

다중 기지국 환경에서의 기지국 협력 기반 무선 인덱스 부호화 전송 기법

손경락*, 최 완^o

Wireless Index Coded Transmission in Multi-Transmitter Environment with Transmitter Cooperation

Kyungrak Son*, Wan Choi^o

요 약

여러 사용자의 요청을 한 번의 전송으로 해결하는 방식인 멀티캐스트 전송은 무선 트래픽 문제를 해결하는 효과적인 방법 중 하나로 제시될 수 있다. 새로운 멀티캐스팅 기법으로서, 인덱스 부호화를 무선 통신에 적용할 경우, 효과적으로 무선 데이터 트래픽을 줄일 수 있고 이와 관련하여 다양한 연구들이 진행되었다. 다중 기지국 환경에서는 링크 용량이 주어진 유선 채널에서 어떻게 인덱스 부호화를 수행할지에 관한 연구가 진행되었으나, 무선 채널 환경에 확장된 연구는 없는 실정이다. 본 논문에서는 이러한 유선 채널 위주의 인덱스 부호화 연구의 한계점들을 극복하고자, 다중 기지국 환경에서 사용자 간 저장 용량이 및 채널이 다른 경우에 채널에 적응적인 인덱스 부호화 기법을 제안한다. 이를 위해서 각 기지국 별 캐시 메모리에 따라 전송 가능한 인덱스 부호화 방식을 계산하고, 최적의 기지국 협력 그룹 및 인덱스 부호를 brute-force 형태로 찾는 알고리즘을 제시하였다. 시뮬레이션을 통해 기지국 협력 방식 간의 성능을 비교하였고, 제안 기법이 유니캐스트 방식 대비 성능이 개선됨을 확인하였다.

Key Words : Index coding, Multi-transmitter, Transmitter cooperation, Wireless channels, Time minimization

ABSTRACT

Multicast transmission, a way to accommodate multiple users' requests in a single transmission, can be utilized as one effective way to solve wireless traffic problems. Index coding, as a new multicasting scheme, has been shown to be able to effectively reduce wireless data traffic and various studies on index coding have been conducted in this regard. In multi-transmitter environments, several studies have been carried out only on how index coding techniques are applied to wired channels with fixed link capacity. However, there has been few study extended to wireless channel environments. In this paper, we propose an adaptive index coding technique for channels in multi-transmitter environments where storage capacity and channels differs in each users. To this end, we figure out decodable index codes according to the cache memory of each users and base station, and propose a brute-force algorithm to find the optimal base station cooperation and the corresponding optimal index code.

※ 이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2015-0-00820, 저장 매체를 무선 통신 자원으로 활용하는 신개념 통신 시스템 연구).

• First Author : School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), skrandrew@kaist.ac.kr, 학생(박사과정), 학생회원

o Corresponding Author : Institute of New Media and Communications and Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University (SNU), wanchoi@snu.ac.kr, 정교수, 종신회원

논문번호 : 202010-260-A-RN, Received October 16, 2020; Revised November 4, 2020; Accepted November 11, 2020

I. 서 론

모바일 장치 및 모바일 기반 서비스의 기하급수적인 성장은 무선 환경에서 막대한 양의 트래픽을 발생시키고 있다. 여러 사용자의 데이터 전송 요청을 한번의 전송으로 해결하는 방식으로 불리는 멀티캐스트 전송은 무선 트래픽 문제를 해결하는 효과적인 방법 중 하나로 사용될 수 있다. 하지만 사용자 요청의 비동기성/비동일성이나 통신 자원의 한계로 인해 기존의 멀티캐스트 전송 기법만으로 얻을 수 있는 이득은 한계를 갖는다.

인덱스 부호화 (Index Coding), 또는 부호화 멀티캐스팅이라고도 불리는 기법은 사용자가 가진 메모리를 활용함으로써, 사용자의 요청을 배타적 논리합 (Exclusive-OR, XOR) 연산을 통해 동시에 해결하는 새로운 멀티캐스팅 기법이며^[1], 이를 무선 통신에 적용할 경우 효과적으로 트래픽을 감소시킬 수 있는 것으로 여겨진다. 사용자의 메모리가 어떻게 구성되어 있는지 알 경우, 전송 횟수를 최소화하는 기법을 찾는 것이 주된 목표로 선형 계획법^[2], 무작위 부호화^[3], 비선형 부호화^[4] 등 여러 수학적 기법들을 통해 연구되어 왔다.

새로운 멀티캐스팅 기법으로써, 인덱스 부호화를 무선 통신에 적용할 경우, 효과적으로 무선 데이터 트래픽을 줄일 수 있을 것으로 여겨지고, 이와 관련하여 다양한 연구들이 진행되었다. 격자 부호화^[5], 링크 에러^[6] 관점에서 문제를 해결하였으나 각 사용자의 채널에 따라 성능이 달라지지 않고, 채널 문제와 인덱스 부호화 문제가 분리된 시스템에서 최적화를 진행하였다. 하지만 ^[7,8]에서는 이렇게 널리 알려진 접근법이 아니라 무선 채널의 경우, 실질적으로 채널과 인덱스 부호화 방식이 동시에 최적화되어야 함을 처음 보여주고, 이를 위해 최적의 전송 시간 할당 및 인덱스 부호화 전송 방식을 낮은 복잡도로 얻는 기법을 개발하였다. 좀 더 실제적으로 재전송 횟수를 고려하여, 지연 허용한 패킷 저장 방식을 제안한 연구들도 개발되어 왔다^[10,11].

