

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.1.103>

IIBC 2016-1-14

무선망의 효율적 전력 할당 알고리즘

Efficient Power Allocation Algorithm for Wireless Networks

안홍영*

Hong-Young Ahn*

요약 통신 시스템에서 제한된 총 전력으로 여러개의 부채널로 이루어진 채널의 입력과 출력 사이의 상호정보를 최대화하는 문제의 해는 Waterfilling 구조를 가진다. 채널 상태 정보(CSI)를 알고 있을 때 OFDM이나 MIMO는 병렬의 독립된 부채널들로 분해 될 수 있다. 제한된 전력 하에 채널용량에 접근하는 전송속도를 위한 최적의 부채널 전력할당 문제의 해는 Waterfilling 으로 구할 수 있다. Waterfilling은 상태가 좋은(SNR이 높은) 부채널에 더 많은 전력을 할당하고 상태가 나쁜 채널들은 적은 전력이나 전력을 할당하지 않으므로서 상태가 좋은 부채널들의 전송속도를 높이고 결과적으로 전체 전송속도를 채널용량에 접근하게 한다. Waterfilling은 총 전력 제한을 만족하는 정확한 수면 높이를 찾는 데 일반적으로 수면 높이를 추정하고 갱신해 나가는 반복적 알고리즘이 사용된다. 이 과정에서 부채널들에 대한 채널이득 제곱의 역수들의 부분합($\sum_{n=1}^{Last} \frac{N_0}{|h_n|^2}$) 계산이 반복적으로 필요하다. 본 논문에서는 이런 부분합들을 초기화 단계에서 미리 계산하여 배열을 만들고 임의의 부분합 계산을 배열 참조로 대체함으로써 Waterfilling 알고리즘의 계산 시간을 줄였다.

Abstract In communication systems the solution of the problem of maximizing the mutual information between the input and output of a channel composed of several subchannels under total power constraint has a waterfilling structure. OFDM and MIMO can be decomposed into parallel subchannels with CSI. Waterfilling solves the problem of optimal power allocation to these subchannels to achieve the rate approaching the channel capacity under total power constraint. In waterfilling, more power is allotted to good channels(high SNR) and less or no power to bad channels to increase the rate of good channels, resulting in channel capacity. Waterfilling finds the exact water level satisfying the power constraint employing an iterative algorithm to estimate and update the water level. In this process computation of partial sums of inverse of square of subchannel gain is repeatedly required. In this paper we reduced the computation time of waterfilling algorithm by replacing the partial sum computation with reference to an array which contains the precomputed partial sums in initialization phase.

Key Words : OFDM, MIMO, parallel channels, waterfilling, iterative algorithm

1. 서론

제약된 최적화 문제로 표현되는 많은 공학문제의 해

는 Waterfilling 구조를 가진다. 통신 시스템에서 제한된 전력 하에 여러개의 부채널로 이루어진 채널의 입력과 출력사이의 상호정보를 최대화하는 문제의 해가 대표적

*정회원, 홍익대학교 컴퓨터정보통신공학과
접수일자: 2016년 1월 6일, 수정완료: 2016년 2월 2일
게재확정일자: 2016년 2월 5일

Received: 6 January, 2016 / Revised: 2 February, 2016 /

Accepted: 5 February, 2016

*Corresponding Author: hyahn@hongik.ac.kr

Dept. of Computer Information Communication, Hongik University, Korea

인 예이다^{[3][4]}.

열악한 페이딩 환경 하에서 고속의 데이터 전송을 위한 기술로 직교 주파수분할 다중화(OFDM)와 다중입출력 안테나(MIMO) 기법은 필수적이다. LTE-Advanced를 포함한 차세대 무선 네트워크에 사용되는 통신 시스템은 모두 이를 표준으로 채택하고 있다. OFDM은 전체 전송대역을 다수의 협대역 직교 부채널로 분할하여 데이터를 동시에 전송하는 방식으로 심볼간 간섭(ISI) 및 채널간 간섭(ICI)을 제거할 수 있다^{[5][6]}. MIMO는 다중 입출력 안테나를 사용한 공간 다중화나 다이버시티 코딩을 통하여 전송속도를 증가 시키거나 깊은 페이딩에서도 통신을 가능하게 한다^{[7][8]}.

