\ \lambda_2 = \lambda_{next}; \text{ goto step2}, & N_{next} > N_c \\ \lambda_1 = \lambda_{next}; \text{ goto step2}, & N_{next} < N_c \end{cases} \quad (12)$$

(9)에서  $H_k$ 의 최소값을 구하기 위해서는  $|x - \hat{z}|$ 의 값을 알아야 한다. 표 2에 변조 방식에 따른  $|x - \hat{z}|$ 의 값과 그 분포를 나타내었다. 여기서  $d_{min}$ 은 해당 변조 방식에서 심볼 사이의 유클리디안 최소 거리를 의미한다.  $\exp(-|h_k|^2 d_{min}/(4\sigma^2))$ 을  $D_k$ 로 정의하고 표 2를 이용하면 (9)의  $P_k$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} BPSK : P_k &= D_k \\ QPSK : P_k &= D_k \\ 16QAM : P_k &= \frac{3}{4}D_k + \frac{1}{4}D_k^4 \\ 64QAM : P_k &= \frac{7}{12}D_k + \frac{3}{12}D_k^4 + \frac{1}{12}(D_k^9 + D_k^{16}) \\ 256QAM : P_k &= \frac{15}{32}D_k + \frac{7}{32}D_k^4 + \frac{2}{32}(D_k^9 + D_k^{16}) \\ &\quad + \frac{1}{32}(D_k^{25} + D_k^{64} + D_k^{49} + D_k^{64}) \end{aligned} \quad (13)$$

#### IV. 모의 실험

BICM-OFDM 시스템의 비트 할당을 위한 변조

표 2. 변조 방식에 따른  $|x - z|$  값과 그 분포

변조방식	$d_{min}$	$ x - z /d_{min}$	$P( x - z )$
QPSK	$2/\sqrt{2}$	1	1
16-QAM	$2/\sqrt{10}$	1 2	3/4 1/4
64-QAM	$2/\sqrt{42}$	1 2 3,4	7/12 3/12 1/12
256-QAM	$2/\sqrt{170}$	1 2 3,4 5,6,7,8	15/32 7/32 3/32 1/32

방식으로 BPSK, 4PSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM을 사용하였다. 이때 부반송파에 할당하는 부호 비트의 수는 각각 0, 1, 2, 4, 6, 8이며, 여기서 0은 해당되는 부반송파에 비트를 할당하지 않음을 의미한다. 다중 경로 채널에서 시간에 따른 퍼짐을 나타내는 매개변수인  $\tau_{rms}$ 와  $\tau_{max}$ 는 각각  $0.2\mu s$ 와  $0.8\mu s$ 로 두었고 지수적으로 감소하는 MIP (Multipath Intensity Profile)을 가정하였다<sup>[19]</sup>.

그림 4는 이 채널의 한 표본을 보여준다. 채널 부호로는 부호율이 1/2, 구속장의 길이가 7, 생성다항식이 (133,171)<sub>8</sub>인 길쌈 부호를 사용하였고, 부호율 1/2인 부호를 천공(puncturing)하여 부호율 2/3, 3/4을 얻었다<sup>[20]</sup>. 부반송파의 수는 64로 하였고, 20개의 OFDM 심벌을 적응 구간으로 정하여 이 구간마다 부반송파의 변조방식을 결정하였다. 또한, 적응 구간 동안 채널은 변하지 않는다고 가정하였다.

그림 5은 신호 대 잡음비(SNR)가 18dB이고 OFDM 심벌로 전송할 부호 비트의 수( $N_c$ )가 256일때, 그림 2의 주파수 응답과 이 채널에서 부반송파에 비트를 할당한 결과를 보여준다. 이 그림은 제안한 비트 할당 기법이 채널의 상태에 따라 잘 동작함을 보여주며, 채널의 상태가 좋을수록 더 많은 비트를 할당한다는 사실을 알 수 있다.

