

# 위성-지상 통합망에서 간섭 전력에 따른 자원할당 성능 평가

조규성\*, 짠삿타°, 김수영°, 오대섭\*\*, 구본준\*\*

## Evaluation of Resource Allocation Schemes for the Integrated Satellite-Terrestrial Network by Interference Power

Gyuseong Jo\*, Satya Chan\*, Sooyoung Kim°, Daesub Oh\*\*, Bon-Jun Ku\*\*

### 요 약

위성통신 시스템에서는 다중 빔을 이용한 동적 자원할당을 통해 주파수 자원을 효율적으로 활용할 수 있다. 주파수 재사용 기술을 다중 빔 위성에 활용한 위성-지상 통합망은 이동 위성 서비스를 제공하기 위한 효과적인 수단일 수 있다. 이때, 동일한 주파수 대역을 재사용하는 위성 빔과 지상 구성요소 간에는 상호 간섭이 발생할 수 있으며, 위성시스템의 매우 한정된 대역폭 및 전력의 효율적 활용을 위해서는 이러한 간섭환경을 고려하여 최적의 대역폭과 전력이 할당될 수 있도록 하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 환경 하에서 효율적으로 동작할 수 있는 자원할당 방식의 기본 원리와 특징에 대해 소개한다. 또, 위성 빔과 지상 구성요소 간 간섭을 모델링하고, 간섭이 자원할당에 미치는 영향을 수식을 통해 제시함으로써, 대역폭 및 전력을 할당하는 자원할당 알고리즘의 이론적인 해석이 제시될 수 있도록 한다. 더불어, 다양한 간섭 조건과 주파수 재사용 인자에 따라 자원할당 방식의 성능을 광범위하게 시뮬레이션하고 그 결과를 평가함으로써 실제 시스템 엔지니어링 과정에 활용될 수 있도록 한다.

**Key Words** : frequency reuse, integrated satellite and terrestrial system, optimization, resource allocation, multi-beam satellite, satellite communication

### ABSTRACT

Multi-beam satellite systems enable efficient utilization of frequency resources by virtue of dynamic resource allocations. Integrated satellite and terrestrial networks with a frequency reusing scheme can be an effective means to provide mobile satellite services. In such a network, there will be harmful interferences between the satellite beam and terrestrial cells using the same frequency band, via the frequency reusing scheme. Since the bandwidth and power resources of a satellite system is very scarce and limited, special attention should be paid on the resource allocation considering the interference conditions. This paper first introduces the basic concept and operational principle of the resource allocation scheme under this kind of interference limited situation. In addition, we present interference modeling between satellite beams and terrestrial cells, and illustrate the effect of the interferences on the resource allocation by using mathematical equations. By this way, theoretical analysis of the resource allocation algorithm can be provided. Finally, this paper provides extensive simulation results under various interference conditions according to frequency reusing factors, so that the results can be utilized during the practical system engineering process.

\* 이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2021-0-00719, 비정기제도 위성망 주파수 간섭 평가/공유 기술 개발 과제)

• First Author : IT Convergence Research Center, Jeonbuk National University, fnd10217@naver.com, 학생회원

° Corresponding Author : IT Convergence Research Center, Jeonbuk National University, sookim@jbn.ac.kr, 종신회원

\* IT Convergence Research Center, Jeonbuk National University, kaonomise4@gmail.com

\*\* Electronics and Telecommunication Research Institute, trap@etri.re.kr, bjoo@etri.re.kr, 정회원

논문번호 : 202205-103-A-RN, Received May 18, 2022; Revised July 19, 2022; Accepted July 26, 2022

## 1. 서 론

최신 현대 위성통신 시스템에서는 다중 빔을 이용하여 동적으로 전력과 대역폭을 할당함으로써, 주파수 자원을 효율적으로 활용할 수 있게 되었다<sup>[1]</sup>. 위성 시스템의 극히 제한적인 주파수 자원을 고려할 때, 주파수 재사용 기술을 다중 빔 위성에 활용한 위성-지상 통합망(integrated satellite and terrestrial network; ISTN)은 미래 통신 서비스를 제공하는 데에 효과적인 수단이 될 수 있다<sup>[2]</sup>.

ISTN에서는 위성 빔과 지상 셀이 서로의 자원을 최대한 활용할 수 있기 때문에, 효율적 자원 활용에 매우 효과적인 방법이 될 수 있다. 이때, 지상 성분은 위성 네트워크 관리 시스템의 제어 하에 위성 자원을 재사용한다. 이를 통해 위성 및 지상 구성요소에 대한 자원할당을 조정하여 스펙트럼 효율을 최적화하고 전체 시스템 용량을 증가시킬 수 있다<sup>[3]</sup>.

주파수 재사용 기법을 사용할 경우, 주파수 재사용 인자(frequency reuse factor; FRF)가 커질수록, 시스템의 스펙트럼 효율 향상이 가능하기 때문에, 전체 시스템 용량 향상에 기여할 수 있다<sup>[4]</sup>. 반면, 동일한 면적 내에서 FRF가 커질수록 위성 빔 및 지상 셀 간 간섭이 더 커질 수 있기 때문에, 간섭에 대한 적절한 제어가 수반되지 않을 경우 전체 시스템 용량이 오히려 감소할 수도 있게 된다<sup>[5]</sup>. 또한, FRF의 증가는 자원할당 알고리즘의 복잡도 증가에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

ISTN에서 대역폭과 전력을 최적으로 할당시키기 위한 선행 연구로서, 참고문헌 [1]에서는 ISTN에서 위성 빔과 지상 셀 간의 간섭을 최소화하고 시스템 용량에 적합한 최적의 송신전력과 대역폭을 찾는 방법을 다항식으로 유도하여 제안한 바 있다. 그러나 이 방법은 트래픽 요구량이 시스템 용량 내에 있는 경우에 한하여 유효한 결과를 도출한다는 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최적화 문제의 목적함수에 추가 조건을 포함하고, 초기 시작점을 설정함으로써 계산의 효율성을 도모할 수 있는 방법이 제시된 바 있다<sup>[6]</sup>.

이처럼 시스템에서 제공 가능한 용량 내에서 최적의 대역폭과 전력을 할당하는 방식의 경우, 요구 트래픽이 시스템 용량을 초과할 경우 유효하지 않은 결과를 도출하는 문제점이 존재해 왔다. 특히, 유효한 결과를 도출할 수 있는지의 여부를 미리 알 수 없고, 최적화 알고리즘을 수행한 후에 할당 가능 여부를 알 수 있게 된다는 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결

하기 위하여 선행연구 [2]에서는 자원할당 문제를 간단한 기계학습 알고리즘과 선형 시스템으로 분리하여 복잡도가 매우 적은 알고리즘을 이용하여 그 해결책을 제시한 바 있다.

그러나, 선행 연구 [2]에서는 알고리즘의 특성과 그 적용가능성에 대한 입증에 주안점을 두었기 때문에 특정한 한 시스템 환경에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하여 알고리즘이 효과적으로 동작함을 보였다. 따라서, 간섭 환경이 다양한 여러 시스템에서 할당 알고리즘의 성능이 어떤 특성을 보이는지에 대한 결과 도출 및 분석이 부족하였다. 또, 대역폭과 전력을 최적으로 할당하기 위한 목적함수의 해를 찾기 위해 활용하는 선형시스템에서 목적함수의 해가 어떻게 얻어지는지에 대한 해석이 부족한 문제점이 존재 하였다.

본 논문에서는 이러한 점을 고려하여, 다음과 같은 새로운 연구 결과를 제시한다. 첫째, 기계학습 기반 자원할당 기법의 동작원리를 분석하고 구현이 가능하도록 알고리즘화하여 제시한다. 둘째, ISTN 시스템의 간섭 시나리오를 명확히 수식으로 모델링하고, 이를 바탕으로 자원할당 기법에 대한 목적함수의 해를 찾기 위한 선형시스템을 희망 경로와 간섭 경로간의 이득 비로 구성된 행렬을 이용하여 유도한다. 또, 선형 시스템의 해가 되는 대역폭과 전력은 상호 의존적인 관계이므로, 전수조사 방법 또는 반복적인 최적화 기법을 이용하여 선형 시스템의 해가 될 수 있는 집합을 구하여야 함을 보인다. 더불어 DVB-S2X 규격과 같이 실제 위성 시스템 파라미터를 적용하는 방법을 제시한다.

