JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 24, No. 12: 1632~1638, Dec. 2020

다중 빔 위성 통신 시스템을 위한 공평성 기반 빔 대역폭 할당

정동현[1*] · 유준규[2]

Fairness-Based Beam Bandwidth Allocation for Multi-Beam Satellite Communication System

Dong-Hyun Jung[1*] · Joon-Gyu Ryu[2]

[1*]Researcher, Satellite Wide-Area Infra. Research Section, ETRI, Daejeon, 34129 Korea
[2]Senior researcher, Satellite Wide-Area Infra. Research Section, ETRI, Daejeon, 34129 Korea

요 약

본 논문은 다수의 단말이 다중 빔 위성을 통해 정보를 중심국으로 전송하는 위성 통신 시스템을 고려한다. 위성은 위상 배열 안테나를 탑재하여 서로 다른 대역폭을 가지는 다수의 스팟 빔을 형성한다. 빔 대역폭 할당의 공평성을 최대화하는 최적화 문제를 형성하고 해를 얻기 위한 두 가지 휴리스틱 알고리즘(반복적 빔 대역폭 할당, 자원 요청 비율 기반 빔 대역폭 할당)을 제안한다. 반복적 빔 대역폭 할당 알고리즘은 반복적으로 자원 요청량 대비 할당 대역폭의 비율을 균등화시키며, 자원 요청 비율 기반 빔 대역폭 할당 알고리즘은 요청량 대비 할당량 비율을 이용해 빔 대역폭을 계산한다. 모의실험을 통해서 반복적 빔 대역폭 할당 알고리즘이 최적의 해와 매우 가까운 공평성 성능을 가진다는 것을 확인하였다. 또한, 자원 요청 비율 기반 빔 대역폭 할당 알고리즘은 반복적 빔 대역폭 할당 알고리즘보다 계산 복잡도가 낮은 대신 더 낮은 공평성 성능을 가진다는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we investigate a multi-beam satellite communication system where multiple terminals transmit information signals to the gateway via a satellite. The satellite is equipped with phased array antennas to form multiple spot beams of which bandwidths are not identically allocated. We formulate an optimization problem to maximize fairness of beam bandwidth allocation. In order to solve the problem, we propose two heuristic algorithms; iterative beam bandwidth allocation (IBBA) and request ratio-based beam bandwidth allocation (RRBBA) algorithms. The IBBA algorithm iteratively equalizes the ratio of allocated bandwidth of each beam to their resource request while the RRBBA algorithm allocates beam bandwidth calculated from the ratio. Simulation results show that the IBBA algorithm has close fairness performance to the optimum while the RRBBA algorithm has less performance than the IBBA algorithm at the price of reduced computational complexity.

키워드 : 위성 통신 시스템, 정지 궤도 위성, 다중 빔 위성, 대역폭 할당

Keywords : Satellite communication system, Geostationary earth orbit (GEO), Multi-beam satellite, Bandwidth allocation

Received 1 September 2020, **Revised** 25 September 2020, **Accepted** 28 September 2020

***Corresponding Author** Dong-Hyun Jung(E-mail:dhjung@etri.re.kr, Tel:+82-42-860-5152)
Researcher, Satellite Wide-Area Infra. Research Section, ETRI, Daejeon, 34129 Korea

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.12.1632 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

최근에 대용량 위성(HTS, High Throughput Satellite) 시스템을 실현하기 위한 방법으로 다중 빔 위성(Multi-Beam Satellite)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-4]. 대용량 위성 시스템에서 위성은 다수의 스팟 빔을 형성하기 위해 신호의 진폭과 위상을 조절해 동적으로 빔의 형태 및 이득을 조절할 수 있는 위상 배열 안테나를 사용한다. 논문[1]에서는 불능 확률과 전력 소모 제약 조건 하에서 합 전송률을 최대화 시키는 빔 형성 방식을 제안하였다. 논문[2]에서는 다중 빔 위성-지상 인지 시스템에서 불능 확률과 스펙트럼 효율을 분석하였고 논문[3]에서는 다중 빔 광대역 위성 통신 시스템에서 선형 프리코딩 방식 및 지상 기반 빔 형성 방식을 제안하였다. 논문 [4]에서는 다중 빔 형성을 이용하여 GPS (Global Positioning System)을 방해하는 재밍 신호에 대응하는 기술을 제안하였다.

