

# 멀티홉 중계 네트워크에서 최적 부채널 및 전력 할당을 위한 통합적 접근법

정회원 장 승 훈\*, 종신회원 김 동 구\*

## A Unified Framework for Joint Optimal Design of Subchannel Matching and Power Allocation in Multi-hop Relay Network

Seunghun Jang\* *Regular Member*, Dong Ku Kim\* *Lifelong Member*

### 요 약

본 논문은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing; 직교 주파수 분할 다중) 또는 MIMO (Multiple-input Multiple-output; 다중안테나) 시스템과 같이 여러개의 부채널이 존재하는 노드들로 구성된 다중 홉 중계 네트워크에서, 부채널할당 및 전력할당의 동시 최적화를 위한 통합적 접근방법을 제시한다. 다수의 부채널이 존재하는 경우 중계기는 전력할당외에도 첫 번째 홉과 두 번째 홉간의 부채널 matching을 통해 성능을 최적화 할 수 있게 된다. 그러나 두 홉간의 부채널 matching문제는 복잡한 조합론적 문제이므로 부채널할당과 전력할당의 동시 최적화 문제는 일반적으로 그 최적해를 구하기가 아주 어려운 문제로 알려져 있다. 하지만 본 논문에서는 재배열 부등식을 이용하여 복잡한 동시최적화 문제가 많은 경우 효율적으로 풀릴 수 있음을 보이고 다양한 예제를 통해 제안된 접근법이 아주 유용함을 보인다.

**Key Words** : Multihop, Relay, Subchannel, Rearrangement inequality

### ABSTRACT

This paper provides a unified framework for the joint optimal subchannel and power allocation in multi-hop relay network, where each node in the network has multiple parallel subchannels such as in OFDM or MIMO system. When there are multiple parallel subchannels between nodes, the relay node decides how to match the subchannel at the first hop with the one at the second hop aside from determining the power allocation. Joint optimal design of subchannel matching and power allocation is, in general, known to be very difficult to solve due to the combinatorial nature involved in subchannel matching. Despite this difficulty, we use a simple rearrangement inequality and show that seemingly difficult problems can be efficiently solved. This includes several existing solution methods as special cases. We also provide various design examples to show the effectiveness of the proposed framework.

### 1. 서 론

다중 홉 중계 네트워크는 기존의 무선 네트워크에

파워 효율성과 커버리지 확장과 같은 다양한 성능 이득을 가져다 줄 수 있는 유망한 기술이다. 또한 차세대 시스템에서 핵심 액세스 기술과 요소기술로 각광

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0000172).

※ 본 연구는 IEEE ICAC 2010에서 일부 발표되었음 [10]

\* 연세대학교 전기전자공학과 이동통신 연구실(shjang, ddkim@yonsei.ac.kr).

논문번호: KICS2010-05-209, 접수일자: 2010년 5월 11일, 최종논문접수일자: 2010년 7월 6일

받고 있는 OFDM 시스템과 MIMO 기술은 다중 홉 중계 네트워크에서 사용되어 네트워크 성능을 향상시킬 수 있는 유망한 기술들이다. OFDM이나 MIMO 시스템에 기반한 다중 홉 중계 네트워크에서는 노드간에 다수의 부채널이 존재하게 되고, 중계노드에서 채널 상황에 적응적인 부채널할당과 전력할당을 통해 시스템의 성능을 더욱 향상시킬 수 있다<sup>2,8)</sup>.

[2]의 논문에서 Herdin은 첫 번째 홉의 부채널과 두 번째 홉의 부채널의 적절한 matching을 통해 두 홉으로 구성된 OFDM기반의 네트워크의 용량을 증가시킬 수 있다는 것을 이론적인 증명없이 실험적으로 보였다. 이후, 두 홉의 채널들을 채널이득이 좋은 순서로 연결해 주는 방식이 많은 경우에 있어 최적임을 증명하려는 여러 시도가 있어 왔다. 이러한 연구방향 중 일부연구에서는 최적 전력할당에 대한 고려 없이 두 홉간의 채널을 좋은 순서대로 연결해주는 기법의 최적성을 majorization 이론<sup>9)</sup> 사용하여 특정 조건을 만족하는 일반화된 성능척도에 대해 밝혔다<sup>14)</sup>. 채널 matching과 파워 할당의 동시 최적화 문제를 고려한 또다른 기존연구들에서는 전송을 관점에서 부채널 할당 및 파워 할당의 동시 최적화 문제에 대한 연구결과를 발표하였다<sup>3,5)</sup>.