셋째, 희망 경로와 간섭 경로간의 이득 비는 시스템에서의 간섭 상황이 얼마나 심각한지를 나타내는 척도가 되기 때문에, 이를 이용하여 다양한 간섭 환경을 설정하고, 그 시뮬레이션 결과를 제시한다. 또 선행연구 [4]에서의 결과를 확장하여 FRF의 변화와 간섭 환경의 변화가 성능에 어떤 영향을 미치는지를 분석하고, 기존의 convex 최적화 기법과의 성능 비교 결과를 제시함으로써, 시스템 설계 및 분석에 활용될 수 있도록 할 것이다.

본 서론에 이어 II장에서는 ISTN 시스템의 기본 개념과 선행 연구 [2]에서 제시한 자원할당 기법에 대하여 설명한다. III장에서는 ISTN에서의 간섭 시나리오를 분석하고, 제시된 시나리오에 따라, 희망 경로 대 간섭 경로의 이득 비의 함수로 결정되는 자원할당 알고리즘에 대한 수학적 분석 내용을 제시한다. IV장에서는 다양한 간섭 상황과 FRF의 변화에 따른 성능 시뮬레이션 결과를 제시하고, 그 의미를 분석한다. 마치

막으로, V장에서는 결론을 맺는다.

## II. 위성-지상 통합망 시스템과 선행 연구

### 2.1 위성-지상 통합망 시스템

ISTN 시스템에서는 지상 구성요소에서 위성 주파수를 재사용함으로써 위성의 적용 범위를 확장할 수 있다는 장점이 있다<sup>1)</sup>. ISTN에서, 위성 빔과 지상 구성요소는 동일한 주파수를 공유할 수 있고, 공통된 자원 관리 시스템에 의해 제어된다. 그러므로, 위성 빔과 지상 구성요소 간의 간섭을 최소화함으로써 전력 효율과 스펙트럼 효율을 향상시키는 방법으로 자원을 적절하게 할당하여 사용해야 한다.

그림 1 은 다중 빔 위성과 지상 구성요소가 주파수를 재사용하는 ISTN 시스템 구조를 보여준다. 그림 1 의 예제에서 FRF값  $F$ 는 3이다. 따라서, 전체 시스템 대역폭을 세 개로 분할한 서브밴드,  $w_1, w_2$  및  $w_3$ 를 위성 빔과 지상 구성요소에서 재사용하며, 각 서브밴드에 대응하는 중심 주파수는  $f_1, f_2$  및  $f_3$ 이다. 적절한 주파수 재사용을 위해  $(F - 1)$ 개, 즉 본 예제에서는 2개의 지상 셀을 위성 빔 내에 할당하여 위성 빔에 할당된 주파수 대역과 다른 대역을 할당하여 사용한다.

예를 들어, 중심 주파수  $f_1$ 을 사용하는 위성 빔 내에는 중심 주파수  $f_2$  및  $f_3$ 를 사용하는 두 개의 지상 셀이 있을 것이다. 이와 같은 구성 방법으로 위성 빔과 그 내부 구성요소 간 간섭을 피할 수 있지만, 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 인접 위성 빔 내에서 동일한 주파수 대역을 사용하는 지상 구성요소 간 간섭이

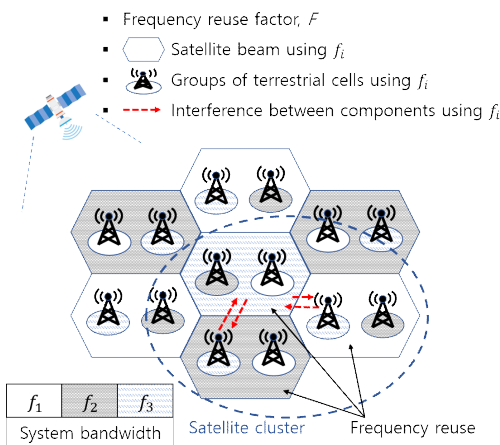


그림 1. 주파수 재사용 기법을 사용하는 ISTN 구조  
Fig. 1. Architecture of an ISTN system with frequency reusing scheme.

발생하게 된다.

### 2.2 지능형 자원할당 기법

선행 연구 [2]에서는, FRF가  $F$ 인 다중빔 위성시스템을 가정하고, 전체 시스템 대역폭을  $F$ 개의 서브밴드로 분할하여 각 서브밴드는 총  $M$  개의 구성요소(위성 빔 또는 지상 셀)가 사용하는 ISTN을 가정하였다. 즉, 모든 서브밴드를 재사용하는 구성요소의 개수는 동일하다는 가정이 적용되었다. 이러한 ISTN에서 간섭과 전체 소비 전력을 최소화하고, 시스템 용량 내에서의 스펙트럼 효율을 최대화 하는 방법으로 자원을 할당하기 위하여, 다음 수식 (1)과 같은 목적함수를 사용하였다.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^F w_i \leq W, w_i \geq 0, \\ & \underset{w_i}{\operatorname{argmin}} P_{\text{sum}} \text{ s.t. } \gamma_i^j \geq 0, \forall i, j, \\ & P_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^F \sum_{j=1}^M (P_t)_i^j \leq P_{\text{max}}, \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\gamma_i^j$ 는  $f_i$ 를 사용하는  $j$  번째 구성요소에 대한 비트 에너지 대 잡음 스펙트럼 밀도 비율( $E_b/N_0$ )이다.  $(P_t)_i^j$ 는  $f_i$ 를 사용하는  $j$  번째 위성 빔 또는 지상 셀에서의 송신전력을 의미한다. 위의 목적함수의 해를 찾기 위해서는 convex 최적화와 같은 최적화 알고리즘을 적용할 수 있다<sup>2)</sup>.

그러나, 대부분의 최적화 알고리즘에서 해를 찾기 위한 반복과정으로 인하여 많은 복잡도가 요구되며, 특히 유효한 해만을 찾기 위하여 요구조건을 추가할수록 그 복잡도는 더 증가하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 선행연구 [2]에서는 최적의 해를 찾는 과정을 몇 개의 세부 단계로 구분하고 간단한 선형 기계학습 알고리즘을 사용하여, 정확도를 높이면서도 복잡도를 줄일 수 있는 방법을 사용하였다. 본 논문에서는 해당 기법을 지능형 자원할당(intelligent resource allocation method; IRS) 기법으로 명명하기로 한다.

그림 2의 알고리즘과 그림 3을 참조하여 IRS 기법의 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 IRS에서는 각 구성요소들의 트래픽 요구 데이터로 구성된 벡터  $\mathbf{t}$ 를 입력으로 받는다. 여기서  $\mathbf{t}$ 를 구성하는  $(R_b)_i^j$ 는  $f_i$ 를 사용하는  $j$  번째 구성요소의 트래픽 요구량을 의미한다. 미리 훈련된 가중치 벡터  $\mathbf{c}$ 를 가진 퍼셉트론에  $\mathbf{t}$ 가 입력되면, 현재 간섭 요건 하에서 시스템 용

IRS Algorithm	
<b>Input:</b>	$\mathbf{t} = [(R_b)_1^1 \ (R_b)_1^2 \ \dots \ (R_b)_1^M \ \dots \ (R_b)_F^1 \ \dots \ (R_b)_F^M]^T$
<b>Output:</b>	$\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_F]^T$ ,
	$\mathbf{p} = [(P_t)_1^1 \ (P_t)_1^2 \ \dots \ (P_t)_1^M \ (P_t)_F^1 \ \dots \ (P_t)_F^M]^T$
1:	$\mathbf{v} = [1 \ \mathbf{t}]$ , $y = \text{sgn}(\mathbf{c}^T \mathbf{v})$ Perceptron
2:	if $y = -1$ ▶ classification
3:	$\mathbf{U} = \text{null}(\mathbf{c}^T \mathbf{v})$
4:	$\mathbf{t}' \leftarrow \text{Proj}_{\mathbf{U}}(\mathbf{t})$ ▶ Projection
5:	$\mathbf{v} \leftarrow [1 \ \mathbf{t}']$
6:	end if
7:	$\mathbf{w} \leftarrow \mathbf{W}_{\text{lin}} \mathbf{v}$ ▶ bandwidth allocation
8:	Estimate $\mathbf{p}$ ▶ power allocation
9:	If $(P_t)_i^j < 0, \forall i, j$ or $P_{\text{sum}} > P_{\text{max}}$ then
10:	$\mathbf{U}' = \text{null}(\mathbf{c}^T \mathbf{v} - \alpha)$
11:	$\mathbf{t}'' \leftarrow \text{Proj}_{\mathbf{U}'}(\mathbf{t}')$
12:	$\mathbf{v} \leftarrow [1 \ \mathbf{t}'']$
13:	$\mathbf{w} \leftarrow \mathbf{W}_{\text{lin}} \mathbf{v}$
14:	Estimate $\mathbf{p}$
15:	end if

그림 2. 지능형 자원할당 기법 알고리즘  
Fig. 2. Algorithm of the IRS.