다중 빔 위성 통신 시스템에서 동적 자원 할당은 중요한 이슈로 다루어진다[5-9]. 논문[5]에서는 다중 빔 위성 통신 시스템에서 시변 채널(Time-Varing Channel)을 고려한 동적 전력 및 서버 할당 방식을 제안하였다. 논문[6]에서는 전력 및 지연에 대한 제약 조건을 고려하여 다중 빔 전력 할당 방식을 제안하였다. 논문[7]에서는 다중 빔 위성 통신 시스템에서 다중 사용자의 전력 임계값을 고려한 전력 할당 방식을 제안하였다. 또한 논문[8]에서는 강우 감쇄 모델과 탐욕적 접근법을 사용하여 동적 전력 할당 방식을 제안하였다. 논문 [9]에서는 다중 빔 위성 통신 시스템에서 강화학습을 이용한 다중 에이전트 자원 관리의 해결책을 제안한다.

본 논문에서는 다수의 단말이 위성을 통해 중심국으로 신호를 전송하는 다중 빔 위성 통신 시스템을 고려한다. 각 빔은 서로 다른 주파수 대역을 가지며 서로 다른 크기의 대역폭을 가진다고 가정한다. 빔 대역폭 할당의 공평성을 최대화하는 최적화 문제를 세우고 두 가지 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 모의실험을 통해 두 알고리즘의 성능을 비교하고 결과를 해석한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서 시스템 모델 및 가정에 대해서 설명한다. 3장에서 빔 대역폭 최적화 문제를 세우고 문제를 풀기 위해 두 가지 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 모의실험을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 비교한다. 5장에서는 결론을 도출한다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문은 그림 1과 같이 하나의 중심국(Gateway)이 위성(Satellite)을 통해 K개의 단말(Terminal)과 통신하는 위성 통신 시스템을 고려한다. 위성은 On-board Processor (OBP)를 탑재하여 수신된 신호를 복호(Decoding)하고 재부호(Re-Encoding)하여 전달하며, 위상 배열 안테나(Phased Array Antenna)를 탑재하여 B 개의 빔을 형성한다고 가정한다. 이 때, 각 빔 b ($b \in \{1, 2, ..., B\}$)에는 K_b ($\Sigma_{b=1}^{B} K_b = K$)개의 단말이 존재한다고 가정한다.

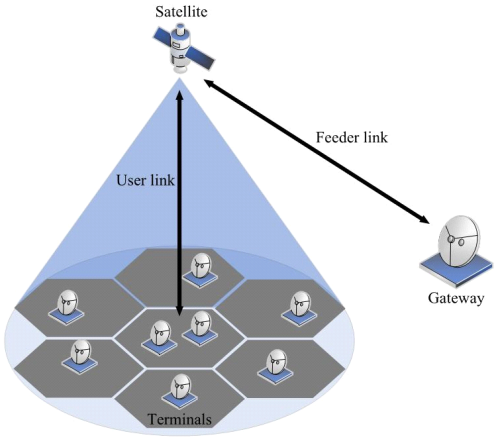

Fig. 1 System model

단말이 트래픽 버스트(Traffic Burst)를 전송하는 단위를 프레임이라고 정의하고 프레임의 대역폭을 BW_{tot}, 프레임의 길이를 T_f로 표시한다. 프레임은 그림 2와 같이 주파수 축에서 B 개의 영역으로 나누어진다. 이 때 각 영역은 각 빔에 할당된 시간-주파수 자원을 의미하며 각 영역의 대역폭은 $BW_b (\Sigma_{b=1}^{B} BW_b = BW_{tot})$이다. 또한 각 영역은 주파수 축에서 M_b개의 채널로 나누어지며 각 채널의 대역폭은 BW_c ($BW_c M_b = BW_b$) 이다. 채널은 시간 축으로 분할된 다수의 타임 슬롯(Time Slot)으로 구성된다. 중심국은 단말의 채널 상태와 전력 여유량(Power Headroom)을 고려해 특정 변조 및 채널 코딩 방식(MCS, Modulation and Coding Scheme)을 결정하고 타임 슬롯을 할당해 관련 자원 할당 정보를 제어 신호를 통해 전달한다. 단말은 할당 받은 타임 슬롯과 변조 및 코딩 방식을 이용해 트래픽 버스트를 중심국으로 전송