인덱스 부호화 기법을 단일 안테나 환경 뿐만 아니라 다중 안테나, 다중 기지국 환경으로 확장할 경우, 빔포밍이나 서로 다른 기지국의 메모리, 채널 문제와 얽혀 복잡한 문제가 된다. 이를 위해서 마찬가지로 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 다중 입력 단일 출력 (Multiple Input Single Output, MISO) 채널에서, ^[11]은 제로포싱(Zero-forcing, ZF) 빔포밍 기반에 미리 결정된 인덱스 부호화를 활용하여, 레이트 분할 기법

을 구하였고,^[12] 또한 주어진 인덱스 부호화에서, 여러 시간 슬롯 (time slot)에서 시공간 부호화 (space time coding)와 제로포싱 빔포밍을 동시에 적용하여 해결하나 ^[7]과 같이 무선 채널에 적응적으로 인덱스 부호가 바뀌는 연구는 개발되지 않았다. 한편, 다중 기지국 환경에서는 링크 용량이 주어진 유선 채널에서 어떻게 인덱스 부호화를 수행할지에 대한 연구만이 진행되었다. ^[13]에서는 각 기지국이 전체 라이브러리에서 일부의 파일들을 갖고 있을 때, 그리고 각 기지국이 전체가 아닌 일부 사용자들과만 통신할 수 있을 때, 최적의 인덱스 부호화 길이에 대한 분석을 진행하였다. ^[14]에서는 앞 논문과 같은 모델 환경에서, 기지국들이 서로 협력할 수 있을 때의 인덱스 부호의 길이를 최적화하는 연구를 수행하였다. 하지만 이와 관련하여 무선 채널 환경에 확장된 연구는 전무하다.

본 논문에서는 이러한 한계점들을 극복하고자, 다중 기지국 환경에서 다중 사용자가 저장 용량 및 채널이 다른 경우에 ^[7]번과 같이 채널에 적응적인 인덱스 부호화 기법을 제안하고자 한다.

II. 시스템 모델 및 문제 설정

2.1 시스템 모델

본 논문에서 다루고자 하는 시스템 모델은 다중 기지국과 다중 사용자가 캐시를 가지고 있는 경우로서 그림1을 예로 한다. 한 개의 안테나를 가진 기지국 S 개가 K 명의 단일 안테나 사용자들을 지원한다. 총 N 개의 파일을 가진 라이브러리 $L = \{\mathbb{F}^{[1]}, \dots, \mathbb{F}^{[N]}\}$ 에서 각 기지국은 일부의 파일 L_s 을 라이브러리로 가지고 있다. 즉, $L_s \subset L$. 여기서 각 파일 $\mathbb{F}^{[n]}$ 의 크기는 B 비트이다. $\mathbb{R}_k \in L$ 는 k 번째 사용자의 요구 파일이며, $M_k \subset L$ 는 k 번째 사용자의 메모리에 저장되어있는 파일이다. 각 사용자는 자신의 메모리에 있는 파일을 요구하지 않는다. (즉, $\mathbb{R}_k \notin M_k$)

본 논문에서는 우선 각 기지국이 서로 다른 시간으로 전송함으로써 기지국 간 직교 전송 상황을 가정하고 있다. 이때 s 번째 기지국으로부터 k 번째 사용자의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_{sk} = h_{sk}x + z_{sk} \tag{1}$$

여기서 h_{sk} 는 s 번째 기지국에서 k 번째 사용자로의 채널로 $h_{sk} \sim \mathcal{CN}(0, \gamma_{sk}^2)$, x 는 총 전송 전력이

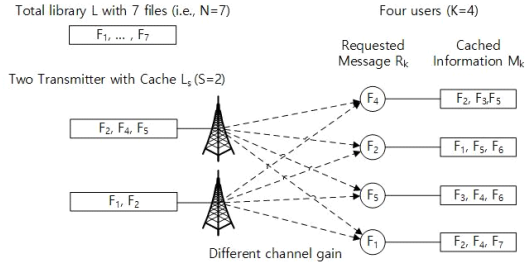


그림 1. 시스템 모델 예시 (N=7, K=4, S=2)
Fig. 1. Example of system model (N=7, K=4, S=2)

P 인 전송 신호, $z_{s,k}$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 잡음이다.