본 논문에서는 부채널과 파워 할당의 동시최적화를 위한 일반화된 접근법을 제안한다. 앞서 언급한바와 같이 기존의 연구 결과들<sup>1,3,5)</sup>, 성능척도를 일반화하지 못하거나 전력할당에 대한 고려 없이 부채널 matching만을 고려하였다. 본 논문에서 제안하는 일반화된 접근법은 기존의 연구 결과들을 특수한 경우로 포함하는 가장 일반적인 방법론을 제시한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 1절의 나머지부분에서, 우리는 시스템 모델과 부채널 및 전력할당의 동시 최적화 문제를 소개한다. 그리고 2절에서는, 1절에서 제기된 문제가 특정 조건을 만족하는 성능 척도들에 대하여 효율적으로 풀릴 수 있음을 보여주는 본 논문의 주요 결과를 보여준다. 제안된 접근법이 효과적임을 보이기 위하여, 3절에서 몇몇의 디자인 예제를 제시하였다. 4절에서 모의 실험결과들을 보여주고 끝으로 5절에서 본 논문의 결론을 맺는다.

### 1.1. 시스템 모델

본 논문에서는 소스 노드와 중계기, 목적지로 구성되는 두 개의 홉에 걸친 중계 네트워크를 고려한다. 각 노드는 그림 1과 같이  $K$ 개의 평행한 부채널을 가진다. 그림 1은 평행부채널을 통한 통신이 발생하는 보다 일반적인 상황으로서 구체적인 예로 우리는 이

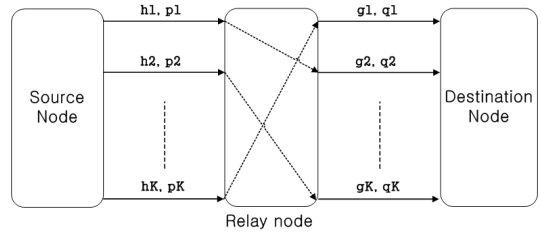


그림 1. 부채널 할당 및 전력 할당 문제

부채널들을 OFDM 또는 MIMO 시스템의 부채널로 생각할 수 있다. 이 모델에서, 소스노드는 먼저 정보 신호  $x_k$ 를  $k$ 번째 부채널을 통해 전송하게 된다. 그리고 중계기에서 수신된 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$r_k = \sqrt{\frac{P_s}{K}} h_k x_k + n_k \quad (1)$$

여기서  $n_k, h_k$  그리고  $P_s$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 백색 가우스 잡음,  $k$ 번째 부채널에서 소스와 중계기간의 채널, 그리고 소스에서 소비 가능한 최대 파워를 각각 나타낸다. 중계기는 (1)과 같이 수신된 신호를 바탕으로  $q_k$ 만큼의 파워를  $k$ 번째 부채널에 할당한다. 그리고 나서 그것을  $\sigma(k)$ 번째 부채널을 통해 목적노드 방향으로 전달한다. 목적노드에서 수신된 신호는 최종적으로 다음과 같이 주어진다.

$$y_{\sigma(k)} = \sqrt{q_k} g_{\sigma(k)} s_k + z_{\sigma(k)} \quad (2)$$

여기서  $z_k, g_k$  그리고  $s_k$ 는 각각 평균이 0이고 분산이 1인 백색 가우스 잡음,  $k$ 번째 부채널에서의 중계기와 목적노드간 채널, 그리고 중계기에서의 송신 신호를 가리킨다.

본 논문에서, 우리는 두 개의 일반적인 중계 방식, 즉 복호후 전달(Decode and Forward; DF) 중계와 증폭후 전달(Amplify and Forward; AF) 중계를 고려한다. 어떤 중계 방식이 고려되는가에 따라,  $s_k$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_k = \begin{cases} x_k & \text{for DF} \\ r_k & \text{for AF} \end{cases} \quad (3)$$

앞서 언급한 바와 같이 그림 1의 모델은 최적 전송이 대각전송으로 밝혀진 MIMO 중계 또는 다중 홉

OFDM에서 적용될 수 있다.

