



Journal of Knowledge Information Technology and Systems

ISSN 1975-7700 (Print), ISSN 2734-0570 (Online)

<http://www.kkits.or.kr>

Optimizing MIMO Link Scheduling

Young-myung Kang*

Network Business, Samsung Electronics

ABSTRACT

In conventional communication systems, throughput optimization problems have been mainly dealt with in terms of protocol designs such as routing, scheduling, and encoding/decoding efficiency. However a new optimization solution has been required and widely studied for complex multivariate systems such as multi-hop MIMO networks. Cross-layer optimization has been introduced as the basic framework for the theoretical solutions to improve the network performance, and there has been a plethora of approaches to extend the cross-layer optimization processes to the multi-hop MIMO networks. Contrary to the legacy SISO, if the cross-layer optimization is applied to MIMO networks without appropriate variables reduction, the computation complexity increases exponentially. Linking the physical layer operations of MU-MIMO to other layer features such as MAC scheduling may cause a tremendous computational overhead. The problem itself has characteristics that cannot be easily expressed in LP, and even if expressed in LP, numerous variables presented in the system prevent a practical optimization. The purpose of this paper is to solve the problem of minimum length scheduling that satisfies a given traffic demand in a multi-hop MIMO network with a cross-layer optimization scheme. The solution we proposed is to devise an optimized scheduling algorithm based on LP decomposition through column generation. Through various mathematical analysis and test results, we have confirmed that the proposed method greatly improves the system performance significantly.

© 2020 KKITS All rights reserved

KEYWORDS : MIMO, Link Scheduling, Optimization, WLANs, Column Generation, Wireless networks

ARTICLE INFO: Received 29 September 2020, Revised 8 October 2020, Accepted 13 October 2020.

*Corresponding author is with Samsung Electronics, 129, Samsung-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do,

Republic of Korea.

E-mail address: kang.youngmyoung@gmail.com

1. 서론

다중 안테나 시스템의 비약적인 발달로 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)는 무선 네트워크의 핵심 기술로 자리 잡았다[1]. 네트워크 용량 증대와 안정적인 무선 통신 지원과 같은 MIMO의 혁신적인 기능은 이미 WLAN과 3G, 4G, 5G등의 이동통신 네트워크에 일찍이 적용되어 무선 네트워크 시장을 주도하고 있다. 또한 메시 네트워크의 출현과 더불어 어디서든지 쉽게 MIMO 장비가 구축된 네트워크 시스템을 접할 수 있게 되었다. MIMO가 미래 무선 통신의 핵심 기술이 될 것이라는 사람들의 기대와 더불어 MIMO는 지속적으로 기능이 향상되어 특히 물리계층에서 성과를 이루었다[2].

이러한 새로운 기술의 성능향상을 위해 기존에는 라우팅, 스케줄링, 그리고 MAC 프로토콜과 같은 측면에서 처리율(throughput) 최적화 문제에 대해 고민해왔다. 이러한 노력은 주로 물리계층의 연구에 집중되었던 SU-MIMO (Single-User MIMO)를 넘어서 MU-MIMO (Multi-User MIMO)로 확장되었다. 한편 SISO 네트워크 혹은 SU-MIMO에서의 다양한 이슈들이 MU-MIMO 에서는 보다 복잡한 문제로 변화된다. 멀티 홉 MIMO (Multi-hop MIMO) 네트워크에서는 기존의 SISO보다 복잡해진 MU-MIMO의 물리계층 연산이 스케줄링과 같은 다른 계층의 문제와 연계되었을 때 그 복잡도가 기하급수적으로 커지는 특성이 있다. 특히 문제가 LP (Linear Programming) 등으로 쉽게 표현될 수 없는 점이나, 표현한다고 해도 수 많은 변수들로 인해 최적화 어려움이 있다.

본 논문은 주어진 트래픽 요구량을 만족시키는 최소 길이 스케줄링(minimum length scheduling) 문제를 멀티 홉 MIMO 네트워크에 적용하여 계층간 최적화 문제로 해결하는 데 목적이 있다. 또한 이 과정 중에 나타나는 복잡도 문제를 해결하는 방법

에 대하여 논한다. 제안한 해결방법은 컬럼 제너레이션 (column generation)을 통한 LP decomposition을 기반으로 하여 최적화된 스케줄링 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 주요 공헌점은 다음과 같다.

