

다중 사용자 OFDM 시스템을 위한 효율적이고 빠른 비트 배정 알고리즘

An Efficient and Fast Bit Allocation Algorithm for Multiuser OFDM Systems

*김민석, **이창욱, ***전기준
Kim Min Suk, Lee Chang Wook, Jeon Gi Joon

Abstract - Orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) is one of the most promising technique for next generation wireless broadband communication systems. In this paper, we propose a new bit allocation algorithm in multiuser OFDM. The proposed algorithm is derived from the geometric progression of the additional transmit power of subcarriers and the arithmetic-geometric means inequality. The simulation shows that this algorithm has similar performance to the conventional adaptive bit allocation algorithm and lower computational complexity than the existing algorithms.

Key Words : OFDM, Bit allocation, Arithmetic-Geometric Mean Inequality, Adaptive modulation

1. 서론

OFDM(적교 주파수 분할 다중)은 멀티캐리어 변조 방식의 일종으로, 멀티패스(multi-path) 및 이동 수신 환경에서 우수한 성능을 발휘한다. 이 때문에 이 기술은 지상과 디지털 TV 및 디지털 음성 방송에 적합한 변조방식으로 주목을 받고 있으며, 최근 인터넷의 보급과 멀티미디어 자료의 급격한 증가에 의한 초고속 통신망에 대한 수요를 충족시키기 위해 초기 1~2Mbps인 IEEE 802.11 규격을 향상시켜 802.11a, 802.11b와 같은 규격을 확정하였으며, 현재 802.11g 규격을 표준화 회의를 통해 결정 중에 있다. 특히 NH 밴드의 5GHz 대역에서 6~54Mbps의 전송률을 유지하는 802.11a는 OFDM을 전송기술로 사용하고 있으며, OFDM 전송과 5GHz 대역의 사용에 대한 관심의 증가로 인해 무선 LAN 규격에 비해 각광을 받고 있다. [1]-[3]

OFDM 시스템에서는 데이터 전송의 효율성을 높이기 위하여 채널 전달함수에 따라서 비트를 배정한 후 변조하여 전송하는 적응변조방식을 채택하고 있다.[4] 따라서 OFDM에서의 각 부채널들은 다른 변조방식으로 변조되어야만 한다. 이 논문에서는 단독 사용자와 다중 사용자 OFDM 환경에서 기존의 비트 배정 방식 중 최적화 되었다고 알려진 water filling 방식(by Hughes-Hartogs[5])과 새롭게 제안된 비트 배정 방식[6]을 비교해 보았다. 시뮬레이션 결과 이 알고리즘이 Hughes-Hartogs 알고리즘에 비해 적은 제약조건 하에서 계산량이 줄어드는 반면 BER(bit error rate)은 비슷한 결과 값

을 가진다는 것을 확인할 수 있었다. 2장에서는 모의실험 모델에 관한 간략한 블록 다이어그램을 소개하고 3장에서는 OFDM 시스템을 위한 비트 배정 방식과 새롭게 제안된 알고리즘에 관한 설명이 이어지며 마지막장에서는 결론을 도출하였다.

2. OFDM 시스템 모델

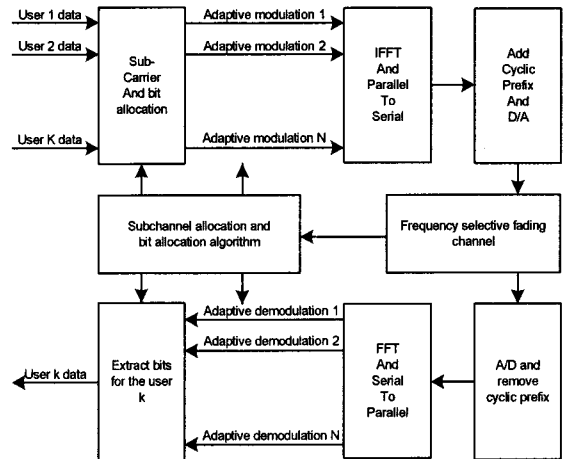


그림 1. 다중 사용자 OFDM 시스템 구성도

저자 소개

- * 金 旻 奭 : 慶北大學 電子學科 碩士課程
- * 李 昌 旭 : 慶北大學 電子學科 博士課程
- ** 全 琪 準 : 慶北大學 電子學科 教授 · 工博

그림 1은 이 논문에서 이용되는 다중 사용자 OFDM 시스템을 나타낸 것이다. 먼저 채널 할당 알고리즘을 이용하여 모든 사용자들에게 채널을 배분하고, 할당된 채널 정보를 바탕으로 각각의 유저 데이터를 비트 배정 알고리즘을 이용하여 서브캐리어에 배정하게 된다. 이것을 적응 변조 방식을 이용하여 변조한 후 IFFT를 거쳐 송신하게 되고, 수신단에서는 FFT를 거쳐 채널 및 비트 알고리즘 정보를 이용하여 사용자들의 정보를 복원하게 된다.