본 논문에서는 다음의 몇 가지 조건들을 가정한다. 각 사용자와의 채널을 알고 있다고만 가정한다. 또한, 기지국이 사용자들의 메모리 저장 상태를 알고 있어서, 이를 활용하여 부호화를 할 수 있다고 가정한다. 또한, 한정된 백홀 링크를 통하여 기지국 간 메시지 상태를 공유하여 협력 전송이 가능하다고 가정한다. 기지국 간 일대일로 합의가 진행되며 메시지 공유에 걸리는 시간은 T_c 로 가정한다.

위와 같은 환경에서 전송 방식은 다음과 같다. 각 기지국 별로 직교적으로 W 의 대역폭을 사용하며, 각 자 최대 K 개의 시간슬롯을 분할하여 K 명의 사용자에게 전송할 것이다. 그리고 전체 사용자 수 K 는 총 파일 개수인 N 보다 적다. 우선 전송 방식을 설명하기에 앞서 몇 가지를 정의하고자 한다. 기지국 간 협력 전송 시 협력하는 기지국 그룹은 인덱스로 대표될 수 있으며, 협력하는 그룹들의 인덱스 집합을 C_1, \dots, C_S 로 정의한다. 예를 들어, 협력이 없는 상황은 $C_1 = \{1\}, \dots, C_S = \{S\}$, 모든 기지국이 협력하는 경우는 $C_1 = \{1, \dots, S\}, C_2 = \dots = C_S = \emptyset$ 로 표현할 수 있다.

i 번째 협력 기지국 그룹에서의 인덱스 부호 구성은 다음과 같다. $G_1^i, \dots, G_K^i \subset \{1, \dots, K\}$ 는 K 개의 서로 다른 사용자 집합을 나타내는데, G_j^i 는 i 번째 기지국 그룹이 j 번째 시간대에 서비스할 사용자들의 집합이다. 또한, 집합들은 $G_l^i \cap G_m^i = \emptyset$ for all $l \neq m$ 와 $G_1^i \cup \dots \cup G_K^i = \{1, \dots, K\}$ 을 만족해야 한다.

2.2 문제 설정

위 시스템 모델에서 걸리는 총 전송시간을 비교하

고자 한다. 우선 협력 기지국 그룹 C_i 로부터 유저 그룹 G_j^i 로 전송할 때, 기지국 $s \in C_i$ 로부터 그룹 G_j^i 내 사용자 k 에 대한 데이터 전송율은 $\log_2(1 + h_{s,k}P)$ 이므로, 해당 유저 그룹의 전송 소요 시간은 다음과 같이 결정된다.

$$T_{s,j}^i = \max_{k \in G_j^i} \frac{B}{\log_2(1 + h_{s,k}P)} \quad (2)$$

따라서, 하나의 기지국 그룹에 대한 전송 소요 시간은 $\min_{s \in C_i} \sum_{j=1}^K T_{s,j}^i$ 로 결정되고, 기지국 그룹 간 가지고 있는 파일 인덱스 및 전송할 파일에 대한 정보 교환 시간 T_C 을 고려한다면, 전체 시스템에서 모든 사용자의 요청을 만족하는데 걸리는 소요 시간은 다음과 같이 계산된다.

$$T_{total} = \sum_{i=1}^S \left[|C_i| T_C + \min_{s \in C_i} \sum_{j=1}^K T_{s,j}^i \right] \quad (3)$$

이에 따라 전체 소요 시간을 최소화 하는 기지국 협력 방식, 각 기지국의 인덱스 부호 및 이에 따른 전송 소요 시간을 결정하는 문제는 다음의 문제 **P1**과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{P1} \text{ minimize } T_{total} &= \sum_{i=1}^S \left[|C_i| T_C + \min_{s \in C_i} \sum_{j=1}^K \max_{k \in G_j^i} \frac{B}{\log_2(1 + h_{s,k}P)} \right] \\ &G_l^i \cap G_m^i = \emptyset \text{ for all } l \neq m \quad (4) \\ \text{subject to } &G_1^i \cup \dots \cup G_K^i = \{1, \dots, K\} \quad (5) \\ &C_1 \cup \dots \cup C_S = \{1, \dots, S\} \quad (6) \end{aligned}$$

III. 제안 기법

3.1 각 기지국의 인덱스 부호화 결정 방식

문제 **P1**에서 주어진 기지국 $C_i (i = 1, \dots, S)$ 에 대해서 주어진 조건들을 만족하는 인덱스 부호화 그룹은 다음과 같이 사용자 전체에 대한 부가정보 그래프 (Side information graph)의 인접 행렬 (adjacency matrix)의 부분 행렬 (submatrix)로부터 얻어낼 수 있다. 우선 사용자 전체에 대한 부가정보 그래프는 다음과 같이 정의된다.

