

군용 통신망에서의 주파수 및 편파 지정 알고리즘 튜토리얼

구본홍*, 채찬병*, 박성호**, 박휘성°, 함재현***

Tutorial on Frequency and Polarization Assignment Algorithms for Military Communication Networks

Bonhong Koo*, Chan-Byoung Chae*, Sung-Ho Park**, Hwi-Sung Park°, Jae-Hyun Ham***

요약

본 논문에서는 군용 통신망에 대한 주파수 지정 문제를 그래프 이론 관점에서 접근하여 해결하는 방법을 소개한다. 선행 연구에서 제안한 알고리즘을 본 문제에 맞게 구현하였으며, 새로운 알고리즘을 제안하여 얻은 해의 성능이 최적의 값에 거의 근접함을 증명하였다. 또한, 이중 편파 안테나의 편파를 동시에 배정하여 주파수 지정 문제 해의 성능을 극대화하는 알고리즘을 소개하였다.

Key Words : Frequency Assignment Problem, Graph Theory, Polarization, XPD, Matching Algorithm

ABSTRACT

In this paper we introduce a graph theory approach to solve the frequency assignment problem(FAP) for military communication network. Prior algorithms are implemented adaptively to the problem, and enhanced algorithms are proposed to show that their results approximately approached the optimum performance. We also proposed polarization assignment algorithms to enhance the FAP performances.

1. 서론

주파수 자원은 수요에 비해 가용범위가 매우 제한적이며, 국제적인 표준에 의한 규제를 받기 때문에 그 사용을 결정하는 과정이 까다롭다. 주파수 지정의 과정은 일정 대역의 주파수 영역을 특정 용도로 사용하는 것을 결정하는 주파수 할당(allotment)과, 할당된 대역 내의 수요자들에게 특정 주파수 자원을 지정하는 주파수 지정(assignment)으로 구분된다. 주파수 할

당의 단계는 정부 기관이 주관하며, 민간의 경우 대부분의 주파수 지정 단계 또한 정부 기관이 관여하여 결정한다.

군사 작전에 사용되는 통신망에 사용되는 주파수 자원은 군에서 직접 관리하게 되며, 작전 상황에 따라 여러 대의 장비에 동시에 주파수를 지정하는 경우가 빈번하게 발생한다. 그러나 군사목적으로 배정된 주파수 자원은 제한되어 있으며 주파수 지정에 소요되는 시간 또한 치명적인 요인이 된다. 가능한 모든 경우의

※ 본 연구는 국방과학연구소 선행핵심과제(912374101)의 지원으로 수행되었습니다.

♦ First Author : School of Integrated Technology, Yonsei University, harpeng7675@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : The 2nd R&D Institute-1, Agency for Defense Development, 7hwisung7@add.re.kr, 정회원

* School of Integrated Technology, Yonsei University, chchae@yonsei.ac.kr, 정회원

** OPENSNS, shpark@opensns.co.kr

*** The 2nd R&D Institute-1, Agency for Defense Development, mjham@add.re.kr, 정회원

논문번호 : KICS2016-10-315, Received October 17, 2016; Revised November 14, 2016; Accepted November 19, 2016

수를 따져 최적의 주파수 지정 상황을 결정하기에는 시간이 부족하며, 충분한 거리를 두고 주파수를 지정하기에는 주파수 자원이 부족하다. 따라서 적절한 알고리즘을 통해 주파수 지정을 결정하여야 한다.

본 논문은 이전의 다른 연구들로부터^[1-3] 다음과 같은 차별 점을 가진다. 첫째로 군용 통신망이 가지는 특수성을 소개하며 주파수 지정 알고리즘 개발에 어떻게 활용되는지 소개한다. 둘째로 기존의 주파수 지정 알고리즘의 아이디어를 본 문제 상황에 적용한 뒤 목적 함수에 맞게 최적화하여 효율을 높인다.^[8-9] 셋째로 이중편파 안테나를 사용하여 편파 지정 문제를 주파수 지정 문제에 접목하여 추가적인 효율을 얻는 알고리즘을 소개한다.^[10,11]

본 논문의 다음 장에서는 주파수 지정 문제와 선형 연구 알고리즘 그리고 군용 통신망에 대한 이론적 배경 및 문제 설정을 소개한다. 3장에서는 문제 상황을 그래프 문제로 치환하는 과정을 소개하며 이어지는 4장에서 새로운 주파수 지정 알고리즘을 제안한다. 편파 배정 알고리즘은 5장에서 소개되며, 6장에서 제안한 알고리즘의 성능 결과에 대한 논의를 진행하여 7장에서 마무리한다.

II. 이론적 배경 및 문제 설정

그래프 이론은 다수의 구성 요소 간의 모든 관계를 분석하여 문제를 해결하는데 응용되는 기법으로 그 자체로 활용범위가 넓어 다양하게 연구되고 있으며^[4,5], 주파수 지정 문제를 위해 활용된 선례가 있다.^[1] 이번 장에서는 선형 연구들에서 정의된 주파수 지정 문제와 알고리즘 개발의 개요에 대해 소개한다. 또한 알고리즘을 적용할 군용 통신망의 특수성을 소개하며 보다 구체적인 문제 상황을 정의한다.

2.1 주파수 지정 문제의 개요

군용 통신망을 구성하는 장비들은 간섭에 민감하다. 따라서 어느 송신기에서 송출된 신호는 송수신 안테나와 전파 환경에 의해 감쇄되어 대응되는 수신기를 제외한 모든 장비들에 검출되지 않도록 해야 한다. 이때 각각의 안테나에서 사용하는 주파수와 안테나의 편파를 조절하여 신호의 감쇄 정도를 조절할 수 있다. 이와 같이 적절히 주파수를 지정하여 간섭을 일으키지 않도록 하는 알고리즘을 찾는 문제를 주파수 지정 문제 또는 FAP (Frequency Assignment Problem)이라 한다.

주파수 지정 문제는 최적화하고자 하는 목적함수에

따라 크게 세 가지로 분류된다. 첫째는 MO(Minimum Order)-FAP로 사용되는 주파수의 개수를 최소화하고자 한다. 이는 시스템의 실제 비용에 비례하는 함수로 가장 집중적으로 연구가 진행이 되어왔다. 둘째는 MS(Minimum Span)-FAP로 사용된 총 주파수 범위를 최소화하고자 한다. 이는 주파수 지정 해의 가용성에 대한 함수로, 주파수 대역 할당이 보다 열악한 환경에서의 가용성을 판단하는 지표가 된다. 셋째는 MI(Minimum Interference)-FAP로 주파수 분리에 의한 신호 감쇄 정도를 최대화하고자 한다. 이는 통신망의 평균 품질에 대한 함수이며 가용성 및 비용에 대한 만족을 전제로 하는 문제이기에 중요도는 셋 중 가장 낮게 다루어진다.

주파수 지정 문제는 일반적으로 세 가지 제한함수를 갖는다. 첫째는 범위에 대한 제한함수이며 MS-FAP를 제외한 FAP에서 구한 해가 할당된 대역 내에서 주파수를 지정하는지 검토한다. 둘째는 간섭에 대한 제한함수이며 MI-FAP를 제외한 FAP에서 임의의 두 장비가 주고받는 간섭 신호가 수신단의 한계레벨 이하로 감쇄되었는가를 검토한다. 마지막으로는 군사 환경에 대한 제한함수로 jamming 등의 공격이나 인접국과의 관계에 의해 사용이 제한되는 주파수 자원들을 검토한다.