표 3은 OFDM 심벌에 할당하는 총 부호 비트 수가 256으로 주어졌을 때,  $\lambda$ 정리를 이용하여 라그랑지 승수를 찾아가는 과정을 보여준다. 제한 조건  $N_c = 256$ 을 만족하는  $\lambda$ 값을 찾기 위해 소요되는 반복회수가 10번 이하임을 알 수 있으며, 이것은 부반송파의 변조 방식을 결정하는데 소요되는 시간이

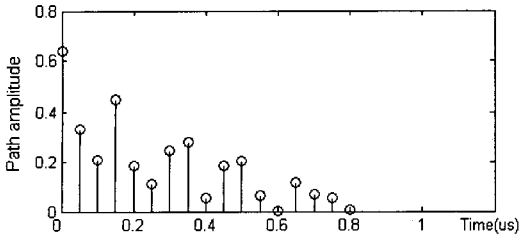


그림 4. 모의실험에 사용된 다중 경로 채널의 한 표본

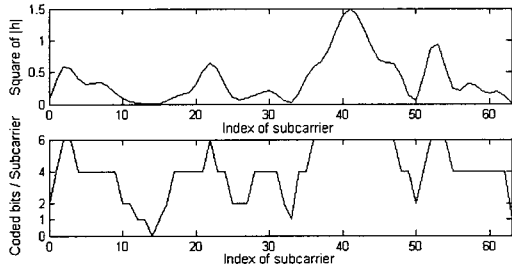


그림 5. 채널 표본과 부호 비트 할당 결과

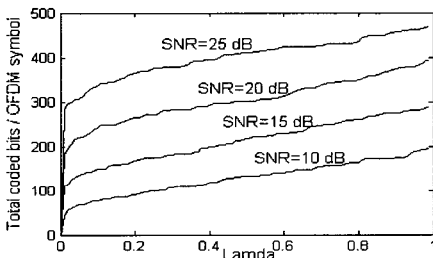


그림 6.  $\lambda$ 와 OFDM 심벌에 할당되는 총 비트수

표 3.  $\lambda$ 값을 찾는 과정

Iteration	$\lambda$	$\sum_{k=0}^{N-1} m_k$	$\sum_{k=0}^{N-1} H_k$
0	1.00000	336	70.9397
1	0.21113	214	4.6764
2	0.54314	281	29.2346
3	0.36654	242	12.0057
4	0.44177	261	19.9456
5	0.39684	256	17.4190

길지 않다는 것을 의미한다. 이것은  $\lambda$ 값이 주어지면 각 부반송파에 할당하는 비트 수의 계산이 독립적으로 이루어질 수 있기 때문이다. [14]에서 제안한 것처럼 테이블 찾기를 이용하면 계산 시간을 더 줄일 수 있을 것이다.

그림 6은  $\lambda$ 와 OFDM 심벌에 할당되는 총 비트

수와의 관계를 보여준다.  $\lambda$ 값이 커질수록 OFDM 심벌에 더 많은 비트를 할당하며, 제한 조건  $N_c$ 가  $\lambda$ 에 대한 단조 증가 함수임을 확인할 수 있다.

비트 할당 기법을 사용한 BICM-OFDM 시스템의 비트오류율을 평가하기 위해 여러 부호율( $R_c$ ), SNR,  $N_c$ 에서 각각 1,000,000번의 모의실험을 하였고, 그 결과를 그림 7에서 그림 12까지 나타내었다.

그림 7은 부호율 1/2, 그림 8은 부호율 2/3, 그림 9는 부호율 3/4에서 비트 할당 기법을 적용한 BICM-OFDM 시스템과 적용하지 않은 BICM-OFDM 시스템의 비트오류율을 보여준다. 이때, 비트 할당을 적용하지 않은 BICM-OFDM 시스템의 변조방식으로  $N_c$ 가 128에서는 QPSK를 사용하였고,  $N_c$ 가 256에서는 16QAM을 사용하였다. 이 결과들은 BICM-OFDM 시스템에 제안한 비트 할당 기법을 적용하면 2~3dB의 신호 대 잡음비 이득을 얻을 수 있음을 보여준다.