량 내에서 서비스 제공이 가능한지 분류된다 (line 1).

만약  $\mathbf{t}$ 가 시스템 용량을 초과하면 (line 2), 서비스 제공이 가능하도록  $\mathbf{t}$ 를 퍼셉트론의 문턱 공간 (Threshold space)까지 감소시키는 작업을 수행한다. 퍼셉트론의 문턱 공간  $\mathbf{U}$ 는  $\mathbf{c}^T \mathbf{v}$ 의 영공간이 되고 (line 3),  $\mathbf{t}$ 를  $\mathbf{U}$ 에 투영시킴으로써(Projection) 시스템 용량 내에서 트래픽 제공이 가능할 수 있도록 트래픽 요구량을 조정한다 (line 4). 트래픽 요구량이 시스템 용량 내로 조정되면, 미리 학습된 선형 회귀 기계학습을 통해 얻어진 가중치 행렬,  $\mathbf{W}_{\text{lin}}$ 을 통해 최소 전력을 사용하는 최적의 대역폭으로 구성된 벡터,  $\mathbf{w}$ 를 출력한다 (line 7).

또, 각 구성요소의 할당된 대역폭별 최적 전력 값으로 구성된 벡터  $\mathbf{p}$ 는 선형시스템의 해를 찾는 과정으로 구하고 (line 8), 그 결과가 유효한지 확인한다. 선형시스템의 해를 구하는 과정은 다음 III장에서 상세히 설명하기로 한다. 유효하지 않은 전력 값이 도출됐을 경우에는 (line 9), 트래픽 요구량을 조절하기 위하여 문턱 공간의 값을  $\alpha$ 만큼 감소시키면서 (line 10) 다시 투영과정을 수행하고, 조건이 만족될 때까지 위 과정을 반복한다.

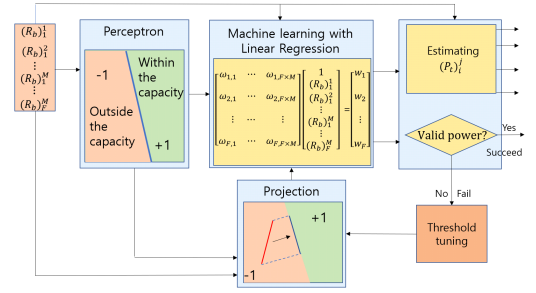


그림 3. 지능형 자원할당 기법의 작동 원리  
Fig. 3. Operational principle of the IRS.

### III. 간섭 시나리오 및 모델링

#### 3.1 간섭 시나리오

그림 4는  $F$ 가 4인 ISTN에서 간섭 시나리오를 보여 준다. 그림에서 동일한 주파수 대역을 사용하는 각 위성 빔과 지상 셀은 동일한 패턴으로 표기되어 있다.

인접한 빔에 속하면서 동일한 주파수 대역을 사용하는 지상 셀과 위성 빔 간에는 간섭이 발생한다. 이 하 본 논문에서 위성 빔 또는 지상 셀들은 모두 구성 요소(component)로 부르기로 한다.  $(G_t)_i^{k,j}$ 와  $(G_r)_i^{k,j}$ 는 각각  $f_i$ 를 사용하는  $k$  번째 구성요소에서  $j$  번째 구성요소까지의 간섭 경로로의 송신 및 수신안테나 이득이다. 또,  $(G_t)_i^{k,k}$  및  $(G_r)_i^{k,k}$ 는  $f_i$ 를 사용하는  $k$  번째 구성요소에서의 희망 경로로의 안테나 이득이다.

이와 같은 상황에서  $I_i^j$ 를  $f_i$ 를 사용하는  $j$  번째 구성요소에서 받는 간섭으로 정의하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_i^j = \sum_{k=1, k \neq j}^M ((G_t)_i^{k,j} (G_r)_i^{k,j} h^{k,j} (P_t)_i^k), \quad (2)$$

여기서,  $h^{k,j}$ 는  $k$  번째 구성요소에서  $j$  번째 구성요소까지의 경로손실, 강우감쇠 및 기타 페이딩 등을 포함하는 채널 전력(channel power) 값이다.

예를 들어, 그림 4를 참조하여  $f_2$ 를 사용하는 위성 빔과 인접한 다른 두 지상 셀과의 간섭을 고려해보자. 그림에서  $C_1$ 은  $f_2$ 를 사용하는 첫 번째 구성요소로 위성 빔을 의미하며,  $C_2$ ,  $C_3$  및  $C_4$ 는  $C_1$ 에 인접한 3개의 서로 다른 구성요소로 동일한 주파수  $f_2$ 를 사용하는 지상 셀들을 의미한다. 이러한 환경에서  $C_1$ 의 지구국에서는  $C_2$ ,  $C_3$  및  $C_4$ 에서 송신되는 전력으로 인하여 간섭이 발생한다.

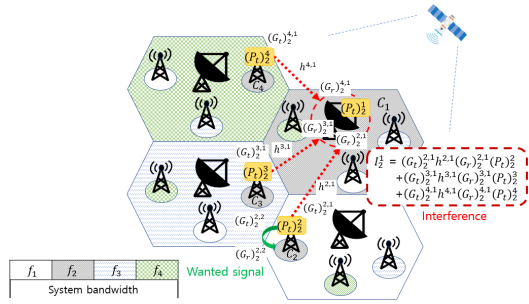


그림 4. 위성 클러스터 내에서의 간섭 시나리오  
Fig. 4. Interference scenario in a satellite cluster.

따라서  $C_2$ ,  $C_3$  및  $C_4$ 에서 위성 지구국 방향으로의 이득 값을 고려하면, 간섭량은 각각  $(G_t)_2^{2,1}(G_r)_2^{2,1}h^{2,1}(P_t)_2^2$ ,  $(G_t)_2^{3,1}(G_r)_2^{3,1}h^{3,1}(P_t)_2^3$  및  $(G_t)_2^{4,1}(G_r)_2^{4,1}h^{4,1}(P_t)_2^4$ 이 된다. 이를 통해  $C_1$ 의 지구국에서 받는 총 간섭량  $I_2^1$ 은  $(G_t)_2^{2,1}(G_r)_2^{2,1}h^{2,1}(P_t)_2^2 + (G_t)_2^{3,1}(G_r)_2^{3,1}h^{3,1}(P_t)_2^3 + (G_t)_2^{4,1}(G_r)_2^{4,1}h^{4,1}(P_t)_2^4$ 임을 알 수 있다.

### 3.2 희망 경로와 간섭 경로 간의 이득 비에 따른 할당 대역폭과 전력의 관계

전력할당 알고리즘에서는 수식 (1)의 목적함수를 만족시키기 위하여, 요구되는 트래픽 양에 따른 대역폭을 할당한다. 또한, 주어진 조건에 따르면 이때 할당되는 대역폭은 최소전력을 소비할 수 있도록 하여야 한다. 할당하는 전력량이 커질수록 에너지 효율이 떨어질 뿐만 아니라, 다른 구성요소로의 간섭도 증가하기 때문이다. 본 절에서는 희망 경로와 간섭 경로 간의 이득 비에 따라 최대 시스템 용량을 달성할 수 있는 대역폭과 전력간의 관계식을 유도하여, 최적화 과정 중 이 관계식을 만족하면서 최소의 전력이 할당될 수 있도록 하는 방법에 대해 기술한다.