다음으로 본 논문의 주제인 부채널 및 전력 최적화 문제를 설명하기 위해  $S_K$ 을  $\{1, \dots, K\}$ 에서 모든 순열들의 집합이라 하자. 그러면 부채널 및 전력의 동시 최적화 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{\sigma \in S_K, q_k} & \sum_{k=1}^K f_k(|g_{\sigma(k)}|^2 q_k) \\ \text{s.t. } & q_k \geq 0, \sum_{k=1}^K q_k \leq P_r \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $f_k$ 와  $P_r$ 는 각각  $k$ 번째 부채널을 성능을 측정하는 임의의 함수와 증계기에서 사용가능한 최대 전력을 의미한다.

보다 일반적으로는, 소스 노드에서의 균일 전력할당에 대한 가정대신 문제 (4)에서 소스 노드의 전력을 최적화 변수로 넣을 수 있다. 이 경우는 각 노드의 최적 전력을 계산하는 centralized 노드가 필요하게 된다. 반면 본 논문의 모델은 centralized 노드의 존재를 요구하지 않는 분산 최적화에 적합한 보다 실용적인 모델이라 할 수 있겠다.

문제 (4)는 혼합 정수 비선형 프로그래밍(Mixed integer nonlinear programmin)으로 최적 해를 구하기가 아주 복잡한 문제로 알려져 있다. 원론적으로, 위의 문제는 가능한 모든 순열에 대해 최적의 전력을 계산함으로써 풀 수 있지만, 이러한 접근법은 복잡도의 지수 증가 때문에 그 한계가 있다.

다음 절에서는 목적 함수가 몇 가지 조건을 만족할 때 위의 문제를 간단히 풀 수 있음을 보일 것이다. 3절에서 보게되겠지만, 많은 흥미로운 예제가 이 조건을 만족한다.

## II. 부채널 및 전력의 동시 최적화

이번 절에서 우리는 동시 최적 부채널과 전력 할당 문제 (4)를 특정한 조건하에서 손쉽게 풀 수 있음을 보이고자한다. 다음의 비선형 재배열 부등식은 잘 알려진 선형 재배열 부등식의 일반화 된 형태로 차후의 내용 전개에 유용한 결과이다.

**보조정리 1:**  $f_1, \dots, f_K$ 를 구간  $I$ 에서 정의된 실함수라고 하면, 임의의 수열  $x_1 \leq \dots \leq x_K$ 와 순열  $\sigma \in S_K$ 에 대해 다음의 부등식이

$$\sum_{k=1}^K f_k(x_{N-k+1}) \leq \sum_{k=1}^K f_k(x_{\sigma(k)}) \leq \sum_{k=1}^K f_k(x_k) \quad (5)$$

성립하기 위한 필요충분조건은 모든  $1 \leq k < K$ 에 대해 다음의 조건이 성립하는 경우이다.

$$f_{k+1} - f_k \text{이 구간 } I \text{에서 단조증가 함수이다.} \quad (6)$$

**증명:** [6]을 참고하면 된다.

보조정리 1을 이용하여 이 논문의 주요 결과, 즉 문제 (4)가 간편히 풀릴 수 있는 조건을 다음의 정리 1로 요약할 수 있다.

**정리 1:** 만약  $f_{k+1} - f_k$ 가 단조증가 함수이면, 문제 (4)에서 최적의 순열  $\sigma^*$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$|g_{\sigma^*(1)}|^2 \leq \dots \leq |g_{\sigma^*(K)}|^2 \quad (7)$$

따라서, 문제 (4)는 다음의 간단한 전력할당 문제로 귀결된다.

$$\begin{aligned} \max_{q_k} & \sum_{k=1}^K f_k(|g_{\sigma^*(k)}|^2 q_k) \\ \text{s.t. } & q_k \geq 0, \sum_{k=1}^K q_k \leq P_r \end{aligned} \quad (8)$$