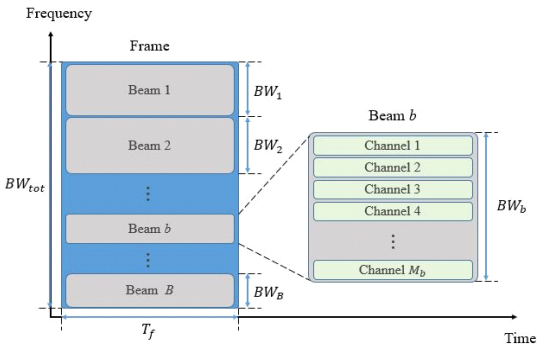

Fig. 2 Frame structure

한다. 한 프레임에서 빔 b에 할당된 시간-주파수 자원의 양을 x_b라고 표현하면 x_b는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_b = BW_b T_f. \tag{1}$$

모든 빔에 대한 시간-주파수 자원 할당 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_b = [x_1, x_2, \cdots, x_B]^T. \tag{2}$$

빔 b에 존재하는 단말 $k(k \in \{1,2,\cdots,K_b\})$의 자원 요청량을 $C_{b,k}$라고 표현하고 단말이 할당된 변조 및 채널 코딩 방식에 대한 페이로드 사이즈(Payload Size)를 D_k라고 표현하면, 단말 k의 요청 자원을 만족시키기 위해 필요한 트래픽 버스트의 개수는 다음과 같이 계산된다.

$$N_{b,k}^{req} = \left\lceil \frac{C_{b,k}}{D_k} \right\rceil. \tag{3}$$

단말 k의 요청 자원량을 만족시키기 위해 필요한 시간-주파수 자원은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{b,k}^{req} = T_k BW_c N_{b,k}^{req}. \tag{4}$$

위 수식에서 T_k는 단말 k가 할당된 변조 및 채널 코딩 방식을 사용했을 때 버스트 길이이다. 빔 b에 위치한 K_b개 단말의 집계 시간-주파수 자원 요청량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_b^{req} = \sum_{k=1}^{K_b} x_{b,k}^{req}. \tag{5}$$

자원 요청량에 따른 공평한 자원 할당 기법을 고려하기 위해 할당된 자원량을 자원 요청량으로 다음과 같이 정규화한 변수를 사용한다.

$$\hat{x}_b = \frac{x_b}{x_b^{req}}. \tag{6}$$

정규화된 시간-주파수 자원량에 대한 Jain의 공평성 인덱스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J(\mathbf{x}_b) = \frac{(\Sigma_{b=1}^{B} \hat{x}_b)^2}{B\Sigma_{b=1}^{B} \hat{x}_b^2}. \tag{7}$$

Ⅲ. 빔 대역폭 할당 기법

본 장에서는 Jain의 공평성 인덱스를 최대화 하는 빔 대역폭 할당을 찾는 최적화 문제를 형성한다. 형성한 최적화 문제의 해를 찾기 위해 두 가지 알고리즘을 제안하고 계산 복잡도를 분석한다.

3.1. 공평성 최대화 문제

Jain의 공평성 인덱스를 최대화 하는 빔 대역폭 할당 문제는 다음과 같이 형성된다.

$$\underset{\mathbf{x}_b}{\text{maximize}} \quad J(\mathbf{x}_b) \tag{8a}$$

$$\text{subject to} \quad BW_b = M_b BW_c, \quad \forall b, \tag{8b}$$

$$x_b = BW_b T_f, \quad \forall b, \tag{8c}$$

$$N_{b,k}^{req} = \left\lceil \frac{C_{b,k}}{D_k} \right\rceil, \quad \forall b,k, \tag{8d}$$

$$x_{b,k}^{req} = T_k BW_c N_{b,k}^{req}, \quad \forall b,k, \tag{8e}$$

$$x_b^{req} = \sum_{k=1}^{K_b} x_{b,k}^{req}, \quad \forall b, \tag{8f}$$

$$\hat{x}_b = \frac{x_b}{x_b^{req}}, \quad \forall b, \tag{8g}$$

$$\sum_{b=1}^{B} BW_b = BW_{tot}, \quad \forall b, \tag{8h}$$

$$x_b \in R_{\geq 0}, \quad \forall b, \tag{8i}$$

$$M_b \in Z_{\geq 0}, \quad \forall b. \tag{8j}$$

위 최적화 문제에서 (8b)는 각 빔에 할당된 대역폭은 채널 대역폭(BW_c)의 배수여야 한다는 제약 조건이고 (8h)는 모든 빔에 할당된 대역폭이 전체 대역폭(BW_{tot})