희망 경로와 간섭 경로 간의 이득 비에 따른 최적의 전력할당 공식을 선형 시스템으로 유도하기 위해,  $f_i$ 를 사용하는  $k$  번째 구성요소에서 수신된 전력,  $(P_r)_i^k$ 를 송신전력과의 관계식으로 표현하면 다음과 같다.

$$(P_r)_i^k = (G_t)_i^{k,k}(G_r)_i^{k,k}h^{k,k}(P_t)_i^k. \quad (3)$$

또, 위 수식 (3)을 이용하여, 수식 (2)에서 간섭  $I_j^i$ 를  $(P_t)_i^k$ 와  $(P_r)_i^k$ 으로 나타내면 다음과 같다.

$$I_j^i = \sum_{k=1, k \neq j}^M \left( (G_t)_i^{k,j}(G_r)_i^{k,j}h^{k,j} \frac{(P_r)_i^k}{(G_t)_i^{k,k}(G_r)_i^{k,k}h^{k,k}} \right), \quad (4)$$

위 수식 (4)에서  $k$  번째 구성요소가  $j$  번째 구성요소로 주는 간섭 경로 대 희망 경로 상의 이득 비  $g_i^{k,j}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$g_i^{k,j} = \frac{(G_t)_i^{k,j}(G_r)_i^{k,j}h^{k,j}}{(G_t)_i^{k,k}(G_r)_i^{k,k}h^{k,k}}. \quad (5)$$

위 식 (3) - (5)를 이용하면 시스템에서 요구되는 신호 대 잡음비에 관한 다음의 선형시스템을 얻을 수 있다. 상세한 유도과정은 부록을 참고할 수 있다.

$$\Delta_i [\gamma_i^1 \gamma_i^2 \dots \gamma_i^M]^T = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T, \quad (6)$$

여기서,  $\gamma_i^k = (E_b)_i^k / N_0$  이고,

$$\Delta_i = \begin{bmatrix} 1/\rho_i^1 & -g_i^{2,1}\eta_i^2 - g_i^{3,1}\eta_i^3 \dots - g_i^{M,1}\eta_i^M \\ -g_i^{1,2}\eta_i^1 & 1/\rho_i^2 & 0 & \dots & 0 \\ -g_i^{1,3}\eta_i^1 & 0 & 1/\rho_i^3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_i^{1,M}\eta_i^1 & 0 & 0 & \dots & 1/\rho_i^M \end{bmatrix}. \quad (7)$$

위 식 (7)에서  $\eta_i^j = (R_b)_i^j / w_i$ 로, 스펙트럼 효율을 나타내는 값이며 시스템에서 사용되는 변조 및 부호 방식(modulation and coding; MODCOD)에 의해 결정되는 값이다. 또  $\rho_i^j = (E_b)_i^j / ((I_0)_i^j + N_0)$ 이고,  $(E_b)_i^k$ 는  $f_i$ 를 사용하는  $k$  번째 구성요소의 비트 에너지를,  $(I_0)_i^j$ 는  $f_i$ 를 사용하는  $k$  번째 구성요소의 간섭 에너지 스펙트럼 밀도를,  $N_0$ 는 잡음 에너지 스펙트럼 밀도를 의미한다. 즉,  $\rho_i^j$ 는  $f_i$ 를 사용하는  $j$  번째 구성요소에서 요구하는 비트 에너지 대 간섭 더하기 잡음 전력 스펙트럼 밀도 비가 된다.

### 3.3 최대 시스템 용량 달성을 위한 전력과 대역폭

위 절에서는 시스템에서 할당해야 하는 주파수 대역폭  $w_i$ 와 각 구성요소들에 대한  $\gamma_i^k$  값과의 관계를 선형 시스템으로 유도한 바 있다. 또 각 구성요소 당 송신전력은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$(P_i)^j = \frac{\gamma_i^j N_0 (R_b)_i^j}{G_i^{j,j}}, \quad (8)$$

식 (6)을 참조하면,  $\eta_i^j$ 값과  $\rho_i^j$ 값에 따라,  $\gamma_i^k$ 을 구할 수 있다. 그러나, 대역폭  $w_i$ 에 따라 결정되는  $\eta_i^j$ 값과,  $\gamma_i^j$ 에 따라 결정되는  $\rho_i^j$ 값은 아래와 같이 사논의 정리에 따라 서로 의존적인 관계에 있다는 것을 알 수 있다. 즉,  $\eta_i^j$ 값은 수신 전력비를 이용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_i^j = \log_2\left(\left(\frac{(P_r)_i^j}{(I_i^j + N_i)}\right) + 1\right), \quad (9)$$

여기서, 수신 전력비인  $(P_r)_i^j / (I_i^j + N_i)$ 는  $\rho_i^j$ 를 이용하여 나타내면 아래와 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{(P_r)_i^j}{I_i^j + N_i} = \frac{(E_b)_i^j (R_b)_i^j}{((I_0)_i^j + N_0) w_i} = \rho_i^j \eta_i^j, \quad (10)$$

따라서,

$$\rho_i^j = \frac{2^{\eta_i^j} - 1}{\eta_i^j}. \quad (11)$$

위와 같이  $\eta_i^j$ 와  $\rho_i^j$ 값은 서로 의존적인 관계이기 때문에, 전수 조사(exhaustive search; ES)과정 또는 convex 최적화 알고리즘과 같은 반복적 조사 과정이 필요하다. 선행연구 [2]에서는 II.2절에서 기술된 바와 같이, 반복적 조사과정 대신에 간단한 선형 기계학습 알고리즘을 접목한 IRS 기법을 제안한 바 있다.

위 수식 (10)은 이론적으로 달성 가능한 값이기 때문에, 실제 시스템에서 적용 가능한 MODCOD에 대한  $\eta_i^j$ 값을 사용하는 것이 타당하다. 아래 그림 5는 DVB-S2X 시스템에 정의된 다양한 MODCOD에 대한  $\eta_i^j$ 값 대비  $\rho_i^j$ 값을 나타낸 그래프이고, 표 1은 일부 MODCOD들에 대한  $\eta_i^j$ 값과  $\rho_i^j$ 값을 나타낸 것이며 실제 자원할당 알고리즘에서 룩업테이블로 활용할 수 있다<sup>8)</sup>. 또는 위성시스템의 성능 목표를 만족할 수 있도록 비선형위성채널에서의  $\eta_i^j$ 값의 최저치에 대한 최대  $\rho_i^j$ 값을 커브피팅한 수식을 적용할 수도 있다<sup>9),10)</sup>.

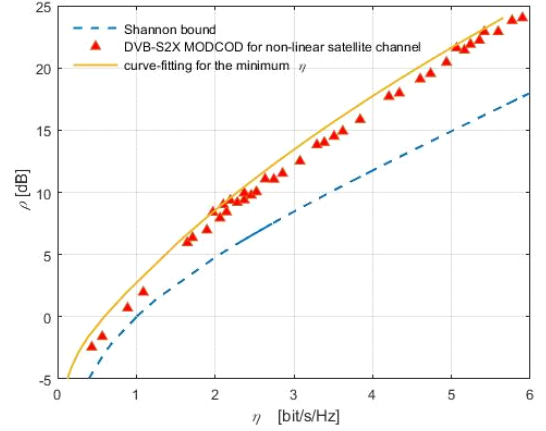


그림 5. DVB-S2X MODCOD 별 스펙트럼 효율 대 신호 대 잡음 및 간섭 비  
Fig. 5. Spectral efficiency versus signal to noise and interference ratio of DVB-S2X MODCOD.

표 1. DVB-S2X MODCOD 별 스펙트럼 효율 대 신호 대 잡음 및 간섭 비  
Table 1. Spectral efficiency versus signal to noise and interference ratio of DVB-S2X MODCOD.