**증명:**  $f_{k+1} - f_k$ 가 감소하지 않는다는 가정으로부터 보조정리 1을 이용하여 최적의  $\sigma^*$ 와  $q^*$ 는 다음의 관계식을 만족해야 함을 알 수있다.

$$|g_{\sigma^*(1)}|^2 q_1^* \leq \dots \leq |g_{\sigma^*(K)}|^2 q_K^* \quad (9)$$

따라서 위의 관계를 문제 (4)의 제약 조건에 추가하면, 원래 문제는 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{\sigma, q_k} & \sum_{k=1}^K f_k(|g_{\sigma(k)}|^2 q_k) \\ \text{s.t. } & q_k \geq 0, \sum_{k=1}^K q_k \leq P_r \\ & |g_{\sigma(1)}|^2 q_1 \leq \dots \leq |g_{\sigma(K)}|^2 q_K \end{aligned} \quad (10)$$

다음으로, 문제 (10)의 최적의  $\sigma^*$ 을 사용하면

$\{|g_{\sigma^*(k)}|^2\}$ 이 오름차순으로 정렬될 수 있는 것을 보이기 위해서,  $a_k = |g_{\sigma(k)}|^2 q_k$ 라 하고, 문제 (10)을 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} \max_{\sigma, a} \quad & \sum_{k=1}^K f_k(a_k) \\ \text{s.t.} \quad & a_k \geq 0, \quad \sum_{k=1}^K \frac{a_k}{|g_{\sigma(k)}|^2} \leq P_r \\ & a_1 \leq \dots \leq a_K \end{aligned} \quad (11)$$

$\sigma^*$ 와  $a^*$ 을 위의 문제 (11)의 최적해라고 하자. 만약  $\{|g_{\sigma^*(k)}|^2\}$ 이 오름차순으로 정렬되지 않는다면, 우리는 (7)을 만족하는 또 다른 순열  $\rho$ 를 선택할 수 있다. 그러면 순열  $\rho$ 를 사용하는 경우를 순열  $\sigma^*$ 를 사용할때와 비교해보면 보조정리 1로부터 목적함수를 유지하면서 제약조건도 다음과 같이 위배하지 않음을 알 수 있다.

$$\sum_k \frac{a_k^*}{|g_{\rho(k)}|^2} \leq \sum_k \frac{a_k^*}{|g_{\sigma^*(k)}|^2} \quad (12)$$

따라서  $\{|g_{\sigma^*(k)}|^2\}$ 이 오름차순이라고 가정할 수 있고, 문제 (11)은 다음과 같이 전력할당문제로 귀결된다.

$$\begin{aligned} \max_{a_k} \quad & \sum_{k=1}^K f_k(a_k) \\ \text{s.t.} \quad & a_k \geq 0, \quad \sum_{k=1}^K \frac{a_k}{|g_{\sigma^*(k)}|^2} \leq P_r \\ & a_1 \leq \dots \leq a_K \end{aligned}$$

여기서  $\{a_k\}$ 가 오름차순이라는 제약조건은 보조정리1로부터 제거할 수 있고 따라서 정리1의 증명이 끝나게 된다.

서론에서 소개한 바와 같이 기존의 몇몇의 연구에서 majorization 이론을 사용하여 채널이득이 좋은 순서로 부채널을 연결해주는 기법이 최적임을 증명하였다<sup>[1,4]</sup>. 그러나 [1,4]의 결과는 전력할당을 고려하지 않았으며 또한 정리 1의 결과는 [1,4]의 결과를 특수한 경우로 포함하는 보다 일반적인 결과이다. 또한 어려운 수학적개념인 majorization 이론에 의존하지 않고 간단한 재배열 부등식에 기반한 결과이므로 그 적용이 보다 수월함을 알 수 있다.

### III. 응용예제

이번 절에서 우리는 정리 1이 많은 문제에 효과적으로 적용될 수 있는 일반적인고 유용한 결과임을 실제 많이 쓰이는 성능척도에 대해 구체적인 응용예제들을 통해서 확인하고자 한다.