전체 사용자에게 대한 부가정보 그래프 G 를 얻고 나면 해당 그래프의 인접 행렬 A 를 바로 얻어낼 수 있다. 한편으로, 주어진 기지국 그룹 C_i 가 지원할 수

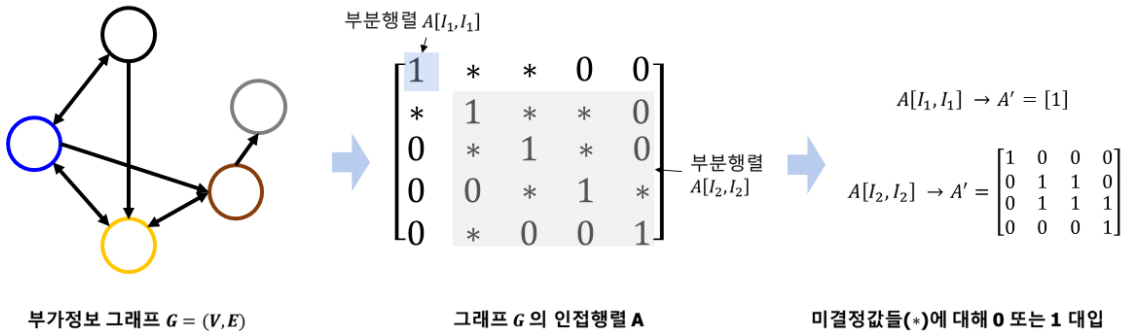


그림 2. 부가정보 그래프 및 각 기지국에서 전송 가능한 인덱스 부호 구성 방법 예시
 Fig. 2. Example of Side information graph and Index code construction for each transmitter

정의 1. (부가정보 그래프) 부가정보 그래프는 무방향 그래프 (undirected graph) $G = (V, E)$ 로 다음과 같이 구성된다.

- 꼭짓점 집합 $V = \{v_1, \dots, v_K\}$: 각 사용자가 요청하는 파일들 집합 (또는 해당 사용자 인덱스로 바로 표기 가능)
- 에지 집합 E : 어느 두 꼭짓점 v_i, v_j (즉, 사용자 i, j)에 대해서, $\mathbb{R}_i \in M_j$ 와 $\mathbb{R}_j \in M_i$ 가 성립하는 경우, 두 꼭짓점은 연결되어 있음. 즉, 에지 $(v_i, v_j) \in E$.

있는 사용자들은 다음 파일들을 가지고 있는 사용자들이다.

$$\bigcup_{s \in C_i} L_s \tag{4}$$

해당 파일에 맞는 사용자 인덱스 집합을 I_i 라 정의한다. 예를 들어, 기지국 그룹 $C_1 = \{1, 2\}$ 에서 첫 번째 기지국이 사용자 요청 파일 중 $\mathbb{R}_1, \mathbb{R}_3$ 을 갖고 있고, 두 번째 기지국이 사용자 요청 파일 중 \mathbb{R}_1 을 갖고 있는 경우, $I_1 = \{1, 3, 4\}$ 가 된다. 부분 행렬 $A[I_i, I_i]$ 을 통해 해당 기지국 그룹이 전송 가능한 인덱스 부호를 다음과 같이 기존의 인덱스 부호를 얻어내는 과정과 동일한 방법으로 얻어낼 수 있다.

- 1) 부분행렬 $A[I_i, I_i]$ 에서 대각선 요소들을 제외한 요소들에 대하여, 0은 그대로 두고, 1인 값들 대해

1) 주어진 그래프 $G = (V, E)$ 의 인접 행렬 A 는 i 번째 행 j 번째 열 (A) = $\begin{cases} 1 & (i, j) \in E \\ 0 & (i, j) \notin E \end{cases}$ 인 행렬로 정의된다.

- 서 그대로 1로 두거나 아니면 0인 행렬 A' 를 얻음.
- 2) A' 의 기저 (basis)를 구하고, 해당 기저의 0이 아닌 성분 (nonzero term)들의 인덱스에 해당하는 파일에 대한 XOR 수행.
- 3) 1번에서 얻을 수 있는 모든 A' 에 대해 수행.

그림 2는 사용자 전체에 대한 부가정보 그래프의 예시 및 이를 통해 각 기지국에서 전송 가능한 인덱스 부호를 구성하는 방법에 대한 간략한 설명이다. 이 과정을 통해서 찾아진 전송 가능한 모든 인덱스 부호를 P_d 라 정의한다. 다음 장에서 P_d 중에서 전송할 최적의 인덱스 부호 $\{G_j^i\} = (G_1^i, \dots, G_K^i)$ 를 탐색하는 알고리즘을 제시한다.

3.2 최적의 기지국 협력 방식 및 인덱스 부호 알고리즘

앞서 주어진 각 기지국 협력 그룹에 대해 전송 가능한 인덱스 부호를 찾는 과정에 대해 살펴보았다. 총 전송 소요시간은 기지국 협력 방식에 따라 다르게 되므로, 모든 기지국 협력 방식을 따져야 한다. 가능한 기지국 협력 경우는 기지국 인덱스에 대한 멍집합 (power set)과 동일하므로 총 경우의 수는 S^K 개가 된다. 최대 메모리 크기가 M 이면 최악의 시나리오로 2^M 개 만큼의 전송 가능한 인덱스 부호가 존재하므로, 계산 복잡도는 $O(S^K 2^M)$ 정도의 복잡도가 발생한다.