$\eta_i^j$	$\rho_i^j$ [dB]	MODCOD
0.43	1.17	QPSK 2/9
⋮	⋮	⋮
2.52	6.02	16APSK 23/36
⋮	⋮	⋮
5.90	16.31	256APSK 3/4

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 비교 분석

##### 4.1 시뮬레이션 환경

본 연구에서는 ISTN 시스템에서 다양한 간섭 조건 하에서 여러 가지 성능을 시뮬레이션 한 결과를 제시한다. 전체 시스템 대역폭이 500 MHz 라고 가정하고, 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. 시스템이 유해한 간섭 환경 하에서 적절한 서비스가 제공될 수 있도록 적응형 부호 및 변조(adaptive coding and modulation; ACM) 방식을 사용하였고, 시뮬레이션에 적용된 ACM 방식으로는 DVB-S2X에서 정의된 MODCOD을 적용하였다<sup>8)</sup>. 또한, 각 구성요소에서 요구하는 트래픽 요구량  $(R_b)_i^j$ 은 정규 분포,  $G(\mu, \sigma^2)$  (Mbps),  $(R_b)_i^j > 0$ ,  $\sigma = 30$ 을 가진다고 가정하였고, IRS 기법에서의 최대 투영 횟수는 10회로 제한하였다.

먼저, 2절에서는 간섭 환경이 전체 시스템 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 여러 가지 간섭 조건

하에서 시뮬레이션을 진행하였다. 또, 3절에서는  $F$ 가 3에서 4로 변화할 때 시스템 성능이 어떻게 변화하는지 알아보기 위한 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 마지막으로, 4절에서는 구성요소 간 간섭이 모두 존재하는 경우, 기존 convex 최적화 방법과의 성능을 비교분석하였다.

4.2 간섭 조건에 따른 성능 시뮬레이션

본 절에서는 자원할당 성능 변화를 여러 가지 간섭 조건에 따라 비교 분석하였다. 이때, 간섭 조건에 따른 상호 비교를 위하여  $F = 4$ 로 고정하고, 동일한 주파수를 사용하는 위성 빔 간의 간섭과 지상 셀 간의 상호 간섭은 없다고 가정하였다. 시뮬레이션에서는 아래 표 2와 같은 다양한 간섭 조건을 설정하였다. 표 2의  $g_i^{k,j}$  값은 간섭 경로 대 희망 경로 상의 이득 비를 의미하기 때문에, 그 값이 작으면 간섭이 적다는 것을 의미하고, 값이 크면 간섭이 크다는 것을 의미한다. 예를 들면, Case 1은 간섭이 가장 심각하게 발생하는 경우에 해당하며, Case 6는 상호간의 간섭이 가장 적은 경우를 의미한다.

본 절의 목적은 간섭 조건이 변화할 때, 자원할당의 성능이 어떻게 변화하는지 관찰하는데 있으므로, 수식 (1)을 만족시키는 해를 찾기 위한 방법으로 ES 방식과 IRS를 이용한 방식을 적용하였다.

그림 6은  $F = 4$  일 때  $\mu = E[R_b]$  즉, 각 구성요소당 평균 요구 트래픽 값의 변화에 따른 두 가지 방식의 자원할당 성공률을 비교한 그래프이다. ES 방식에서는  $\mu$ 가 증가할수록 더 많은 전력이 요구되고, 이는 상호 구성요소간의 간섭이 증가하게 됨을 의미하기 때문에 시스템 용량 내에서 할당이 불가능한 경우가 점점 많아지게 되어, 모든 경우에서 트래픽 요구량이 증가할수록 할당 성공률이 급격히 감소하게 된다는 것을 알 수 있다. 특히 Case 1의 경우 관찰된 모든 구

표 2. 시뮬레이션에서 사용된 위성 및 지상 요소간의 상호 간섭 조건  
Table 2. Interference condition between satellite and terrestrial components during the simulation.

	$g_i^{j,k}$ (위성→지상)	$g_i^{k,j}$ (지상→위성)
Case 1	0.50 (-3.01 dB)	0.20 (-6.99 dB)
Case 2	0.25 (-6.02 dB)	0.10 (-10.00 dB)
Case 3	0.20 (-6.99 dB)	0.08 (-10.97 dB)
Case 4	0.15 (-8.24 dB)	0.06 (-12.22 dB)
Case 5	0.10 (-10.00 dB)	0.04 (-13.98 dB)
Case 6	0.05 (-13.01 dB)	0.02 (-16.99 dB)

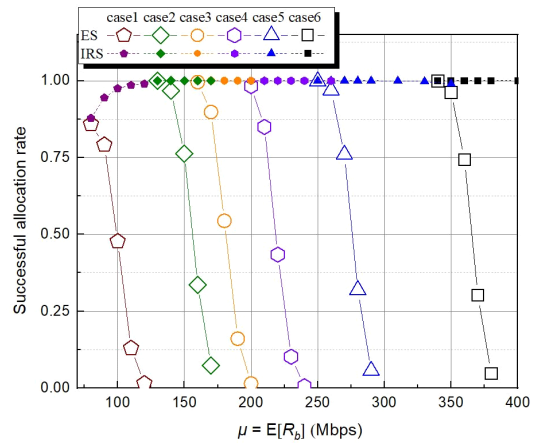


그림 6. 간섭 환경에 따른 자원할당 성공률  
Fig. 6. Successful resource allocation rate according to interference condition.

간에서 100%의 할당 성공률을 달성하지 못한다는 것을 알 수 있다.

IRS 방식은  $\mu$ 가 증가하여 시스템 용량 내에서 할당이 불가능할 경우에는 투영 방식을 이용하여 자원할당이 가능한 수준으로 트래픽 양을 감소시키기 때문에 거의 100%의 할당 성공률을 제공할 수 있다. 단, Case 1의 경우 평균 요구 트래픽 대비 표준편차가 상대적으로 큰 구간에서는 IRS 방식에서 적용하고 있는 투영 기법이 효과적으로 동작하지 않는다는 것을 알 수 있다.

그림 7은  $\mu$ 값의 변화에 따른 시스템에서 제공되는 평균 스펙트럼 효율을 비교한 그래프이다.

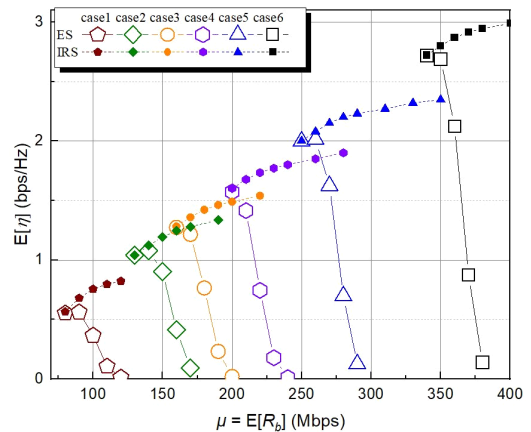


그림 7. 간섭 환경에 따른 평균 스펙트럼 효율  
Fig. 7. Average spectral efficiency according to interference condition.

동일한 조건에서, ES 방식에서는  $\mu$ 가 증가할수록 자원할당 성공률이 감소하여, 서비스 제공이 불가능하므로 시스템에서 제공되는 서비스의 스펙트럼 효율도 낮아진다. 반면, IRS 방식은  $\mu$ 가 증가하더라도, 제공 가능한 범위 내에서 자원할당을 수행하기 때문에 시스템에서 제공하는 스펙트럼 효율이 일정 범위 내에서 증가하게 된다. 단, IRS 방식에서 모든 트래픽 요구량에 대해 투영이 실시되어야 할 정도로 트래픽 요구량이 증가하게 되면, 트래픽 요구량에 상관없이 모든 서비스는 시스템 용량 내에서 제공되기 때문에 최대 스펙트럼 효율 값의 증가는 둔화된다는 것을 알 수 있다.

