

# Polynomial Time Algorithm for Multi-Beam SS/TDMA Satellite Communications Scheduling Problem with Frequency-Hopping Ground Stations

Sang-Un Lee \*

## Abstract

The time slot assignment problem (TSAP) or Satellite Communications scheduling problem (SCSP) for a satellite performs  $n \times n$  ground station data traffic switching has been known NP-hard problem. This paper suggests  $O(n^2)$  time complexity algorithm for TSAP of a satellite that performs  $n^2 \times n^2$  ground station data traffic switching. This problem is more difficult than  $n \times n$  TSAP as NP-hard problem. Firstly, we compute the average traffic for  $n$ -transponder's basic coverage zone and applies ground station exchange method that swap the ground stations until all of the transponders have a average value as possible. Nextly, we transform the  $D$  matrix to  $D_{LB}$  traffic matrix that sum of rows and columns all of transponders have LB. Finally, we select the maximum traffic of row and column in  $D_{LB}$ , then decide the duration of  $k$ th switch mode to minimum traffic from selected values. The proposed algorithm can be get the optimal solution for experimental data.

▶ Keyword : Multi-beam, Duplicated coverage, Time slot, Makespan, Switch mode

## I. Introduction

SS/TDMA (satellite-switch, time division multiple access) 기술을 적용한 통신위성은  $n$ 개의 송수신기 쌍(transponders)을 장착하여  $n \times n$  지구국(ground stations) 간의 데이터 송수신 중계기 역할을 수행하고 있다. 즉, 각 송수신기는 하나의 통신채널을 의미한다고 할 수 있으며,  $n \times n$ 의 데이터 전송을 효율적으로 중계하기 위해서는 특정 통신채널로 전송되는 데이터가 없을 경우 이 시점에서 송수신기들에 배정된 송신 지구국과 수신 지구국들을 서로 변경시켜야만 한다. 이를 스위치 모드(switch mode)라 한다. 초기에는 각 송수신기가 한 쌍의 지구국들을 커버하였으나 최근 들어  $n \times n$  지구국 영역(zone)을 커버하도록 확장되어, 전체적으로는  $n^2 \times n^2$  지구국 간에 정보를 중계할 수 있도록 기술이 진보하였다. 이를 위해 한 영역의  $n \times n$  지구국들은 주파수 도약(frequency hopping, FH) 기법을 적용한 망으로 연결시켰으며, 한 송수신기는 기본적으로 배정된 영역의 인접 영역까지 중첩하여 커버하는 기술을 적용하였다[1]. 여기서,  $n^2 \times n^2$ 의 트래픽 행렬에 대한 모든 정보를 가장 빨리 전송 완료하려면 통신위성은 마지막 스위치 모드의 종료시간인 총 소요시간(makespan)을 최소로 해야 하며,

수행되는 스위치 모드 수 또한 최소로 해야 한다. 이를 시간대 배정 문제(time slot assignment problem, TSAP) 또는 통신위성 일정관리 문제(Satellite Communications scheduling problem, SCSP)라 한다 [2].

일반적인 간단한  $n \times n$  지구국간 송수신 문제인 TSAP에 대해서 다항시간으로 최적 해를 얻을 수 있는 알고리즘이 알려져 있지 않아 NP-난제(NP-hard)로 분류되어 있다[3]. 더군다나 중첩된 영역을 커버하면서  $n^2 \times n^2$  지구국간 송수신하는 TSAP는  $n \times n$ 에 비해 문제의 복잡성이 지수적으로 증가하여 더욱더 해결이 어려운 난제이다.

TSAP에 대해, Inukai[2]는 간선 부분집합들을 이용한 SDR(system of district representatives) 법을, Yeung[4]은 2-단계 TSA로 정규화된 트래픽 행렬  $ND$ 를 구하고,  $ND$ 의 임계경로 상에 있는 트래픽을 첫 번째 모드로 설정하는 MRS(maximum remaining sum) 방법을, Wan et al.[5]은 망 흐름 알고리즘(network flow algorithm, NFA)을, Werra[6]은 선형계획법(linear programming, LP)을 적용하였다. 그러나 수학적 프로그램의 일종인 LP는 변수의 개수가 많아지면 문제의 크기는 기하급수적으로 증가하는 관계로 NP-완전으로 분류되어 실제적으로는 소규모 문제들에만 적용되고 있다[7].

• First Author: Sang-Un Lee, Corresponding Author: Sang-Un Lee

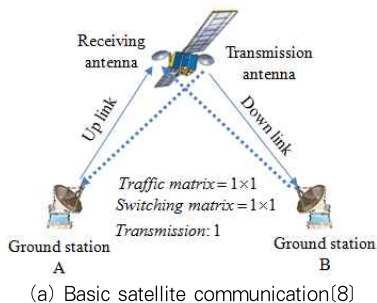
\*Sang-Un Lee (sulee@gwnu.ac.kr), Dept. of Multimedia Eng., Gangneung-Wonju National University

• Received : 2015. 03. 25, Revised : 2015. 05. 16, Accepted : 2015. 06. 10.

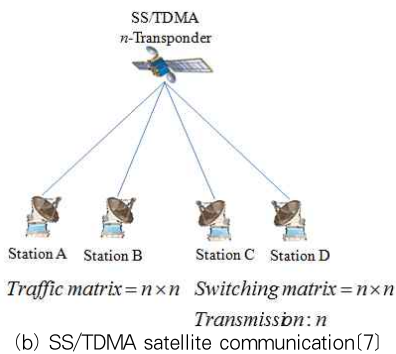
본 논문에서는 TSAP들 중에서 가장 난제로 알려진 지구국이 FH 망으로 연결되어 있고, 통신위성 송수신기들이 지상 지구국 영역을 중첩하여 커버하는 TSAP에 대해 최적 해를  $O(n^2)$ 의 방향시간으로 얻을 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 2장에서는 위성통신 운영 방식과 TSAP에 대해 연구 사례를 중심으로 고찰해 본다. 3장에서는  $O(n^2)$  수행 복잡도로 TSAP의 최적 해를 구할 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 실험 데이터에 적용하여 알고리즘 적합성을 평가해 본다.

