

멀티유저 OFDM 시스템에서 QoS 보장을 위한 서브캐리어와 파워 할당에 관한 연구

A Sub-optimal Joint Subcarrier and Power Allocation Algorithm for QoS Supporting in Multiuser OFDM Systems.

심우철, 이상재, 김세현

KAIST 산업공학과 통신시스템 및 인터넷 보안 연구실

E-mail : wcshim, sjlee, shkim@tmlab.kaist.ac.kr

Abstract

This paper suggests that resource allocation algorithm in multiuser orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). The proposed algorithm considers throughput maximization with power constraint and quality of service (QoS) constraint. This problem has a optimal solution with using well known water-filling algorithm but the algorithm requires high computational complexity. Therefore the problem needs a sub-optimal algorithm for decreasing computational complexity. We propose a sub-optimal joint subcarrier and power allocation algorithm for multiuser OFDM system and compare with previous resource allocation algorithm.

1. Introduction

멀티유저 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 시스템 하향링크에서의 자원 할당은 두 가지의 할당 문제를 가지고 있다. OFDM이 가지는 서브캐리어를 어느 유저에게 할당할 것인지와 특정 서브캐리어를 사용하는 유저에게 얼마만큼의 파워를 할당할 것인가에 대한 문제이다. 이 할당을 어떻게 하느냐에 따라서 OFDM 자원 할당 기술은 정적 할당과 동적 할당의 두 가지 기법을 서브캐리어 할당과 파워 할당에 적용하여 총 네 가지의 조합으로 나타낼 수 있게 된다[1]. 정적 자

원 할당기법은 멀티유저 다이버시티를 사용하지 못함에 따라서 시스템의 성능이 매우 낮아지게 된다. 이에 반해 동적 자원 할당 기법은 각 시점에서 각 유저마다 다른 채널 환경을 고려하여 서브캐리어와 파워를 동적으로 할당하여 멀티유저 다이버시티를 얻게 되어 시스템의 성능향상을 가져오게 되며 이로 인해 동적 자원 할당에 관한 많은 연구들이 이루어지고 있는 실정이다[1],[2].

기존의 연구들이 제시한 하향링크 동적 자원 할당기법은 두 단계의 접근방법으로 할당을 하고 있다. 첫 번째 단계에서는 각 유저에게 어떤 서브캐리어를 할당할 것인가에 대한 결정을 하여 서브캐리어 할당을 마친다. 두 번째 단계에서는 가용한 총 파워를 어느 유저에게 얼마만큼 나누어 줄 것인가를 결정한다. 파워 할당에 관한 최적해를 구하는 방법은 잘 알려진 Water-filling Algorithm으로 결정할 수 있게 된다. 이때 최적해가 아닌 부-최적해 제시에서는 유저마다 혹은 서브캐리어마다 동일한 파워를 사용한다는 가정을 하여 문제를 해결하고 있다. 최근에 발표된 Chandrashekar Mohanram and Srikrishna Bhashyam[3]의 논문은 두 단계 접근 기법을 탈피하고 서브캐리어와 파워 할당을 같이 고려하여 유저간의 Rate를 맞추는 방법을 제시하였다.

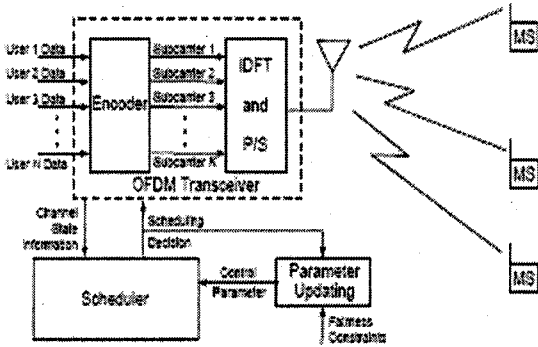
본 논문에서는, 기존 연구들이 사용한 두 단계 접근방법에서의 서브캐리어 할당과 파워 할당이 각각 독립적으로 이루어지며 파워 할당은 모든 유저 혹은 서브캐리어가 동일한 파워를 가지는 결과에 따른 시스템 용량 증가의 한계를 극복함에 있어서 [3]의 방법을 사용하며, 동적 자원 할당이 가지는 장점을 고려하여 QoS를 보장하는 OFDM 하향 링크의 스케줄

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음

링 알고리즘을 제시하고자 한다. Section II에서는 OFDM 시스템의 구성에 대해서 간략히 설명을 하고, 문제에 대한 정의 및 문제의 구성을 하고 각종 변수들에 대한 설명을 하도록 한다. Section IV에서는 제안하는 알고리즘에 대한 설명을 하겠고, Section V에서는 제안된 알고리즘에 대한 성능평가가 이루어질 것이다. Section VI에서는 분석된 결과를 바탕으로 결론과 향후에 이루어질 연구에 관한 논의를 하도록 하겠다.