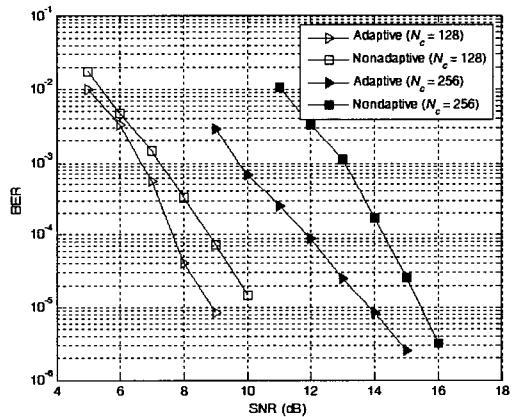


그림 7.  $R_c=1/2$ ,  $N_c=128, 256$ 에서 비트오류율

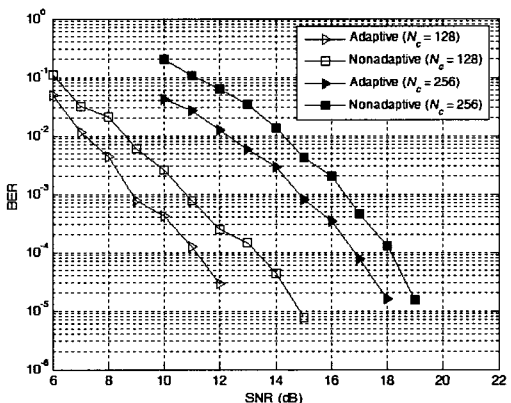


그림 8.  $R_c=2/3$ ,  $N_c=128, 256$ 에서 비트오류율

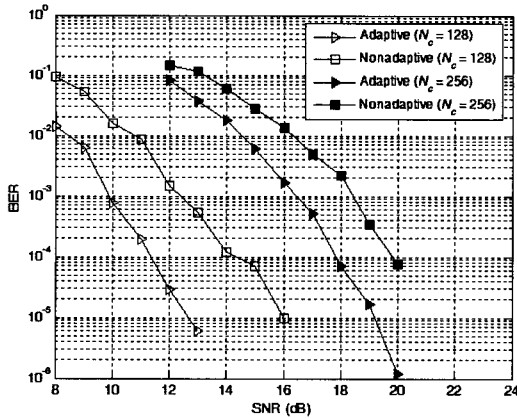


그림 9.  $R_c = 3/4$ ,  $N_c = 128, 256$  에서 비트오류율

### V. 결론

BICM-OFDM 시스템은 다중 경로 페이딩에 강하며 고속 데이터 전송에 유리한 통신 시스템이며, 적응 전송 기법을 사용하면 성능을 더욱 개선시킬 수 있다. 이 논문에서는 이산 라그랑지 승수 방법을 사용하여 일정한 데이터 전송률을 유지하며 비트 오류율을 최소화하도록 부반송파에 비트를 할당하였다. 모의 실험을 통해 제안한 비트 할당 기법의 반복 계산량이 크지 않음을 입증 하였고, BICM-OFDM에 이 기법을 사용하면 신호 대 잡음비를 2~3dB 개선시킬 수 있음을 보였다. 제안한 비트 할당 BICM-OFDM 시스템은 충분한 전송 품질로 일정한 데이터 전송률을 사용자에게 보장해 줄 수 있으므로 무선 통신 환경에 적합한 통신 시스템이다.

### 참고 문헌

[1] G. Caire and G. Taricco and E. Biglieri, "Bit-Interleaved Coded Modulation", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 44, pp. 927 - 946, May 1998.

[2] D. Sommer and G. Fettweis, "Aspects of Coding and Modulation for OFDM," *In Proc. 6th International OFDM-Workshop (InOWo)*, pp. 211-214, Hamburg, Sep. 2001.

[3] Z. X. Yang, M. Han, C. Y. Pan, J. Wang, L. Yang, and A. D. Men, "A Coding and Modulation Scheme for HDTV Services in DMB-T," *IEEE Trans. Broadcast.*, VOL. 50, pp. 26-31, Mar. 2004.