## II. Optimal Time Slot Assignment of Satellite Communications

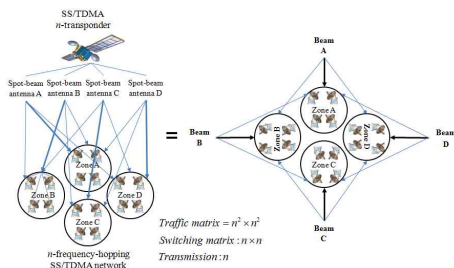
위성을 통한 디지털 통신 시스템은 그림 1과 같이 통신위성 (comsat)과 지상망과 망과 인터페이스를 제공하는 지구국 집합으로 구성되어 있다. (a)는 기본적인 형태로 1:1의 데이터 중계기로 위성이 하나의 채널만을 가진 경우로 매우 비효율적이다. 따라서 실제 운영은 (b)와 (c) 방식을 적용하여 통신위성의 운영 효율성을 극대화 시키고 있다[1,7,8].



(a) Basic satellite communication(8)



(b) SS/TDMA satellite communication(7)



(c) SS/TDMA satellite communication with frequency-hopping ground stations(1)

Fig. 1. Various Satellite communication system

SS/TDMA 기술을 사용하는 (b)의 단일 정지위성은 시간을  $n$ 개 지구국들에게 분할하여  $n \times n$ 의 송수신 정보를  $n$ 개 송수신기의 통신채널 변경을 수행하는 멀티플렉서에 1:1로 할당하는 방식을 채택하고 있다. 이와 같이  $n$ 개 통신채널로  $n:n$  송수신을 동시에 수행하기 위해 시분할 기법을 적용하여 동일 패킷 수로 나누어 동시에 전송하는 선점권 (preemptive) 방식의 시분할 다중접근법을 적용하고 있다[6].

(b)의  $n:n$  송수신을 처리하는 SS/TDMA 단일 정지위성 방식을 단순히 이용하여  $n^2 \times n^2$  지구국 데이터 송수신을 처리하려면  $n \times n$ 을  $n^2$ 회 수행해야 한다. 이를  $n$ 회로 획기적으로 감소시킬 수 있는 방법으로, (c)와 같이  $n$ 개 지구국들이 주파수 도약 (FH) 망으로 연결되어 하나의 지구국 (영역)처럼 취급하고, 위성의  $n$ 개 송수신기는 집중 방사선과 안테나 (spot-beam antenna)를 장착하여  $n^2 \times n^2$ 의 송수신 데이터 트래픽을 통신위성이  $n \times n$  단위의 스위치 모드들 순서를 통해 중계하는 방식을 채택하고 있다[1]. 또한, 각 송수신기 안테나는 기본적인 커버 영역이 배정되어 있으며, 인접 영역의 지구국들도 커버할 수 있도록 하였다. 이로 인해, 특정 송수신기의 부하가 너무 많으면 이를 부하가 적은 송수신기로 재배정하여 균형된 부하를 갖도록 하여 데이터 전송 종료시간을 단축시킬 수 있다.

본 논문에서는 FH를 가진 지구국과 SS/TDMA 통신위성 간 데이터 전송에 대한 그림 1의 (c) 문제를 대상으로 한다. 이 문제에서  $n^2 \times n^2$ 의 트래픽 행렬의 모든 데이터를 전송하기 위해서는 통신위성은 행과 열의 트래픽 최대값들 중 최대값을 마지막 스위치 모드의 종료시간인 총 소요시간의 하한값 (lower bound, LB)으로 갖는다. 즉, LB 이하로는 모든 데이터의 전송을 끝마칠 수 없다[2].

통신위성은  $n \times n$  송수신기에 대한 상향 링크 (up link)와 하향링크 (down link) 연결의 배열 순서를 통해  $n^2 \times n^2$ 의 트래픽 행렬의 모든 데이터를 중계한다. 여기서  $n \times n$  송수신기에 대한 하나의 상향 링크와 하향링크 연결을 스위치 모드라 하며, 각 스위치 모드는 지속시간 (duration,  $d_s$ )을 갖는다. 결국,  $k$ 개의 스위치 모드 변경을 통한  $\sum_{s=1}^k d_s$ 의 길이로 데이터 전송이 완료된다. 우리는  $\sum_{s=1}^k d_s = LB$ 가 되도록 하며, 최소의 스위치 모드 수  $k$ 를 찾고자 한다. 이를 시간대 분할 문제 (TSAP)라 한다[4,5].

SS/TDMA를 가진 단일위성 문제에 대한 Inukai[2]의 TSAP 알고리즘은 Gonzalez와 Sahni[9]의 오픈숍 일정계획 문제 (open-shop scheduling problem, OSSP) 알고리즘에서 도입되었다[10].

OSSP는  $m$ 대 기계와  $n$ 개 작업이 주어지며, 각 작업은 기계 순서는 고려하지 않으면서 모든 기계들로 작업되어야 한다. 각 기계는 기껏해야 한 번에 한 작업 공정만을 수행하며, 한 작업은 2대의 기계에서 동시에 작업될 수 없다. 여기서  $m=n$ 이라 가정한다.  $T$ 를  $j$ 번째 작업이  $i$ 번째 기계에서의 작업시간  $t_{ij}$ 라 할 때, OSSP는 최종 작업 종료시간인 총소요시간을 가능한 줄일 수 있는 일정을 찾는 것이다. OSSP 또한 NP-난제로 분류되어 있다[9].