1. MIMO 시스템의 제약사항을 최소 길이 스케줄링 문제로 재정의했다.

2. column generation을 사용해서 복잡도 문제를 해결하고 효율적인 스케줄링 알고리즘을 제안했다.

3. 수학적 모델을 제시하고 성능 평가를 통해 제안한 모델과 알고리즘의 효용성을 입증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에는 관련 연구를 소개하고 3장에서는 시스템 모델에 관해 설명한다. 4장에서는 스케줄링 알고리즘을 소개하고 5장에서 성능 평가를 통해 제안의 타당성을 검증하며 6장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

Link Scheduling : 주로 컬러링 문제로 변형되는 링크 스케줄링 문제는 기본적으로 NP-hard이기 때문에 수많은 근사 알고리즘이 제안되어 왔다. [3]은 주어진 링크의 트래픽 요구량을 만족시키는 최소 길이 스케줄 방법을 찾기 위해 복잡도 $O(N^5)$ 의 알고리즘을 제안했다. 하지만 이 알고리즘은 단지 half-duplex constraint만을 고려하였다. [4]는 SINR 제약사항을 추가했을 때 적용할 수 있는 방법을 제시했지만, 트래픽 요구량을 나타내는 벡터가 superincreasing 성질을 갖는 특정한 상황에서만 적용될 수 있는 한계점을 지니고 있다.

MIMO 스케줄링 : [5]에서는 무선랜에서 MIMO AP를 통해 다수의 수신자들에게 동시에 데이터를 보낼 수 있도록 하여 MU-MIMO의 공간적 멀티플렉싱 (spatial multiplexing) 이득의 최대화 문제를 다루었다. [6]에서는 SIC를 고려한 MIMO 애드혹 네트

워크에서의 링크 스케줄 문제를 다루었다.

계층간 최적화 : [7]는 최초로 멀티 홉 MIMO 네트워크에 적용할 수 있는 계층간 최적화를 위한 프레임워크를 제안했다. 또한 이들이 제안한 프레임워크는 처리량 최대화를 고려한 전형적인 스케줄링 문제에 적합하도록 설계되어 풀고자 하는 최소 길이 스케줄링 문제 (일반적으로 최소길이 스케줄링 문제가 더 큰 복잡도를 갖는다) 에는 직접적으로 적용될 수 없는 한계가 있다. [8]은 본 논문과 가장 비슷한 문제를 풀고 있다. 하지만 이 논문은 MU-MIMO의 특성을 활용하지 않았다는 한계점을 지니고 있다. [9]에서 저자들은 SINR based의 스케줄링 방법을 제시한다. Column generation 방법을 이용한 이 문제는 MIMO를 고려하지 않았다.

3. 시스템 모델

3.1 MIMO-Primer

전형적으로 MIMO 전송 시스템은 트랜시버가 다수의 안테나를 가지고 있다. 이때 송신단과 수신단의 안테나 개수는 각각 n_t, n_r 로 표기한다. 데이터는 먼저 인코딩된 후 다수의 심볼 스트림으로 매칭되고 각각의 심볼 스트림은 송신단의 각 안테나에 할당되어 채널을 통해 송신된다. 수신단은 다수의 안테나를 통해 심볼을 받은 후 데이터를 복구시킨다. MIMO는 하나의 안테나의 개수만큼 $\min(n_t, n_r)$ 하나의 링크에서 여러 개의 독립적인 전송이 가능하고 따라서 기존 SISO 시스템보다 훨씬 더 높은 전송 속도를 낼 수 있다.

MIMO 링크의 일반적인 특성은 아래와 같다.

- Spatial Multiplexing : 송신단이 서로 다른 데이터 스트림을 한 개 혹은 다수의 수신단에게 동시에 전송한다. 이를 통해 처리량 측면에서 추가적인 대역폭이나 파워 없이 높은 효율을 거둘 수 있

다.

- Diversity : 서로 독립적이지 않은 데이터 스트림을 전송하여 리시버가 데이터 다중화로 인한 수신성능 개선 효과를 얻는다. STBC, STTC 등의 채널 코딩 기술이 MIMO-Diversity와 밀접한 관련이 있다 [10][11].