#### 예제 1: (AF 전송을 최대화)

$\pi$ 를 다음을 만족하는 순열이라고 하자.

$$|h_{\pi(1)}|^2 \leq \dots \leq |h_{\pi(K)}|^2 \quad (13)$$

그리고,  $k$  번째 부채널의 성능함수를 다음과 같이 두자.

$$f_k(x) = \log \left( 1 + \frac{P_s |h_{\pi(k)}|^2}{K} \frac{x}{\alpha_{\pi(k)} + x} \right),$$

여기서,  $\alpha_k = 1 + \frac{P_s |h_k|^2}{K}$  이다. 그러면 AF 전송을 최대화 문제는 [5,8]에서처럼 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{\sigma \in S_K, q_k} \quad & \sum_{k=1}^K \log \left( 1 + \frac{P_s |h_{\pi(k)}|^2 |g_{\sigma(k)}|^2 q_k}{K (\alpha_{\pi(k)} + |g_{\sigma(k)}|^2 q_k)} \right) \\ \text{s.t.} \quad & q_k \geq 0, \quad \sum_{k=1}^K q_k \leq P_r \end{aligned} \quad (14)$$

$f_{k+1}(x) - f_k(x)$  이 단조증가 함수임을 보이기 위해  $\frac{d}{dx}(f_{k+1}(x) - f_k(x))$  을 계산해보면 다음과 같이 단조증가 함수임을 쉽게 알 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{P_s |h_{\pi(k+1)}|^2}{K} \alpha_{\pi(k+1)} (\alpha_{\pi(k)} + x)^2 \\ & + \frac{P_s^2 |h_{\pi(k+1)}|^2 |h_{\pi(k)}|^2}{K^2} \alpha_{\pi(k+1)} x^2 \\ & - \frac{P_s |h_{\pi(k)}|^2}{K} \alpha_{\pi(k)} (\alpha_{\pi(k+1)} + x)^2 \\ & - \frac{P_s^2 |h_{\pi(k+1)}|^2 |h_{\pi(k)}|^2}{K^2} \alpha_{\pi(k)} x^2 \\ & \geq 0 \end{aligned}$$

따라서 정리 1로부터 항상 (7)을 만족하는  $\sigma^*$ 를 선택할 수 있고 다음의 간단한 문제를 풀기만 하면 된다.

$$\max_{q_k} \sum_{k=1}^K \log \left( 1 + \frac{P_s |h_{\pi(k)}|^2}{K} \frac{|g_{\sigma^*(k)}|^2 q_k}{\alpha_{\pi(k)} + |g_{\sigma^*(k)}|^2 q_k} \right) \quad (15)$$

s.t.  $q_k \geq 0, \sum_k q_k \leq P_r$

이는 효율적으로 최적해를 얻을 수 있는 간단한 블록 최적화 문제이다. [8]은 (14)를 풀기 위해 모든 순열의 경우에 대해 최적해를 구하는 brute force 검색 방식을 적용하고 있다. 그러나 본 논문의 결과는 이러한 복잡한 검색이 불필요함을 말해준다.

**예제 2 : (AF 평균자승오차(Mean Square Error; MSE) 최소화)**

(13) 과 같이  $\pi$  를 정의하고  $k$  번째 부채널의 성능함수에 해당하는 MSE는 다음과 같이 주어진다.

$$f_k(x) = - \frac{\alpha_{\pi(k)} + x}{\alpha_{\pi(k)} + \alpha_{\pi(k)}x},$$

여기서  $\alpha_k = 1 + \frac{P_s |h_k|^2}{K}$ . AF기반의 중계기에서 MSE 최소화 문제는 [7]과 같이 다음의 문제로 주어진다.

$$\max_{\sigma \in S_K, q_k} - \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_{\pi(k)} + |g_{\sigma(k)}|^2 q_k}{\alpha_{\pi(k)} + \alpha_{\pi(k)} |g_{\sigma(k)}|^2 q_k} \quad (16)$$

s.t.  $q_k \geq 0, \sum_k q_k \leq P_r$

예제 1과 마찬가지로  $f_{k+1}(x) - f_k(x)$ 가 단조 증가 함수임을 쉽게 보일 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dx} (f_{k+1}(x) - f_k(x)) \\ &= \frac{x(\alpha_{\pi(k+1)} - \alpha_{\pi(k)})}{\alpha_{\pi(k)}\alpha_{\pi(k+1)}(1+x)} \geq 0 \end{aligned}$$