위성통신시스템에서, 하나의 통신은  $n$ 개의 다른 지상 기지

국들 간의 정보 전송에 이용된다. 이 통신위성은  $n$ 개의 중계 방송기를 장착하고 있어 송신과 수신 기지국들 간에  $n \times n$ 의 스위치로 상호 연결을 해준다.  $T_i, (i=1,2,\dots,n)$ 를 송신 기지국,  $R_j, (j=1,2, \dots,n)$ 를 수신 기지국,  $S_k, k=1,2,\dots$ 를 스위칭 모드,  $l_k$ 를  $k$ 번째 모드의 지속시간,  $f_{ijk}$ 를  $k$ 번째 모드로  $T_i$ 에서  $R_j$ 로 전송시 "1"이라 하자.

$n \times n$  상호연결의 특정 집합은 스위치 모드의 치환 행렬  $S_k = (d_k)$ 로 표현된다. 이 행렬은 모든 행과 열에 정확히 하나의 값만을 갖는 이진  $n \times n$  행렬이다.  $n \times n$  트래픽 행렬  $D$ 의 쌍  $(i,j)$ 는  $i$ 에서  $j$  기지국으로의 전송 소요시간  $d_{ij}$ 를 갖고 있다. 트래픽 행렬  $D$ 의 모든 데이터를 전송하기 위해서는 다수의 스위치 모드들을 필요로 한다.  $l_k$ 를  $d_{ij} \geq l_k$ 라 하자. 길이  $l_k$ 인 시간간격에 대한 스위치 모드  $S_k$ 를 적용한 이후 미 전송된 트래픽 행렬 값은  $d_{ij} - l_k S_k$ 가 된다.

TSAP는 모든 정보가 최소 총소요시간으로 전송될 수 있도록 하는 스위치 모드의 순서와 각 스위치 모드의 전송 길이  $l$ 을 찾고자 한다.  $D$  행렬에서 행의 합  $t_i$ 이 최대값을  $\max t_i$ , 열의 합  $r_j$ 이 최대값을  $\max r_j$ 라 하면, 총소요시간  $t^*$ 는 최적 해의 하한값 (LB)로 식 (1)로 구해진다[2].

$$t^* = LB = \max(\max t_i, \max r_j) \quad (1)$$

$$\text{such that } \max t_i = \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n d_{ij}$$

$$\max r_j = \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n d_{ij}$$

TSAP는 최소의  $k^*$  개 스위칭 모드 수를 사용하는 식 (2)와 총소요시간  $t^*$ 인 식 (3)을 찾는다[5].

$$z_1 = \text{minimize } \sum_{k \in S} l_k = t^* \quad (2)$$

$$z_k = \text{minimize } k^* \quad (3)$$

$$\text{such that } \forall_i \in T, \forall_j \in R: \sum_{k \in S} f_{ijk} = 1$$

$$\forall_i \in T, \forall_k \in S: \sum_{j \in R} f_{ijk} = 1$$

$$\forall_j \in R, \forall_k \in S: \sum_{i \in T} f_{ijk} = 1$$

$$\forall_i \in T, \forall_j \in R, \forall_k \in S: d_{ij} \times f_{ijk} \leq l_k$$

$$\forall_k \in S: l_k \geq 0$$

$$\forall_i \in T, \forall_j \in R, \forall_k \in S: f_{ijk} \in \{0,1\}$$

그림 1의 (b)인 SS/TDMA를 장착한 단일위성의 경우에 대한 TSAP를 풀 수 있는 Gonzalez와 Sahni[9] 알고리즘은 다음과 같이 수행된다.

Step 1.  $\exists_{ij}, d_{ij} \neq d_j$ 인  $D$ 의 행과 열의 합들 중 최대값으로 LB 결정

Step 2.  $D$ 에 가상의 트래픽을 추가하여  $\forall_{i,j}, \forall t_i = \forall r_j = LB$ 인  $D_{LB}$  행렬로 변환

Step 3. while  $\exists_{ij}, d_{ij} > 0, d_{ij} \in D_{LB}$  do

- (1) 수학적 프로그램이나 이분 그래프에 대한 완전 매칭으로 0이 아닌 값을 가진  $d_{ij}$ 들로  $n \times n$ 의  $k$ 번째 모드 결정

- (2)  $k$ 번째 모드의  $d_{ij}$ 들 중에서 최소 패킷 길이인  $d_{\min}$ 으로  $k$ 번째 모드의 지속시간  $l_k$  결정

- (3) 모드  $k$ 의  $d_{ij}$ 들 값에서  $l_k$ 를 감소시켜 미 전송된 패킷 수를 얻음

end do

$n \times n$  지구국들간 송수신 중계 역할을 수행하는 통신위성 일문제에 대해, Gonzalez와 Sahni[9] 알고리즘은  $D$ 를  $D_{LB}$ 로 변환시키는데 반해, Lee[11]은 직접  $D$ 행렬에서 최적 배정 기법을 적용하여  $O(n^2)$ 의 다항시간 알고리즘을 적용하였다.

표 1은 Huang과 Wen[1]에서 인용된 문제로, 그림 1의 (c)와 같이 4개 지구국이 주파수 도약 기법 (FH)을 적용한 TDMA 망으로 연결되어 있고, 한 통신위성은 4개의 다중 빔 송수신기의 집중 방사선과 안테나를 갖고 SS/TDMA로 16개 지구국들 간의 데이터 송수신을 중계하는 경우이다. 즉, SS/TDMA 정지위성은 4개의 수신 안테나와 4개의 송신 안테나를 갖는 송수신기(transponder)의 멀티플렉서  $4 \times 4$ 로 데이터 중계를 수행하는데 반해, 지상 기지국은 16개 송신 기지국에서 16개 수신 지구국으로 총 659개의 패킷을 전송해야 한다. 표 1의  $D_1$  트래픽 데이터의 LB=192이다.