- Interference suppression : MIMO 노드는 자신의 안테나 개수만큼 주위 간섭을 효율적으로 제거할 수 있다 [12].

3.2 Network Model

본 논문은 A개의 안테나를 가지고 있는 정지노드 (stationary nodes) 들로 구성되어 있는 멀티 홉 MIMO network $G=(V,E)$ 을 고려한다 <그림 1>. 여기서 V는 네트워크를 구성하고 있는 노드(v)들의 집합을 의미하고 $\{v \mid v \in V, v = \text{노드}\}$, E는 두 노드 간의 링크(e)의 집합을 나타낸다 $\{e \mid e \in E, e = \text{directed TX link}\}$. 본 논문에서는 각 링크가 만족시켜야 하는 트래픽 요구량(d)이 있다고 가정한다. 각 링크의 트래픽 요구량은 TDMA 방식을 가정하는 시스템에서 하나의 스케줄 단위 동안 모두 만족 되어야 한다.

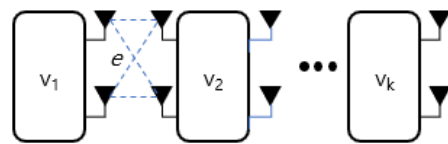


그림 1. MIMO 네트워크 모델 그래프 $G=(V,E)$
Figure 1. MIMO Network Model Graph $G=(V,E)$

이 논문에서는 MIMO의 공간적 멀티플렉싱을 고려한다. 따라서 멀티 안테나를 이용하여 송신단은 최대 A개의 데이터 스트림을 하나 혹은 여러 수신단에게 동시에 전송할 수 있다. 하지만 그 반대의

경우는 고려하지 않는다. 하나의 수신단이 안테나 배열을 이용하여 여러 개의 데이터 스트림을 동시에 수신하는 방법은 이번 연구를 통해 간단히 확장할 수 있으므로 생략하기로 한다. 각 송신단에서 전송되는 멀티스트림은 모두 같은 방식의 모듈레이션을 쓴다고 가정하고 채널 정보와 스트림 개수에 따른 데이터 속도는 주어진다고 가정한다.

4. 최소길이 스케줄링 Formulation

이번 절에서는 풀려고 하는 최소길이 스케줄링 문제를 수학적으로 정형화 (formulation) 하고 여기서 생기는 부가적인 문제를 해결하기 위한 방법을 제시한다. 아래 문제 정형화에 사용된 용어 및 그 의미는 <표1>에 정의하였다.

표 1. 용어 설명
Table 1. Terms used in the paper

Terms	Meaning
i, j, k	Node Index
e, e'	Link Index
m	# of data streams
x_{ki}	Node k가 i에게 전송하면 1, 아니면 0
t_i	Node i가 전송하면 1, 아니면 0
z_e	Link e에 할당된 data streams 개수
A	안테나 개수
S_e	링크 e가 활성화 될 경우 1, 아니면 0
$I_{e'e}$	링크 e'가 링크 e에 간섭하면 1, 아니면 0
y_{em}	링크 e가 m개의 data stream을 전송할 경우 1, 아니면 0
r_e	링크 e의 데이터 속도
R_{em}	링크 e가 m개의 data stream을 전송 할 경우 데이터 속도

<표 1>의 항목에 기반하여 아래와 같이 문제를 정의한다.

매칭($s \in S$) : 하나의 매칭은 링크(e)와 링크에 할당된 데이터 스트림의 개수 ($n(e)$)의 집합이다. 즉, 매칭은 스케줄을 구성하는 하나의 요소가 되어 매

칭을 구성하는 모든 링크들은 같은 타임슬롯에 서비스된다. 다시 말해서 하나의 매칭안의 모든 링크들은 각자 할당된 개수만큼 데이터 스트림을 동시에 보내도 문제가 없음을 의미한다.