따라서 정리 1로부터 문제 (16) 을 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\max_{q_k} - \sum_{k=1}^K \log \left( \frac{\alpha_{\pi(k)} + |g_{\sigma^*(k)}|^2 q_k}{\alpha_{\pi(k)} + \alpha_{\pi(k)} |g_{\sigma^*(k)}|^2 q_k} \right) \quad (17)$$

s.t.  $q_k \geq 0, \sum_k q_k \leq P_r$

여기서, 마찬가지로  $\sigma^*$  은 (7)을 만족하는 순열이다.

**예제 3 : (DF 전송율 최대화)**

DF 중계기반의 전송율 최대화 문제에서는  $k$  번째 부채널의 성능함수가 다음과 계산된다.

$$f_k(x) = \log \left( 1 + \min \left\{ \frac{P_s |h_{\pi(k)}|^2}{N}, x \right\} \right) \quad (18)$$

따라서 DF 중계 전송율 최대화 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\max_{\sigma \in S_K, q_k} \sum_{k=1}^K \log \left( 1 + \frac{P_s |h_{\pi(k)}|^2}{K} \wedge |g_{\sigma(k)}|^2 q_k \right) \quad (19)$$

s.t.  $q_k \geq 0, \sum_k q_k \leq P_r$

여기서  $a \wedge b = \min(a, b)$ 로 정의하였다.  $f_k(x)$ 의 정의에 의해  $f_{k+1}(x) - f_k(x)$ 가 단조증가함수라는 사실을 확인하는 것은 쉽다. 이를 위해  $x \geq y$ 라 가정하자.  $x, y, \frac{P_s |h_k|^2}{K}, \frac{P_s |h_{k+1}|^2}{K}$ 의 관계에 따라 6가지의 경우가 존재한다. 예를 들어 다음의 경우

$$y \leq \frac{P_s |h_{\pi(k)}|^2}{K} \leq x \leq \frac{P_s |h_{\pi(k+1)}|^2}{K}$$

우리는 다음과 같이  $f_{k+1}(x) - f_k(x)$ 의 단조증가를 판단할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \{f_{k+1}(x) - f_k(x)\} - \{f_{k+1}(y) - f_k(y)\} \\ &= \log \left( \frac{(1+x)}{\left(1 + \frac{P_s |h_{\pi(k)}|^2}{K}\right)} \right) \geq 0 \end{aligned}$$

다른 5가지의 경우에 대하여 비슷한 방법을 사용하면, 우리는  $f_{k+1}(x) - f_k(x)$ 은 단조증가 함수라는 결론을 내릴 수 있다. 따라서, 문제 (19)는 정리1로부터 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$\begin{aligned} & \max_{q_k} \sum_{k=1}^K \log \left( 1 + \frac{P_s |h_{\pi(k)}|^2}{K} \wedge |g_{\sigma^*(k)}|^2 q_k \right) \\ & s.t. \cdot q_k \geq 0, \sum_k q_k \leq P_r \end{aligned}$$

여기서도 마찬가지로  $\sigma^*$  는 (7)을 만족하는 순열이다. 다음으로, 위 문제의 최적해는 다음의 조건을

$$|g_{\pi(k)}|^2 q_k \leq \frac{P_s |h_{\pi(k)}|^2}{K}$$

만족해야함을 알 수 있다. 이 사실로부터 미분 불가능한 점을 갖는 위 문제를 다음과 같이 미분가능한 최적화 문제로 동일하게 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{q_k} \sum_{k=1}^K \log \left( 1 + |g_{\sigma^*(k)}|^2 q_k \right) \\ & s.t. \cdot q_k \geq 0, \sum_k q_k \leq P_r \end{aligned} \quad (20)$$

$$|g_{\sigma^*(k)}|^2 q_k \leq \frac{P_s |h_{\pi(k)}|^2}{K}$$

위 문제는 효율적으로 최적해를 얻을 수 있는 볼록 최적화 문제이다.