본 연구에서는 MO-FAP에 최적화 된 알고리즘을 연구하여, 그 과정에서 개발된 일부 알고리즘의 MS-FAP 및 MOS-FAP 등에 대한 응용 여부를 소개하였고, 범위와 간섭에 대한 제한함수를 고려하였다.

2.2. 알고리즘 개발의 개요

FAP의 최적의 해를 찾는 문제는 이와 동치인 그래프 이론 문제에서 NP-hard임이 증명되었고, 따라서 근접(sub-optimal) 해를 찾는 알고리즘을 개발하는 방향으로 연구가 진행되어왔다. 군 목적의 주파수 지정 문제를 그래프 이론 관점에서 접근하여 시도한 선례로 유럽의 CALMA 프로젝트가 있다.^[1] 선형 연구로 제안된 알고리즘은 크게 탐욕 알고리즘과 이웃 탐색 알고리즘으로 분류할 수 있다.

탐욕 알고리즘은 주어진 문제에 대해 빠른 시간 내에 하나의 가능한 해를 찾아내는 방법이다. 이는 국소 범위 내에서 최적의 해를 도출하지만 전체 최적의 해를 찾을 확률은 낮다. [1]의 연구진들이 제시한 알고리즘은 그래프에서 최대 차수를 갖는 노드에 우선순위를 배정하는 Zoeliner 등의 기법으로^[2], 임의 순서로 배정한 알고리즘보다는 개선된 성능을 보이며 추후에 보다 집중적으로 다루어진 이웃 탐색 알고리즘의 기

준 및 초기 해의 역할을 하였다.

이웃 탐색 알고리즘은 탐욕 알고리즘에 의해 구해진 초기 해와 그 '이웃'을 정의하여 해의 개선 여부를 판단한다. 해를 '이동'해가며 종결조건에 도달할 때까지 작업을 반복한다. 종결 조건에 따라 소요 시간이 결정되며 보다 많은 시간을 투자할수록 좋은 해를 찾을 확률이 높아진다. 또한 '초기 해', '이웃', '이동'을 정의하는 방식에 따라 다양하게 응용이 되며 같은 시간 대비 해의 개선 성능이 달라질 수 있다.

[1]의 연구진들이 개발한 이웃 탐색 알고리즘으로는 타부 탐색, 신경망 모방, 유전 알고리즘 등이 있다. 그 중에서는 유전 알고리즘이 다양한 FAP의 목적함수와 제한조건을 만족시키는 해를 찾는데 가장 뛰어난 효율을 보이는 것으로 나타났다.^[3]

본 연구에서는 최적화 된 알고리즘을 제안하기 위해 앞서 위에서 제시된 탐욕 알고리즘과 유전 알고리즘을 본 문제 상황에 맞게 응용하여 개발하였으며 보다 자세한 내용은 4.1장에서 기술하였다.

2.3 군용 통신망의 특수성

군용 장비들이 구축하는 가상통신망은 그림 1과 같이 소수의 작전 장비들이 군집을 형성하는 특징을 보인다. 링크를 형성하는 두 장비는 다른 군집에 위치하여 짝을 이룬다. 통신 링크는 상호적으로 형성되며, 거리가 먼 군집과 직접적인 통신 링크를 이루기보다 근접한 군집을 거쳐 정보를 전달하는 형태를 보인다. 본 논문에서는 표 1과 같이 설정된 정보에 따라 임의로 생성된 모의 지형에 대해 알고리즘을 시험하였다.

본 연구에서는 분산시스템이 아닌 중앙시스템을 가정하는 FAP에 대해서 다룬다. 따라서 전체 상황을 관망하는 중앙 제어시설이 존재하여 모든 입력 값을 받아 연산을 처리한 뒤 각각의 장비에 명령을 내릴 수

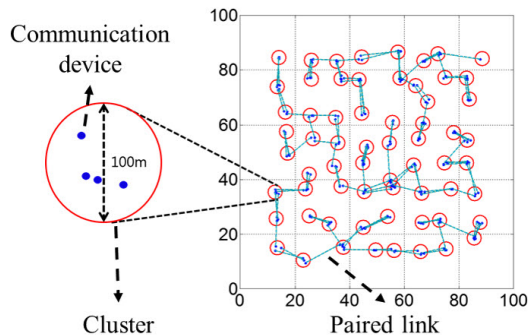


그림 1. 군용 장비 통신망 분포 개념도
Fig. 1. Conceptual drawing of communication network units distribution for military

표 1. 통신망 지형 정보
Table 1. Numerical information of the network

Total map size	100km×100km
Number of clusters	About 80
Number of devices	220 ~ 250
In-cluster distance	Maximum 100m
Devices per cluster	Maximum 4
Pair to non-pair devices distance ratio	Maximum $\sqrt{2}$

있다고 가정한다.

검증에 사용된 안테나 및 패턴은 그림 2와 같이 설계된 안테나를 모델로 한다. 각각의 안테나는 수직 혹은 수평의 두 가지 편파를 설정할 수 있도록 설계되었다. 서로 다른 편파를 사용하는 경우 편파 계수인 XPD 값에 의해 성능 이득이 결정된다. 4장에서 구현 및 제안하는 알고리즘은 단일 편파를 사용하는 FAP를 가정하며, 편파분리가 조합된 알고리즘은 5장에서 소개한다.

통신 파라미터의 값은 모든 장비에 동일하게 주어지며 표 2에 나타내었다. 작전 장비의 군집은 고지대에 위치하여 전파 환경의 LOS(Line Of Sight)가 확보됨을 가정한다. 신호의 자유전파 감쇄 모델은 수식 (1)에서 PL으로 정의된 바와 같이 ITU P.525를 따른다.

실제 주파수 자원은 연속적으로 존재하지만 군에서 사용되는 자원은 이산적으로 주어져야 한다. 주파수 할당 범위는 600MHz로 제한하며, 각각의 주파수 자원은 $\delta f=150\text{kHz}$ 의 거리를 두고 총 4000개의 양자화

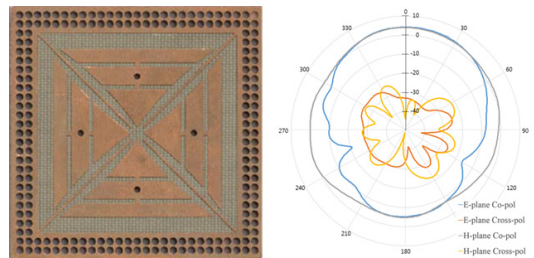


그림 2. 실제 안테나 및 패턴
Fig. 2. Implemented Antenna and Pattern

표 2. 통신 파라미터 값
Table 2. Communication parameter value

Transmit power P	1W (30dBm)
Receiver threshold T	-79.12dBm
Antenna gain A	Maximum 30dBi
Line loss L	3dB each for Tx/Rx
Polarization gain XPD	Minimum 30dB
Virtual frequency range	5000 ~ 5600 MHz

된 주파수 목록 중 일부가 사용됨을 가정한다.