채널 상태 정보(CSI)를 알고 있을 때 OFDM이나 MIMO는 병렬의 독립된 부채널들로 분해 될 수 있다. 제한된 전력 하에 채널용량에 접근하는 전송속도를 위한 최적의 부채널 전력 할당은 잘 알려진 Waterfilling 절차로 구할 수 있다. 기본적으로 Waterfilling은 상태가 좋은(SNR이 높은) 부채널에 더 많은 전력을 할당하고 상태가 나쁜 채널들은 적은 전력이나 전력을 할당하지 않음으로서 상태가 좋은 부채널들의 전송속도를 높이고 결과적으로 전체 전송속도를 채널용량에 접근하게 한다.

Yang^[8] 등은 MIMO 부채널들에 존재하는 평균제곱오류(MSEs)의 합을 최소화하는 문제의 해로서, Yu^[9] 등은 차선의 저 복잡도 상수 전력 할당 문제의 해를 구하는데 Waterfilling을 사용하였다. 이런 문제들의 해는 부채널 이득의 역으로 주어지는 그릇 표면위로 물을 붓는 형태를 가지기 때문에 Waterfilling이라고 불린다.

해를 찾아가는 과정은 총 전력 제한을 만족하는 정확한 수면 높이를 찾는 것이다. 일반적으로 수면 높이를 추정하고 갱신해나가는 반복적 알고리즘이 사용된다. 한번 반복될 때마다 상태가 나쁜 채널들은 버려지고 상태가 좋은 채널들로 새로운 수면 높이를 추정하고 총 전력 제한을 만족하는지를 검사하게 된다. 이 과정에서 상태가 좋은 채널들에 대한 채널이득 제곱의 역수들의 부분합

$(\sum_{n=1}^{Last} \frac{N_0}{|h_n|^2})$ 들이 반복적으로 계산된다.

본 논문에서는 Waterfilling 알고리즘에 사용되는 부채널 이득 제곱의 역수들의 부분합들을 초기화 단계에서 미리 계산하여 배열을 만들고 임의의 부분합 계산을 배열 참조로 대체함으로써 Waterfilling 알고리즘이 해를 찾는 시간을 줄였다. 통신 시스템은 채널 상태가 바뀔 때

마다 혹은 주기적으로 최적의 전력 할당을 다시 계산해야 함으로 시스템의 시간절약은 상당할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 OFDM과 MIMO 통신 시스템에서 최대 전송률을 위한 최적의 부채널 전력 할당문제의 해가 어떻게 Waterfilling 절차에 의해 구해지는지를 논의하고, 3장에서는 효율적 전력 할당 알고리즘 구현을, 4장에서는 Rayley 페이딩 환경하에서 제안된 알고리즘에 대한 시뮬레이션 및 결과를 논의하고, 5장에서는 결론을 맺는다.

II. System Model

다음과 같은 OFDM 통신 시스템 모델을 고려하자.

$$y_n[m] = h_n x_n[m] + w[m], n = 1, \dots, N \quad (1)$$

$x_n[m]$, $y_n[m]$, $w[m]$ 은 각 부채널에서의 입력, 출력, 잡음 신호이고^[3], h_n 은 부채널의 채널 이득이고 전체 전력은 P_T 로 제한된다. 각 부채널의 전송전력을 P_n 이라고 하면, 이 OFDM 채널을 이용한 신뢰적 통신의 최대 전송률은 다음과 같다.

$$C = \sum_{n=1}^N \log\left(1 + \frac{P_n |h_n|^2}{N_0}\right) \quad \text{bit/symbols} \quad (2)$$

여기서 N_0 는 잡음의 전력밀도이다. 따라서 부채널의 전력할당 문제는 다음과 같은 최적화 문제의 해가 된다.

$$C_n = \max_{P_1, \dots, P_N} \sum_{n=1}^N \log\left(1 + \frac{P_n |h_n|^2}{N_0}\right) \quad (3)$$

Subject to

$$\sum_{n=1}^N P_n = P_T, P_n \geq 0, n = 1, \dots, N \quad (4)$$

(3)의 목적함수는 Lagrange Multiplier 방법으로 풀 수 있다.

$$L(\lambda, P_1, \dots, P_N) = \sum_{n=1}^N \log\left(1 + \frac{P_n |h_n|^2}{N_0}\right) - \lambda \sum_{n=1}^N P_n \quad (5)$$