#### IV. 모의 실험 결과

본 절에서는 앞 절에서 소개된 응용사례들의 성능을 모의 실험을 통해 살펴보고자 한다. 모든 실험에서 Rayleigh 페이딩 채널과 블록 페이딩 모델을 가정하였으며 부채널의 수는 64개를 사용하였다.

그림 2,3은 AF중계기에서 각각 최적 부채널 및 전력 할당을 적용한 경우와 부채널 할당을 identity map으로하고 전력할당을 균일하게 했을 때를 전송율, 평균자승오차 관점에서 비교하였다. 여기서 SNR은 각각 첫 번째 홉과 두 번째 홉의 SNR을 의미하며 본 모의실험에서는 두 홉의 SNR이 동일한 환경을 고려하였다. 그림 2,3으로부터 최적 부채널 및 전력 할당을 통해 모든 SNR범위에서 전송율 및 평균자승오차 성능을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

그림 4는 DF중계기에서 최적 부채널 및 전력 할당을 적용한 경우의 성능과 부채널 할당을 identity map으로하고 전력할당을 균일하게 했을 때의 전송율을 비교하였다. 그림 4로부터 DF 중계기에서도 최적 부채널 및 전력 할당을 통해 모든 SNR범위에서 전송율

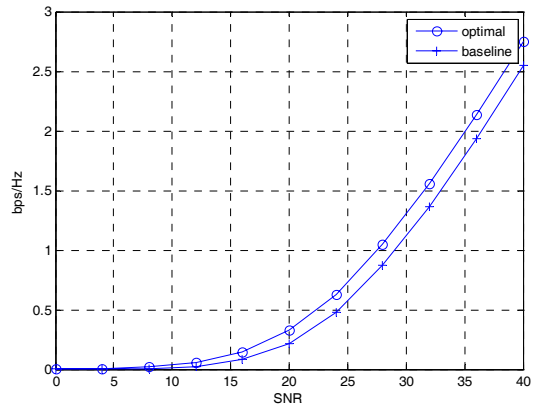


그림 2. AF 중계기에서 최적 부채널 및 전력할당 알고리즘을 적용한 전송율

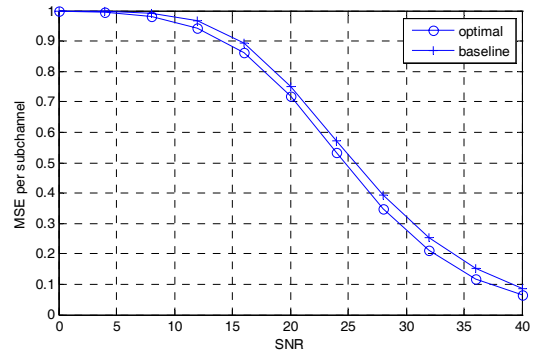


그림 3. AF 중계기에서의 최적 부채널 및 전력할당기법의 평균자승오차

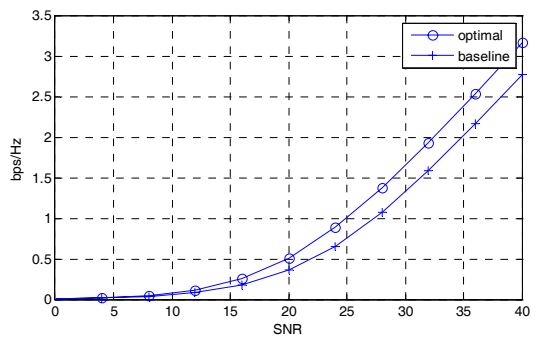


그림 4. DF 중계기에서 최적 부채널 및 전력할당 기법의 전송율

성능을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

모든 그림에서 성능은 “부채널당 성능”을 나타내고 있으므로 실제 모든 부채널에서의 성능개선을 합하면 부채널의 수가 많은 경우 전체적으로는 상당한 성능개선을 보일 수 있음을 알 수 있다. 또한 SNR이 증가할수록 전력할당에 의한 성능개선 효과는 줄어들고

부채널 할당에 의한 성능개선 효과가 성능개선에 대부분의 역할을 하게된다. baseline으로 사용된 기법에서는 부채널 할당을 적용하지 않으므로 base line의 성능은 주어진 채널분포에서 random permutation의 평균적인 성능으로 생각해볼 수 있다. 따라서 모든 그림에서 높은 SNR에서의 성능개선의 정도는 채널분포에 의해 결정된다.