MI-FAP를 고려하지 않으므로 수신된 신호의 세기가 수신한계레벨 T 보다 작으면 통신이 성공한 것으로 판단하며, 장비 간 간섭은 T 보다 작아지기 위해 주파수를 이격하여 추가로 감쇄해야하는 신호의 세기로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$EIL = \max(P + A - PL(f, d) - L - T, 0), \quad (1)$$

$$= 32PL(f, d).4 + 20\log f + 20\log d.$$

수식 (1)에서 계산된 두 장비에 대한 EIL 값이 양수라면 주파수의 거리를 두어 필터 효과를 얻어야한다. 이때 f 는 송신 장비의 중심 주파수이며 d 는 링크의 거리를 의미한다. 신호 감쇄 값과 주파수 이격거리 사이의 관계는 NFD(Net Filter Discrimination) 함수를 사용하여 구하며, 이는 안테나 성능 값으로 사전에 측정된 표를 입력 값으로 사용한다. 필요 주파수 이격량은 단위주파수 δf 로 나누어 나타내어 FAP의 간섭에 대한 제한조건으로 주어진다.

III. 그래프 구성 및 문제 설정

그래프 G 는 꼭지집합 V 와 모서리행렬 W 으로 정의된다. 총 N 개의 장비들이 형성한 N 개의 통신 링크 각각을 꼭지집합의 원소 v_i 로 정의한다. 이때 2.3장에서 정의된 바와 같이 링크 v_i 와 v_j 사이의 주파수 이격 요구 값을 구할 수 있다. 이때 각 링크를 구성하는 장비 중 v_i 의 송신 장비와 v_j 의 수신 장비 사이의 관계를 계산하여 e_{ij} 로 정의한다. 이때 e_{ij} 와 e_{ji} 의 값이 다를 수 있는데, v_i 와 v_j 에 지정된 주파수는 두 제한함수를 모두 만족해야 하므로 모서리 행렬의 원소 w_{ij} 는 $\max(e_{ij}, e_{ji})$ 을 계산하여 정의한다. 이때 W 는 대칭행렬이 되며 따라서 그래프는 무향 그래프로 정의된다.

2.3장에서 정의한 주파수 자원을 $f_1 \sim f_M$ 으로 나타낸다($M=4000$). 주파수 자원 f_i 는 $5000 + i \times 0.15\text{MHz}$ 의 중심주파수를 의미한다. 링크 $x \in V$ 에 배정된 주파수가 f_i 일 때 주파수 배정함수 $C(x) = i$ 인 $C: V \rightarrow \mathbb{N}$ 로 정의한다.

주파수 지정 문제는 그래프 $G = \{V, W\}$ 에 대해 (2-1)의 간섭에 대한 제한함수를 만족시키는 주파수 배정함수 C 를 찾는 문제로 치환된다. C 의 치역을 $Y = \{C(v) | v \in V\}$ 으로 정의할 때, 전체 주파수 사용 범위는 (3)과 같이 정의되며 600MHz의 제한조건은 (2-2)와 같이 나타낼 수 있다.

Y 에 속한 중복되지 않는 원소의 개수는 χ^* 의 함수를 통해 (4)와 같이 정의하며, 이는 MO-FAP의 목적함수가 된다. (3)에서 정의한 범위에 대한 함수는 또한 MS-FAP의 목적함수가 된다. 따라서 주파수 지정 문제는 주어진 그래프 G 에 대해 (2)의 조건을 만족시키며, (3)또는 (4)에서 정의된 목적함수를 최소화하는 해를 찾는 이산최적화 문제로 아래와 같이 표현된다.

FAP에 대한 이산최적화 문제	
간섭 및 자원에 대한 제한함수	
$ C(v_i) - C(v_j) \geq w_{ij}, \forall v_i, v_j \in V$	(2-1)
$R(Y) \leq 600$	(2-2)
MS-FAP 목적함수	
$R(Y) = 0.15 \times (\max(Y) - \min(Y))$	(3)
MO-FAP 목적함수	
$\chi^*(Y) = Y $	(4)

IV. 단일 편파 주파수 지정 알고리즘

모든 장비들이 동일한 편파를 사용할 때, 주파수 지정 알고리즘의 개발은 2.2장에서 언급한 선행연구로부터 시작한다. 이번 장에서는 우선 선행 연구에서 제안된 탐욕 알고리즘과 이웃 탐색 알고리즘 중 가장 성능이 좋았던 알고리즘들을 각각 구현하는 과정을 소개한다. 4.2장과 4.3장에서는 각각에 대해 성능이 개선된 새로운 알고리즘을 제안한다. 4.4장에서는 개발된 알고리즘의 성능을 평가하는 알고리즘을 제안하여 구한 해의 최적성을 검증하는 과정을 서술한다.

4.1. 선행 연구 알고리즘 구현

주파수 지정 알고리즘은 링크에 주파수 지정 순서를 생성하는 단계와 순서가 돌아온 링크에 주파수를 배정하는 두 단계로 분리된다. 탐욕 알고리즘은 두 단계 각각에 대한 탐욕적인 선택과정을 제시한다.

기존에 제시된 주파수 지정 순서 생성에 대한 탐욕 알고리즘은 최대 차수 꼭지 우선 선택, 최소 차수 꼭지 최후 선택 등이 있다. 본 연구에서 구현된 탐욕 알고리즘은 W 의 i 번째 행을 W_i 으로 표현할 때 알고리

알고리즘 1. HEDGE 주파수 지정 순서 생성 알고리즘
1) $\ W_i\ _0$ 이 큰 순서대로 v_i 를 정렬한다.
2) 1)의 값이 같을 때 $\ W_i\ _1$ 가 큰 순서대로 정렬한다.
3) 2)의 값이 같을 때 i 가 작은 순서대로 정렬한다.

즘 1과 같은 순서를 따라 결정되며 HEDGE(HighEst DeGrEe prior) 순서 생성 방법이라 명명한다.

순서가 결정된 이후 주파수 배정은 알고리즘 2와 같이 진행된다.

HEDGE 알고리즘은 알고리즘 1과 2를 거쳐 주파수를 지정한다. 이를 수행하는데 필요한 계산복잡도는 $O(N^2)$ 이하로 주어지며, 2.3장에서 생성된 $N=238$ 인 모의실험 지형에 대해 0.1초 이내에 해를 찾아낸다.

유전 알고리즘은 주어진 ‘조상’ 해로부터 자식세대의 해를 대량으로 생산하여 그 중 원하는 성능을 보이는 해들을 다음 세대의 조상으로 삼아 세대를 거듭해 나가며 더 나은 해를 찾아가는 알고리즘이다. 자식 세대 해를 생산하는 과정은 ‘이웃’을 설정하는 단계에 해당되며, 그 중 우수한 형질의 해를 선별하는 과정은 ‘이동’의 과정에 해당되어 유전 알고리즘은 이웃 탐색 알고리즘의 분파에 속한다.

유전 알고리즘으로 FAP를 해결하기 위해서는 개체를 표현하는 단계, 시조를 결정하는 단계, 자식 세대 생산의 단계, 다음 세대의 부모를 결정하는 단계가 차례대로 필요하다.

개체의 유전 형질은 각각의 링크에 배정된 주파수의 인덱스로 정의한다. 즉, 제한된 범위 내의 자연수로 구성된 $1 \times N$ 크기의 벡터로 하나의 개체가 표현된다. 시조의 해는 HEDGE 알고리즘으로 구한 해가 사용되며, 다음 세대의 부모를 결정하는 함수로는 (3) 또는 (4)를 조합하여 사용한다.

