

제한된 무선 자원 환경에 적합한 주파수 자동지정 알고리즘

구본홍*, 채찬병*, 박성호**, 박휘성°, 함재현***

A Novel Frequency Allocation Algorithm for Limited Radio Resource Environments

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

요약

주파수 자동지정 알고리즘은 빈번한 환경 변화에 따라 주파수 재지정이 요구되는 군용 통신에서 중요하게 고려되고 있다. 본 논문에서는 주파수 자동지정 문제를 그래프 이론 관점에서 해결한다. 그래프의 색칠 이론을 기반으로 한 알고리즘을 제시하여 기존의 탐욕 알고리즘 보다 사용되는 주파수 개수를 0.77배 감소시키는 성능 향상을 확인하였다. 또한, 주파수 범위와 재사용률 간의 맞교환을 통하여 원하는 성능을 얻을 수 있는 하이브리드 알고리즘을 제시하였다.

Key Words : Frequency Assignment Problem

ABSTRACT

In this paper, we investigate a frequency assignment problem from graph theory for military communications. We propose an algorithm based on the graph coloring theory and confirm that we utilize 0.77 times lower number of frequencies. We also propose a hybrid algorithm that facilitates a trade-off between the range and the spectrum utilization gain.

I. 서론

지휘체계와 타격체계간의 원활한 통신을 지원하는 전술통신망은 다수의 장비를 동시에 운용하기 때문에 주파수 자원이 부족하다. 또한 실시간으로 전장을 지원하기 때문에 장비에 주파수를 배정하는 시간이 제한된다. 따라서 이러한 전술통신망에서는 다수의 장비들이 상호 간섭을 피하도록 주파수를 배정하면서, 배정에 필요한 시간을 단축하고 주파수 재사용 효율을 높이기 위한 알고리즘이 필요하다. 기존의 연구에서는 주파수 지정을 위해 그래프 이론으로 접근하여, 탐욕 알고리즘과 유전자 알고리즘으로 해결하였다^{1,2}. 탐욕 알고리즘은 계산량이 적은 장점을 가지고 있었지만, 주파수 효율을 보장하지 못 하는 하나의 해만을 도출하였다. 유전자 알고리즘은 시간이 지날수록 주파수 효율이 더 나은 해를 찾을 수 있으나 소요시간이 대폭 증가하였다. 본 논문에서 제안하는 색칠 기반 알고리즘은 사용하는 주파수의 개수를 이론적 최솟값에 가깝게 단축함으로써 주파수 사용 효율을 극대화한다. 그러나 이때 주파수 사용 범위가 늘어나는 손해가 생기므로 이를 보완하기 위해 탐욕 알고리즘과 색칠기반 알고리즘을 복합적으로 사용하는 기법을 제안한다.

II. 문제 정의

주파수 지정을 위한 접근 방법 중 그래프 이론을 사용한 접근 방법이 효율적이다.¹¹ 이를 위해 먼저 그래프를 구성하고, 그 후 그래프 이론을 사용할 때 주파수 지정 문제에 대해 정의한다.

2.1 그래프 구성

주파수 지정이 필요한 무선장비의 통신 링크를 그래프의 꼭지로 정의하고, 각 링크의 다른 링크에 대한 간섭을 그래프의 모서리로 정의한다. 링크 간 간섭의 크기(X)는 간섭신호의 수신 전력과 장비의 수신한계 레벨(T)을 이용해 다음 수식 (1)과 같이 계산된다.

$$X = P + G - PL(f, d) - L - T. \tag{1}$$

※본 연구는 국방과학연구소 신행핵심과제(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, cbchae@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 : KICS2015-07-215, Received July 9, 2015; Revised August 13, 2015; Accepted August 13, 2015

수식 (1)에서 P 는 송신 전력, G 는 송수신단의 안테나 이득, L 은 선로 손실을 의미한다. PL 은 사용되는 주파수와 전파 환경에 따른 경로 손실이며 ITU P.525에서 정의를 따른다. PL 은 간섭 링크의 송신단과 피간섭 링크의 수신단 사이의 거리(d)와 간섭 링크의 주파수(f)에 영향을 받는다.

수식 (1)에서 예측된 링크 간 간섭량이 0보다 큰 경우 중심주파수를 이격하여 간섭을 감쇠시킨다. 간섭의 감쇠 값은 통합필터변별도(NFD: Net Filter Discrimination) 함수 $F_{NFD}(x)$ 를 사용하여 구할 수 있다. 그래프의 두 꼭지 i, j 에 배정되는 자원의 중심주파수 이격요구량 w_{ij} 는 i 에서 j 로의 간섭예측량 e_{ij} 과 j 에서 i 로의 간섭예측량 e_{ji} 중 큰 값을 사용하여 수식 (2)와 같이 계산된다. 여기서 w_{ij} 값을 모서리 가중치로 정의한다. 모서리 가중치가 0인 경우 모서리는 형성되지 않는다.