II. System Design & Problem Formulation

본 논문에서는 그림. 1.에서 보이는 멀티 유저 OFDM 시스템에서의 하향링크를 고려하기로 한다.



[그림 1. 멀티유저 OFDM 하향 링크 시스템]

기지국에선 N 명의 사용자 data를 서브캐리어 K 개에 나누어 실어 보낸다. 이때 몇 명의 사용자를 선택하고 사용자가 어떤 서브캐리어를 사용할 것이며 서브캐리어에 얼마만큼의 파워를 실어 보낼 것인지는 Scheduler가 결정할 문제이고 상향 링크를 통해서 각 유저들의 채널정보들을 보고 받게 된다.

앞으로 본 논문에서는 다음과 같은 상황을 가정하고자 한다.: (1) 송신된 신호는 수신되기까지 레일리 페이딩을 겪는다. (2) 송신기 즉 기지국에서는 Parameter Updating을 통하여 채널 정보에 관한 완벽한 정보를 알고 있다. 위의 두 가지 가정을 기본으로 문제 구성을 위한 시스템 변수들을 설명해보도록 하겠다. 시스템의 유저수를 N 명이라 하고 시스템의 서브캐리어 수를 K 개라고 가정하자. 그리고 임의의 서브캐리어 k 을 통해서 어떤 유저 n 가 얻는 채널 gain을 $h_{n,k}$ 이라고 가정하자. OFDM의 한 서브캐리어가 차지하는

bandwidth를 B 라고 하고 N_0 를 additive white Gaussian noise (AWGN) 의 power spectral density (PSD)라 가정하면, 채널 gain대 노이즈 파워 비율은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있게 된다.

$$H_{n,k} = \frac{|h_{k,n}|^2}{N_0 B} \quad (1)$$

그리고 시스템의 기지국이 가지는 총 파워를 P_T 라고 하면 임의의 유저 n 의 data를 임의의 서브캐리어 k 를 통해 전송할 때 기지국이 사용하는 파워는 $P_{n,k}$ 과 같다. 또 이 $P_{n,k}$ 는 다음과 같은 식을 만족해야 한다.

$$\sum_{n=0}^N \sum_{k=0}^K P_{n,k} = P_T \quad (2)$$

이제 임의의 유저 n 에게 보낼 데이터를 임의의 서브캐리어 k 로 전송한다고 하였을 때의 Throughput을 계산해보면 다음과 같다.

$$T_{n,k} = B \log(1 + P_{n,k} \cdot H_{n,k}) \quad (3)$$

위와 같은 사실을 바탕으로 최적화 문제를 구성해보면 다음과 같다.

$$\max_{P_{n,k}, x_{n,k}} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K x_{n,k} \cdot \log_2(1 + P_{n,k} \cdot H_{n,k})$$

$$\text{subject to } \sum_{n=1}^N x_{n,k} = 1 \quad \text{for all } k$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K P_{n,k} \leq P_T$$

$$\sum_{k=1}^K x_{n,k} \cdot \log_2(1 + P_{n,k} \cdot H_{n,k}) \geq T_n^R \quad \text{for all } n$$

$$P_{n,k} \geq 0 \quad \text{for all } n, k$$

$$x_{n,k} \in \{0, 1\} \quad \text{for all } n, k$$

T_n^R 은 Quality of Service (QoS) 값으로 임의의 유저 n 이 필요로 하는 최소 Throughput을 의미하고 이 값들은 미리 결정된 상수로서 각 유저간의 QoS를 보장하는 역할을 한다. 또, $\sum_{n=1}^N x_{n,k} = 1$ for all k 라는 제약식은 이미 OFDM 시스템에서 서브캐리어는 다수의 사용자가 나누어 쓰는 것보다 한명의 사용자가 전부 사용하는 것이 최적이라는 발표된 결과로부터 기인한 것이다[4].

III. Proposed Algorithm

이 섹션에서는 섹션 II에서 구성된 최적해를 찾는 문제에서의 부-최적해를 찾는 알고리즘을 제안한다. QoS를 만족하기 위해서 계산되어야 하는 것은 사용자들의 Throughput 이고 이것은 파워를 할당 해야지만 계산이 된다. 따라서 파워 할당에 대해서 모든 서브캐리어가 동일한 파워를 쓸 수 있다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{n,k} = \frac{P_T}{K} \cdot x_{n,k} \quad \text{for all } n, k \quad (4)$$

즉, 임의의 사용자가 서브캐리어를 하나 더 얻게 된다면 $\frac{P_T}{K}$ 만큼의 파워를 할당받게 된다.

또, 임의의 유저 n 의 Throughput을 $T_n = \sum_{k=1}^K T_{n,k}$ 라고 할 수 있다. 또, 유저 n 에

게 할당된 파워는 $P_n = \sum_{k=1}^K P_{n,k}$ 라고 하자.