자식 세대의 생산은 ‘교배’와 ‘변이’의 과정을 통해 이루어진다. ‘교배’는 두 개체를 표현하는 유전 형질 중 하나의 원소를 위치마다 임의로 선택하는 과정이다. ‘교배’의 과정을 거쳐 생겨난 해는 (2)의 제한조건을 만족시키지 않으므로 ‘변이’의 과정을 통해 보정한다. ‘변이’의 과정에서는 간접 상황에 문제를 일으키는 유전 형질을 선택하여 보다 높은 형질의 주파수로 대체한다. 이때 기준에 이미 사용된 주파수를 사용할 수 있으면 그 중 최솟값을 선택하여 그 값으로 변경하며, 이와 같은 변화에 의해 영향을 받는 모든 형질들을 동일하게 증가시켜주어 새로운 문제 상황을 피한다.

유전 알고리즘은 부모 결정 함수를 설계하는 방법

알고리즘 2. 주파수 배정 탐욕 알고리즘
1) 이미 주파수가 배정된 꼭지들과의 관계에 의해 사용 불가능한 주파수들을 후보에서 걸러낸다.
2) 1)에서 추려진 주파수들의 이전에 사용된 횟수를 계산하여 가장 많이 사용된 주파수들을 후보로 추려낸다.
3) 2)에서 추려진 후보가 다수일 경우 최솟값을 선택한다.

에 따라 MOS-FAP 또는 MI-FAP에 대해서도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 또한 한 세대를 거치는데 필요한 시간이 길지 않아 전체 구동 시간을 원하는 대로 조정할 수 있다. 그러나 해의 성능의 유의한 개선을 관찰하기 위해서는 수 분 이상의 시간을 투자해야 한다는 단점이 있으며, 많은 저장 공간을 요구한다는 점이 경우에 따라서 또 다른 단점이 될 수 있다.

4.2 목표 지향적 탐욕 알고리즘

본 논문에서 제안하는 첫 번째 알고리즘은 간접이 존재하는 모든 모서리의 두 꼭지가 다른 색이 배정되도록 색을 배정한다. 이후 같은 색이 배정된 꼭지들을 집합으로 정하여 하나의 집합에 속한 여러 꼭지에 동시에 하나의 주파수를 배정함으로써 주파수 개수 단축을 꾀하였다.

그래프의 꼭지에 색을 배정하는 문제는 그래프 이론에서 널리 연구된 문제이며 최적의 색칠 방법을 찾는 것은 NP-hard임이 알려져 있다. 따라서 탐욕 알고리즘으로 개발되어야 하며, 그 과정은 마찬가지로 순서 결정과 색 배정의 두 단계로 나뉜다. 순서 결정은 알고리즘 1의 단계를 따르며, 색 배정 알고리즘은 알고리즘 2와 유사하게 진행된다. 색은 자연수 인덱스를 통해 표현하며, 인덱스를 배정한다는 점에서 주파수 배정 알고리즘과 동일하다. 다만 1번 과정에서 모서리로 연결된 두 꼭지에 배정되는 주파수의 경우 w_{ij} 만큼의 거리를 두어야 했다면 색의 경우 1의 거리만 두어도 된다는 차이가 있다.

모든 꼭지에 색을 배정한 이후에는 색을 바탕으로 그래프 $G_C = (V_C, W_C)$ 를 재구축한다. 색 배정 함수 $C_1: V \rightarrow \mathbb{R}$ 는 장비 x 에 색 i 가 배정되었을 때 $C_1(x) = i$ 이도록 정의하며, 꼭지 집합 V_C 의 원소 c_i 는 $\{x \in V | C_1(x) = i\}$ 으로 정의된다. 모서리 가중치 값은 다음 (5)와 같이 정의한다.

$$w_{C_{ij}} = \max(w_{ij} | i \in c_i, j \in c_j) \tag{5}$$

재구축된 그래프 G_C 에 대해 탐욕 알고리즘을 적용하여 주파수 지정 단계를 완료하며, 이와 같은 색칠 기반 탐욕 알고리즘을 DGC(Degree-prior Greedy Coloring) 알고리즘이라 명명한다.

DGC 알고리즘은 마찬가지로 $O(N^2)$ 의 복잡도를 가지며, 실제로 다양한 모의 지형에 대한 실험을 통해 MO-FAP의 성능을 대폭 개선시킴을 확인하였다. 그러나 그 과정에서 R 의 값이 증가하여 (2-2)의 제한조

건을 위반하는 경우가 발생하는 단점이 있었다. 또한, 색칠 단계 및 주파수 배정 단계에서 모두 탐욕 알고리즘의 한계점을 여전히 가지고 있어 보다 나은 해를 찾을 수 있는 가능성이 존재한다.

두 번째 색칠 기반 알고리즘은 QGC(clique-prior Greedy Coloring) 알고리즘으로 주어진 그래프의 최대 크기의 클리크(clique)를 입력 값으로 알고 있다는 전제 하에 탐욕 알고리즘으로 동작한다. 클리크는 임의의 두 꼭지 사이에 모서리가 존재하는 꼭지들로 이루어진 그래프의 부분집합이다. 클리크의 최대 크기가 q 인 경우 최소 q 개의 색이 필요하다는 점에서 기인한 알고리즘이며, 이는 최적성 평가에도 활용된다. 클리크 탐색 알고리즘은 4.4장에서 자세히 기술한다.

그래프 G 에 대해 $w(G)$ 는 G 의 클리크 중 최대인 것에 속한 꼭지의 개수를 의미한다. DGC 알고리즘은 색을 배정하는 단계에서 가용 색의 범위를 무한히 허용하지만 QGC 알고리즘은 가용 색 범위를 제한한다는 차이점을 갖는다. 그 과정은 알고리즘 3과 같다.

세 번째 알고리즘은 색칠 기반 알고리즘이 R 을 증가시키는 단점을 보완하기 위한 혼합 알고리즘이다. 즉, 색 배정에 총 c 개의 색이 사용되었다면, $d \leq c$ 인 d 에 대해 1번부터 d 번까지 색이 칠해진 꼭지들은 DGC (혹은 QGC) 알고리즘으로 주파수를 배정한 뒤, 나머지 꼭지들에 HEDGE 알고리즘으로 주파수를 배정하는 알고리즘이다. 이는 Hybrid 알고리즘으로 명명한다. 두 탐욕 알고리즘이 선형 결합된 형태이므로 Hybrid 알고리즘은 역시 $O(N^2)$ 의 복잡도로 구현된다.

Hybrid 알고리즘은 R 과 χ^* 사이의 성능 교환을 피할 수 있어 MOS-FAP에도 응용될 수 있어 해의 가용성에 대한 확장 범위가 보다 넓다. 단 최적의 d 값을 찾는 문제는 아직 해결되지 않았으며 가능한 모든 d 값을 binary-tree search 방식으로 시도한다고 가정할 때의 계산복잡도는 최대 $O(N^2 \log N)$ 로 주어진다.