과 같다는 제약 조건을 의미한다. 최적화 문제의 목적함수 (8a)는 컨벡스 함수(Convex Function)가 아니기 때문에 최적화 문제를 푸는 것이 어렵다. 문제를 풀기위해 전역 탐색(Exhaustive Search) 방법을 사용할 수 있지만 가능한 모든 빔 대역폭 할당에 대해서 해를 찾는 것은 매우 높은 계산 복잡도를 요구한다. 이 문제를 해결하기 위해 다음 절에서 복잡도가 낮은 두 가지 알고리즘을 제안한다.

3.2. 반복적 빔 대역폭 할당(IBBA)

본 절에서는 최적화 문제 (8)의 해를 찾기 위한 반복적 빔 대역폭 할당(IBBA, Iterative Beam Bandwidth Allocation) 알고리즘을 그림 3과 같이 제안한다. Jain의 공평성 인덱스 정의에 따르면 최적화 문제 (8)의 목적함수 (8a)는 $1/B$ 부터 1까지의 값을 가지며 정규화된 시간-주파수 자원 할당량 $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \cdots, \hat{x}_B$이 모두 같은 값을 가질 때 최대화 된다[10]. 만약 빔 b의 정규화된 시간-주파수 자원 할당량 ($\hat{x}_b$)이 다른 빔의 정규화된 시간-주파수 자원할당량 보다 크다면, 각 빔의 자원 요청량을 고려했을 때 빔 b에 과도한 채널이 할당되었다는 의미이다[10]. 이러한 Jain의 공평성 인덱스 특성을 이용해 정규화된 시간-주파수 자원 할당량이 가장 큰 빔에 할당된 채널을 정규화된 시간-주파수 자원 할당량이 가장 작은 빔으로 전달하는 방식을 반복적으로 수행함으로써 공평하게 자원을 할당해주는 알고리즘을 제안한다.

먼저 제약 조건 (8h)를 만족하는 임의의 빔 대역폭 할당을 초기값으로 설정하고 각 반복에서 결정되는 Jain의 공평성 인덱스의 최댓값을 나타내는 변수 $J_{\max}$을 0으로 설정한다. 각 단말에 대해서 필요 트래픽 버스트 개수($N_{b,k}^{req}$)와 시간-주파수 자원 요청량($x_{b,k}^{req}$)을 각각 수식 (3)과 수식 (4)를 이용하여 계산한다. 그 후 수식 (5)를 이용하여 빔 별 집계 시간-주파수 자원 요청량(x_b^{req})을 계산한다. 현재 설정된 빔 대역폭 할당에 대해서 빔 별 시간-주파수 자원 할당량(x_b)을 계산하고 집계 자원 요청량을 이용해 정규화된 시간-주파수 자원 할당량 ($\hat{x}_b$)을 계산한다. Jain의 공평성 인덱스의 특징을 이용해 공평성을 높이기 위해 다른 빔에 비해 상대적으로 많은 자원이 할당된 빔과 상대적으로 적은 자원이 할당된 빔을 다음과 같이 찾는다.

Algorithm 1 Iterative algorithm for beam bandwidth allocation

Input: $C_{b,k}$, D_k, T_k, BW_c, K_b, B, B_{tot}, T_f, γ.
Output: $\{BW_b^*\}$.