풀려는 스케줄링 문제의 목적은 주어진 트래픽 요구량을 만족시킬 수 있는 가장 빠른 스케줄이 되는 매칭의 집합을 찾는 것이다. 어떤 매칭(s)이 지속되는 시간을 λ_s 라 할 때 스케줄의 총 길이는 가능한 모든 매칭의 합이 되므로 아래 식으로 표현 가능하다.

$$\sum_{1 \leq s \leq S} r_{s,e} \lambda_s \geq f_e$$

따라서 풀고자 하는 스케줄링 문제는 주어진 매칭의 합을 τ 라고 했을 때 이를 최소화 시키는 문제가 된다. 이것을 MR-MSP (Multi-data Rate Minimum Scheduling Problem)으로 표기한다.

$$P_1 : \text{MR-MSP} \\ \text{minimize } \tau = \sum_{1 \leq s \leq S} \lambda_s$$

이때 모든 링크는 각자 주어진 트래픽 요구량 (d_e)을 만족해야 하므로 다음과 같은 식으로 제약사항을 추가 할 수 있다.

$$\sum_{1 \leq s \leq S} r_{s,e} \lambda_s \geq f_e \tag{1}$$

주어진 식에서 $r_{s,e}$ 는 링크(e)가 주어진 매칭(s)에서 보낼 수 있는 데이터 속도를 의미한다.

또한 각 매칭의 길이는 음수가 될 수 없으므로 다음의 제약사항을 추가한다.

$$\lambda_s \geq 0 \tag{2}$$

제약사항 <식 (1)>, <식 (2)>로 주어진 문제 P_1

: MR-MSP은 매우 간단한 형태의 LP로 형성되었지만, 최적 값을 구하기 위해 고려해야 할 변수의 개수가 많아 큰 복잡도를 야기한다. 고려하는 모델은 각 링크당 A개의 데이터 스트림을 보낼 수 있기 때문에 가능한 모든 매칭의 개수는 실제로 $(A+1)^e$ 이 될 것이고, 이를 모두 고려하여 계산하는 것은 매우 비효율적이다.

이러한 복잡도 문제는 불가능한 매칭을 미리 제거하여 많은 도움을 얻을 수 있다. 하지만 MIMO의 경우 데이터 스트림을 다수의 수신단에게 동시전송 하거나 다수의 송신단으로부터 수신하는 경우도 가능한 매칭으로 만들어진다. 따라서 위의 방법은 여전히 직접적인 해결책이 될 수 없다.

이 문제를 column generation 방법을 이용해 해결하고 이를 바탕으로 스케줄링 알고리즘을 제안한다. column generation은 주어진 문제의 형태를 변경하지 않고 복잡도를 낮춰 실질적으로 문제 해결 가능성을 높여준다.

4.1 Column Generation

Column generation은 변수(column)의 개수가 큰 LP 혹은 IP 문제를 효율적으로 풀기 위한 최적화 분해 (decomposition) 기법 중 하나이다 [13][14][15] 본 논문에서 풀고자 하는 최소길이 스케줄링 문제도 동일하게 적용할 수 있다. 예를 들어, 하나의 토폴로지에서 나올 수 있는 매칭의 개수는 최대 $(A+1)^e$ 이지만, 실제로 최적해를 이루는 매칭의 개수는 최악의 경우 링크의 개수(e)만큼이다.

Column generation 방법에서 Column이란 최적화를 이루는 데 필요한 변수를 의미한다. 즉, 이 문제에선 하나의 매칭이 column이 될 것이다. Column generation은 주어진 LP (혹은 IP)를 master problem과 sub-problem으로 분해한다. Master problem은 매우 적은 수의 column을 갖고 있고,

LP의 dual이 적용된 목적함수를 갖고 있는 sub-problem은 master problem에 필요한 column을 제공하는 역할을 맡는다. 다시 말해 sub-problem은 현재 최적해를 개선시킬 수 있는 매칭을 만들어낸다. 이런 식으로 master problem과 sub-problem을 번갈아 진행하며 기존의 LP가 최적해에 도달할 경우 반복이 멈추게 된다. 최적해에 도달 여부는 master problem에서 negative reduced cost가 있는 변수가 존재하는지를 가지고 판단한다. 이는 더 이상 어떠한 매칭도 현재의 최적해를 개선시키는데 도움이 될 수 없음을 의미한다.

4.2 Re-formulation

column generation을 적용하기 위해 P_1 으로부터 다음과 같은 master problem을 형성한다.