$$w_{ij} = F_{NFD}^{-1}(\max(0, e_{ij}, e_{ji})) \quad (2)$$

2.2 주파수 지정 문제

주파수를 지정하기 위하여, 주파수 집합 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_M\}$ 을 정의한다. 집합의 각 원소는 첫 번째 중심주파수 f_1 으로부터 동일한 간격 δf 만큼 이격된 중심주파수를 갖는다. 또한 주파수 지정 함수 C 를 정의한다. 주파수 지정함수 C 는 그래프의 꼭지 집합 V 과 주파수 집합 F 를 연결하는 함수이다. 이때 다음 수식 (3)을 만족시키도록 그래프 컬러링 함수 C 를 찾는 것으로 주파수 지정 문제를 정의한다.

$$w_{ij} \leq |C(i) - C(j)|. \quad (3)$$

III. 제안 알고리즘

주파수 지정 알고리즘은 주파수를 지정받을 꼭지의 순서를 정하는 것과 차례가 온 꼭지에 주파수를 지정하는 두 부분으로 나뉜다.

꼭지의 순서를 정하는 것에 관련된 기존의 해법으로는 탐욕 알고리즘이 있다^[2]. 탐욕 알고리즘은 1) 각 꼭지와 연결된 모서리 개수, 2) 모서리 가중치 합 순서로 큰 값을 갖는 순서대로 꼭지를 정렬한다. 3) 동률인 경우에는 최소 번호의 꼭지를 선택한다. 꼭지 i 의 주파수를 지정할 때에는 수식 (3)을 만족하는 후보 중 하나를 선택한다. 이때, 주파수 재 사용률을 증가시키기 위해 이전까지의 배정에서 가장 많이 사용되었던 주파수로 중 최소 주파수를 선택한다.

3.1 색칠 기반 알고리즘

알고리즘 1. 그래프 색칠 방법

- 1) w_{ij} 값이 0보다 크면 ‘ i ’와 ‘ j ’를 ‘이웃’으로 정의.
- 2) 1번 꼭지에 1번 색깔을 칠한다.
- 3) k 번 꼭지에는 k 와 ‘이웃’인 꼭지들에 칠해져있지 않은 색 중 최빈 번호의 색을 선택하며, 최빈값이 중복되는 경우 최소 번호의 색깔을 칠한다.

제안하는 색칠 기반 알고리즘은 그래프 꼭지에 색을 먼저 배정한 후, 색에 주파수를 배정한다. 색칠 기반 알고리즘에서 꼭지 순서를 정하기 위해, 탐욕 알고리즘과 같이 꼭지에 번호를 정하고 알고리즘 1과 같이 1부터 c 까지 색을 배정하면 꼭지들의 전체집합 V 는 $S = \{\{P_1\}, \{P_2\}, \dots, \{P_c\}\}$ 로 분할된다. 이때 같은 색의 꼭지에는 같은 주파수를 배정하는 컬러링 함수 $C_1: S \rightarrow \mathcal{R}$ 를 정의한다. 두 그룹 사이의 가장 간섭이 심한 두 장비에서 통신이 가능하면 각 그룹이 그룹 내 동일한 주파수를 사용하여도 간섭 없이 통신이 가능하다. 따라서 두 집합 사이의 최대 중심주파수 이격 요구량을 집합 사이의 가중치 함수 $W_c: S \times S \rightarrow \mathcal{R}$ 로 수식 (4)와 같이 정의한다. 그 후 꼭지 집합사이의 가중치 W_c 를 사용하여, 수식 (5)를 만족시키는 주파수를 꼭지 집합에 지정할 수 있다.

$$W_c(\{P_i\}, \{P_j\}) = \max_{u \in \{P_i\}, v \in \{P_j\}} (w_{uv}) \quad (4)$$

$$W_c(\{P_i\}, \{P_j\}) \leq |C_1(\{P_i\}) - C_1(\{P_j\})| \quad (5)$$

$C_1(\{P_i\})$ 는 P_i 에 속하는 꼭지들에 공통으로 배정된 주파수 자원의 값을 의미한다. $C_1(\{P_j\})$ 의 값은 P_i 에 속하는 꼭지들과 P_j 에 속하는 꼭지들 간의 간섭의 최댓값인 $W_c(\{P_i\}, \{P_j\})$ 만큼 거리를 두어야한다. $C_1(\{P_i\})$ 은 최소 주파수로 결정한다. 그 후 i 보다 작은 모든 j 에 대해 수식 (5)를 사용하여 이를 만족하는 값 중 최솟값으로 $i=2$ 부터 차례대로 $C_1(\{P_i\})$ 의 값을 결정한다. 위와 같은 방식을 적용한 색칠 기반 알고리즘은 기존 탐욕 알고리즘 대비 사용하는 주파수의 개수를 단축하는 이득을 가지고 있다.