Initialize $BW_1^{(0)}, BW_2^{(0)}, \cdots, BW_B^{(0)}$ satisfying (8h) and $J_{max} = 0$.
Calculate $x_b^{(0)} = BW_b^{(0)} T_f$ for all b.
Calculate $N_{b,k}^{req} = \lceil C_{b,k}/D_k \rceil$ for all k and b.
Calculate $x_{b,k}^{req} = T_k BW_c N_{b,k}^{req}$ for all k and b.
Calculate $x_b^{req} = \sum_{k=1}^{K_b} x_{b,k}^{req}$ for all b.
Calculate $\hat{x}_b^{(0)} = x_b^{(0)}/x_b^{req}$ for all b.
for $i = 0$ to $i_{max} - 1$ **do**
  Obtain $b_{max} = \arg\max_b \hat{x}_b^{(i)}$ and $b_{min} = \arg\min_b \hat{x}_b^{(i)}$.
  Calculate $\delta = \gamma BW_c T_f$.
  Calculate $x_{b_{max}}^{(i+1)} = x_{b_{max}}^{(i)} - \delta$ and $x_{b_{min}}^{(i+1)} = x_{b_{min}}^{(i)} + \delta$.
  Calculate $\hat{x}_b^{(i+1)} = x_b^{(i+1)}/x_b^{req}$ for all b.
  Calculate $J(\mathbf{x}^{(i+1)}) = (\sum_{b=1}^{B} \hat{x}_b^{(i+1)})^2/(B \sum_{b=1}^{B} (\hat{x}_b^{(i+1)})^2)$.
  if $J(\mathbf{x}^{(i+1)}) > J_{max}$ **then**
    Update $J_{max} = J(\mathbf{x}^{(i+1)})$.
  else
    Update $BW_b^* = \hat{x}_b^{(i+1)} x_b^{req}/T_f$ for all b.
    break
  end if
end for

Fig. 3 IBBA algorithm

$$b_{\max} = \arg\max_b \hat{x}_b, \tag{9}$$

$$b_{\min} = \arg\min_b \hat{x}_b. \tag{10}$$

공평성을 높이기 위해 빔 $b_{\max}$에 할당된 γ개의 채널을 빔 $b_{\min}$으로 옮긴다. 이 때 빔 $b_{\max}$에서 빔 $b_{\min}$로 옮겨가는 시간-주파수 자원은 다음과 같다.

Algorithm 2 Request Ratio-Based algorithm for beam bandwidth allocation

Input: $C_{b,k}$, D_k, T_k, BW_c, K_b, B, B_{tot}.
Output: $\{BW_b^*\}$.

for $b = 1$ to $B - 1$ **do**
  Calculate $N_{b,k}^{req} = \lceil C_{b,k}/D_k \rceil$ for all k.
  Calculate $x_{b,k}^{req} = T_k BW_c N_{b,k}^{req}$ for all k.
  Calculate $x_b^{req} = \sum_{k=1}^{K_b} x_{b,k}^{req}$.
  Calculate $\alpha_b = x_b^{req}/\sum_{b=1}^{B} x_b^{req}$.
  Calculate $M_b = \lfloor BW_{tot} \alpha_b / BW_c \rfloor$.
  Calculate $BW_b^* = M_b BW_c$.
end for
Calculate $BW_B^* = BW_{tot} - \sum_{b=1}^{B-1} BW_b^*$.

Fig. 4 RRBBA algorithm

$$\delta = \gamma B W_c T_f. \quad (11)$$

즉, 빔 $b_{\max}$에 할당된 시간-주파수 자원량($x_{b_{\max}}$)은 δ 만큼 감소하고 빔 $b_{\min}$에 할당된 시간-주파수 자원량($x_{b_{\min}}$)은 δ 만큼 증가한다. 변화된 자원 할당량을 바탕으로 정규화된 시간-주파수 자원 할당량을 재계산한 후 위의 과정을 포화 상태까지 반복한다.

3.3. 자원 요청 비율 기반 빔 대역폭 할당(RRBBA)

본 절에서는 최적화 문제 (8)의 해를 찾기 위해 매우 낮은 복잡도를 가지는 자원 요청 비율 기반 빔 대역폭 할당(RRBBA, Request Ratio-Based Beam Bandwidth Allocation) 알고리즘을 그림 4와 같이 제안한다. RRBBA 알고리즘은 전체 대역폭 BW_{tot}을 각 빔에서 요청한 자원량의 비율만큼 나눠 각 빔에 할당해주는 방법이다. 먼저, 수식 (3)~(5)를 이용해 각 빔의 집계 시간-주파수 자원 요청량(x_b^{req})을 계산한다. 다음으로, 전체 시간-주파수 자원 요청량 대비 각 빔의 자원 요청량의 비율을 다음과 같이 계산한다.