3. 비트 및 채널 배정 알고리즘

3.1 기존의 비트 배정 알고리즘

비트 배정에 있어 먼저 고려되어야 할 문제는 OFDM 심벌 B당 고정된 비트를 전송하기 위한 전체 전송 전력을 최소화하는 것이다. 전체 전송 전력을 구하기에 앞서 먼저 n 번째 서브캐리어에 b_n 개의 비트가 배정되었을 때의 전송 전력을 구해보면 다음과 같다.

$$p_{n,b_n} = \frac{f(b_n)}{\alpha_n^2} \quad (1)$$

여기서 b_n 은 n 번째 서브캐리어를 위한 비트 수, α_n 은 n 번째 서브캐리어의 채널 이득의 크기이며 $f(b_n)$ 은 요구되는 수신 전력이다. 따라서 전체 전송 전력은 다음과 같고,

$$P_{n,b_n}^* = \min_{b_n \in D} \sum_{n=1}^N P_{n,b_n} \quad (2)$$

이것을 최소화하기 위해서는 다음과 같은 제약 조건을 가진다.

$$B = \sum_{n=1}^N b_n \quad (3)$$

여기서, $D = \{0, 1, 2, \dots, M\}$ 이다.

n 번째 서브캐리어에 배정된 전송 전력, P_{n,b_n} 은 n 번째 서브캐리어에 연속적으로 한 개의 비트를 추가로 배정할 때 마다 요구되어지는 전송 전력의 합으로 표현할 수 있다.

$$P_{n,b_n} = \Delta P_{n,1} + \Delta P_{n,2} + \dots + \Delta P_{n,b_n} \quad (4)$$

여기서 $\Delta P_{n,l}$ 은 다음으로 정의된다.

$$\Delta P_{n,l} = \frac{f(l) - f(l-1)}{\alpha_n^2} \quad (5)$$

$\Delta P_{n,l}$ 은 n 번째 서브캐리어에 배정된 비트 수가 l 개일 때 그 서브캐리어에서 한 개의 비트를 더 추가하여 전송하기 위해 필요한 추가 전력을 나타낸다.

Hughes-Hartogs's algorithm은 매번 모든 서브캐리어에 한 개의 비트를 배정하고 그 과정에서 최소 추가 전력을 요구하는 서브캐리어를 선택하여 비트를 배정한다. 전송하고자 하는 전체 비트 수, B 비트개가 모두 배정되면 비트 배정 과정이 끝나게 된다. 자세한 과정은 다음과 같다.

1) 모든 n 에 대하여 $b_n=0$, $\Delta P_n = [f(1) - f(0)]/\alpha_n^2$;

2) 다음 과정을 B 번 반복한다.

$$\hat{n} = \arg \min_n \Delta P_n;$$

$$b_{\hat{n}} = b_{\hat{n}} + 1;$$

$$\Delta P_n = [f(b_{\hat{n}} + 1) - f(b_{\hat{n}})]/\alpha_n^2;$$

3) 마지막 비트 배정 결과는 $\{b_n\}_{n=1}^N$ 이다.

위의 알고리즘은 성능면에서 최적화되었다고 알려져 있지만 각각의 서브캐리어에 한 개 이상의 비트를 배정할 때마다 매번 계산된 추가 전력을 순서대로 배열 후 가장 적은 값을 선택해야 하기 때문에 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

3.2 새로운 비트 배정 알고리즘

기존의 비트 배정 알고리즘의 문제점을 보완하기 위해 여기서는 좀 더 짧은 계산시간을 가지며 빠르게 비트를 배정할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 방법은 서브캐리어의 추가 전송 전력에 대해서는 수열, 전체 전송 전력의 최소값은 산술기하평균 부등식으로 구한다.

n 번째 서브캐리어에서 요구되는 수신 전력, $f(b_n)$ 은 직사각형 구조 M-ary quadrature amplitude modulation(MQAM) 신호 배치(b_n 이 짝수인 경우)는 식(6)처럼 표현할 수 있다.[1],[8]

$$f(b_n) \leq \frac{N_0}{3} \left[Q^{-1} \left(\frac{p_e}{4} \right) \right]^2 (2^{b_n} - 1) \quad (6)$$

여기서, $N_0/2$ 는 additive white Gaussian noise(AWGN)의 분산이며, p_e 는 심벌 에러 확률이고, $Q(x)$ 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (7)$$

직사각형 구조가 아닐 경우의 신호 배치(b_n 이 홀수인 경우)는 식(8)과 같은 형태로 바뀌게 된다.

$$f(b_n) < \frac{N_0}{3} \left[Q^{-1} \left(\frac{p_e}{4} \right) \right]^2 (2^{b_n} - 1) \quad (8)$$

BPSK(Binary Phase Shift Keying)인 경우 $f(1)$ 은 $N_0[Q^{-1}(p_e)]^2/2$ 이다.