제안하고자 하는 알고리즘은 다음과 같다.

사용자 집합을 \bar{N} , 서브캐리어 집합을 \bar{K} 사용자들이 특정 시점까지 획득한 Throughput 집합을 \bar{T} 라고 하자.

1. Initialization

$$\bar{N} = \{1, 2, \dots, N\}, \bar{K} = \{1, 2, \dots, K\},$$

$$\bar{T} = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$$

$$P_n = 0, T_n = 0 \quad \text{for all } n$$

$$x_{n,k} = 0 \quad \text{for all } n, k$$

2. while $\bar{K} \neq \emptyset$ and $\bar{N} \neq \emptyset$

① find n, k such that $\max H_{n,k}$ for $\forall k, \forall n$
then, $n^* = n, k^* = k$
and $x_{n^*,k^*} = 1$

$$\textcircled{2} P_{n^*} = P_{n^*} + \frac{P_T}{K}, \bar{K} = \bar{K} - \{k^*\}$$

$$\textcircled{3} T_{n^*} = \sum_{k=1}^K x_{n^*,k} \cdot \text{Blog}_2(1 + P_{n^*,k} \cdot H_{n^*,k})$$

$$\text{where } P_{n^*,k} = \left(\lambda - \frac{1}{H_{n^*,k}} \right)^+$$

$$\text{and } \sum_{k=1}^K P_{n^*,k} = P_{n^*}$$

$$\textcircled{4} \text{ if } T_{n^*} \geq T_n^R \text{ then, } \bar{N} = \bar{N} - \{n^*\}$$

3. if $\bar{K} \neq \emptyset$

$$\textcircled{1} \bar{N} = \{1, 2, \dots, N\}$$

② find n, k such that $\max H_{n,k}$ for $\forall k, \forall n$
then, $n^* = n, k^* = k$
and $x_{n^*,k^*} = 1$

$$\textcircled{3} P_{n^*} = P_{n^*} + \frac{P_T}{K}, \bar{K} = \bar{K} - \{k^*\}$$

$$\textcircled{4} T_{n^*} = \sum_{k=1}^K x_{n^*,k} \cdot \text{Blog}_2(1 + P_{n^*,k} \cdot H_{n^*,k})$$

$$\text{where } P_{n^*,k} = \left(\lambda - \frac{1}{H_{n^*,k}} \right)^+$$

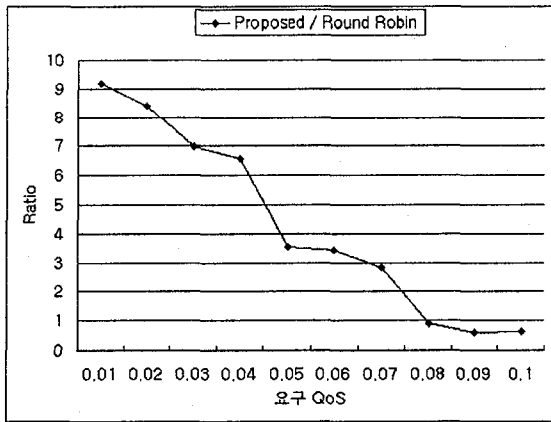
$$\text{and } \sum_{k=1}^K P_{n^*,k} = P_{n^*}$$

$$f(x) = (x)^+ = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & x \geq 0 \end{cases} \text{이다.}$$

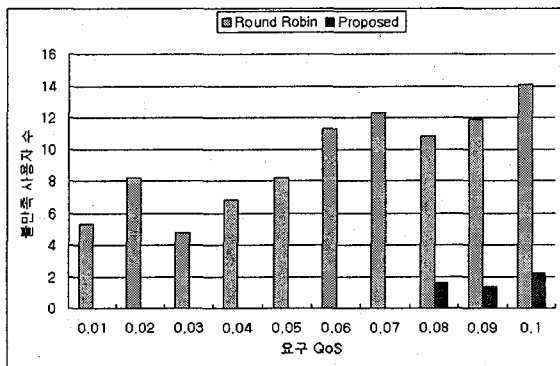
알고리즘은 크게 세 부분으로 나누어진다. 첫 번째 부분은 초기화 단계로 초기의 변수들과 할당 파워, 인덱스들을 초기화 한다. 두 번째 부분은 가장 높은 채널 Gain값을 가지는 사용자와 서브캐리어 짝을 찾아서 (4)에서 정의한대로 파워를 증가시키고 그 서브캐리어는 사용할 수 없으므로 \bar{K} 집합에서 제외한다. 이때, 기존에 할당 받은 서브캐리어들과 사용자에게 할당된 파워로 water-filling algorithm을 사용하여 파워 할당을 각 서브캐리어별로 해준 후 Throughput을 계산한다. 그 후, 요구하는 만큼의 Throughput 이상을 획득 하였으면 그 사용자는 사용자 집합인 \bar{N} 에서 빠지게 된다. 세 번째 부분은 모든 사용자가 요구하는 만큼의 Throughput을 만족하고 서브캐리어가 남았을 경우이다. 이때는 simple greedy algorithm으로 서브캐리어와 파워를 할당하되 Throughput을 계산할 때에는 두 번째 부분에서 하였던 대로 water-filling algorithm으로 계산한다. 즉, 두 번째 부분은 QoS를 보장하기 위한 부분이며 세 번째 부분은 시스템의 성능향상을 추구하는 부분이라고 할 수 있다. 제안한 알고리즘은 water-filling을 K번 수행하게 되는데 복잡도를 낮추기 위해서는 2.③ 과 3.③에서 사용된 water-filling 대신에 [5]의 파워 할당 알고리즘을 사용하여 복잡도를 낮출 수 있을 것이다.