최적 해를 위한 Kuhn-Tucker 조건은

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_n} = 0 & \text{if } P_n > 0 \\ \frac{\partial L}{\partial P_n} \leq 0 & \text{if } P_n = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$x^+ = \max(x, 0)$ 로 정의하면 최대 전송률을 위한 부채널의 전력 할당은 다음과 같다.

$$P_n^* = \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{N_0}{|h_n|^2} \right)^+ \quad (7)$$

Lagrange Multiplier λ 는 다음의 전체전력 조건을 만족해야한다.

$$\sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{N_0}{|h_n|^2} \right)^+ = P_T \quad (8)$$

Lagrange Multiplier λ 의 역수 $\frac{1}{\lambda}$ 은 수면 높이가 되며 추정 값을 갱신해 나가는 반복적 방법으로 구할 수 있다.

N_t 개의 송신 안테나 N_r 개의 수신 안테나를 가진 MIMO 시스템은 다음과 같은 벡터 식으로 표현된다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (9)$$

여기서 \mathbf{x} 는 송신벡터, \mathbf{y} 는 수신벡터, \mathbf{H} 는 채널 이득 행렬, $\mathbf{w} \sim CN(0, N_0 \mathbf{I}_{N_r})$ 인 백색 가우시안 잡음이다. 채널

상태 정보(\mathbf{H})를 알 경우 \mathbf{H} 를 특이값 분해(SVD)를 하면

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{V}^* \quad (10)$$

여기서 \mathbf{U} 는 $N_r \times N_r$, \mathbf{V} 는 $N_t \times N_t$ unitary 매트릭스이고, \mathbf{A} 는 $N_r \times N_t$ 매트릭스인데 대각 원소들은 음이 아닌 실수이며 비대각 원소들은 0 이다. 대각 원소들은 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{N_{\min}}$ 인 \mathbf{H} 의 특이값들이고 0 이 아닌 특이값 개수가 \mathbf{H} 의 rank이다.

$N_{\min} = \min(N_t, N_r)$ 이다.

다음과 같은 변환을 하면

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}} &= \mathbf{V}^* \mathbf{x} \\ \tilde{\mathbf{y}} &= \mathbf{U}^* \mathbf{y} \\ \tilde{\mathbf{w}} &= \mathbf{U}^* \mathbf{w} \end{aligned} \quad (11)$$

(9)식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{w}} \quad (12)$$

즉 다음과 같은 등가적 병렬 가우시안 채널로 바꿀 수 있다.

$$\tilde{y}_i = \lambda_i \tilde{x}_i + \tilde{w}_i, \quad i=1,2,\dots,N_{\min} \quad (13)$$

위 식은 OFDM 입출력 관계식 (1)과 동일한 형태를 지니고 있으며 최대 전송률을 위한 부채널 전력 할당 문제도 Waterfilling 방법으로 해를 구할 수 있다.

$$C = \max_{P_1, \dots, P_{N_{\min}}} \sum_{i=1}^{N_{\min}} \log \left(1 + \frac{P_i \lambda_i^2}{N_0} \right) \quad (14)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^{N_{\min}} P_i = P_T, P_i \geq 0, \quad i=1, \dots, N_{\min} \quad (15)$$

$$P_i = \left(\mu - \frac{N_0}{\lambda_i^2} \right)^+ \quad (16)$$

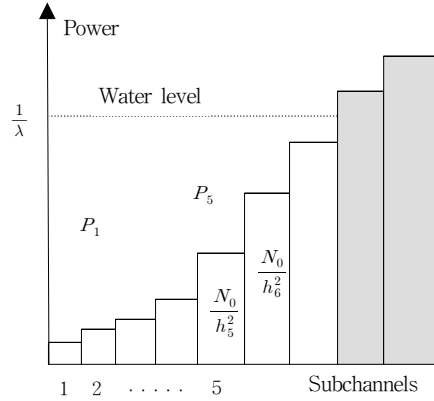


그림 1. Waterfilling 전력 할당
 Fig. 1. Waterfilling Power Allocation

OFDM이나 MIMO 시스템의 최대 전송률을 위한 부채널 전력 할당 문제가 같은 구조를 가졌으므로 앞으로의 논의는 OFDM 시스템을 다루기로 한다.