알고리즘 3. QGC 색 배정 알고리즘
1) $Q = w(G)$ 으로 두고 클리크 구성 꼭지들에 1-Q까지의 색을 임의로 배정한다.
2) 색칠되지 않은 모든 꼭지들에 대해 1-Q 중 색칠 가능한 후보의 개수를 추린다.
3) 2)에서 색칠 불가능한 꼭지가 존재할 경우 $Q \leftarrow Q+1$ 으로 변경한 뒤 2)로 돌아간다. 아닐 경우 4)로 진행한다.
4) 후보의 개수가 가장 적은 꼭지를 정한다. 동률이 발생할 경우 인덱스가 낮은 꼭지를 택한다.
5) 가능한 후보 중 이전까지 사용 횟수가 적은 색을 배정되 동률 시 낮은 인덱스의 색을 배정한다.
6) 배정이 완료될 때 까지 2)로 돌아간다.

4.3 목표 지향적 이웃 탐색 알고리즘

이웃 탐색 알고리즘은 탐욕 알고리즘이 구한 해의 ‘이웃’을 정의하는 방법에 따라 성능이 좌우된다. 3장에서 FAP를 해결하는 과정은 주파수 지정 순서 생성과 주파수 배정의 두 단계로 분할하였다. 첫 번째 단계는 총 M 개의 잠재적 이웃을 가지며 두 번째 단계는 M^N 개의 잠재적 이웃을 가진다.

본 연구에서는 유전 알고리즘의 성능을 저해하는 최대 요소가 M^N 개의 잠재적 해 중 제한조건을 불만족하는 수많은 해들의 존재라 판단하였다. 반면 두 번째 단계를 알고리즘 2로 진행할 경우 M 개의 모든 해는 최소 (2-1)의 조건을 만족한다. 따라서 순서 생성 단계에 대해 집중적으로 이웃 탐색 알고리즘을 구현하여 알고리즘의 효율 개선을 꾀하였다.

본 연구에서 제안하는 이웃 탐색 알고리즘은 기존의 주파수 지정 순서로부터 일부분을 뒤바꾼 순서로 배정된 결과의 해를 ‘이웃’으로 정의한다. 알고리즘 1에 의해 순서를 정해나갈 때 지명된 후보 중 최상위 꼭지를 정하는 것이 아닌 차상위 후보들 중 임의의 꼭지를 선택하는 과정을 ‘caprice’ 또는 ‘변덕’으로 정의한다. 매 짝수 번째 순서를 정할 때마다 ‘변덕’을 시행하여 기존 탐욕 알고리즘의 방향성과 이웃 탐색 알고리즘의 임의성 사이의 절충을 꾀한다.

한 번의 시행은 HEDGE와 동일한 복잡도를 요구하며, 매 시행마다 다른 해가 도출된다. 여러 번의 시행을 반복한 뒤 해를 저장하여 원하는 조건에 맞는 최적의 해를 찾아야하므로 해의 저장 공간을 필요로 하며, 소요시간과 더 좋은 해를 찾을 가능성이 비례한다.

이웃 탐색 알고리즘의 종결조건은 시간에 의해 결정하거나 해의 성능에 의해 결정하는 두 가지 방법이 있다. 해의 성능에 의해 결정하는 경우 해가 기존 대

알고리즘 4. KQS 알고리즘
1) V 의 모든 원소를 A 에 등록한다.
2) A 의 원소들로 구성된 부분그래프 G' 에 대해 내부 차수를 계산하여 값이 $k-1$ 미만인 경우 A 에서 삭제한다.
3) 삭제된 꼭지가 존재하면 2)로 돌아가 작업을 반복한다. 삭제된 꼭지가 존재하지 않으면 4)로 진행한다.
4) A 의 원소 개수가 k 보다 작으면 $\Sigma = \phi$ 으로 정하고 알고리즘을 종료한다.
5) A 에 속한 원소 중 차수가 최소인 노드 v_i 를 선정한다.
6) v_i 의 이웃의 꼭지로 구성된 부분그래프 G_i 에 대해 $\Sigma = KQS(G_i, k-1)$ 을 연산한다.
7) $\Sigma \neq \phi$ 이면 $\Sigma = \Sigma \cup v_i$ 를 출력하고 종료한다.
8) $\Sigma = \phi$ 이면 A 에서 v_i 를 지우고 4)로 돌아간다.

비 개선된 정도로부터 판단하거나 해가 최적의 값에 도달 혹은 근접한 정도로부터 판단할 수 있다. 해의 최적성 검사에 대한 내용은 4.4장에서 서술한다.

‘변덕’의 과정은 3장에서 제안된 모든 알고리즘에 적용할 수 있으며, 이때 기존의 이름에 ‘with Caprice’를 더하여 명명한다. Caprice 알고리즘은 (6)과 같은 복합적인 목적함수를 정의함으로써 MOS-FAP를 해결하는데 응용할 수 있다. 이때 b 는 $1 - \min(\chi^*)$ 이상의 임의의 실수인 상수로, 사용자가 비용과 가용성 중 어느 쪽에 더 초점을 두는가를 의미하는 입력 값이다.

$$F_{CP} = (\chi^* + b) \times R \tag{6}$$

4.4 해의 최적성 검사 알고리즘

3장에서 정의한 모든 FAP는 M^V 의 유한한 경우의 수 내에서 해가 결정되므로 해가 적어도 하나 존재한다면 그 최적의 성능 값은 항상 존재한다.

MO-FAP의 경우 그래프 G 의 꼭지를 색칠하는데 필요한 색의 최소 개수가 최대 하한으로 주어진다. 이는 크로마틱 수 혹은 $\chi(G)$ 로 나타내며, χ 를 찾는 문제는 NP-hard임이 알려져 있다. 그러나 $\chi(G)$ 는 $w(G)$ 를 하한으로 가지며 그 차이가 매우 작으며 $w(G)$ 를 구하는 것은 비교적 간단하다.

그래프 G 가 k 개의 꼭지를 갖는 완전그래프를 부분 그래프로 갖는지 판단하는 알고리즘은 $\Sigma = KQS(G, k)$ 으로 정의하며 알고리즘 4와 같이 구성된다. 이때 Σ 를 공집합으로 출력하지 않는 최대의 k 가 $w(G)$ 가 되며, binary tree search로 모든 시도를 거쳐 찾는다.

MS-FAP에 대한 하한을 구하는 문제는 본 연구의 주 범위에서 벗어나며, 추후의 과제로 남겨두었다.

V. 편파 배정 알고리즘

본 연구에서 고려하는 시스템은 이중 편파 안테나를 사용하고 있으며, 그림 2에서 확인할 수 있듯이 편파 분리를 통해 최소 30dB의 신호 감쇄를 추가적으로 얻을 수 있다. 따라서 각각의 링크에 편파를 적절히 배정하면 전체 시스템의 간섭량이 감소하여 해의 성능 개선을 꾀할 수 있다.

이번 장에서는 MO-FAP와 MS-FAP에 각각 적합한 편파 배정 알고리즘을 소개한다. 꼭지에 배정되는 편파는 V, H 으로 표현하며 각각의 장비는 송신 안테나와 수신 안테나의 편파를 개별적으로 조절할 수 있다. 즉, N 개의 장비에 대해 편파가 배정될 수 있는 총 $2N$ 개의 물리적 변수가 존재한다. 그러나 링크를 형성

하는 송신부와 수신부는 동일한 편파를 사용해야 한다. 따라서 N 개의 통신 링크에 편파를 배정하는 방식으로 표현함으로써 시스템의 복잡도를 단축한다.