기지국 협력 및 인덱스 부호에 대해 무작위 탐색 (brute-force) 방식으로 탐색하는 알고리즘은 아래 알고리즘 1과 같다. 주어진 기지국 협력 방식 및 인덱스 부호에 따른 총 전송 소요시간은 다음과 같이 계산된다.

알고리즘 1. 최적의 기지국 협력 방식 및 인덱스 부호를 찾는 알고리즘 의사코드
 Algorithm 1. Pseudo code for Brute-force index coding and transmitter cooperation set searching algorithm

알고리즘 1. (최적의 기지국 협력 방식 및 인덱스 부호를 찾는 알고리즘 의사코드)

입력값 : 사용자 요청 파일 $\mathbb{R}_1, \dots, \mathbb{R}_K$, 사용자 메모리 저장 파일 M_1, \dots, M_K , 기지국 협력 그룹 수 S

1. 요청파일 및 메모리 저장 파일로부터 시스템 전체의 부가정보 그래프 G 와 해당 그래프의 인접 행렬 \mathbf{A} 도출.
2. For all (C_1, \dots, C_S) do
 - 2.1. For $i=1, \dots, S$ do
 - 2.1.1. 주어진 기지국 협력 그룹 C_i 에 해당하는 사용자 집합을 I_i 에 대한 부분행렬 $\mathbf{A}[I_i, I_i]$ 고정.
 - 2.1.2. 부분행렬 $\mathbf{A}[I_i, I_i]$ 로부터 행렬 \mathbf{A}' 를 얻음.
 - 2.1.3. \mathbf{A}' 의 기저를 구하고, 해당 기저의 0이 아닌 성분들의 인덱스 들을 하나의 그룹으로 하도록 인덱스 부호 G_j^i 결정.
 - 2.1.4. If $T(C_1, \dots, C_S, G_j^1, \dots, G_j^S) > T(C_1, \dots, C_S, \tilde{G}_j^1, \dots, \tilde{G}_j^S)$
 - 2.1.4.1 $(\tilde{C}_1, \dots, \tilde{C}_S) = (C_1, \dots, C_S)$.
 - 2.1.4.2 $(\tilde{G}_j^1, \dots, \tilde{G}_j^S) = (G_j^1, \dots, G_j^S)$.
 - 2.1.4. End
 - 2.2. End
3. End
4. 출력값 : 최적의 기지국 그룹 C_1, \dots, C_S 및 사용자 그룹 G_j^1, \dots, G_j^S .

- 기지국 1, 기지국 2, 기지국 3 모두 협력하는 경우
- 기지국 1, 기지국 2가 협력하는 경우
- 기지국 1, 기지국 3가 협력하는 경우
- 기지국 2, 기지국 3가 협력하는 경우
- 협력하지 않는 경우

이러한 5가지 경우 중 최적의 협력 방식 및 최적의 인덱스 부호를 통해 얻은 최소 전송 시간을 여러 신호-대-잡음비 (Signal to Noise Ratio, SNR) 및 메모리 크기에 따라 시뮬레이션을 수행하고 유니캐스트 전송 방식과 성능을 비교하였다. 또한, 협력의 정도가 환경에 따라 어떻게 다르게 반영되는지도 파악하기 위하여, 최적 협력 방식 외에도 각각 협력하는 경우, 성능도 제시하였다.

4.1 SNR에 따른 전송 시간

그림 3 및 그림 4는 0 ~ 40(dB)의 신호-대-잡음비 상에서 기존 기법 및 제안 기법의 총 전송 소요시간을 나타낸다. 추가적인 시뮬레이션 환경은 다음과 같다. 기지국간 협력을 위한 메시지가 충분히 길지 않아 단위 패킷 내에 전송이 가능할 것으로 판단하여, 협력시간은 5G NR의 subframe 단위 길이인 $T_c = 10^{-3}$ 으로 설정하였으며, 각 기지국으로부터 사용자로의 채널 경향성이 비슷한 경우와 상이한 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 각 기지국 및 각 사용자의 최대 메모리 크기는 5로 결정하였으나, 실제 시뮬레이션에서는 5개를 모두 다 활용하지 않는 경우까지 포함하여 진행하였다. 채널 경향성이 비슷한 경우의 감쇠 계수는 세 기지국 모두 $(\gamma_{11}, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{14}, \gamma_{15}, \gamma_{16}, \gamma_{17}) = (0.05, 0.1, 0.5, 1, 3, 4, 7)$ 를 따르는 환경이며, 채널 경향성이 상이한 경우는 $(\gamma_{11}, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{14}, \gamma_{15}, \gamma_{16}, \gamma_{17}) = (0.05, 0.1, 0.5, 1, 3, 4, 7)$, $(\gamma_{21}, \gamma_{22}, \gamma_{23}, \gamma_{24}, \gamma_{25}, \gamma_{26}, \gamma_{27}) = (7, 4, 3, 1, 0.5, 0.1, 0.05)$, $(\gamma_{31}, \gamma_{32}, \gamma_{33}, \gamma_{34}, \gamma_{35}, \gamma_{36}, \gamma_{37}) = (7, 0.05, 4, 0.1, 3, 0.5, 1)$ 을 따르는 환경이다.