$$\alpha_b = \frac{x_b^{req}}{\sum_{b=1}^{B} x_b^{req}}. \quad (12)$$

그 후, 전체 대역폭에서 각 빔의 자원 요청량 비율을 고려하여 다음과 같이 각 빔의 채널 수를 결정한다.

$$M_b = \left\lfloor \frac{BW_{tot}\alpha}{BW_c} \right\rfloor. \quad (13)$$

빔 b에 할당된 대역폭은 $BW_b^* = M_b BW_c$로 계산된다. 위의 과정을 $B-1$ 빔에 대해 반복 한 뒤 남은 대역폭을 빔 B에 할당한다.

Ⅳ. 실험 결과

본 논문은 다중 빔 위성 통신시스템에서 다수의 단말이 다중 빔 위성을 통해서 중심국으로 신호를 전달하는 상황을 고려한다. 모의실험은 프레임 길이(T_f)를 1초, 빔 개수(B)를 7개, 단말의 자원 요청량(C_k)을 1 kbyte로 설정하여 진행한다. 중심국은 각 단말에게 표 1에 정의된 다섯 개의 변조 및 채널 코딩 방식 중 하나를 할당한다. 모의실험에서는 무작위로 하나의 변조 및 채널 코딩 방식을 할당해 준다고 가정한다. 또한 7개의 빔 중에 3개는 인구가 적은 시골(Rural) 지역에 위치하고 4개는 도심(Urban) 지역에 위치한다고 가정한다. 이 때, 시골 지역과 도심 지역에 위치한 빔에 존재하는 단말의 개수는 푸아송 분포(Poisson Distribution)을 따르며 평균은 각각 λ_r과 λ_u로 나타낸다. 그림 5번과 그림 6번은 10,000회의 서로 다른 독립적인 실현(Realization)에 대한 Jain의 공평성 인덱스의 평균값을 나타내며, 그림 7번은 특정한 실현에 대해 반복 횟수에 따른 공평성 인덱스의 변화를 나타낸다. 성능 비교를 위해 균등 빔 대역폭 할당(EBBA, Equal Beam Bandwidth Allocation) 알고리즘을 고려하며, EBBA의 최적의 성능은 전역 탐색 방법을 통해서 얻는다.

그림 5는 다양한 빔 대역폭 할당 알고리즘에 대한 전체 대역폭에 따른 평균 공평성 인덱스 변화를 나타낸다. 이 모의실험에서는 시골 지역의 단말 수의 평균(λ_r)은 10, 반복 횟수당 전달 채널 수(γ)는 1로 설정한다. IBBA와 RRBBA 알고리즘은 전체 대역폭이 증가할수록 평균 공평성 인덱스가 증가함을 보이는데, 이는 더 많은 대역폭을 사용할수록, 단말에게 더 공평하게 자원을 할당할 기회가 많아지기 때문이다. IBBA 알고리즘의 성능은 최적의 성능과 매우 가까운 성능을 보인다. 또한 RRBBA 알고리즘은 EBBA 알고리즘보다는 높고 IBBA 알고리즘 보다는 낮은 성능을 보이지만, 현저하게 낮은 복잡도를 가지기 때문에 복잡도가 주요한 시스템에서 IBBA 알고리즘을 대신하여 사용이 가능할 것으로 예상된다.

그림 6은 다양한 빔 대역폭 할당 알고리즘에 대한 도심 지역 빔에 위치한 단말 개수의 평균값에 따른 평균 공평성 인덱스 변화를 나타낸다. 이 모의실험에서는 전

Table. 1 Definition of MCS levels

MCS level	1	2	3	4	5
Burst duration [ms]	5	5	5	20	20
Payload size [bytes]	75	90	100	556	648
Modulation	QPSK	QPSK	QPSK	16APSK	16APSK
Code rate	5/8	3/4	5/6	1/2	4/7
Channel bandwidth [kHz]	156.25	156.25	156.25	156.25	156.25

체 대역폭(BW_{tot})을 10 MHz, 시골 지역의 단말 수의 평균(λ_r)은 10, 반복 횟수당 전달 채널 수(γ)는 1로 설정한다. 도심 빔의 평균 단말 수가 많아질수록 평균 공평성 인덱스가 낮아지는데, 이는 빔 간의 자원 요청량의 차이가 클수록 불공평한 자원 할당을 야기하기 때문이다. 또한 IBBA 알고리즘은 불균등한 자원 요청에 따라 유연하게 자원을 할당하기 때문에, RRBBA와 EBBA 알고리즘에 비해 도심 빔의 평균 단말 수가 증가할수록 성능의 열화가 적은 것을 확인할 수 있다.