그림 8은  $\mu$ 값의 변화에 따라 자원할당이 성공했을 때, 시스템에서 소비되는 평균 에너지를 나타낸 그래프이다. 두 방식 모두  $\mu$ 가 증가할수록 상호 구성요소 간의 간섭이 증가하므로 시스템에서 더 많은 에너지를 소비하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, IRS 방식의 경우,  $\mu$ 가 증가할수록 성공적인 자원할당을 위해 투영이 발생하여, 시스템에서 제공 가능한 용량 범위 내에서만 자원을 할당하기 때문에 어느 일정 범위 이상에서는 거의 항상 일정한 전력만을 사용하게 된다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 IRS 방식에서  $\mu$ 가 증가함에 따른 평균 투영 횟수를 보여주는 그래프이다. 동일한 조건에서,  $\mu$ 가 증가할수록 성공적인 자원할당을 위해 발생하는 평균 투영 횟수가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 10과 그림 11은 IRS 방식에서  $\mu$ 에 따른 평균

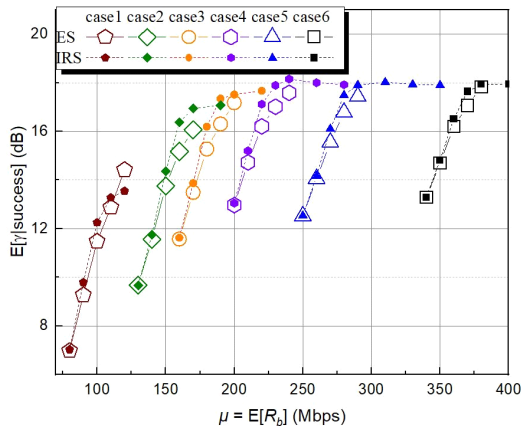


그림 8. 자원할당에 성공했을 경우 간섭 환경에 따른 평균 요구 에너지  
Fig. 8. Average required energy according to interference condition under the successful resource allocation.

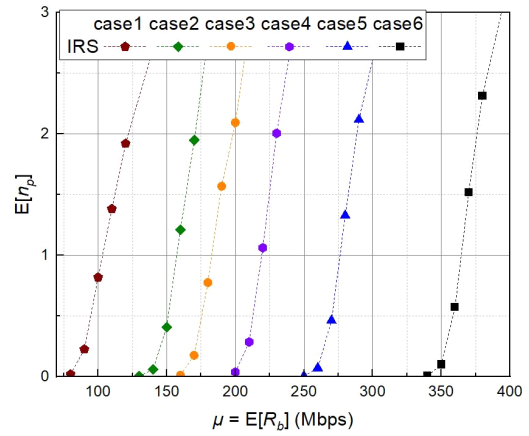


그림 9. 평균 투영 횟수  
Fig. 9. Average number of projections.

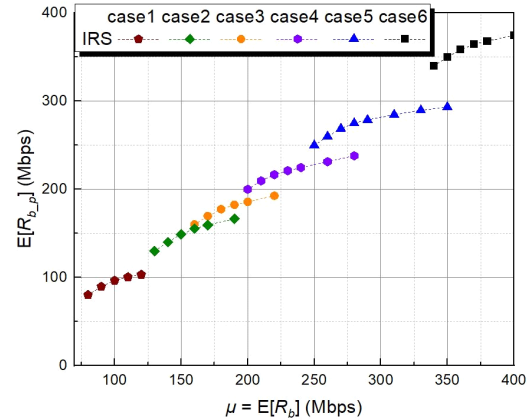


그림 10. 평균 트래픽 공급량  
Fig. 10. Average traffic supply.

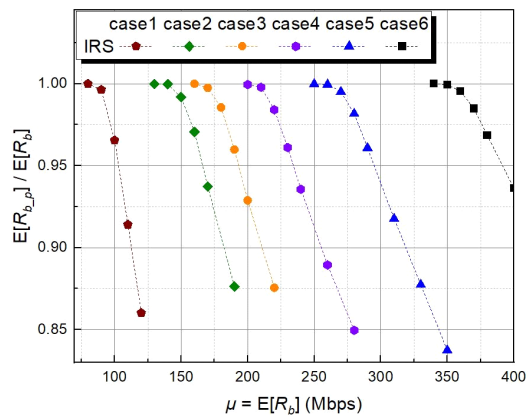


그림 11. 트래픽 요구량 대 공급량 비  
Fig. 11. Traffic demand to supply rate.



트래픽 공급량,  $E[R_{b,p}]$ 과 이를 비율로 나타낸 그래프이다. 동일한 조건에서,  $\mu$ 가 증가할수록 성공적인 자원할당을 위해  $\mu$ 대비 제공할 수 있는 평균 트래픽 공급량은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 간섭이 증가할수록  $\mu$ 가 증가함에 따라 시스템에서 요구하는 트래픽 요구량 대 제공 가능한 트래픽 공급량 비율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고, ES 방식에서의 자원할당 성공률이 5-10% 정도로 낮은 경우에도 IRS 방식을 이용하면 요구 트래픽의 약 80-90% 수준의 용량으로 서비스 제공이 가능하게 된다는 것을 알 수 있다.

### 4.3 주파수 재사용 인자에 따른 성능 시뮬레이션

본 절에서는  $F$ 의 변화에 따른 자원할당 성능을 분석한다. 위 절과 마찬가지로, 자원을 할당하기 위해 수식 (1)의 목적함수를 사용하였고, 동일한 주파수를 사용하는 위성 범 간의 간섭과 지상 셀 간의 상호 간섭은 없다고 가정하였다.

그림 12-14는 표 2의 Case 2와 Case 6 두 가지 간섭 상황에서  $F$ 가 3에서 4로 변화함에 따른 자원할당 성능을 나타낸 그래프이다. Case 6은 구성요소 간 간섭이 가장 적게 발생하는 경우에 해당하며, Case 2는 Case 6에 비해 구성요소 간 간섭이 심각하게 발생하는 경우에 해당한다.

그림 12는 전체 시스템에서 요구되는 총 트래픽 양,  $(R_b)_{total}$ 에 따른 두 가지 방식의 자원할당 성공률을 비교한 그래프이다. Case 2와 Case 6 모두  $F$ 가 3에서 4로 변화할 때 시스템에서 더 많은 트래픽 요구량을 수용할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한, Case 6

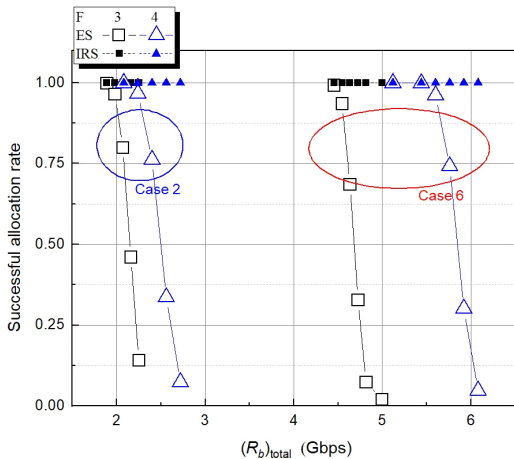


그림 12.  $F$ 에 따른 자원할당 성공률  
Fig. 12. Successful resource allocation rate according to  $F$ .

의 경우 Case 2의 경우보다 상호 간섭량이 적기 때문에  $F$ 의 증가에 따른 수용 가능한 트래픽 양의 변화가 더 크다는 것을 알 수 있다.

그림 13은 IRS 방식에서  $(R_b)_{total}$ 에 따른 시스템에서 제공되는 총 트래픽 공급량,  $(R_{b,p})_{total}$ 을 비교한 그래프이다.  $F$ 가 3에서 4로 변화함에 따라 주파수 자원의 효율적 활용을 통하여 더 많은 트래픽 양을 공급하게 될 수 있다는 것을 알 수 있다. 또, 상호 간섭량이 적을수록  $F$ 의 증가에 따른 트래픽 공급량의 향상도가 더 크게 된다.