그림 3(a)와 그림 4(a) 모두 SNR이 커짐에 따라 $\sum_{i=1}^S |C_i| T_C$ 로 성능이 포화(saturation)됨을 확인할 수 있다. 그림 3(a)의 결과를 살펴보면 기지국의 협력 방식에 따라 성능이 달라짐을 확인할 수 있고, 그림 4(a)의 결과를 살펴보면, 신호-대-잡음비가 낮을 때는 전송시간이 채널에 영향을 받아, 모든 기지국이 협력하는 경우가 최적이지 아닌 경우가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 채널이 최적의 인덱스 부호 및 기지국

$$T(C_1, \dots, C_S, G_j^1, \dots, G_j^S) = \sum_{i=1}^S \left[|C_i| T_C + \sum_{k=1}^K \max_{k \in C_j} \frac{B}{\log_2(1 + h_{ik}P)} \right]$$

IV. 성능 분석

본 논문에서는 제안한 기법을 활용하여 여러 가지 환경에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 환경은 다음과 같다. 총 기지국 수는 3개, 사용자 수는 7명이며, 라이브러리 내 파일 수는 총 10개, 각 파일의 크기는 1000비트, 사용 대역폭 크기는 10MHz이다 (즉, $S=3, K=7, N=10, B/W=10^{-4}$). 이외에 각 기지국의 메모리 크기, 각 기지국으로부터 사용자로의 감쇠 계수, 협력 시간 등은 각각의 시뮬레이션마다 다르며, 해당 시뮬레이션에서 구체적으로 표기한다. 각 시뮬레이션은 10000번 반복시행하였다. 총 기지국 수가 3개이므로 가능한 기지국 협력 방식의 경우의 수는 총 5가지이다.

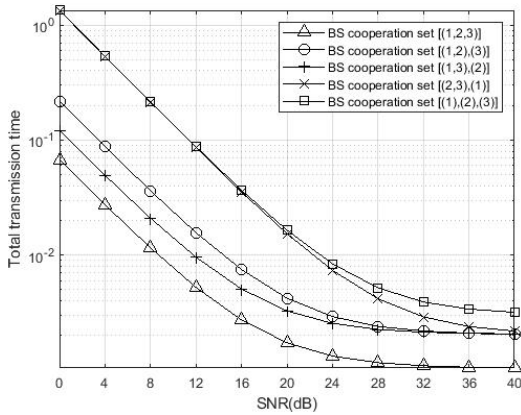


그림 3(a) 기지국 협력 방식 별 최적의 전송 시간 비교

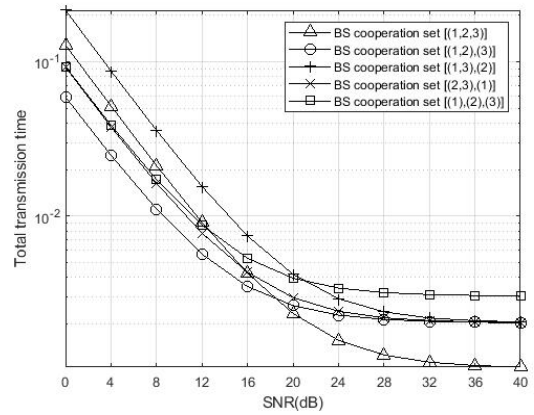


그림 4(a) 기지국 협력 방식 별 최적의 전송 시간 비교

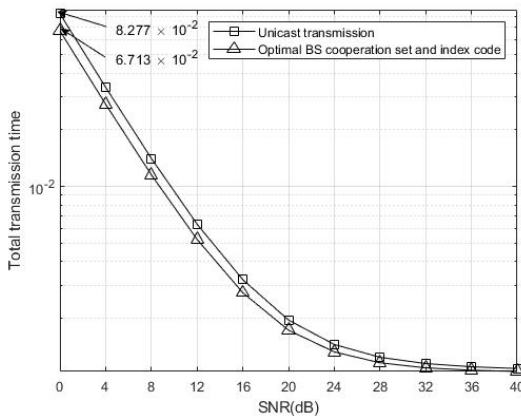


그림 3(b) 유니캐스트 기법과 최적의 협력 방식 및 인덱스 부호에 따른 전송시간 비교

그림 3. 각 기지국의 채널 감쇠 계수가 비슷한 경우, 신호대-잡음비에 따른 다양한 기법들의 총 전송 시간

Fig. 3. Total transmission time of various schemes with respect to SNR, when each transmitter has similar channel pathloss coefficients.