만약, 표 1의 데이터를 지상 기지국이 주파수도약 방법을 적용하지 않고, 정지위성만이 SS/TDMA를 수행한다면, Gonzalez와 Sahni[9] 알고리즘을 적용하면 표 2와 같이 16회의 중계로 LB=240 패킷 수로 종료시킬 수 있다.

Table 1. Traffic matrix of  $D_1$

Traffic	Beam A ( $Z_A$ )				Beam B ( $Z_B$ )				Beam C ( $Z_C$ )				Beam D ( $Z_D$ )				$t_i$	$u_i$	
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16			
Beam A ( $Z_A$ )	T1	0	4	1	1	5	4	0	0	5	1	3	5	4	0	1	5	39	151
	T2	3	3	4	4	4	4	1	0	3	0	1	1	5	1	4	0	38	
	T3	3	3	2	4	5	2	2	2	2	0	5	0	0	5	1	1	37	
	T4	0	1	1	2	2	4	3	5	3	2	3	4	0	2	1	4	37	
Beam B ( $Z_B$ )	T5	1	5	2	5	2	4	0	0	5	4	1	2	5	1	4	5	46	170
	T6	3	0	0	2	4	4	5	3	3	4	2	0	3	5	3	2	43	
	T7	4	1	2	5	2	4	4	0	1	3	0	1	1	2	4	0	34	
	T8	3	3	4	5	1	0	3	0	5	5	1	4	1	3	5	4	47	
Beam C ( $Z_C$ )	T9	2	1	2	1	2	4	5	1	4	5	3	1	1	2	3	1	38	146
	T10	1	0	2	0	1	1	2	1	0	4	3	1	4	1	3	1	25	
	T11	4	1	5	2	4	2	2	5	2	2	4	3	0	1	1	2	40	
	T12	1	3	4	2	2	0	5	3	5	0	3	0	5	4	5	1	43	
Beam D ( $Z_D$ )	T13	2	5	3	5	0	2	5	1	4	4	1	5	4	5	4	5	55	192
	T14	3	2	5	4	3	5	5	4	4	5	3	0	2	1	0	4	50	
	T15	2	5	3	2	5	2	5	3	0	3	4	2	1	2	4	1	44	
	T16	3	1	5	1	5	1	5	3	5	0	1	1	5	0	5	2	43	
$r_j$	35	38	45	45	47	43	52	31	51	42	38	30	41	35	48	38		LB=192	
$d_j$	163				173				161				162						

Beam	$T_A$	$T_B$	$T_C$	$T_D$	$u_i$
$R_A$	36	43	38	34	151
$R_B$	45	36	41	48	170
$R_C$	31	40	40	35	146
$R_D$	51	54	42	45	192
$d_j$	163	173	161	162	LB=192





Zone A의  $T_i$  (or  $R_j$ ) 1과 패킷 수가 작은 Zone B의  $T_i$  (or  $R_j$ ) 2를 상호 교환 (swap)하여 Beam A의 부하는 감소시키고, Beam B의 부하는 증가시킨다. 즉, 1은 Beam A에서 B로, 2는 Beam B에서 Beam A로 배정을 바꾼다. 여기서 Zone A (Beam A)에 존재하는  $T_i$  (or  $R_j$ ) 1이 Beam B로 이동하고, 다시 Beam B와 Beam C (Zone C)의 3과 교환이 가능할 지라도 1은 Beam C로 이동할 수 없다. 왜냐하면 Beam C는 Zone B,C,D를 커버하며, Zone A를 커버하지 못하기 때문이다. 이러한 제약조건을 충족시키면서,  $T_i$  열과,  $R_j$  행에 대해 교환 최적화를 수행하여 균등부하 분배를 수행한다.

부하가 균등 배분되고, 행과 열의 합들 중 최대값인 LB가 결정되면  $D \rightarrow D_{LB}$ 로 변환시키고, 최대 패킷 수 선택-최소 패킷수로 절단하여 전송할 모드 길이를 결정하는 최대-최소 전략으로 데이터 송수신을 수행한다.

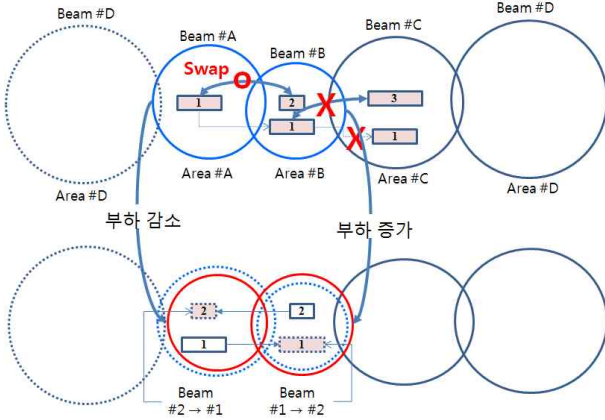


Fig. 3. Swap optimization for load balance

제안된 알고리즘을 균등부하-최대 선택-최소 절단 알고리즘 (load balancing-max selection-min cut algorithm, LBMSMCA)이라 하며, 다음과 같이 수행된다.

**Step 1. 최적의 LB 설정**

$n^2 \times n^2$ 의 트래픽 행렬  $D$ 의  $t_i$ 들의 합  $\sum_{i=1}^{n^2} t_i$ 를 계산하

고,  $\mu = \sum_{i=1}^{n^2} t_i / n$ 의  $\lceil \mu \rceil$ 를 구한다. 즉, 총 전송이나 수신될 패킷 수를 송수신기  $n$ 으로 나눈 평균값의 상한을 목표로 하는 부하균등배분 값으로 결정한다.