그림 7는 다양한 반복 횟수당 전달 채널 수(γ)에 대한 반복 횟수에 따른 공평성 인덱스의 변화를 나타낸다. 이 모의실험에서는 전체 대역폭(BW_{tot})을 10 MHz, 시골 및 도심 지역의 단말 수의 평균(λ_r과 λ_u)은 각각 10과 50으로 설정한다. 초기 조건으로 모든 대역폭이 빔 1에 할당되었다고 가정한다. 반복 횟수가 증가할수록 공평성 인덱스가 증가하고 특정한 값에 도달하면 포화되는 양상을 보인다. 또한 반복 횟수당 전달 채널 수가 클수록 공평성 인덱스는 더 빠르게 최대값에 도달하나 최적해와 성능 차이는 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 공평성과 계산 복잡도 사이에 존재하는 트레이드 오프(Trade-Off)를 고려해 적절한 파라미터를 선정해야 한다.

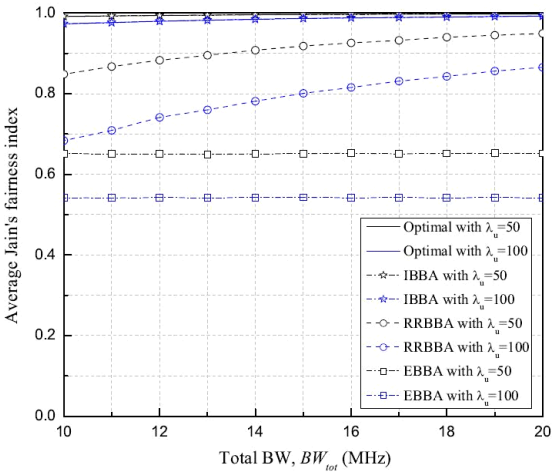

Fig. 5 Average Jain's fairness index versus the total bandwidth for various beam bandwidth allocation algorithms

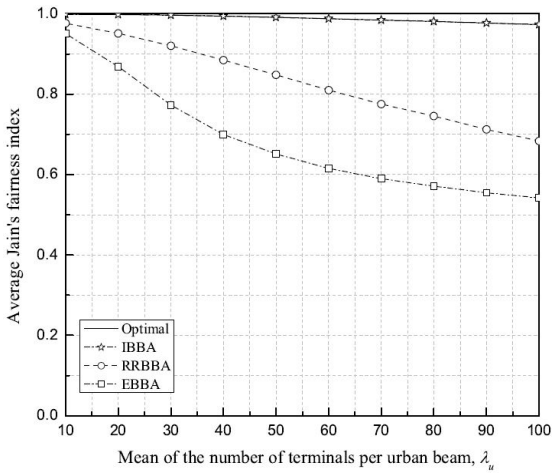

Fig. 6 Average Jain's fairness index versus the mean of the number of terminals per urban beam for various beam bandwidth allocation algorithms

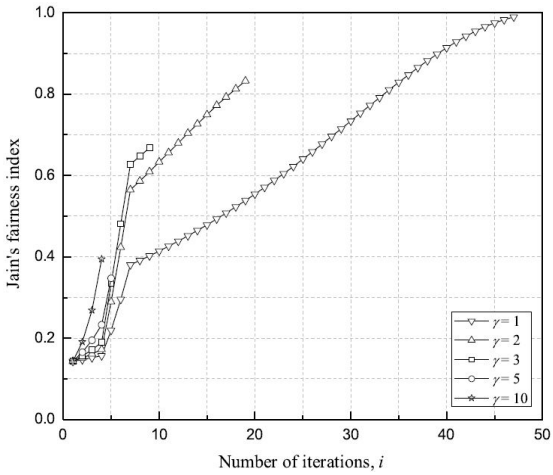

Fig. 7 Jain's fairness index versus the number of iterations for the IBBA algorithm