그림 1은 OFDM 시스템의 최적 전력 할당을 그림으로 보여준다. 먼저 부채널들을 채널이득 크기의 제곱의 역수에 비례한 값으로 오름차순으로 정렬한다. 각 사각형은 부채널을 나타내며 높이는 $\frac{N_0}{|h_n|^2}$ 이다. 음영이 있는 사각형은 SNR이 나빠서 전력 할당에서 제외된 부채널이고 흰 사각형은 SNR이 좋은 부채널들이다. SNR이 좋은 부채널에 할당된 전력은 $\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{N_0}{|h_n|^2} \right)^+$ 이다.

III. 효율적 전력할당 알고리즘

그림 1에서 최대 전송률을 위한 최적의 전력 할당은 (8)식을 만족한다. 수면 아래 마지막 부채널 인덱스 r 은 수면 아래에 있는 상태가 좋은 부채널 중 SNR이 가장 나쁜 부채널이다. 즉 다음 조건이 만족된다.

$$\left(\frac{1}{\lambda_{est}} > \frac{N_0}{|h_r|^2} \right) \quad \&\& \quad \left(\frac{1}{\lambda_{est}} < \frac{N_0}{|h_{r+1}|^2} \right)$$

단순한 Waterfilling 알고리즘 구현은 다음과 같다.

알고리즘 1.

- ① 부채널들을 $N_0/|h_n|^2$ 의 값에 따라 오름차순으로 정렬한다. $Last = N$
- ② 수면 높이($1/\lambda$)를 다음과 같이 추정한다.

$$\frac{1}{\lambda_{est}} = \frac{N_0}{|h_{Last}|^2}$$
- ③ 수면 아래 마지막 부채널($Last$)까지 물 높이를 더하여 필요한 전력($power$)을 계산한다.

$$\sum_{n=1}^{Last} \left(\frac{1}{\lambda_{est}} - \frac{N_0}{|h_n|^2} \right)^+ = power$$
- ④ $power > P_T$ 이면, $Last = Last - 1$ 한 후 단계 ②로 아니면 ⑤로.
- ⑤ r 개 부채널에 채널이득에 따라 $\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{N_0}{|h_n|^2} \right)$ 의 전력을 할당한다.

알고리즘 1은 현 반복에서 SNR이 가장 나쁜 부채널을 수면 높이로 추정해서 하나씩 제거해 나가는 방식이므로 대단히 비효율적이다.

알고리즘 2.

- ① 부채널들을 $N_0/|h_n|^2$ 의 값에 따라 오름차순으로 정렬한다. $Last = N$
- ② 수면 높이($1/\lambda$)를 다음과 같이 추정한다.

$$\frac{1}{\lambda_{est}} = (P_T + \sum_{n=1}^{Last} \frac{N_0}{|h_n|^2}) / Last$$
- ③ 수면 아래 마지막 부채널(r)까지 물 높이를 더하여 필요한 전력($power$)을 계산한다.

$$\left(\frac{1}{\lambda_{est}} > \frac{N_0}{|h_r|^2} \right) \ \&\& \ \left(\frac{1}{\lambda_{est}} < \frac{N_0}{|h_{r+1}|^2} \right)$$

$$\sum_{n=1}^r \left(\frac{1}{\lambda_{est}} - \frac{N_0}{|h_n|^2} \right)^+ = power, \ Last = r$$
- ④ $(power - P_T) > \epsilon$ 이면 단계 ②로 아니면 ⑤로.
- ⑤ r 개 부채널에 채널이득에 따라 $\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{N_0}{|h_n|^2} \right)$ 의 전력을 할당한다.

그림 1에서 보듯이 수면 높이와 수면 아래 마지막 부채널 인덱스(r)는 아래의 관계가 있다.

$$Water\ level \times r = P_T + \sum_{n=1}^r \frac{N_0}{|h_n|^2} \quad (17)$$

알고리즘 2는 (17)식으로부터 수면 추정치($\frac{1}{\lambda_{est}}$)를 계산하여 추정치 보다 큰 부채널들(낮은 SNR)을 모두 제거함으로써 알고리즘이 정확한 수면 높이($1/\lambda$)로 빠르게 수렴하게 한다. 알고리즘 2는 정확한 수면 높이를 $1/\lambda$ 보다 더 큰 값에서 $1/\lambda$ 로 수렴하게 만든다.