$\delta^- = u_i - \lceil \mu \rceil < 0$  영역을  $Z^-$ ,  $\delta^+ = u_i - \lceil \mu \rceil > 0$  영역을  $Z^+$ 라 하자.  $Z^-$ 와  $Z^+$ 가 인접한 경우에 한해 다음이 수행된다. 즉, 불가능 송수신기로는  $T_i$  지구국을 배정할 수 없다. 만약,  $Z^-$  인접 송수신기들이 모두  $Z^-$ 이면, 인접한 임의의 송수신기를  $Z^+$ 로 취급한다.

**Step 2. 수신 지구국의 송수신기 부하 균등 배정**

```

for i = 1 to n
  각 송수신기의  $n^2 \times n$  송신 (행) 트래픽 합  $u_i$ 에 대해  $\lceil \mu \rceil - u_i$ 를 계산한다.
end
if  $t_i$ 를 가진  $T_i \in Z^-$ 에 대해,  $t_j = t_i + \delta^-$ 인  $T_j \in Z^+$  또는  $Z^-$  ( $Z^- \rightarrow Z^+$ ) 존재 then  $T_i \leftrightarrow T_j$  교환
else  $\min\{t_j - (t_i + \delta^-)\}$ 인  $T_j \in Z^+$  존재 then  $T_i \leftrightarrow T_j$  교환
  
```

$\delta^- = d_j - \lceil \mu \rceil < 0$  영역을  $Z^-$ ,  $\delta^+ = d_j - \lceil \mu \rceil > 0$  영역을  $Z^+$ 라 하자.  $Z^-$ 와  $Z^+$ 가 인접한 경우에 한해 다음이 수행된다.

**Step 3. 송신 지구국의 송수신기 부하 균등 배정**

```

for j = 1 to n
  각 송수신기의  $n \times n^2$  수신 (열) 트래픽 합  $d_j$ 에 대해  $\lceil \mu \rceil - d_j$ 를 계산한다.
end
if  $r_i$ 를 가진  $R_i \in Z^-$ 에 대해,  $r_j = r_i + \delta^-$ 인  $R_j \in Z^+$  또는  $Z^-$  ( $Z^- \rightarrow Z^+$ ) 존재 then  $R_i \leftrightarrow R_j$  교환
else  $\min\{r_j - (r_i + \delta^-)\}$ 인  $R_j \in Z^+$  존재 then  $R_i \leftrightarrow R_j$  교환
  
```

**Step 4. D를 ND행렬로 변환**

$d_{ij}$  트래픽 행렬  $D$ 의 각  $i$ 행과  $j$ 열의 합  $d_i, d_j$ 에 대해  $LB$ 와의 차이  $\delta_i = LB - d_i$ ,  $\delta_j = LB - d_j$  계산.  
 if  $\exists i_j, \delta_i > 0, \delta_j > 0$  and  $\max d_{ij} \in (d_i = LB \text{ or } d_j = LB)$   
 then  $d_{ij} = d_{ij} + \min\{\delta_i, \delta_j\} \leq \max d_{ij}$   
 단, 행과 열에서 1개씩 존재하도록 설정  
 end

**Step 5. 모드 수와 모드 지속시간 결정**

```

k = 1 /* 모드 번호 */
until  $\forall i_j, d_{ij} = 0$  do /* 수행 복잡도 :  $O(n^2)$  */
  [최대 패킷 수 ( $T_i, R_j$ ) 쌍 선택]
  (1)  $(S_A, S_B)$ 와  $(S_B, S_A)$  행렬의 행에서 최대값을  $a(S_A, S_B)$ 와  $b(S_B, S_A)$ 의  $a$ 와  $b$ 개 우선 선택
  (2)  $(S_A, S_A)$ 와  $(S_B, S_B)$  행렬에서  $(S_A, S_B)$ 와  $(S_B, S_A)$ 와 중복되지 않는 행과 열의 최대값 선택
  [최소 패킷 수로 절단, 전송]
  (3) 선택된 값들 중 최소치인  $d_{\min}$ 으로  $k$ 번째 모드의 지속시간  $l_k$  결정
  (4)  $k$ 번째 모드로 전송될  $d_{ij}$ 에 대해 전송되지 않고 남은 양인  $d_{ij} = d_{ij} - l_k$ 로 갱신
  k = k + 1
end
  
```

제안된 TBLA는  $O(n^2)$  수행 복잡도로 단순히 구현할 수 있어 실무에 즉시 활용 가능한 장점을 갖고 있다.

**IV. Experiments and Result Analysis**

본 장에서는 표 1의  $D_1$  데이터에 대해 LBMSMCA를 적용하여

본 장에서는 표 1의  $D_1$  데이터에 대해 LBMSMCA를 적용하여

본다. 표 1의  $D_1$  데이터에 대해 LBMSMCA를 적용한 결과는 그림 4에 제시되어 있다.

제한된 LBMSMCA는 송신 지구국과 수신 지구국에 대해 별도로 수행되었으며, 먼저 송신 지구국에 대해서는 평균 값  $164 \leq \mu \leq 165$  에 비해 Beam D가 +27, Beam A가 -14로 과부하, 저부하 송수신기를 결정하고, 상대방의 송수신기 Beam으로 교환이 가능한 지구국인  $T_3(37)$ 과  $T_{14}(50)$ 를 결정한다. 왜냐하면  $50-37=13$ 으로 T3는 Beam A에서 Beam D로, T14는 Beam D에서 Beam A로 이동시키면 Beam A는 평균값이 되며, Beam D는 +14를 갖는다. 따라서 Beam A는 더 이상의 지구국 교환이 발생하지 않아도 된다. 두 번째로, Beam B의  $T_6$ 와 Beam C의  $T_9$ 가 상호 교환되어 Beam B도 평균 값의 부하를 갖게 되었다. 마지막으로 Beam C의  $T_{11}$ 과 Beam D의  $T_{13}$ 이 교환되어 Beam C는 평균값 +1, Beam D는 평균 값의 부하를 갖게 되어 더 이상의 교환은 수행되지 않는다.