3.2 하이브리드 알고리즘

색칠 기반 알고리즘은 사용되는 주파수의 개수를 단축하는 이득을 가져오지만, 사용되는 주파수의 전체 범위를 증가시키는 단점을 가지고 있다. 일반적으로 주파수 자원은 범위의 제한을 받으므로, 범위와 재사

용량 사이의 이득 교환이 가능해야 한다. 하이브리드 알고리즘은 색칠 기반 알고리즘에 사용되는 총 c 개의 색깔 중, 임의의 d 에 대해 ($d \leq c$) 1번부터 d 번까지의 색이 칠해진 꼭지들은 색칠 기반 알고리즘을 이용해 주파수를 배정한 뒤, 남은 꼭지들은 탐욕 알고리즘을 이용해 주파수를 배정하는 방식이다. 여기서 d 의 값이 작아짐에 따라 범위는 줄어들고 사용되는 주파수의 개수는 늘어난다. 따라서 범위 조건을 만족시키는 최대의 d 값에 대해 하이브리드 알고리즘을 구현함으로써 범위 제한을 만족시키며 재사용률을 최대로 갖는 해를 찾을 수 있다.

IV. 성능 평가

4.1 시험 환경

본 논문에서는 그림 1과 같이 $100\text{km} \times 100\text{km}$ 크기의 지형에 총 64개의 군집이 형성되어 있는 구조이며, 각 군집은 1~4개의 장비가 배치된다. 총 250개의 장비가 있으며, 각 장비는 다른 군집에 속한 다른 하나의 장비와 상호 통신하여 250개의 통신 링크 ($N=250$)를 형성한다. 링크의 최대 거리는 20km고, 군집 하나는 지름 0.1km의 원으로 형성되어 있다.

장비의 수신한계레벨 T 는 -70dBm 이며 각 장비는 30dBm 의 전력을 사용한다. 송수신 안테나는 방향성을 가지며 최대 이득은 30dBi 이다. 각 장비는 각자의 통신 대상에 대한 최적의 방향으로 안테나 방향을 설정 한다. 신호 손실(L)은 송수신 각 3dBm 씩 총 6dBm 이다. 각 주파수 자원은 15MHz 의 대역폭을 가지며 중심주파수 간 최소거리 δf 는 150kHz 로 가정한다. 주파수 자원은 약 $5000 \sim 5615\text{MHz}$ 로 제한하여 총 4000개의 가능한 중심주파수를 가정한다.

4.2 성능비교

알고리즘의 성능은 장비에 배정하는데 총 사용된 주파수의 개수(a_f), 범위(R), 해를 도출하는데 소요되는 시간(t)을 측정하여 비교한다. a_f 가 작을수록 주파수 재사용률이 높은 것으로 해석할 수 있으며, 주파수의 범위는 사용된 주파수들의 중심주파수 중 최댓값과 최솟값의 차이로 정의한다.

본 논문에서 제안하는 색칠 기반 알고리즘과 하이브리드 알고리즘의 성능을 기존의 탐욕 알고리즘과 비교하여 표 1에 기재하였다. 세 알고리즘 모두 해를 도출하는데 소요되는 시간은 1초 내외로 거의 차이가 없다. 색칠 기반 알고리즘은 탐욕 알고리즘 대비 주파수를 0.6배 사용함으로써 높은 재사용률을 얻을 수 있

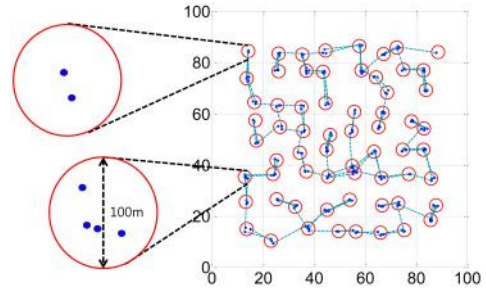


그림 1. 장비 분포 및 링크 형성 토폴로지 (예시)
Fig. 1. Topology of the devices and the links

표 1. 알고리즘 성능 비교

Table 1. Performance comparison

	a_f	R (MHz)	t (s)
탐욕 알고리즘	73 (x)	555.15	≈ 1.0
색칠 기반 (제안 1)	44	856.2	≈ 1.0
하이브리드 (제안 2)	56 (y)	599.25	≈ 1.0

지만 1.6배 넓은 범위의 자원을 사용한다. 본 논문의 범위 제한 조건인 600MHz 를 만족하는 하이브리드 알고리즘의 해는 $a_f = 56$ 으로, 기존의 탐욕 알고리즘 대비 주파수를 0.77배 (y/x) 사용하여 재사용률이 높은 해를 추가적인 시간 소모 없이 찾을 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서 제시한 색칠 기반 알고리즘은 기존의 탐욕 알고리즘 대비 사용하는 주파수 개수를 73에서 56으로 약 0.77배 감소시키는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 전체 주파수의 범위가 넓어진다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위하여 제안한 하이브리드 알고리즘으로 주어진 제약조건에 맞는 해를 찾을 수 있었다. 본 논문의 결과를 활용하여 전술통신망에서 효율적으로 주파수를 사용하는 망을 계획할 수 있을 것이다.

References

[1] J. Riihijärvi, M. Petrova, and P. Mähönen, "Frequency allocation for WLANs using graph colouring techniques," *Ad Hoc & Sensor Wirel. Netw.*, vol. 3, pp. 121-139, 2007.

[2] K. Chae and S. Yoon, "A transmission parameter optimization scheme based on genetic algorithm for dynamic spectrum access," *J. KICS*, vol. 38A, no. 11, pp. 938-943, Dec. 2013.