그러나 알고리즘 2는 단계 ②, ③에서 반복이 계속되는 동안 부채널 이득 제공의 역수들의 부분합을 $\left(\sum_{n=1}^{Last} \frac{N_0}{|h_n|^2} \right)$ 계속 계산해야 함으로 아직도 비효율적이다. 이 부분합을 초기화 과정에서 계산하여 배열에 저장하면 부분합이 필요할 때마다 테이블 검색을 통해 즉시 얻을 수 있다. 효율적 전력할당 알고리즘은 다음과 같다.

알고리즘 3.

- ① 부채널들을 $N_0/|h_n|^2$ 의 값에 따라 오름차순으로 정렬한다. N 개의 부분합 $\sum_{n=1}^r \frac{N_0}{|h_n|^2}$, $r = 1, \dots, N$ 을 계산하여 배열 $Area$ 에 저장한다. $Last = N$
- ② 수면 높이($1/\lambda$)를 다음과 같이 추정한다.

$$\frac{1}{\lambda_{est}} = (P_T + Area[Last]) / Last$$
- ③ 수면 아래 마지막 부채널 인덱스 r 을 찾고 필요한 전력($power$)을 계산한다.

$$\frac{r}{\lambda_{est}} - Area[r] = power, \ Last = r$$
- ④ $(power - P_T) > \epsilon$ 이면 단계 ②로 아니면 ⑤로.
- ⑤ r 개 부채널에 채널이득에 따라 $\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{N_0}{|h_n|^2} \right)$ 의 전력을 할당한다.

알고리즘 3에서 모든 종류의 부분합 계산($\sum_{n=1}^{Last} \frac{N_0}{|h_n|^2}$) 은 배열 참조로 대체되었음을 알 수 있다. 특히 수면아래 마지막 채널의 인덱스(r)만 알면 알고리즘 2의 ③단계 마지막 식의 계산은 곱하기 한번과 배열 참조 한번으로 끝난다.

IV. 실험 및 결과

주어진 알고리즘들의 성능을 비교하기 위해 Matlab 시뮬레이션을 수행하였다. 부채널들은 $\sigma^2 = 1$ 인 i.i.d Rayleigh 페이딩 채널이다.

부채널 수는 200부터 1000까지 100개 단위로 증가시키며 9 가지 실험을 하였다. 주어진 부채널 수마다 100번씩의 시뮬레이션을 수행하고 평균을 구하였다. 표 1과 그림 2는 시뮬레이션 결과다. 알고리즘 1의 계산시간은 알고리즘 2, 3 에 비해 수십 배의 시간이 걸리므로 표와 그림에서 제외하였다.

그림 2에서 실선은 알고리즘 2, 점선은 알고리즘 3의 실행시간이다. 채널수가 증가함에 따라 좋은 채널의 수가 선형적으로 증가하고 이를 찾기 위한 시간도 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 알고리즘3은 루프 내에서 반복적으로 계산되는 부채널 이득 제곱의 역수들의 부분합 $(\sum_{n=1}^{Last} \frac{N_0}{|h_n|^2})$ 을 초기화 과정에서 한번 계산하여 배열에 저장하고 참조함으로서 알고리즘 2보다 계산시간이 평균 19.6 % 감소가 되었다.

V. 결론

채널 상태 정보(CSI)를 알고 있을 때 OFDM이나 MIMO는 병렬의 독립된 부채널들로 분해 될 수 있다. 제한된 전력 하에 채널용량에 접근하는 전송속도를 위한 최적의 부채널 전력할당 문제의 해는 Waterfilling으로 구할 수 있다. Waterfilling은 상태가 좋은(SNR 이 높은) 부채널에 더 많은 전력을 할당하고 상태가 나쁜 채널들은 적은 전력이나 전력을 할당하지 않음으로서 상태가 좋은 부채널들의 전송속도를 높이고 결과적으로 전체 전송속도를 채널용량에 접근하게 한다.

해는 총 전력 제한을 만족하는 정확한 수면 높이를 찾는 것인데 일반적으로 수면 높이를 추정하고 갱신해나가는 반복적 알고리즘이 사용된다. 이 과정에서 부채널들에 대한 채널이득 제곱의 역수들의 부분합 $(\sum_{n=1}^{Last} \frac{N_0}{|h_n|^2})$ 계산이 반복적으로 필요하다.