### V. 결 론

본 논문은 부채널과 전력의 동시 최적화를 위한 통합적 접근법을 제안하였고, 제안된 방식은 기존의 연구결과들을 포함하는 일반적인 방식이다. 기존의 연구들이 특정성능척도에 국한된 결과들이거나 또는 전력할당에대한 고려없이 부채널할당만 고려한 반면 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고 전력할당과 부채널할당을 동시에 고려한 복잡한 문제를 쉽게 접근할 수 있는 일반적인 방법을 제시하였다. 구체적으로, 비선형 재배열 부등식을 통해 일반화된 성능척도가 추가적인 조건을 만족하는 경우 원문제의 어려운 속성에도 불구하고 손쉽게 풀 수 있다는 사실을 밝혔다. 또한 여러 응용예제들을 통해 실제 많이 사용되는 성능척도들의 경우에 대해 제안된 방식을 적용하면 부채널과 전력 동시최적화 문제가 손쉽게 풀릴 수 있음을 보였다. 제안된 방식은 대각전송이 최적으로 밝혀진 MIMO 중계 또는 OFDM 기반의 중계기에 적용이 가능하다.

### 참 고 문 헌

[1] A. Hottinen and Tiina Heikkinen, "Optimal Subchannel Assignment in a Two-Hop OFDM Relay," Proc. IEEE SPAWC, Helsinki, Finland, June 2007.

[2] Markus Herdin, "A Chunk Based OFDM Amplify-and-Forward Relaying Scheme for 4G Mobile Radio Systems," IEEE J. Sel. Areas Comm., Vol.24, pp.528-541, Mar. 2006.

[3] Y. Li, W. Wang, J. Kong, W. Hong, X. Zhang, and M. Peng, "Power Allocation and Subcarrier Pairing in OFDM-Based Relaying Networks," Proc. IEEE 2008 International Conference on Communications., May. 2008.

[4] C. K. Ho and A. Pandharipande, "BER Minimization in Relay-Assisted OFDM Systems by Subcarrier Permutation," Proc. IEEE VTC Spring 2008, Singapore, Apr. 2008.

[5] W. Zhang, U. Mitra, and M. Chiang, "Optimization of amplify-and-forward multi-carrier two-hop transmission," Submitted to IEEE Transactions on Communications, August 2008.

[6] A Vince, "A Rearrangement Inequality and the Permutation," The American Mathematical Monthly 97 (1990) pp.319-323.

[7] W. Guan and Hanwen Luo, "Joint MMSE transceiver design in nonregenerative MIMO relay systems," IEEE. Commun. Letters., Vol.12, No.7, Jul. 2008, pp.517-519.

[8] O. Munoz-Medina, J. Vidal, and A. Agustín, "Linear transceiver design in nonregenerative relays with channel state information," IEEE Transactions on Signal Processing, Vol.55, No.6, pp.2593-2604, 2007.

[9] A.W. Marshall and I. Olkin, Inequalities: Theory of Majorization and Its Applications. Academic Press, 1979.

[10] S. Jang and D. K. Kim, "A unified framework for the joint optimal allocation of subchannel and power in multi-hop relay network," Advanced Communication Technology (ICACT), Feb. 2010.

장 승 훈 (Seunghun Jang)

정회원



2002년 8월 연세대학교 기계 전자공학부  
2005년 2월 연세대학교 전기전자공학과 석사  
2005년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정  
<주관심분야> CDMA, OFDM,

MIMO 시스템, Cooperative communication.

김 동 구 (Dong Ku Kim)

중신회원



1983년 2월 한국항공대학교 통신공학과

1985년 : U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 석사

1992년 : U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 박사

1999년~현재 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 교수

<관심분야> CDMA 이동통신, 다중접속 기술, 변조 및 채널 부호화 기술, 스케줄링/MAC기술, 순방향 링크 빔성형 기술 및 MIMO기술, UWB, Binary CDMA