5.1 편파 배정 MO-FAP 알고리즘

어떤 두 링크 사이의 간섭의 세기가 XPD의 값보다 작을 때 두 링크가 서로 다른 편파를 사용한다면 두 꼭지는 동일한 주파수를 사용할 수 있다. 색칠 기반 탐욕 알고리즘에서 정의된 G_C 에서 이와 같은 두 링크를 최대치로 찾으면 χ^* 의 값이 최대치로 단축된다.

그래프에서 조건에 맞는 두 꼭지들의 쌍을 서로 겹치지 않게 최대치로 찾는 문제는 matching problem으로 정의되어 있으며, $O(N^4)$ 내에 그 최적의 해를 찾는 알고리즘이 존재한다.[6] 이때 조건을 만족하는 두 꼭지들의 쌍을 각각 ‘matching’이라 부른다.

MP(Matching based Polarization) 알고리즘은 색칠된 그래프 G_C 에서 모서리 값이 XPD 값보다 작을 때, 이를 matching으로 간주하여 maximum matching을 탐색한다. Matching에 속한 두 꼭지에는 수직과 수평의 편파를 각각 배정하며, matching을 이루지 못한 꼭지들에는 임의의 편파를 배정한다.

V_C 의 원소인 c_i 와 c_j 가 matching을 형성할 때, 대응하는 V 의 원소들에 각각 수직 \mathbb{V} 과 수평 \mathbb{H} 의 편파를 각각 배정한다. 편파의 배정상태는 편파 배정함수 $P: V \rightarrow \{\mathbb{V}, \mathbb{H}\}$ 를 통해 표현한다. 이제 편파를 반영한 간섭의 제한조건 값 \wp_{ij} 을 (7)과 같이 정의한다. 이때 ρ 는 XPD의 성능 값을 주파수 거리 인덱스로 변환한 정수 값이며, δ_{ij} 는 $i = j$ 이면 1, 아니면 0을 출력하는 함수이다.

$$\wp_{ij} = \max(w_{ij} - \rho \times \delta_{P(i)P(j)}, 0) \tag{7}$$

이제 c_i 와 c_j 가 색칠된 통신 링크들 간의 간섭이 상쇄되어 동일한 주파수를 배정할 수 있다. G_C 의 두 원소 c_i 와 c_j 가 matching을 형성할 때, c_i 와 c_j 로 색칠된 V 의 모든 원소들로 구성된 집합 p_k 를 새로운 원소로 정의한다. 모든 matching에 대해 정의된 p_k 를 원소로 갖는 V_p 를 편파 그래프 G_p 의 새로운 원소로 정의한다. 편파 모서리 W_p 는 다음과 같이 정의한다.

$$W_{P_{ab}} = \max(\wp_{ij} | i \in p_a, j \in p_b) \tag{8}$$

수식 (7)과 (8)에 의해 얻어진 그래프 $P \cdot G$ 에 대해 HEDGE 알고리즘을 적용하여 MP 알고리즘의 해를 얻는다. 이때 그래프의 색칠 알고리즘을 DGC 혹은 QGC 중 선택하는 여부에 따라 MP-D 혹은 MP-Q 알고리즘의 응용이 가능하다. 또한 HEDGE 알고리즘에 Caprice를 더함으로써 이웃 탐색 알고리즘으로의 응용 또한 가능하다. MP 알고리즘의 해에 대한 하한은 $w(G)$ 값의 절반으로 주어진다.

5.2 편파 배정 MS-FAP 알고리즘

MS-FAP에 특화된 편파 배정 알고리즘은 장비들이 군집을 형성하는 특수성을 고려하여 설계되었다. 같은 군집 내에 속한 장비들은 서로 통신 링크를 형성하지 않으며 거리가 매우 가까워 서로에게 가장 큰 영향을 준다. 따라서 어느 장비가 V 의 편파로 신호를 보냈다면 같은 군집의 다른 장비는 H 의 편파로 신호를 수신하는 경우가 많을수록 전체 간섭량은 줄어든다.

이번 장에서는 이전까지 그래프의 꼭지를 통신 링크로 정의했던 것과 다르게, 통신 장비들의 군집을 하나의 꼭지로 정의한다. 그리고 통신 링크가 형성된 두 군집을 모서리로 연결한다. 같은 군집 내에서는 링크를 형성하지 않으므로 self edge는 존재하지 않으며 두 군집 사이에 다수의 통신 링크가 동시에 형성된 경우 다중 모서리가 연결된 다중그래프가 주어진다.

군집은 최대 4개의 장비로 구성되므로 상호 링크 형성을 고려하여도 모든 꼭지의 차수는 8을 넘지 않는다. 표 1에서 정의된 바와 같이 통신 링크와 비통신 링크 거리의 비가 주어질 때, 모든 모서리를 곧은 선으로 표현할 경우 두 모서리가 겹치는 일은 발생하지 않으며 따라서 평면 그래프로 표현이 가능하다. 최대 차수가 Δ 로 주어진 평면-다중 그래프는 Shannon의 정리에 의해 최대 $1.5 \times \Delta$ 개의 색을 사용하여 같은 꼭지를 공유하는 모서리가 다른 색을 갖도록 색칠할 수 있다.

LCP(Line Coloring-based Polarization) 알고리즘은 이와 같은 그래프 G_L 의 모서리에 최대 12개의 색을 사용하여 색을 배정한 뒤, 각각의 색에 편파를 배정하는 알고리즘이다. 편파 배정 이후의 그래프 재구성 및 주파수 지정은 MP 알고리즘과 동일하며, 색에 편파를 배정하는 모든 경우의 수를 시도하여 최적의 해를 찾는다.

각각의 색에 편파를 배정하는 방법은 총 2^{12} 가지가 존재하며, 대칭되는 경우와 단일 편파의 경우를 제외하면 $2^{11} - 1$ 가지가 남는다. 최악의 경우에 이를 모두 시도하게 되면 약 2000회의 시도를 하게 된다. 그러나

그래프 G_L 의 모서리 개수는 $2N$ 이며 꼭지의 개수는 약 $N/3$ 개로 밀도가 낮다. 모의실험 지형에 적용했을 때 요구되는 색의 개수는 약 5~8개이며, 최대인 경우 $2^7 - 1 = 127$ 번의 시도를 통해 최적의 배정을 찾았다.

VI. 결과 분석

6.1 단일 편파 알고리즘의 성능 분석

단일 편파 알고리즘의 성능을 비교하기 위해 그림 1에 묘사된 총 238개의 꼭지를 가진 모의 지형에 대한 검증을 진행하였다. 그 결과 중 일부를 성능이 우수한 순서대로 표 3에 제시하였다.

탐욕 알고리즘은 붉은 체로, 이웃 탐색 알고리즘은 기울임 체로 표기하였다. 탐욕 알고리즘은 제안하는 Hybrid 알고리즘의 성능이 항상 HEDGE 알고리즘보다 우수함을 확인할 수 있다. 이웃 탐색 알고리즘의 경우 유전 알고리즘은 10분, Caprice 알고리즘은 1분 (100개의 해) 구동하여 해를 얻었으며, Hybrid with Caprice 알고리즘이 유전 알고리즘보다 항상 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

MO-FAP의 순위는 R 에 대한 제한조건을 만족하는 해 중 χ^* 의 값이 가장 작은 값들로 순서를 매겼다. DGC 알고리즘의 경우 χ^* 의 값은 44로 가장 우수하였지만 $R=856.2\text{MHz}$ 로 사용이 불가능한 해를 도출하였다. QGC 알고리즘도 마찬가지며 여러 지형들에 대해 검증하였을 때 DGC 알고리즘과 비교하여 어느 쪽이 확실한 우위를 차지하지는 않았다.