P_2 : MR-MSP (master problem)

$$\text{minimize } \tau = \sum_{1 \leq s \leq M} \lambda_s$$

$$\sum_{1 \leq s \leq M} r_{s,e} \lambda_s \geq f_e \tag{3}$$

$$\lambda_s \geq 0 \tag{4}$$

master problem은 위와 같이 가능한 매칭의 집합 S가 M(MCS)으로 바뀐 차이 말고는 기존과 동일하다. Master problem을 풀어서 나온 해는 아직 최적해인지는 알 수 없다. 따라서 이후 새로운 column(즉, 매칭)이 필요할지를 알 필요가 있는데 이는 변수 λ_s 가 strict negative reduced cost를 갖는지에 대한 여부로 확인한다. 즉, LP-duality에 의해 매칭 s에 해당하는 reduced cost $price_s$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$price_s = 1 - w^T r_s s \quad (5)$$

이때 w^T 는 P_2 의 제약사항 (3)의 dual variable이다. 따라서 최소의 reduced cost를 갖는 매칭을 만들어야 하므로 다음과 같은 또 다른 문제를 생각해 볼 수 있다.

$$\min price_s \quad (6)$$

이 문제는 다시 아래 최대화 문제로 표현된다.

$$P_3 : \text{MR-MSP (sub problem)} \\ \max w^T r_s \quad (7)$$

이제 <식 (7)>의 P_3 에 해당하는 sub-problem에 대한 제약사항을 하나씩 추가하도록 한다.

□ Half-duplex constraint

x_{ki} 를 노드 k 가 i 한테 전송할 경우 1, 아니면 0인 binary variable로 정의한다. 그러면 half-duplex 제약사항은 다음과 같다.

$$x_{ki} + x_{ij} \leq 1 \quad \forall_{k,i,j} \quad (8)$$

□ Node activity constraint

하나의 수신단은 동시에 많아야 하나의 노드로 부터만 데이터 프레임 받을 수 있으므로 다음이 성립한다.

$$\sum_k x_{ki} \leq 1 \quad \forall_i \quad (9)$$

단, MU-MIMO를 고려하므로 아래는 허용한다.

$$\sum_i x_{ki} > 1$$

□ Link activity constraint

t_i 를 노드 i 가 전송 할 경우 1, 아니면 0인 binary variable로 정의한다. z_e 는 링크 e 에 할당된 데이터 스트림의 개수를 의미한다. 따라서 하나의 링크에 대한 스트림 개수의 제약은 다음과 같다.

$$t_i \leq \sum_{e \in E_i} z_e \leq t_i \cdot A \quad \forall_i \quad (10)$$

□ DoF constraint

s_e 를 링크 e 가 활성화 될 경우 1, 아니면 0인 binary variable로 정의한다. $I_{e'e}$ 는 링크 e' 가 링크 e 에 간섭을 줄 수 있다면 1, 아니면 0으로 표현된다. 따라서 다음과 같이 DoF 조건을 쓸 수 있다.

$$s_e \leq z_e + \sum_{e'} z_{e'} \cdot I_{e'e} \leq s_e \cdot A + (1 - s_e) \cdot M \quad \forall_e \quad (11)$$

$$s_e \leq z_e \leq s_e \cdot A \quad \forall_e \quad (12)$$

이때 M 은 $z_e + \sum_{e'} z_{e'} \cdot I_{e'e}$ 의 상한값으로 설정하여 s_e 가 0 이어도 조건 (11)이 만족될 수 있도록 한다.

□ Data rate equations

다음은 주어진 매칭안에서 링크의 데이터 속도를 표현하기 위한 부분이다.

$$r_e = \sum_m R_{em} \cdot y_{em} \quad \forall_e \quad (13)$$

Sub-problem P_3 는 objective function <식 (7)>에 <식 (8)-(13)>의 제약사항으로 이루어진 MIP 문제이다. 이렇게 구성된 sub-problem P_3 의 최적해가 만약 strictly negative reduced cost를 가지고 있다면 이때의 결과가 새로운 매칭으로 만들어져 P_2 에 추가되어 다시 한번 최적화 과정을 거친다.