[4] S. Catreux, V. Erceg, D. Gesbert, and R. W. Jr. Heath, "Adaptive modulation and MIMO coding for broadband wireless data networks," *IEEE Comm. Mag.*, vol. 40, pp. 108 -115, June 2002.

[5] W. T. Webb and R. Steele, "Variable rate QAM for mobile radio," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, pp. 2223 -2230, July 1995.

[6] 정연호, "균일 및 주파수 선택적 페이딩에서 대역폭 효율의 적응 QAM 성능분석," *한국통신학회논문지*, 25권, 1473-1479쪽, 2000년 7 월.

[7] A. J. Goldsmith, Soon-Ghee Chua, "Variable-rate variable-power MQAM for fading channels," *IEEE Trans. on commun.*, vol. 45, pp. 1218 -1230, Oct. 1997.

[8] S. T. Chung and A. J. Goldsmith, "Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 49, pp. 1561-1571, Sep. 2001.

[9] T. Keller, L. Hanzo, "Adaptive modulation techniques for duplex OFDM transmission," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, pp. 1893-1906, Sep. 2000.

[10] S. Ye, R. S. Blum, and L. J. Jr. Cimini, "Adaptive modulation for variable-rate OFDM systems with imperfect channel information," *IEEE Proc. Veh. Technol. Conf. VTC 2002*, Spring, pp. 767 -771, May 2002.

[11] J. A. C. Bingham, "Multicarrier Modulation for Data Transmission : An Idea Whose Time Has Come," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 28, pp. 5-14, May 1990.

[12] P. S. Chow, J. M. Cioffi, and J. A. C. Bingham, "Practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels," *IEEE Trans. on commun.* vol. 43, pp. 773-775, Feb. 1995.

[13] R. F. H. Fischer, J. B. Huber, "A new loading algorithm for discrete multitone transmission," *Global Telecommunications Conference, GLOBECOM ' 96*, vol: 1 pp. 724-728, Nov. 1996.



[14] B. S. Krongold, K. Ramchandran, and D. L. Jones, "Computationally Efficient Optimal Power Allocation Algorithms for Multicarrier Communication Systems," *IEEE Trans. on commun.*, vol. 48, pp. 23-27, Jan. 2000.

[15] M. Speth, S. A. Fechtel, G. Fock, H. Meyr, "Optimum receiver design for wireless broad-band systems using OFDM. I," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 47, pp. 1668-1677 Nov. 1999.

[16] F. Tosato, P. Bisaglia, "Simplified soft-output demapper for binary interleaved COFDM with application to HIPERLAN/2," in *Proc. IEEE int. Communications Conf. ICC 2002*, April, pp. 664-668.

[17] M. K. Simon and M. S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis*, New York, Wiley, 2000.

[18] H. Everett III, "Generalized lagrange multiplier method for solving problems of optimum allocation of resources," *Operational Research*, vol. 11, pp. 399-417, 1963.

[19] D. J. R. van Nee and R. Prasad, *OFDM for wireless multimedia communications*, Artech House Publishers, 2000.

[20] J. G. Proakis, *Digital Communications, Fourth Edition*, McGraw-Hill, 2001.

박 동 찬 (Dong Chan Park)

정회원



2001년 2월 부산대학교 전기  
공학과 졸업  
2004년 2월 부산대학교 전자  
공학과(석사)  
2004년 3월~현재 부산대학교  
전자공학과 박사과정  
<관심분야> OFDM, 부호화변

조, RFID

김 석 찬 (Suk Chan Kim)

정회원



1993년 2월 부산대학교 전자공  
학과 졸업  
1995년 2월 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학과(석사)  
2000년 2월 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학과(박사)  
2000년 3월~2000년 7월 한국전

자통신연구소 (ETRI) 연구원

2000년 8월~2001년 7월 Princeton 대학교 박사 후  
과정  
2001년 8월~2002년 2월 Lehigh 대학교 박사 후 과  
정  
2002년 3월~현재 부산대학교 전자공학과 조교수  
<관심분야> 이동통신, 통신 신호처리, OFDM