MS-FAP의 순위는 같은 χ^* 의 값을 갖는 해들 중

표 3. 단일 편파 알고리즘 성능 순위
Table 3. Performance ranking of the single polarization FAP algorithms

MO-FAP	Algorithm	χ^*	R
1	Hybrid with Caprice	54	575.4
2	Hybrid	56	599.25
3	Genetic	63	577.65
4	HEDGE with Caprice	65	592.35
5	HEDGE	73	555.15
MS-FAP	Algorithm	χ^*	R
1	Hybrid with Caprice	67	553.65
2	Hybrid	67	570
3	HEDGE with Caprice	67	571.8
4	Genetic	67	572.85

가장 작은 R 의 값에 대해 순서를 매겼다. HEDGE 알고리즘은 탐욕 알고리즘이라 χ^* 의 값을 조정할 수 없었다. Hybrid 알고리즘은 MO-FAP에서의 해를 찾을 때와 다른 문턱 값을 사용하여 다른 해를 구하였다.

가용성에 대한 제한조건이 주어지지 않은 환경에서의 MO-FAP라면 색칠 기반 알고리즘이 가장 우수한 성능을 보인다. QGC 알고리즘이 클릭 탐색을 선행 과정으로 요구한다는 점을 감안했을 때 DGC 알고리즘이 가장 효율적인 알고리즘이라고 판단할 수 있다.

DGC 알고리즘에 Caprice를 결합한 경우 동일한 χ^* 를 가지며 $R=730.2\text{MHz}$ 인 해를 찾을 수 있었다. 이는 DGC에 의한 성능 이득과 Caprice에 의한 성능 이득은 독립적임을 의미한다. 그러나 그 효율은 HEDGE with Caprice 알고리즘에 비해 높지 않다. 따라서 Hybrid with Caprice 알고리즘을 구현하고자 할 때 Caprice는 HEDGE로 주파수가 지정되는 부분에만 적용하는 것이 가장 효율적이다.

MO-FAP에 대한 알고리즘의 최적성을 검사하기 위해 새로운 10개의 지형을 생성하여 그 결과의 일부를 표 4에 제시하였다. $w(G)$ 를 구하는데 소요된 시간은 각각 10분 미만이었다. 총 10개의 지형 중 4개의 지형에서 QGC가 우세하였고 6개의 지형에서 DGC가 우세하였다.

하한과 성능 값의 차이는 최소 0에서 최대 6까지 평균 2.8으로 근소한 차이를 보였으며, 이는 색칠 기반 알고리즘이 MO-FAP의 최적의 해에 매우 근접하게 도달함을 의미한다. 성능 값의 차이가 0인 경우는 해가 최적임을 의미하며, QGC가 우세한 경우 그 최적의 해를 찾아낼 수 있었다.

표 4. 알고리즘 MO-FAP 최적성 검사 결과
Table 4. Optimality test results for MO-FAP

HEDGE	112	96	114	112	116
DGC	80	70	90	86	87
QGC	79	72	86	92	86
$w(G)$	75	68	86	80	86

6.2 편파 분리 알고리즘의 성능 분석

단일 편파 알고리즘에 대한 성능 분석으로부터 MP-D 알고리즘과 MP-Q 알고리즘은 마찬가지로 어느 한 쪽이 유의한 우세를 보이지 않을 것을 예상할 수 있다. MP-D 알고리즘에 대한 성능은 다음 표 5와 같이 주어진다.

표 5의 1행은 지형 번호를 나타내고 2,3행의 값은

표 5. MP-D 알고리즘 성능 평가
Table 5. Performance evaluation of MP-D

	#1	#2	#3	#4	#5
DGC	80	70	90	86	87
MP-D	41	36	45	43	44
$w(G)/2$	38	34	43	40	43
R_{MP-D}	509.7	491.1	491.3	521.9	446.9

1열에 명시된 알고리즘으로 구한 χ^* 값을 의미하며, 4행은 그 이론적 하한의 값을 의미한다. 5행에는 MP-D 알고리즘으로 구한 해의 R 값을 표시하였다.

MP-D 알고리즘의 χ^* 값은 그 최적의 값에 매우 근접함을 확인할 수 있으며, 단일 편파 알고리즘 대비 절반 가까이 비용을 절감했음을 확인하였다. 반면 전체 사용 범위 또한 단일 편파 대비 단축되었으나 그 정도가 χ^* 에 비해서는 높지 않았다.

LCP 알고리즘이 성능 개선을 보임을 확인하기 위해 임의로 편파를 배정하는 기준 알고리즘을 우선 제시하였다. 첫째는 모든 홀수 번째 링크에 V 를 배정하는 알고리즘이며 LCP-b1으로 표기하였다. 둘째는 mod 4로 1,2인 모든 링크에 V 를 배정하는 알고리즘이며 LCP-b2로 표기하였다.

LCP 알고리즘은 HEDGE 또는 Caprice와 조합하였을 때 가장 좋은 성능을 보였다. HEDGE와 조합하는 경우에도 127가지의 가능한 해 중 최적의 해를 선택하므로 약 1~2분의 시간이 걸렸으며 표 6에는 그 중 최적의 해만을 표기하였다. HEDGE와 조합된 LCP는 LCP-h로, HEDGE with Caprice와 조합된 LCP는 LCP-c로 표현하였다.

LCP-b1과 LCP-b2는 임의로 편파를 배정한 것으로 보이지만 인덱스를 정하는 순서가 장비들의 좌표에 의해 정렬되었다. 즉, LCP 알고리즘에서 시도했던 바인 같은 군집에 연결된 통신 링크에 되도록 다른 편파를 배정하고자 하는 의도가 반영이 된 결과를 보였다.

LCP 알고리즘은 단일 편파 알고리즘 대비 R 을 효율적으로 단축하여 MS-FAP에 적합한 알고리즘을 입증하였다. 반면 χ^* 의 값에 대한 단축은 R 에 비해서는

표 6. LCP 알고리즘 성능 평가
Table 6. Performance evaluation of LCP

Algorithm	χ^*	R
HEDGE	112	621.3
LCP-b1	80	393.45
LCP-b2	85	361.5
LCP-h	76	323.7
LCP-c (Best χ^*)	61	351.0
LCP-c (Best R)	84	333.75

높지 않았다. MP 알고리즘과 비교하여 명확한 장단점을 가짐을 확인할 수 있었다.

임의 배정 알고리즘에 비해 LCP-h 혹은 LCP-c 알고리즘이 추가적인 성능 이득을 얻을 수 있음을 확인하였다. 한편, Caprice가 추가된 알고리즘은 LCP-h 대비 성능 이득을 전혀 보이지 않아 LCP 알고리즘에는 적합하지 않음을 볼 수 있다.