다음으로, 수신 지구국들에 대해 Beam B의  $R_6$ 와 Beam C의  $R_{11}$ , Beam A의  $R_4$ 와 Beam B의  $R_5$ , Beam C의  $R_9$ 와 Beam D의  $R_{15}$ 에 이어 Beam B의  $R_8$ 과 Beam C의  $R_{12}$ 가 상호 교환되는 4회 교환 수행으로 모든 Beam 들이 평균 값의 부하를 갖도록 하였다.

$T_i$ (번역 #1)	Beam A				Beam B				Beam C				Beam D			
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{14}$	$T_{15}$	$T_{16}$
$f_i$	39	38	<b>37</b>	37	46	43	34	47	43	25	40	43	55	<b>50</b>	44	43
Impossible beam (IB)	C	C	C	C	D	D	D	D	A	A	A	A	B	<b>B</b>	B	B
$u_i$	151				170				146				192			
$\delta_i$	-14				+5				-19				+27			
Target: $164 \leq \mu \leq 165$ , 교환: $T_3 \leftrightarrow T_{14}$																
$T_i$ (번역 #2)	Beam A				Beam B				Beam C				Beam D			
	$T_1$	$T_2$	$T_{14}$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{15}$	$T_{16}$	$T_{18}$
$f_i$	39	38	50	37	46	<b>43</b>	34	47	<b>38</b>	25	40	43	55	37	44	43
IB	C	C	B	C	D	<b>D</b>	D	D	A	A	A	A	B	C	B	B
$u_i$	164				170				146				179			
$\delta_i$	0				+5				-19				+14			
교환: $T_6 \leftrightarrow T_9$																
$T_i$ (번역 #3)	Beam A				Beam B				Beam C				Beam D			
	$T_1$	$T_2$	$T_{14}$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{15}$	$T_{16}$	$T_{18}$
$f_i$	39	38	50	37	46	38	34	47	43	25	<b>40</b>	43	<b>55</b>	37	44	43
IB	C	C	B	C	D	A	D	D	D	A	A	A	<b>B</b>	C	B	B
$u_i$	164				165				151				179			
$\delta_i$	0				0				-14				+14			
교환: $T_{11} \leftrightarrow T_{13}$																
$T_i$ (Result)	Beam A				Beam B				Beam C				Beam D			
	$T_1$	$T_2$	$T_{14}$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{15}$	$T_{16}$	$T_{18}$
$f_i$	39	38	50	37	46	38	34	47	43	25	35	43	40	37	44	43
IB	C	C	B	C	D	A	D	D	D	A	B	A	A	C	B	B
$u_i$	164				165				166				164			
$\delta_i$	0				0				+1				0			
$R_j$ (번역 #1)	Beam A				Beam B				Beam C				Beam D			
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$	$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{14}$	$R_{15}$	$R_{16}$
$r_j$	5	38	45	47	45	<b>43</b>	52	31	51	42	<b>38</b>	30	41	35	48	38
IB	C	C	C	C	D	<b>D</b>	D	D	A	A	A	A	B	B	B	B
$d_j$	163				173				161				162			
$\delta_j$	-2				+8				-4				-3			
교환: $R_6 \leftrightarrow R_{11}$																
$R_j$ (번역 #2)	Beam A				Beam B				Beam C				Beam D			
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$	$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{14}$	$R_{15}$	$R_{16}$
$r_j$	5	38	45	47	45	38	52	31	51	42	43	30	41	35	48	38
IB	C	C	C	C	D	A	D	D	A	A	D	A	B	B	B	B
$d_j$	163				168				166				162			
$\delta_j$	-2				+3				+1				-3			
교환: $R_4 \leftrightarrow R_9$																
$R_j$ (번역 #3)	Beam A				Beam B				Beam C				Beam D			
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$	$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{14}$	$R_{15}$	$R_{16}$
$r_j$	5	38	45	47	45	38	52	31	51	42	43	30	41	35	48	38
IB	C	C	C	D	C	A	D	D	A	A	D	A	B	B	B	B
$d_j$	165				166				166				162			
$\delta_j$	0				+1				+1				-3			
교환: $R_9 \leftrightarrow R_{13}$																
$R_j$ (번역 #4)	Beam A				Beam B				Beam C				Beam D			
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$	$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{14}$	$R_{15}$	$R_{16}$
$r_j$	5	38	45	47	45	38	52	31	51	42	43	30	41	35	51	38
IB	C	C	C	D	C	A	D	D	B	A	D	D	B	B	A	B
$d_j$	165				166				163				165			
$\delta_j$	0				+1				-2				0			
교환: $R_9 \leftrightarrow R_{13}$																
$R_j$ (Result)	Beam A				Beam B				Beam C				Beam D			
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$	$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{14}$	$R_{15}$	$R_{16}$
$r_j$	5	38	45	47	45	38	52	30	48	42	43	31	41	35	51	38
IB	C	C	C	D	C	A	D	D	B	A	D	D	B	B	A	B
$d_j$	165				165				164				165			
$\delta_j$	0				0				0				0			