Ⅴ. 결 론

본 논문은 다수의 단말이 다중 빔 위성을 통해서 중심국으로 신호를 전달하는 위성 통신 시스템을 고려한다. 위성은 다수의 스팟 빔을 형성하기 위해 위상 배열 안테나를 장착하고 있으며, 각 스팟 빔의 대역폭의 크기는 서로 다를 수 있다고 가정한다. 본 논문에서는 각 빔의 대역폭 할당의 공평성을 최대화하기 위한 최적화 문제

를 세우고 두 가지 휴리스틱 알고리즘을 이용해 해를 구한다. 모의실험을 통해 IBBA 알고리즘이 최적의 성능과 유사한 성능을 가진다는 것과 RRBBA 알고리즘이 IBBA 알고리즘보다 계산 복잡도가 적은 대신 낮은 성능을 가진다는 것을 확인하였다. 또한 빔 별 자원 요청량의 차이가 큰 경우에는 본 논문에서 제안한 두 알고리즘이 EBBA 알고리즘 보다 훨씬 높은 성능을 가진다는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant (2018-MOIS32-002) from Disaster-Safety Industry Promotion Program funded by Korean Ministry of Interior and Safety (MOIS).

REFERENCES

[1] Y. Yan, W. Yang, B. Zhang, D. Guo, and G. Ding, "Outage constrained robust beamforming for sum rate maximization in multi-beam satellite systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 1, pp. 164-168, Jan. 2020.

[2] O. Y. Kolawole, S. Vuppala, M. Sellathurai, and T. Ratnarajah, "On the performance of cognitive satellite-terrestrial networks," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 4, pp. 668-683, Dec. 2017.

[3] B. Devillers, A. Perez-Neira, and C. Mosquera, "Joint linear precoding and beamforming for the forward link of multi-beam broadband satellite systems," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2011*, Houston, TX, pp. 1-6, Dec. 2011.

[4] E.-R. Jeong, H.-H. Won, G.-J. Yang, and B.-S. Ahn, "A new multi-beam MVDR technique for removing interference signals in array antenna based GPS receivers," *The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 21, no. 3, pp. 491 – 498, Mar. 2017.

[5] M. J. Neely, E. Modiano, and C. E. Rohrs, "Power allocation and routing in multibeam satellites with time-varying channels," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 11, no. 1, pp. 138-152, Feb. 2003.

[6] J. P. Choi and V. W. S. Chan, "Optimum power and beam allocation based on traffic demand and channel conditions over satellite downlinks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 4, no. 6, pp. 2983-2993, Nov. 2005.

[7] A. Destounis and A. D. Panagopoulos, "Dynamic power allocation for broadband multi-beam satellite communication networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 4, pp. 380-384, Apr. 2011.

[8] N. K. Srivastava and A. K. Chaturvedi, "Flexible and dynamic power allocation in broadband multi-beam satellites," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 9, pp. 1722-1725, Sep. 2013.

[9] X. Liao, X. Hu, Z. Liu, S. Ma, L. Xu, X. Li, W. Wang, and F. M. Ghannouchi, "Distributed intelligence: A verification for multi-agent DRL based multibeam satellite resource allocation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 12, Dec. 2020.

[10] D. H. Jung, M. S. Shin, and J. G. Ryu, "Fairness-based superframe design and resource allocation for dynamic rate adaptation in DVB-RCS2 satellite systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 11, pp. 2046-2050, Nov. 2019.

정동현(Dong-Hyun Jung)

2015년 POSTECH 전자전기공학과 학사
2017년 서울대학교 전기정보공학부 석사
2017년 ~ 현재 한국전자통신연구원 위성광역인프라연구실 연구원
※관심분야 : 위성통신, MIMO, 시스템 최적화

유준규(Joon-Gyu Ryu)

1999년 충남대학교 전파정보통신공학과 학사
2001년 충남대학교 전파정보통신공학과 석사
2014년 충남대학교 전파정보통신공학과 박사
2001년 ~ 현재 한국전자통신연구원 위성광역인프라연구실 실장
※관심분야 : 위성통신, 안테나 공학, 시스템 엔지니어링