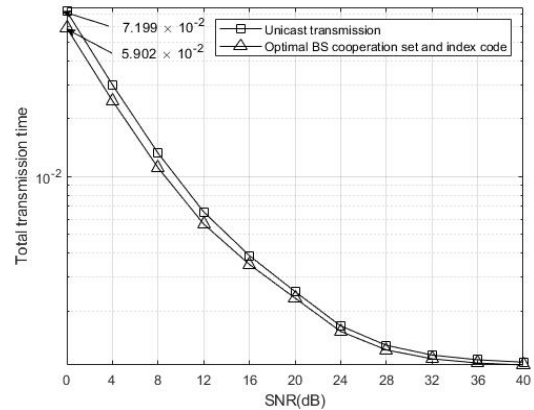


그림 4(b) 유니캐스트 기법과 최적의 협력 방식 및 인덱스 코드에 따른 전송시간 비교

그림 4. 각 기지국의 채널 감쇠 계수가 상이한 경우, 신호대-잡음비에 따른 다양한 기법들의 총 전송 시간

Fig. 4. Total transmission time of various schemes with respect to SNR, when each transmitter has different channel pathloss coefficients

협력 방식에 영향을 주는 것을 확인할 수 있고, 기지국 별 채널이 상이한 경우에 이러한 경향이 더 두드러지게 드러나는 것을 알 수 있다. 한편, 그래프 결과에서 신호대-잡음비가 높은 경우, 전송시간이 기지국 협력 시간 대비 전송 소요시간이 매우 작아서 기지국 협력의 정도에만 결정이 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)와 그림 4(b)에서는 유니캐스트 및 인덱스 코딩 기법 모두 최적의 기지국 협력 방식을 선택한 경우에 대해서 비교하였다. 결과를 살펴보면, 유니캐스트 방식 대비 제안한 인덱스 코딩 및 기지국 협력 방식을 통해 전송 소요시간이 감소하였음을 확인할 수 있고 대략 15 ~ 18% 정도의 전송 소요시간 감소율을 보임을 확인할 수 있다.

본 제안 기법은 메모리 및 채널 환경에 따라 평균

적인 성능을 측정하였기 때문에, 메모리 구성에 따라 구성할 수 있는 인덱스 부호가 적거나, 좋은 채널을 가진 사용자의 파일이 안 좋은 채널을 가진 사용자의 파일과 같이 멀티캐스트 전송되어 안 좋은 채널에 대해 전송시간이 결정되는 병목현상(bottleneck effect)을 겪는 경우가 발생한다. 이로 인해, 인덱스 부호를 활용하고, 무작위 탐색을 적용하였음에도 불구하고, 채널이 균일할 때 인덱스 부호를 통해 전송 횟수가 7 번에서 6번으로 한번 감소한 상황의 전송 시간 감소율 (1/7 ≈ 14.28%)과 비슷한 정도의 감소율을 얻는 것을 확인할 수 있다.

4.2 사용자의 최대 메모리 크기에 따른 전송 시간

그림 5는 총 전송 소요시간을 기지국 메모리 크기

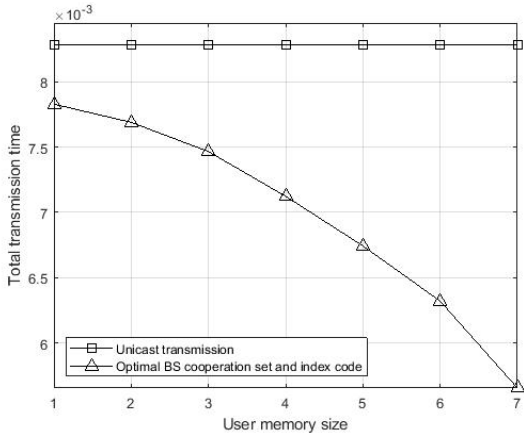


그림 5. 사용자 메모리 크기에 따른 다양한 기법들의 총 전송 시간
 Fig. 5. Total transmission time of various scheme with respect to user memory size

에 따라 표시한 그래프이다. 추가적인 시뮬레이션 환경은 다음과 같다. 신호-대-잡음비는 10 dB, 협력 시간은 $T_c = 10^{-3}$ 이며, 각 기지국으로부터 사용자로의 채널 감쇠 계수는 세 기지국 모두 $(\gamma_{i1}, \gamma_{i2}, \gamma_{i3}, \gamma_{i4}, \gamma_{i5}, \gamma_{i6}, \gamma_{i7}) = (0.05, 0.1, 0.5, 1, 3, 4, 7)$ 를 따르는 환경이다. 각 기지국의 메모리 크기는 5로 결정하였으나, 실제 시뮬레이션 시에는 5개를 모두 다 활용하지 않는 경우까지 포함하여 진행하였다. 각 사용자의 메모리 크기 또한 마찬가지로 모두 다 활용하지 않는 경우를 포함하여 진행하였다.