Result	Beam A				Beam B				Beam C				Beam D				$f_i$	$u_i$
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{14}$	$T_{15}$	$T_{16}$		
Beam A	39	38	37	37	46	43	34	47	43	25	40	43	55	50	44	43	164	164
Beam B	39	38	37	37	46	43	34	47	43	25	40	43	55	50	44	43	165	165
Beam C	39	38	37	37	46	43	34	47	43	25	40	43	55	50	44	43	166	166
Beam D	39	38	37	37	46	43	34	47	43	25	40	43	55	50	44	43	164	164
$d_i$	165				165				164				165				LB=166	

Beam	$T_A$	$T_B$	$T_C$	$T_D$	$u_i$
$R_A$	41	45	35	43	164
$R_B$	43	30	51	41	165
$R_C$	31	41	42	52	166
$R_D$	50	48	37	29	164
$d_j$	165	164	165	165	LB=166

Fig. 4. Result of LBMSMCA for  $D_1$  data

결론적으로 LBMSMCA는 송신 지구국을 담당하는 Beam들과 수신 지구국을 담당하는 Beam들의 부하를 평균값으로 균등하게 배분한 결과 LB는  $\max\{164,165,166,164,165,165,164,165\}=166$ 을 얻었다. 이 결과는 TRA의 LB=168을 LB=166으로 2 감소시켰다. 우리가 찾고자 하는 LB=165로  $T$  열에 대해서는 이 값을 찾았으나  $R$  행에 대해서는  $R_C$ 의  $u_c = 166$ 으로 찾지 못하였다. 이는  $R_D$ 의  $u_d = 164$ 에 존재하는 교환이 가능한  $T_i$ 가 존재하지 않을 수도 있고, 존재하더라도 이전에 다른 Beam에서 이미 1회 이동하여 더 이상 Beam C로 이동이 불가능한 경우가 존재하기 때문이다.

TRA의 LB=168와 LBMSMCA의 LB=166인  $D$  데이터에 대해  $ND$ 로 변환시키고, 스위치 모드 수와 총소요시간을 구한 결과는 그림 5에 제시하였다.

D	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D	$u_i$
Beam A	31	50	45	41	167
Beam B	52	34	40	38	164
Beam C	34	31	49	47	161
Beam D	46	48	34	39	167
$d_i$	163	163	168	165	LB=168

Mode 1	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	32	50	45	41
Beam B	52	36	40	40
Beam C	38	34	49	47
Beam D	46	48	34	40

Mode 2	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	32	50	0	41
Beam B	7	36	40	40
Beam C	38	34	49	47
Beam D	46	3	34	40

Mode 3	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	32	10	0	41
Beam B	7	36	40	0
Beam C	38	34	9	2
Beam D	6	3	34	40

Mode 4	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	32	10	0	7
Beam B	7	2	40	0
Beam C	4	34	9	2
Beam D	6	3	0	40

Mode 5	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	0	10	0	7
Beam B	7	2	8	0
Beam C	4	2	9	2
Beam D	6	3	0	8

Mode 6	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	0	3	0	7
Beam B	0	2	8	0
Beam C	4	2	2	2
Beam D	6	3	0	1

Mode 7	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	0	3	0	5
Beam B	0	2	6	0
Beam C	4	0	2	2
Beam D	4	3	0	1

Mode 8	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	0	3	0	2
Beam B	0	2	3	0
Beam C	1	0	2	2
Beam D	4	0	0	1

Mode 9	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	0	1	0	2
Beam B	0	2	1	0
Beam C	1	0	2	0
Beam D	2	0	0	1

Mode 10	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	0	1	0	0
Beam B	0	0	1	0
Beam C	1	0	0	0
Beam D	0	0	0	1

(a) LB=168 of TRA

D	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D	$u_i$	ND	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D	$u_i$
Beam A	41	40	40	43	164	Beam A	41	41	40	44	166
Beam B	37	41	46	41	165	Beam B	38	41	46	41	166
Beam C	31	41	42	52	166	Beam C	31	41	42	52	166
Beam D	56	43	36	29	164	Beam D	56	43	38	29	166
$d_i$	165	165	164	165	LB=166	$d_i$	166	166	166	166	LB=166

Mode 1	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D	Mode 2	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	41	41	40	44	Beam A	41	0	40	44
Beam B	38	41	46	41	Beam B	38	41	5	41
Beam C	31	41	42	52	Beam C	31	41	42	11
Beam D	56	43	38	29	Beam D	15	43	38	29
$l_1 = 41$					$l_2 = 38$				

Mode 3	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D	Mode 4	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	41	0	40	6	Beam A	3	0	40	6
Beam B	0	41	5	41	Beam B	0	41	5	3
Beam C	31	41	4	11	Beam C	31	3	4	11
Beam D	15	5	38	29	Beam D	15	5	0	29
$l_3 = 38$					$l_4 = 29$				

Mode 5	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D	Mode 6	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	3	0	11	6	Beam A	3	0	0	6
Beam B	0	12	5	3	Beam B	0	1	5	3
Beam C	2	3	4	11	Beam C	2	3	4	0
Beam D	15	5	0	0	Beam D	4	5	0	0
$l_5 = 11$					$l_6 = 3$				

Mode 7	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D	Mode 8	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	3	0	0	3	Beam A	0	0	0	3
Beam B	0	1	2	3	Beam B	0	1	2	0
Beam C	2	0	4	0	Beam C	2	0	1	0
Beam D	1	5	0	0	Beam D	1	2	0	0
$l_7 = 3$					$l_8 = 2$				

Mode 9	Beam A	Beam B	Beam C	Beam D
Beam A	0	0	0	1
Beam B	0	1	0	0
Beam C	0	0	1	0
Beam D	1	0	0	0
$l_9 = 1$				

(b) LB=166 of LBMSMCA  
Fig. 5. Schedule of switch mode

실험 결과 통신위성 송수신기가 중복 커버하는 영역을 가진 경우의 TSAP는 D 행렬 재배정 결과에 따라 총소요시간을 최대한으로 단축할 수 있다는 결론을 얻었다.