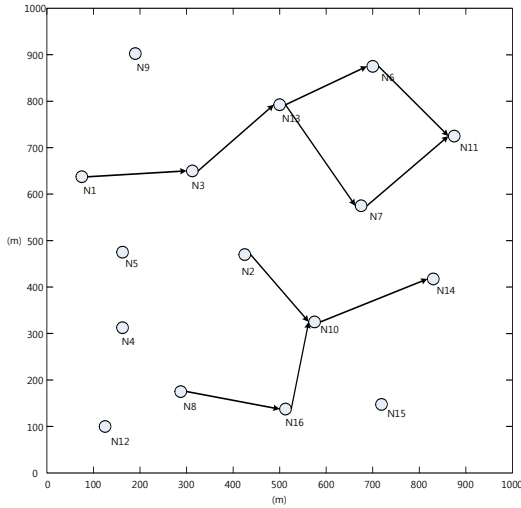


그림 2. case study 1에서 사용하는 토폴로지
Figure 2. Topology used in case study #1

5. 성능 평가

노드 수와 링크 수를 변경하며 랜덤한 토폴로지를 생성하고, 각각의 트래픽 요구량 및 채널 역시 랜덤하게 생성했다. 제안한 알고리즘의 정상 동작을 위해선 P_2 에서 초기 매칭 집합 M 을 결정해줄 필요가 있다. 링크의 개수만큼의 매칭을 형성해서 각 매칭에 하나의 링크가 최대의 스트림을 가질 때를 구성해서 초기값을 설정했다.

■ Case-study 1. Algorithm procedure

본 케이스 스터디에서는 제안한 알고리즘의 성능을 검증하여 그 적정성을 보였다. <그림 2>의 토폴로지서 각각 트래픽 요구량은 <표 2>와 같다.

<표 3>의 결과를 통해 제안한 알고리즘이 정상적으로 최소 길이 스케줄 결과를 보임을 확인했다. 이 예에선 최적해를 위한 매칭이 10개였고, 8, 9의 매칭에서는 3개의 링크가 동시에 전송되고, 대부분의 경우 알고리즘이 간섭이 없는 링크 셋을 찾아 (1, 2, 4, 6) 최대의 스트림을 할당하였다.

표 2. 트래픽 요구량
Table 2. Traffic Demands

Links	Traffic Demand (Mbits)
N1->N3	36.80307
N3->N13	168.9384
N13->N6	168.0356
N13->N7	492.4798
N6->N11	375.832
N7->N11	323.2655
N2->N10	441.4327
N8->N16	255.945
N16->N10	188.1014
N10->N14	441.8811

표 3 알고리즘 프로시저 결과
Table 3. Algorithm Procedure Results

Links	Active Links	Duration (ms)
1	N10->N14 [3]	3.85
2	N6->N11 [3] N2->N10 [3]	7.64
3	N6->N11 [3] N16->N10 [2]	9.68
4	N13->N7 [3] N10->N14 [3]	8.52
5	N7->N11 [2] N8->N16 [3]	5.91
6	N3->N13 [3] N10->N14 [3]	2.92
7	N7->N11 [1] N16->N10 [2]	11.93
8	N13->N6 [2] N7->N11 [1] N16->N10 [2]	3.88
9	N1->N3 [3] N7->N11 [1] N16->N10 [2]	0.64
10	N7->N11 [2] N10->N14 [1]	3.53

■ Case-study 2. Algorithm comparison

아래 2가지 알고리즘을 비교하였다.

1. Approximation : 알고리즘 속도 성능 개선을 위해서 sub-problem P_3 의 objective function을 $w^T r_s$ 에서 $w^T z_s$ 로 바꾸고 제약사항 (13)을 제거했다. 이를 통해 sub-problem의 각 매칭의 데이터 속도를 스트림의 개수로 근사했다.

2. DoF : [8]에서 제안한 DoF 방식을 적용하였다. 데이터 속도를 고려하지 않은 채 스트림의 개수를 최대화하는 목적함수를 풀었다.

10개의 노드, 3개의 안테나가 있는 상황에서 각

각 링크의 개수를 10~50개로 변경시켰고 결과는 <표 4>와 같다.