그림 14는  $(R_b)_{total}$ 에 따라, 자원할당이 성공했을 때, 시스템에서 소비되는 평균 에너지를 나타낸 그래

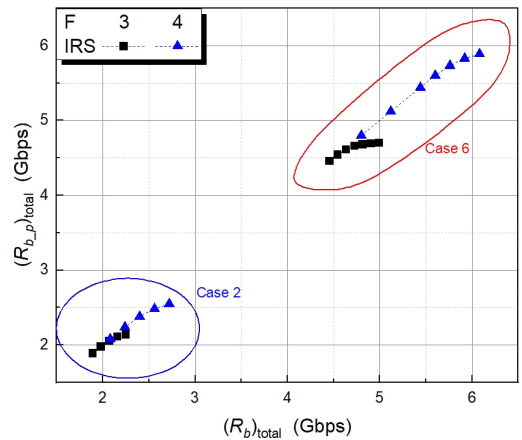


그림 13.  $F$ 에 따른 총 트래픽 공급량  
Fig. 13. Total traffic supply according to  $F$ .

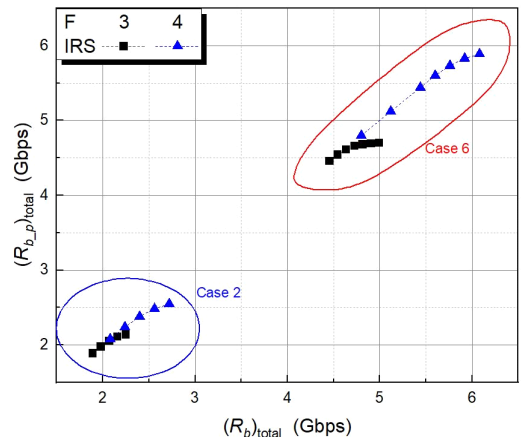


그림 14. 자원할당에 성공했을 경우  $F$ 에 따른 평균 요구 에너지  
Fig. 14. Average required energy according to  $F$  under the successful resource allocation.

프이다. ES 및 IRS 방식 모두  $F$ 가 3에서 4로 변화함에 따라 평균 요구 에너지가 감소하게 됨을 확인할 수 있다. 또, 상호 간섭이 적은 Case 6의 경우에  $F$ 의 증가에 따른 에너지 감소 효과가 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 즉,  $F$ 가 증가할수록 각 구성요소에서 보다 적은 에너지를 소비하면서도 전체 시스템에서 더 많은 트래픽 용량을 제공할 수 있다는 것을 알 수 있다.

#### 4.4 보편적 간섭 조건 하에서 기존 convex 최적화 방법과의 성능 비교

본 절에서는 각 구성요소 간 간섭(interference between components; IC)이 모두 존재할 경우에 대한 ES 방식, IRS 방식 및 기존의 convex 최적화 기법에 대한 시뮬레이션 결과를 비교한다. 기존의 convex 최적화 기법으로는 참고문헌 [7]에서 다중 빔 위성시스템에서 송신전력과 대역폭을 최적화(optimal power optimal bandwidth; OPOB)하는 기법으로 제안된 방법을 이용하였다. 이때  $F = 4$  이고, 2절에서 사용한 Case 4에 동일 구성요소 간 간섭을 추가하여 아래 표 3과 같은 조건으로 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 15는 위 세 가지 방식에 대하여 구성요소 간 간섭 유무에 따른 평균 스펙트럼 효율을 비교한 그래

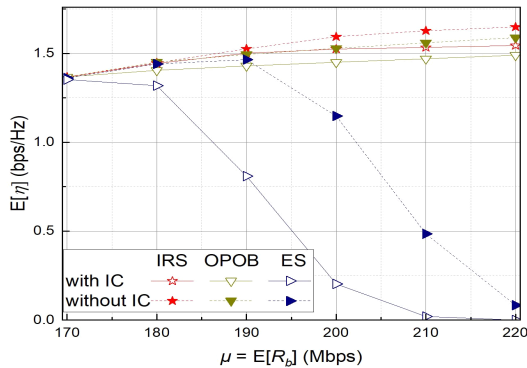


그림 15. 동일 구성요소 간 간섭 유무에 따른 평균 스펙트럼 효율  
Fig. 15. Average spectral efficiency according to the interference condition.

표 3. 시뮬레이션에서 사용된 구성요소 간 간섭 조건  
Table 3. Interference condition between components during the simulation.

	$g_i^k$
위성 → 지상	0.15 (-8.24 dB)
지상 → 위성	0.06 (-12.22 dB)
위성 ↔ 위성, 지상 ↔ 지상	0.02 (-16.99 dB)

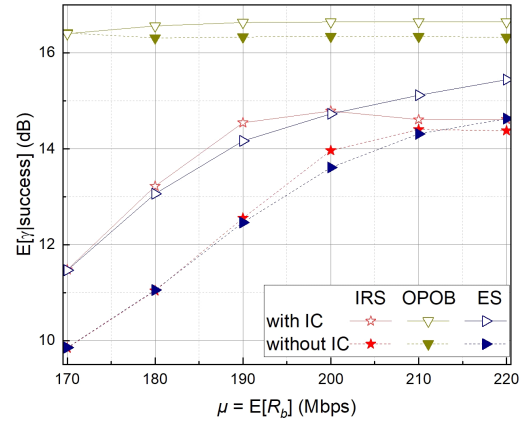


그림 16. 자원할당에 성공했을 경우 구성요소 간 간섭 유무에 따른 평균 요구 에너지  
Fig. 16. Average required energy according to the interference condition under the successful resource allocation.

프이다. 그림에서 ‘with IC’는 각 구성요소 간 간섭이 모두 존재하는 경우이고, ‘without IC’는 위성 빔 간 또는 지상 셀 간 간섭이 존재하지 않고, 2-3절에서와 같이 위성 및 지상 요소 간의 간섭만 존재하는 경우이다. 결과를 보면, 동일 트래픽 요구량 대비 평균 스펙트럼 효율은 IRS 방식이 가장 높다는 것을 알 수 있다. ‘with IC’의 경우 ‘without IC’의 경우와 비교하여 평균 스펙트럼 효율이 감소한다는 것을 알 수 있으며, 그 감소폭은 ES에서 더 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 16은 자원할당이 성공했을 때, 구성요소 간 간섭 유무에 따른 시스템에서 소비되는 평균 에너지를 비교한 그래프이다. OPOB 방식은 소비전력을 최소화하지 않고 최적의 대역폭과 전력을 할당하기 때문에 모든 트래픽 요구량 구간에서 소비 에너지가 가장 높다는 것을 알 수 있다. 이와 반대로, ES 방식과 IRS 방식은 소비전력을 최소화하면서 최적의 대역폭과 전력을 할당하기 때문에, 트래픽 요구량이 증가함에 따라 소비 에너지가 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 세 가지 방식 모두 각 구성요소 간 간섭이 모두 존재하는 경우, 간섭이 존재하지 않는 경우와 비교하여 평균 소비 에너지가 증가한다는 것을 알 수 있다.

## V. 결론 및 고찰

본 논문에서는 주파수 재사용 기법을 사용하는 ISTN에서 효율적으로 활용할 수 있는 자원할당 기법으로 선형방정식과 선형 기계학습을 결합한 방식에 대하여 살펴보고, 시스템에서 각 구성요소 간 발생하

는 간섭을 모델링하였다. 또한 간섭이 할당 대역폭과 전력에 미치는 관계를 수식을 통해 구체적으로 제시하였다. 그리고 여러 가지 간섭 조건을 가정하여 간섭 조건 및  $F$ 의 변화에 따른 IRS 기법의 성능을 ES 기법과 비교하여 다양한 성능 평가 결과를 제시하였다.

본 논문에서 제시된 시뮬레이션 결과에 따르면, 간섭 상황이 심각한 경우에는 주파수 재사용율이 증가하여도 시스템의 효율향상에 기여하는 바가 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 즉, 간섭 여건을 제대로 고려하지 않은 경우, 자원할당 기법의 성능 여부와 상관없이 시스템의 전력 및 대역폭 효율이 저하된다. 따라서, 본 논문에서 제시된 다양한 시뮬레이션 결과를 참조하여, 시스템 파라미터에 따른 자원할당 기법의 성능을 시뮬레이션 할 경우, 향후 시스템 설계과정에서 링크버짓 파라미터와  $F_{\text{값}}$  등을 최적으로 설정하는 데 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

### 부 록

본 부록에서는, 수식 (3) - (5)를 이용하여  $f_i$ 를 사용하는 구성요소들에서의 간섭 전력 대 잡음전력 비를 전개함으로써, 수식 (6)의 선형 시스템이 유도될 수 있음을 증명한다.