식(2)를 식(8)로 바꾸어 쓰면 다음과 같다.

$$P_{n,b_n}^* = \min_{b_n \in D} (\Delta P_{1,1} + \dots + \Delta P_{1,b_1}) + (\Delta P_{2,1} + \dots + \Delta P_{2,b_2}) + \dots + (\Delta P_{N,1} + \dots + \Delta P_{N,b_N}) \quad (9)$$

식(8)은 $\Delta P_{1,b_1} + \Delta P_{1,b_2} + \dots + \Delta P_{N,b_N}$ 이 최소일 때 P_T 가 최소값을 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 식(5), (6)으로부터 $\Delta P_{n,1}$, $\Delta P_{n,2}$, ..., $\Delta P_{n,b_n}$ 은 수열로 표현된다.

$$\Delta P_{n,1} = \frac{f(1)}{\alpha_n^2}, \quad \Delta P_{n,2} = \frac{f(2) - f(1)}{\alpha_n^2} = \frac{2f(1)}{\alpha_n^2}, \quad (10)$$

$$\dots, \quad \Delta P_{n,b_n} = \frac{f(b_n) - f(b_n - 1)}{\alpha_n^2} = \frac{f(1)}{\alpha_n^2} 2^{b_n - 1}$$

$\Delta P_{1,b_1} + \Delta P_{1,b_2} + \dots + \Delta P_{N,b_N}$ 의 최소값을 찾기 위해 산술기하 평균 부등식을 이용하면 다음처럼 전개된다.

$$\begin{aligned} & \Delta P_{1,b_1} + \Delta P_{1,b_2} + \dots + \Delta P_{N,b_N} \\ &= \frac{f(1)}{\alpha_1^2} 2^{b_1 - 1} + \frac{f(1)}{\alpha_2^2} 2^{b_2 - 1} + \dots + \frac{f(1)}{\alpha_N^2} 2^{b_N - 1} \end{aligned}$$

$$\geq \sqrt{N} \sqrt{N_0} \frac{f(1)}{\alpha_1^2} 2^{b_1-1} \cdot \frac{f(1)}{\alpha_2^2} 2^{b_2-1} \dots \frac{f(1)}{\alpha_N^2} 2^{b_N-1} \quad (11)$$

식(11)의 왼쪽부분은 합이 최소일 때 등식이 성립한다. 그러므로 등식의 왼편 각각은 다음과 같이 같은 값을 가진다.

$$\frac{f(1)}{\alpha_n^2} 2^{b_n-1} = \sqrt{N} \sqrt{N_0} \frac{f(1)^N}{\alpha_1^2 \alpha_2^2 \dots \alpha_N^2} 2^{b_1+b_2+\dots+b_N-N} \quad (12)$$

여기서 $n = 1, 2, \dots, N$ 이다. 그리고 이때 전체 전송 전력 P_T 는 최소값을 가진다.

식(12)로부터 n 번째 서브캐리어에 대한 최적화된 비트수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b_n = \log_2 \left(\alpha_n^2 \sqrt{N} \sqrt{N_0} \frac{2^{B-N}}{\alpha_1^2 \alpha_2^2 \dots \alpha_N^2} \right) + 1 \quad (13)$$

$$b_n = 2 \log_2 \alpha_n + \frac{B}{N} - \frac{2}{N} \log_2 (\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_N) \quad (14)$$

여기서 구한 b_n 은 소수점을 가지는 실수이므로 다음과 같이 반올림을 취해 정수로 바꾸어 준다. $\hat{b}_n = \text{round}(b_n)$ 이러한 반올림 과정을 거친 후 \hat{b}_n 을 $n=1$ 부터 N 까지 모두 합한다. 이 값을 $R (= \sum_{n=1}^N \hat{b}_n)$ 로 뒀을 때 R 이 B 와 같아지면 비트 배정은 끝나게 된다. 그러나 R 이 B 보다 크거나 작다면 다음의 과정을 거쳐 B 와 같아지도록 조정한다.