표 4. 최소 스케줄링 길이 (ms)
Table 4. Minimum Schedule Length (ms)

# of Links	Proposed	Approximation	DoF
10	13.94087	14.44706	17.68876
20	24.79552	29.61318	39.51183
30	33.44339	41.96131	50.35401
40	38.73119	46.4575	51.31946
50	46.71433	66.74662	71.63972

<표 4>의 결과에서 알 수 있듯이 approximation 방법은 제안한 방법과는 달리 최적해에서 훨씬 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 특히 링크 수가 많아지면서 더욱 심해졌다. 이를 통해 approximation이나 DoF 처럼 단지 데이터 스트림의 개수의 최대화가 잘못된 결과를 나타낼 수 있음을 확인했다. 또한 DoF 방식처럼 다중 전송 속도를 고려하지 않을 경우 minimum length scheduling 문제에서 approximation 보다도 훨씬 떨어지는 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이는 곧 채널 상황에 따른 데이터 속도가 MU-MIMO에서의 전체적인 스케줄 결과에 민감하게 작용하기 때문이라고 해석할 수 있다. 반면 멀티 데이터 속도를 고려했던 방법은 다른 알고리즘에 비해 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

■ Case-study 3. Convergence time analysis

최적해를 구하는데 까지 걸리는 시간과 알고리즘 반복 횟수를 측정해 convergence analysis를 수행했다. 첫 번째 케이스 스터디는 P_1 와 제안한 알고리즘을 통해 최적화된 해를 구하는데 걸리는 시간을 측정했다. 두 번째 케이스 스터디로는 노드 개수를 10개로 고정 한 채, 링크의 개수와 안테나 개수를 변화시켜가며 알고리즘의 반복 횟수를 측정하였다. 각 실험은 20회씩 하여 그 평균값을 구하

였고, 각각의 결과는 <표 5>와 <표 6>과 같다.

표 5. 수렴 시간 (s)
Table 5. Convergence Time (s)

# of Links	Optimal	Proposed
10	13.612	4.037
20	6h	13.983
30	6h	26.255
40	6h	34.186
50	6h	41.268

<표 5>를 보면 모든 매칭을 통해 계산하는 P_1 은 링크의 개수가 20개만 되어도 지나치게 오랜 시간이 걸리는 문제가 있다. 이에 비해 제안한 방법은 링크 개수가 50개일 경우에도 1분 안에 문제를 해결하였다.

<표 6>의 평균 반복 횟수를 보고 알 수 있었던 흥미로운 점은 알고리즘이 안테나 개수보다는 주로 링크의 개수에 더 많은 영향을 받고 있다는 사실이다. 이는 sub-problem P_3 에서 제약사항의 개수에 직접적으로 영향을 주는 요소는 안테나의 개수보다는 링크의 개수이기 때문이라고 해석할 수 있다.

표 6. 수렴 분석 (반복 횟수)
Table 6. Convergence Analysis (# of iterations)

# of antenna \ # of Links	3	4	5
10	3.5	4.2	4.8
20	7.9	7.5	8.3
30	11.5	11.1	12.5
40	13.3	14.5	15.3
50	11.9	10.9	11.1

6 결론

본 논문에서는 각 링크의 트래픽 요구량을 만족시키는 최소 길이 스케줄링 문제를 멀티 홉 MIMO 네트워크에서 적용하여 문제를 새롭게 형성하고

이를 해결하는 방법을 제안했다. 주어진 문제를 LP로 형성하고 이때 생기는 복잡도 문제를 column generation 방법을 이용하여 해결했다. 다수의 케이스 스터디를 통해 제안한 column generation을 통한 알고리즘은 멀티 홉 MIMO 네트워크를 고려한 계층간 최적화 문제를 푸는데 적절함을 보였다.