표 7에는 동일한 지형에서 단일 편파 및 편파 배정 탐욕 알고리즘의 성능을 제시하여 비교해두었다. HEDGE 알고리즘으로 해를 찾을 수 없는 지형에 대해서도 Hybrid 알고리즘이 가용의 해를 찾을 수 있음을 확인하였다. 편파를 분리하여 MO-FAP 혹은 MS-FAP에서 이득을 얻기 위해 각각 MP 알고리즘과 LCP 알고리즘이 효과적인 성능 이득을 가져옴을 또한 볼 수 있다.

표 7. 동일 지형에서의 편파 배정 알고리즘 성능
Table 7. Polarization assignment algorithms performance evaluation for identical topology

Algorithm	χ^*	R
HEDGE	112	621.3
DGC	80	627.9
Hybrid	92	580.95
LCP	76	323.7
MP	41	509.7

VII. 결 론

본 논문에서는 군용 통신망에 사용되는 장비들에 주파수를 자동으로 지정하는 문제를 그래프 이론 관점에서 해석하여 해결하였다. 문제의 구성은 실제 군용 통신망의 특성을 반영하여 실측 안테나 패턴과 ITU 표준 등을 반영하여 설계하였으며, 임의로 생성된 그래프에 대해 알고리즘을 검증하였다.

탐욕 알고리즘과 이웃 탐색 알고리즘 각각에 대하여 기존의 알고리즘보다 성능 효율이 대폭 향상된 알고리즘을 제시하였다. 색칠 기반 탐욕 알고리즘인 DGC 및 QGC 알고리즘은 HEDGE 알고리즘 대비 MO-FAP의 성능을 효과적으로 개선시켰다. 성능 관점에서 DGC와 QGC 사이의 유의미한 우위는 없었으며, DGC는 클릭 정보를 필요로 하지 않는다는 점과 QGC는 최적의 해를 찾을 가능성이 높다는 점의 장점이 각각 있었다. Hybrid 알고리즘은 HEDGE와 색칠 기반 알고리즘의 성능 교환을 시간 손실 없이 얻을 수 있었다. Caprice 알고리즘은 유전 알고리즘 대비 대폭 개선된 효율을 보이며 주파수 지정 문제는

지정 순서 생성에 큰 영향을 받음을 증명하였다.

편파 배정 알고리즘으로 선 색칠 기반의 LCP 알고리즘과 매칭 탐색 기반의 MP 알고리즘을 제시하였으며 각각은 MS-FAP와 MO-FAP의 성능을 두 배 가까이 극대화함을 확인하였다. LCP 알고리즘에는 군용 통신망의 군집화 특성이 반영되어 보다 효율적으로 해를 찾을 수 있었고, MP 알고리즘은 최적의 QGC와 조합하여 최적의 해를 찾는 경우가 있었다.

MO-FAP의 경우 성능의 하한을 유도하여 해의 최적성을 판단할 수 있었으며, MS-FAP의 성능 하한에 대한 연구는 추후를 위한 과제로 남겨두었다. 통신 품질에 대한 문제인 MI-FAP에 대하여 또한 다음 단계의 과제로 남겨두었다. 편파 안테나의 경우 보다 일반적으로 분리 거리와 감쇄 값에 대한 함수를 활용한 배정 알고리즘을 개발할 여지가 있다. 전이중 및 다중안테나 시스템의 복합적인 활용 알고리즘 역시 성능 개선을 위한 또 다른 주요 과제가 될 것이다.^[7] 또한, 실제 군용 통신망에 알고리즘을 적용했을 때 중앙시스템의 FAP는 지형 계산에 많은 시간이 걸린다. 따라서 분산시스템에서 행렬 완성 등의 분야와 접목하여 불완전정보가 주어졌을 때의 FAP에 대한 연구가 진행된다면 실제 군용 통신망 시스템에 활용될 때 보다 큰 실효성을 갖게 될 것이다.

References

- [1] K. I. Aardal, S. Hossel, A. Koster, C. Mannino, and A. Sassano, *Models and solution techniques for frequency assignment problem*, Technical Report ZIB-01-40, Dec. 2001.
- [2] J. Arthur Zoeliner and C. Lyle Beall, "A breakthrough in spectrum conserving frequency assignment technology," *IEEE Trans. EMC*, vol. 19, no. 3, Aug. 1977.
- [3] G. Colombo, "A genetic algorithm for frequency assignment problem," *ACM J. MNDI*, vol. 1, no. 2, pp. 102-112, Sept. 2006.
- [4] J. A. Torkestani and M. R. Meybodi, "A new vertex coloring algorithms based on variable action-set learning automata," *Computing and Informatics*, vol. 29, pp. 447-466, 2010.
- [5] J. Riihijärvi, M. Petrova, and P. Mähönen, "Frequency allocation for WLANs using graph coloring techniques," *AD Hoc & Sensor Wirel.*

Netw., vol. 3, pp. 121-139, 2007.

- [6] Z. Galil, "Efficient algorithms for finding maximum matching in graphs," *ACM CSUR*, vol. 18, no. 1, pp. 23-38, Mar. 1986.
- [7] M. S. Sim, J. Park, C.-B. Chae, and R. W. Heath, Jr., "Compressed channel feedback for correlated massive MIMO systems," *IEEE/KICS J. Commun. Networks*, vol. 18, no. 1, pp. 95-104, Feb. 2016.
- [8] B.-H. Koo, C.-B. Chae, S.-H. Park, H.-S. Park, and J.-H. Ham, "A novel frequency allocation algorithm for limited radio resource environments," *J. KICS*, vol. 40, no. 9, pp. 1719-1721, Sept. 2015.
- [9] H. B. Yilmaz, B.-H. Koo, S.-H. Park, H.-S. Park, J.-H. Ham, and C.-B. Chae, "Frequency assignment problem with net filter discrimination constraints," accepted to *IEEE/KICS J. Commun. Networks*.
- [10] B.-H. Koo, C.-B. Chae, S.-H. Park, H.-S. Park, and J.-H. Ham, "Joint polarization and frequency assignment algorithm based on graph theory," *J. KICS*, vol. 41, no. 8, pp. 954-957, 2016.
- [11] B.-H. Koo, C.-B. Chae, S.-H. Park, H.-S. Park, and J.-H. Ham, "Joint assignment of frequency and polarization to minimize the chromatic number," *ICT Express*, Aug. 2016.

구 본 홍 (Bon-Hong Koo)



2014년 2월 : 연세대학교 글로벌융합공학과 졸업
 2014년 3월~현재 : 동대학원 석사 통합과정
 <관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

채 찬 병 (Chan-Byoung Chae)



2011년 3월~현재 : 연세대학교 글로벌융합공학과 부교수

박 성 호 (Chan-Byoung Chae)



1984년 : 고려대학교 수학과 학사
 <관심분야> 군통신용 라디오 전파

박 휘 성 (Hwi-Sung Park)



2012년 : 성균관대학교 전자전기공학과 학사
 2014년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
 2014년~현재 : 국방과학연구소 연구원
 <관심분야> 전술통신망 관리, 적응형 전송 기술 (Link adaptation), 다중안테나 기술 (MIMO)

함 재 현 (Jae-Hyun Ham)



1999년 : 동국대학교 컴퓨터공학과 학사
 2001년 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 석사
 2016년 : 고려대학교 컴퓨터정보학과 박사
 2001년~현재 : 국방과학연구소 선임연구원

<관심분야> 전술통신망 관리, 트래픽 모니터링 및 분석, mobile ad hoc network (MANET)