IV. Simulation

Parameters	
Bandwidth	4MHz
Subcarriers	512
Users	16
Timeslots	100
Channels	Pedestrian_chB



[그림 2. QoS에 따른 Throughput ratio]



[그림 3. QoS에 따른 불만족 사용자 수]

그림. 2는 QoS의 변화에 따른 시스템 Throughput의 변화를 그래프로 나타내어 본 것이다. 제안한 방식이 전체 시스템 용량증대가 Round Robin 방식에 비해 높은 것을 알 수 있다. QoS가 증가할 수록 이 차이는 점점 줄어들게 된다. 그림. 3은 QoS의 변화에 따라 제안한 방식과 Round Robin 방식에서의 QoS를 만족시키지 못한 사용자 수를 나타내어 본 것이다. 제안한 알고리즘은 QoS를 거의 만족함을 볼 수 있다. 두 그래프 모두 각각의 QoS에 대해 10번의 실험 결과를 평균한 것이며 실험 결과에서 특정 유저의 채널이 월등히 좋은 특수한 경우에는 제안된 알고리즘의 성능이 좋지 않았다. 특히 요구하는 QoS값이 높은 경우(0.08이상) QoS만족을 위한 용량 손실이 큼을 볼 수 있다. 이는 모든 사용자에 대한 QoS를 만족 시키려 하기 때문에 나오는 결과이다. 하지만 QoS보장에 있어서는 Round Robin보다 월등히 좋음을 확인할 수 있다. 즉 제안한 알고리즘은 너무 높지 않은 QoS를 보장할 때 시스템의 Throughput을 크게 향상시킬 수 있는 알고리즘이라 할 수 있다. 이는, 임의의 유저가 할당받은 서브캐리어가 있을

때 각 서브캐리어별로 고정된 파워가 아니라 좀 더 좋은 서브캐리어에게 많은 파워를 할당하게 되어 시스템의 용량증대를 가져오기 때문이다.

V. Conclusion

본 논문에서는 서브캐리어와 파워 할당을 결합하여 멀티유저 OFDM 시스템에서의 QoS 보장을 위한 동적 할당 알고리즘을 제시하였다. 섹션 IV의 결과에서 알 수 있듯 Slot Fairness를 중시한 Round Robin 보다 최소 요구 Throughput을 더욱 잘 만족시키면서 시스템의 전체 Throughput을 향상시키는 결과가 나온다. 향후에 행해질 연구로는 특정 환경에 있어서의 제안된 알고리즘의 성능저하에 대한 보완과 파워 할당의 기본 가정을 서브캐리어별로 동일하게 한다는 가정에서 탈피하여 시스템의 성능향상을 추구하고 한다.

VI. Reference

- [1] Mathias Bohge, James Gross, Adam Wolisz, "The Potential of Dynamic Power and Sub-carrier Assignments in Multi-User OFDM-FDMA Cells", *IEEE GLOBECOM*, 2005, Vol,5 pp.2933 and 2936.
- [2] Suman Das and Harish Viswanathan, "Dynamic Power and Sub-carrier Assignment in a Multi-user OFDM System", *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2004, Vol,5 pp.3338.
- [3] Chandrashekar Mohanram, Srikrishna Bhshyam, "A Sub-optimal Joint Subcarrier and Power Allocation Algorithm for Multiuser OFDM", *IEEE GLOBECOM*, 2005, Vol, 9, pp.686.
- [4] Guoqing Li and Hui Liu, "On the Optimality of the OFDMA Network", *IEEE COMMUNICATIONS LETTERS*, 2005, Vol. 9, pp.438-440.
- [5] B. S. Krongold, K. Ramchandran, and D. L. Jones, "Computationally efficient optimal power allocation algorithms for multicarrier communication systems", *IEEE Trans. Commun.*, 2000, Vol, 48, pp.23-27.