References

- [1] IEEE Std 802.11n-2009.
- [2] D. N. Amudala, E. Sharma, and R. Budhiraja, *Spectral efficiency optimization of spatially-correlated multi-pair full-duplex massive mimo relaying*, IEEE Transactions on Communications, Vol 67, Issue: 12, Dec. 2019.
- [3] B. Hajek, and G. Sasaki, *Link scheduling in polynomial time*, IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 34, No. 5, pp. 910-917, Sep. 1988.
- [4] S. A. Borbash, and A. Ephremides, *The feasibility of matchings in a wireless network*, IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 52, No. 11, pp. 2749-2755, Nov. 2006.
- [5] Z. Zhang, S. Bronson, J. Xie, and W. Hu, *Employing the one-sender-multiple-receiver technique in wireless lans*, IEEE International Conference on Computer Communications, 2010.
- [6] E. Gelal, K. Pelechrinis, T-S. Kim, I. Broustis, S. V. Krishnamurthy, and B. Rao, *Topology control for effective interference cancellation in multi-user mimo networks*, IEEE International Conference on Computer Communications, 2010.
- [7] Y. Shi, J. Liu, C. Jiang, C. Gao, and Y. T. Hou, *An optimal link layer model for multi-hop mimo networks*, IEEE International Conference on Computer Communications, 2010.
- [8] D. M. Blough, G. Resta, P. Santi, R. Srinivasan, and L. M. Grtes-Pena, *Optimal one-shot scheduling for mimo networks*, Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks 2011.
- [9] S. Kompella, J. E. Wieselthier, A. Ephremides, H. D. Sherali, and G. D. Nguyen, *On optimal sinr-based Scheduling in multihop wireless networks*, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol: 18, Issue: 6, pp: 1713-1724, Dec. 2010.
- [10] L. Zheng, and D. Tse. *Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple antenna channels*, IEEE Transactions on information theory, Vol. 49, No. 5, pp. 1073-1096, May 2003.
- [11] R. W. Heath, and J. Paulraj. *Switching between diversity and multiplexing in mimo systems*. IEEE Transactions on Communications, Vol. 53, Issue. 6, pp. 962-968, Jun. 2005.
- [12] R. Gummadi, D. Wetherall, B. Greenstein, and S. Seshan. *Understanding and mitigating the impact of RF interference on 802.11 networks*. Proceedings of the 2007 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, Aug. 2007.
- [13] P. C. Gilmore, and R. E. Gomory, *A linear programming approach to the cutting stock problem*, Operations Research, Vol. 9, No. 6, 849-859. 1961.
- [14] M. Lübbecke, *Column generation*, Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, Jan. 2011.

- [15] J. Desrosiers, and M. Lübbecke, *A Primer in Column Generation*, Column Generation, 1-32. Mar. 2006.

MIMO 링크 스케줄링 최적화

강영명

삼성전자 네트워크 사업부 책임연구원

요약

기존에는 주로 라우팅, 스케줄링, MAC 프로토콜과 같은 디자인 측면에서 시스템 처리량 최적화 문제를 다루었으나 멀티 홉 MIMO 네트워크와 같이 복잡한 다변수 시스템에서는 새로운 최적화 방식이 필요하며 꾸준히 연구되어 왔다. 계층간 최적화(Cross-layer optimization)는 네트워크 성능 향상에 이론적인 해결책의 근간을 제시하여 왔고 멀티 홉 MIMO 네트워크로의 확장도 꾸준히 연구되어 왔다. 계층간 최적화를 MIMO에 적용할 경우 기존의 SISO보다 복잡해진 MU-MIMO의 물리계층 연산이 MAC 스케줄링과 같은 다른 계층의 문제와 연계되어 그 복잡도가 기하급수적으로 커진다. 특히 문제 자체가 LP 등으로 쉽게 표현될 수 없는 특성을 가지며, LP로 표현한다고 하더라도 수많은 변수들은 실질적으로 최적화를 하는데 많은 어려움을 주게 된다. 본 논문은 주어진 트래픽 요구량을 만족시키는 최소 길이 스케줄링 (minimum length scheduling) 문제를 멀티 홉 MIMO 네트워크에 적용하여 계층간 최적화 방식으로 해결하려고 하는데 그 목적이 있다. 또한 이 과정 중에 나타나는 복잡도 문제를 해결하는 방법에 대하여 논한다. 제안한 해결방법은 column generation을 통한 LP decomposition을 기반으로 최적화된 스케줄링 알고리즘을 고안하는 것이다. 다양한 수학적 분석과 시험 결과를 통해 제안하는 방식이 성능향상에 큰 도움을 주는 것을 확인하였다.



Young-myung Kang is currently a research engineer at Samsung Electronics, Suwon, Korea. He received his M.S. and Ph.D. degree in Computer Science and Engineering from Seoul National University in 2003 and 2013, respectively. He was with LG Electronics as an engineer from Jan. 2003 to Sept. 2006. His research interest includes wireless systems, 5G, IoT with emphasis on WLAN, data science, data analysis and AI.

E-mail address: kang.youngmyoung@gmail.com