본 논문에서는 이런 부분합들을 초기화 단계에서 미리 계산하여 배열을 만들고 임의의 부분합 계산을 배열

표 1. 알고리즘2와 알고리즘3 실행시간(sec)
 Table 1. Execution Time of Algorithm 2, 3(sec)

채널수	알고리즘2	알고리즘3
200	0.000055937790905	0.000041232423201
300	0.000066583609219	0.000049292028585
400	0.000076337026590	0.000059566888075
500	0.000087651270709	0.000071056112771
600	0.000099018009001	0.000078961735247
700	0.000109177381311	0.000089457070265
800	0.000120883581922	0.000100368859057
900	0.000138483128373	0.000116589558559
1000	0.000151375697298	0.000129142665164

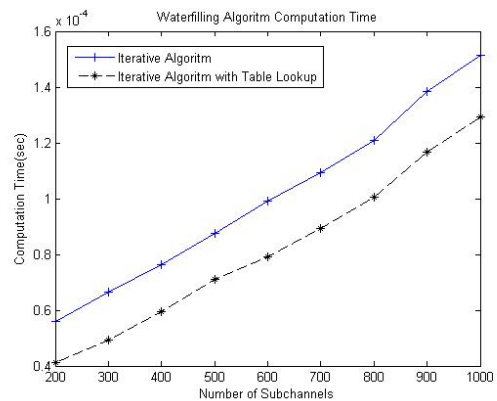


그림 2. Waterfilling 알고리즘 수행시간(sec)
 Fig. 2. Execution time of Waterfilling Algorithm

참조로 대체함으로서 Waterfilling 알고리즘의 계산 시간을 줄였다. 여러 개의 제약 조건에 의한 여러 개의 수면 높이를 결정해야 하는 다차원 Waterfilling 이나, 알고리즘의 효율을 더욱 높이기 위한 이진 탐색 등은 차후의 연구 과제이다.

References

- [1] J.Y. Park et al., "Cell Edge SINR of Multi-cell MIMO Downlink Channel", The J. of The Institute of Internet, Broadcasting & Comm., Vol 15, No 4, pp. 105-117, 2015
- [2] J.S. Yang et al., "Pseudo Jacket Matrix and Its MIMO SVD Channel," The J. of The Institute of Internet, Broadcasting & Comm., Vol 15, No 5, pp. 39-49, 2015

- [3] D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communications, Cambridge University Press, May 2005.
- [4] T. M. Cover and J. A. Thomas, Elements of Information Theory. New York: Wiley, 1991.
- [5] J. Huang, V. Subramanian, R. Agrawal, and R. Berry, "Downlink scheduling and resource allocation for OFDM systems," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 8, no. 1, pp. 288-296, Jan. 2009.
- [6] L. Gao and S. Cui, "Efficient subcarrier, power, and rate allocation with fairness consideration for OFDMA uplink," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, no. 5, pp. 1507-1511, 2008.
- [7] T. Yoo, A. Goldsmith, "Capacity an power allocation for fading MIMO channels with channel estimation error," IEEE Transactions on Information Theory, vol.52, no.5, pp.2203-2214, May 2006.
- [8] J. Yang and S. Roy, "On joint transmitter and receiver optimization for multiple-input-multiple-output(MIMO) transmission systems," IEEE Trans. Commun., vol. 42, no. 12, pp. 3221 - 3231, Dec. 1994.
- [9] Wei Yu; J. M. Cioffi, "On constant power water-filling," IEEE International Conference on Communications, vol.6, no., pp.1665-1669 vol.6, 2001.

저자 소개

안 홍 영(정회원)



- 1975년 : 서울대학교 전자공학과 (BS)
 - 1986년 : University of Florida (MS), Department of Electrical and Computer Engineering
 - 1991년 : University of Florida (Ph.D.), Department of Electrical and Computer Engineering
 - 1975년 ~ 1984년 : 국방과학연구소선임연구원
 - 1984년 ~ 1991년 : Research Assistant, University of Florida, USA
 - 1991년 ~ 현재 : 홍익대학교 컴퓨터 정보통신공학과 교수
- <주관심분야 : Wireless Networks, Ad-hoc Networks, Sensor Networks, Wireless Internet, VoIP, 4세대 이동통신, MIMO, OFDM>

※ 이 논문은 2012학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.