1) 만일 $B > R$ 이면 큰 $b_n - \hat{b}_n$ 값을 가지는 순서대로 $B-R$ 개의 서브캐리어를 선택한다.

2) 만일 $B < R$ 이면 작은 $b_n - \hat{b}_n$ 값을 가지는 순서대로 $R-B$ 개의 서브캐리어를 선택한다.

3.3 다중 사용자를 위한 채널 할당 알고리즘

다중 사용자로의 시스템 확장은 채널 배정 알고리즘을 제외하고는 단독 사용자의 경우와 같다. 먼저 Rhee 등[3]의 채널 배정 알고리즘을 이용하여 유저마다 채널을 할당한다. 그 과정은 다음과 같다.

- 1) 유저 $k = 1 \sim K$ 에 대해 $R_k = 0$ 로 둔다.
 $A = \{1, 2, 3, \dots, K\}$
 - 2) $k = 1$ 부터 K 에 대해
 - (a) $|h_{k,n}| \geq |h_{k,j}|$ 를 만족하는 n 값을 찾는다.
 단, 모든 $j \in A$
 - (b) (a)를 이용하여 R_k, A 값을 업데이트 한다.
 - 3) $A \neq \emptyset$ 인 동안
 - (a) 모든 $i, 0 \leq i \leq K$ 에 대해 $R_k \leq R_i$ 인 k 를 찾는다.
 - (b) 찾은 k 값에 대해 모든 $j \in A$ 에 대한 $|h_{k,n}| \geq |h_{k,j}|$ 을 만족하는 n 을 찾는다.
 - (c) k 와 n 을 가지고 R_k 와 A 를 업데이트 한다.
 $R_k = R_k + C(h_{k,n}), A = A - \{n\}$
- $\alpha(h_{k,n})$ 은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\alpha(h_{k,n}) = \frac{B}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{\max} |h_{k,n}^2}{N_0 \frac{B}{N}} \right) \quad (15)$$

이 과정을 거치면 유저마다 고유한 채널을 가지게 되므로

여기에 water filling algorithm과 제한한 알고리즘을 이용하여 각각 서브캐리어에 비트를 배정한다.

4. 결론

모의실험은 먼저 단독 사용자인 경우에 채널 배정 알고리즘인 ughes-Hartogs algorithm과 새로운 알고리즘을 비교하고 이것을 바탕으로 Rhee 등의 채널 배정 알고리즘을 적용하여 다중 사용자 OFDM 시스템으로 확장하였다. 그 결과 두 알고리즘의 성능이 거의 같다는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제시된 새로운 알고리즘은 추가적인 전송 전력이 수열의 형태를 가진다는 것과 산술 기하 평균 부등식으로부터 모든 서브 캐리어의 추가 전송 전력이 같을 때 전체 전송 전력이 최소가 된다는 것을 이용하여 비트 배정 알고리즘을 구현하였다. 이 알고리즘의 장점은 최대 $N/2$ 이하의 반복을 가진다는 것과 그것으로 인해 비트 배정 시간을 줄일 수 있으며 계산 과정이 간단하다는 것이다. 또한 시뮬레이션 결과 water filling 방식에 비해 BER 측면에서 차이가 나지 않는다는 것을 확인하였다. 이러한 장점으로 인해 다중 유저 시스템으로 확장하여도 계산의 복잡성과 속도 면에서 크게 성능이 좋아진다.

참 고 문 헌

- [1] L. J. Cimini, Jr. and N. R. Sollenberger, "OFDM with diversity and coding for high-bit-rate mobile data applications," *Mobile Multimedia Commu.*, vol. 1, pp. 247-254, 1997.
- [2] M. Alard and R. Lassalle, "Principles of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers," *BBU Review*, pp. 47-69, Aug. 1987.
- [3] ETSI, "Radio broadcasting systems: Digital Audio Broadcasting(DAN) to mobile, portable and fixed receivers.", ETS 300 401, Aug. 1997.
- [4] C.-Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Latief, and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 10, pp. 1747-1758, Oct. 1999.
- [5] D. Hughes-Hartogs, "Ensemble modem structure for imperfect transmission media," U. S. patent 4 679 227, July 7, 1987.
- [6] Chang Wook Lee and Gi J. Jeon, "An efficient and novel bit allocation algorithm in OFDM systems," submitted for publication.
- [7] Wonjong Rhee and John M. Cioffi, "Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation," *IEEE 51st Vehicular Technology Conf. Proceedings*, vol. 2, pp.15-18, May 2000.