수식 (5)를 수식 (4)에 삽입하고, 양변에 잡음 전력  $N_i$ 로 나누어 간섭 대 잡음 전력비를 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_i^j}{N_i} = \sum_{k=1, k \neq j}^M \left( \frac{g_i^{k,j} (P_r)_i^k}{N_i} \right), \quad (\text{A.1})$$

여기서,  $N_i$ 는  $w_i$ 에서의 잡음전력이다. 이제 수식 (A.1)의 양변을  $w_i$ 로 나누면, 간섭 대 잡음 에너지 비로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_i^j/w_i}{N_i/w_i} = \frac{(I_0)_i^j}{N_0} = \sum_{k=1, k \neq j}^M \left( g_i^{k,j} \frac{(E_b)_i^k (R_b)_i^k}{N_0 w_i} \right), \quad (\text{A.2})$$

수식 (A.2)에,  $\gamma_i^k = (E_b)_i^k / N_0$ 를 대입하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{(I_0)_i^j}{N_0} = \sum_{k=1, k \neq j}^M \left( g_i^{k,j} \frac{\gamma_i^k (R_b)_i^k}{w_i} \right). \quad (\text{A.3})$$

수식 (A.3)의 왼쪽 항에 1을 더하고, 다시 빼주는 작업을 통하여 아래와 같이 나타낸다.

$$1 + \frac{(I_0)_i^j}{N_0} - 1 = \frac{(I_0)_i^j + N_0}{N_0} - 1, \quad (\text{A.4})$$

또, 수식 (A.4)를 신호 대 잡음비 값으로 표현하기 위하여 첫 번째 항의 분자, 분모에 비트 에너지,  $E_b$ 를 곱해주고 그 결과를 수식 (A.3)에 대입하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{(E_b)_i^j / N_0}{(E_b)_i^j / ((I_0)_i^j + N_0)} - 1 = \sum_{k=1, k \neq j}^M \left( g_i^{k,j} \frac{\gamma_i^k (R_b)_i^k}{w_i} \right), \quad (\text{A.5})$$

이제  $\rho_i^j = (E_b)_i^j / ((I_0)_i^j + N_0)$ 를 대입하면 다음과 같이 최적의 대역폭과 전력과의 관계식을 얻게 된다.

$$\frac{\gamma_i^j}{\rho_i^j} - \sum_{k=1, k \neq j}^M \left( g_i^{k,j} \frac{\gamma_i^k (R_b)_i^k}{w_i} \right) = 1, \quad (\text{A.6})$$

따라서,  $f_i$ 를 사용하는  $j$  번째 구성요소의  $\gamma_i^j$ 값과 해당 대역폭  $w_i$ 는 동일한 대역을 사용하는 다른 ( $M-1$ )개 구성요소의  $\gamma_i^k$ 와 요구 트래픽  $(R_b)_i^k$ 에 의해 결정되는 간섭과의 관계식으로 나타낼 수 있다.

예를 들어,  $j=1$  일 때 식 (A.6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\gamma_i^1}{\rho_i^1} - g_i^{2,1} \eta_i^2 \gamma_i^2 - \dots - g_i^{M,1} \eta_i^M \gamma_i^M = 1, \quad (\text{A.7})$$

동일한 원리로  $1 \leq j \leq M$ 인 경우에 대하여 전개하면, 식 (6)과 같은 선형 시스템을 얻을 수 있다.

### References

[1] U. Park, H. Kim, D. Oh, and B. Ku, "Interference-limited dynamic resource management for an integrated satellite/terrestrial system," *ETRI J.*, vol. 36, no. 4, pp. 519-527, Aug. 2014. (<https://doi.org/10.4218/etrij.14.0113.0079>)

[2] S. Chan, H. Lee, S. Kim, and D. Oh,

- “Intelligent low complexity resource allocation method for integrated satellite-terrestrial systems,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 5, pp. 1087-1091, May 2022. (<http://doi.org/10.1109/LWC.2022.3157062>)
- [3] K. Kang, J. Park, H. Kim, T. Hong, B. Ku, and D. Chang, “Analysis of interference and availability between satellite and ground components in an integrated mobile-satellite service system,” *Int. J. Satellite Commun. and Netw.*, vol. 33, pp. 351-366, Apr. 2015. (<https://doi.org/10.1002/sat.1100>)
- [4] G. Jo, D. Oh, S. Chan, and S. Kim, “Performance analysis of a resource allocation algorithm for an integrated satellite-terrestrial network according to frequency reuse factor,” in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 1262-1263, Pyeongchang, Korea, Feb. 2022.
- [5] M. A. Vazquez, A. Perez-Neira, D. Christopoulos, S. Chatzinotas, B. Ottersten, P. Arapoglou, A. Ginesi, and G. Tarocco, “Precoding in multibeam satellite communications: Present and future challenges,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 6, pp. 88-95, Dec. 2016. (<https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500047WC>)
- [6] H. Lee, S. Kim, and D. Oh, “Modified lagrangian method and initial point setting for satellite resource allocation,” in *Proc. JC-SAT 2021*, pp. 85-90, Busan, Korea, Oct. 2021.
- [7] M. Jia, X. Zhang, X. Gu, Q. Guo, Y. Li, and P. Lin, “Interbeam interference constrained resource allocation for shared spectrum multibeam satellite communication systems,” *IEEE Internet of Things J.*, vol. 6, no. 4, pp. 6052-6059, Aug. 2019. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2870878>)
- [8] ETSI - EN 302 307-2 V1.2.1 (2020-01), *Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications, Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X)*.
- [9] H. Lee, S. Kim, and D. Oh, “Study on the evaluation of performance objectives of satellite systems using adaptive transmissions,” *J. KICS*, vol. 45, no. 11, pp. 1878-1885, Nov. 2020. (<https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.11.1878>)
- [10] Recommendation ITU-R S.2131 - *A method for the determination of performance objectives for satellite hypothetical reference digital paths using adaptive coding and modulation*, Sep. 2019.

조 규 성 (Gyuseong Jo)



2022년 2월 : 전북대학교 전자공학부 학사  
 2022년 3월~현재 : 전북대학교 전자정보공학부 석사 과정  
 <관심분야> 전자공학, 통신공학, 이동/위성통신

짚 샷 타 (Satya Chan)



2014년 10월 : National Polytechnic Institute of Cambodia 전자공학과 학사  
 2019년 8월 : 전북대학교 전자정보공학부 석사  
 2019년 9월~현재 : 전북대학교 전자정보공학부 박사 과정  
 <관심분야> 위성통신, 무율부호, 연판정 MIMO 검출

김 수 영 (Sooyoung Kim)



1990년 2월 : 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학과 학사

1990년 2월~1991년 9월 : ETRI  
연구원

1992년 10월 : Univ. of Surrey,  
U.K 공학석사

1995년 2월 : Univ. of Surrey,  
U.K 공학박사

1994년 11월~1996년 6월 : Research Fellow, Univ. of  
Surrey, U.K

1996년 8월~2004년 2월 : ETRI 광대역무선전송연구  
팀장

2004년 3월~현재 : 전북대학교 전자공학부 교수

<관심분야> 오류정정부호화방식, coded MMO, 이동/  
위성통신

[ORCID:0000-0003-0817-2790]

구 본 준 (Bon-Jun Ku)



1995년 2월 : 경북대학교 전자  
공학과 학사

1999년 2월 : 경북대학교 전자  
공학과 석사

2010년 2월 : 충북대학교 정보  
통신공학과 박사

1999년 3월~현재 : 한국전자 통신연구원 통신미디어  
연구소 책임연구원

<관심분야> 위성통신, 무선통신

오 대 섭 (Daesub Oh)



1996년 2월 : 경북대학교 전자  
공학과 학사

1998년 2월 : 경북대학교 전자  
공학과 석사

2014년 2월 : 전북대학교 전자  
공학과 박사

2000년 7월 : LG정보통신 주임  
연구원

2000년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 전파통신, 위성통신