실험 데이터에 대해 제안된 LBMSMCA와 Huang과 Wen[1]의 TRA 성능을 비교한 결과는 표 3에 제시하였다. 제안된 LBMSMCA는 TRA에 비해 스위치 모드 수를 1개 감소시켰으며, 총소요시간을 2 감소시켰다. 결론적으로, 제안된 알고리즘은 TRA에 비해 멀티플렉서의 송수신 지구국 연결 변경 횟수인 스위치 모드를 1회 적게 작동시키면서도, 총 패킷 길이를 2만큼 단축시켜 보다 빨리 송수신 중계를 끝마칠 수 있었다.

Table 3. Compare with algorithm performance

알고리즘		성능		
		LB	스위치 모드 수	Makespan
GSA	SS/TDMA	240	-	240
[9]	SS/TDMA+FH	192	-	192
TRA[1]	(SS/TDMA+FH)	168	10	168
LBMSMCA	(SS/TDMA+FH)	166	9	166

기준에 알려진 알고리즘에 보다 적은 투자 (변경 스위치 모드 수 감소)로 보다 많은 이득 (시간 단축)을 취할 수 있는 다항 시간 알고리즘이 존재한다면 통신위성의 효율성을 보다 증가시켜, 이득을 극대화시킬 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 볼 때

본 장에서 얻은 실험 결과는 제안된 알고리즘이 실무 분야에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

## V. Conclusions

본 논문은 NP-완전인  $n:n$  지구국간의 송수신 중계기 역할을 수행하는 통신위성 일정문제에 비해  $n^2$ 배 복잡한  $n^2:n^2$  지구국간 중계기 역할을 수행하는 통신위성의 일정문제를  $O(n^2)$ 의 다항시간으로 구할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘은 통신위성의 각 송수신기들이 가능한 균등한 부하를 갖도록 하는 방법으로, 각 송수신기의 가능한 지상 커버 영역에 대한 트래픽 합이 가능한 평균값을 갖도록 과부하로 배정된 송수신기의 지구국을 저부하 송수신기로 재배정하는 방법을 적용하였다.

제안된 알고리즘을 실험 데이터에 적용한 결과 기존의 TRA에 비해 LB를 보다 단축시켰으며, 이로 인해 소요되는 스위치 모드 수 뿐 아니라 총소요시간을 LB로 하는 스위치 모드를 결정할 수 있었다.

결론적으로, 제안된 알고리즘은 한 통신위성의 송수신기들이 지상 영역을 중첩하여 커버하여  $n^2 \times n^2$  지구국들 간에 송수신 중계역할을 하는 경우에도  $O(n^2)$  수행 복잡도로 최적 해를 구할 수 있어, 위성통신망 정보 전송 분야 실무자에게 실제로 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

## REFERENCES

- [1] K. T. Huang and J. H. Wen, "A Traffic Reallocation Algorithm for an SS/TDMA System with Frequency-Hopping Earth Stations," Proceedings of IEEE Vehicular Technology, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp. 1606-1610, May 2000.
- [2] T. Inukai, "An Efficient SS/TDMA Time Slot Assignment Algorithm," IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-27, No. 10, pp. 1449-1455, Oct. 1979.
- [3] G. Rote and A. Vogel, "A Heuristic for Decomposing Traffic Matrices in TDMA Satellite Communication," Zeitschrift für - Methods and Models of Operations Research, Vol. 38, No. 3, pp. 281-307, Oct. 1993.
- [4] K. L. Yeung, "Efficient Time Slot Assignment Algorithms for TDM Hierarchical and Nonhierarchical Switching Systems," IEEE Transactions on Communications, Vol. 49, No. 2,

pp. 351-359, Feb. 2001.

- [5] X. Wan, F. Shan, and Z. Shen, "An Optimal Algorithm for Time-slot Assignment in SS/TDMA Satellite Systems," IEEE 22nd International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), pp. 1-6, Jul. 2013.
- [6] D. Werra, "A Note on SS/TDMA Satellite Communication," Linear Algebra and Its Applications, Vol. 135, pp. 69-77, Jul. 1990.
- [7] T. H. Lee and S. S. Park, "An Integer Programming Approach to the Time Slot Assignment Problem in SS/TDMA Systems with Intersatellite Links," European Journal of Operational Research, Vol. 135, No. 1, pp. 57-66, Nov. 2001.
- [8] D. L. Adamy, "EW 102: A Second Course in Electronic Warfare, Chapter 7: Communication Satellite Links," Horizon House Publications, Inc. 2004.
- [9] T. Gonzalez and S. Sahni, "Open-Shop Scheduling to Minimize Finish Time," Journal of the ACM, Vol. 23, No. 4, pp. 665-679, Oct. 1976.
- [10] S. Martello, "Jenő Egerváry: From the Origins of the Hungarian Algorithm to Satellite Communication," Central European Journal of Operations Research, Vol. 18, No. 1, pp. 47-57, Mar. 2010.
- [11] S. U. Lee, "Polynomial Time Algorithm for Satellite Communications Scheduling Problem," Journal of KIIT, Vol. 13, No. 4, pp. 27-36, Apr. 2015.

## Authors



Sang-Un Lee received the B. Sc. degree in avionics from the Korea Aerospace University in 1997. He received the M. Sc. and Ph. D. degrees in Computer Science from Gyeongsang National University, Korea, in 1997 and 2001, respectively.

He is currently Professor with the Department of Multimedia Science, Gangneung-Wonju National University, Korea. He is interested in software quality assurance and reliability modeling, software engineering, software project management, neural networks, and algorithm.