그림 5의 결과를 관찰하면, 사용자의 최대 메모리가 커질수록 제안 기법의 전송 소요시간이 더 감소함을 확인할 수 있다. 이는 최대 메모리가 커짐에 따라 구성할 수 있는 인덱스 부호화 더 다양해지고, 이 중에서 좋은 성능을 가지는 인덱스 부호를 선택할 수 있기 때문이다. 메모리가 가장 큰 경우에는 대략 35%의 전송 시간 감소율을 보임을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 다중 기지국 환경에서 다중 사용자의 메모리 및 채널이 서로 다른 경우에 채널에 적응적인 인덱스 부호화 및 기지국 협력 기법을 제안하였다. 이를 위해, 다중 기지국 및 다중 사용자 환경에서 저장 용량이 임의로 설정되어있는 경우에 대한 캐싱 시스템을 모델링 하였다. 기존 단일 기지국 형태의 인덱스 부호화 방식을 확장하여, 기지국 간 협력이 고려된 각 기지국의 인덱스 부호화 방식을 결정하였다. 그리

고 최적의 기지국 협력 및 인덱스 부호화 탐색 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 기지국 협력 방식 간의 성능을 비교하였고, 제안 기법이 유니캐스트 방식 대비 성능이 개선됨을 확인하였다.

References

- [1] Z. Bar-Yossef, Y. Birk, T. S. Jayram, and T. Kol, "Index coding with side information," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 3, pp. 1479-1494, Mar. 2011.
- [2] A. Blasiak, R. Kleinberg, and E. Lubetzky, "Index coding via linear programming," [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1004.1379>, Apr. 2010.
- [3] F. Arbabjolfaei, B. Bandemer, Y.-H. Kim, E. Sasoglu, and L. Wang, "On the capacity region for index coding," in *Proc. IEEE ISIT*, pp. 962-966, Istanbul, Turkey, Jul. 2013.
- [4] E. Lubetzky and U. Stav, "Nonlinear index coding outperforming the linear optimum," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 8, pp. 3544-3551, Aug. 2009.
- [5] L. Natarajan, Y. Hong, and E. Viterbo, "Lattice index coding," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 12, pp. 6505-6525, Oct. 2015.
- [6] A. Thomas, R. Kavitha, A. Chandramouli, and B. S. Rajan, "Optimal index coding with min-max probability of error over fading," in *Proc. IEEE Int. Symp. PIMRC*, pp. 889-894, Hong Kong, Aug. 2015.
- [7] K. Son, J. H. Lee, and W. Choi, "Vector linear index codes and time allocation in wireless channels," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 238-239, Jeongseon, Korea, Jan. 2018.
- [8] K. Son, J. H. Lee, and W. Choi, "User-cache aided transmission with index coding in k-user downlink channels," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 12, pp. 6043-6058, Dec. 2019.
- [9] K. Ngo, S. Yang, and M. Kobayashi, "Scalable content delivery with coded caching in multi-antenna fading channels," *IEEE*

Trans. Wirel. Commun., vol. 17, no. 1, pp. 548-562, Jan. 2018.

- [10] S. W. Choi, J. Kim, and Y. K. Kim, "Efficient broadcast scheme based on ergodic index coding," *J. KICS*, vol. 40, no. 8, pp. 1500-1506, Aug. 2015.
- [11] S. W. Choi, "Index coded automatic repeat request(ARQ)," *Entropy*, vol. 22, no. 8, pp. 1-10, Aug. 2020.
- [12] S. P. Shariatpanahi, G. Caire, and B. H. Khalaj, "Multi-antenna coded caching," in *Proc. IEEE ISIT*, pp. 2113-2117, Aachen, Germany, Jun. 2017.
- [13] P. Sadeghi, F. Arbabjolfaei, and Y.-H. Kim, "Distributed index coding," in *Proc. IEEE Inf Theory Wkshp.*, pp. 330-334, Cambridge, United Kingdom, 2016.
- [14] M. Li, L. Ong, and S. J. Johnson, "Cooperative multi-sender index coding," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 65, no. 3, pp. 1725-1739, Mar. 2019.
- [15] 3GPP, TR 38.101, "*User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone*," Retrieved Nov. 10, 2020. from https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.101-1/38101-1-g50.zip

최 완 (Wan Choi)



1996년 2월 : 서울대학교 전자공학 학사

1998년 2월 : 서울대학교 전자공학 석사

2006년 12월 : University of Texas at Austin, Department of Electrical and Computer Engineering 박사

2007년 1월~2020년 2월 : 한국과학기술원 (KAIST) 전기 및 전자공학부 조교수, 부교수, 정교수

2020년 3월~현재 : 서울대학교 뉴미디어통신공동연구소 및 전기정보공학부 정교수

<관심분야> 무선통신, 정보이론, 머신러닝

[ORCID:0000-0003-3930-7088]

손 경 락 (Kyungrak Son)



2014년 2월 : 한국과학기술원 (KAIST) 전기 및 전자공학과 학사 (수리과학과 복수전공)

2016년 2월 : 한국과학기술원 (KAIST) 전기 및 전자공학부 석사

2016년 3월~현재 : 한국과학기술원 (KAIST) 전기 및 전자공학부 박사과정

<관심분야> 무선통신, 정보이론, 부호이론

[ORCID:0000-0002-2983-985X]