Journal of the KIMST, Vol. 18, No. 4, pp. 441-450, 2015
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2015.18.4.441

Research Paper 정보 · 통신 부문

통합 필터 변별도와 그래프 컬러링을 이용한 전술통신망 백본 무선 링크의 주파수 지정 방법

함재현*,1) · 박휘성1) · 이은형1) · 최증원1)

1) 국방과학연구소 제2기술연구본부

Frequency Assignment Method using NFD and Graph Coloring for Backbone Wireless Links of Tactical Communications Network

Jae-Hyun Ham*,1) · Hwi-Sung Park1) · Eun-Hyoung Lee1) · Jeung-Won Choi1)

1) *The 2nd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 26 March 2015 / Revised 17 July 2015 / Accepted 24 July 2015)

ABSTRACT

The tactical communications network has to be deployed rapidly at military operation area and support the communications between the military command systems and the weapon systems. For that, the frequency assignment is required for backbone wireless links of tactical communications network without frequency interferences. In this paper, we propose a frequency assignment method using net filter discrimination (NFD) and graph coloring to avoid frequency interferences. The proposed method presents frequency assignment problem of tactical communications network as vertex graph coloring problem of a weighted graph. And it makes frequency assignment sequences and assigns center frequencies to communication links according to the priority of communication links and graph coloring. The evaluation shows that this method can assign center frequencies to backbone communication links without frequency interferences. It also shows that the method can improve the frequency utilization in comparison with HTZ-warfare that is currently used by Korean Army.

Key Words : Tactical Communications Network(전술통신망), Frequency Assignment(주파수 지정), Graph Coloring(그래프 컬러링)

1. 서 론

전술통신망은 군사작전지역에 신속히 구축되어 지휘체계와 타격체계간의 통신을 지원하는 것이 목적이며, 군사작전에 의해 통신이 필요한 임의 작전지역에 전술적으로 구축된다[1]. 전술통신망에서는 백본 무선 링크가 대용량 트래픽을 전송하는 역할을 수행하며, 백본 무선 링크는 동일 또는 인접의 주파수 대역이 할당된 다수의 무선 통신장비로 구성되기 때문에 전파

* Corresponding author, E-mail: mjhham@add.re.kr

간섭으로 인한 통신 장애를 회피하기 위한 주파수 지정 계획이 필요하다[2].

기존 주파수 지정에 관한 연구는 대부분이 이동통신망에서 주파수 지정 문제를 해결하기 위한 방법으로 제안되었다. Hale의 연구[3]에서 주파수 지정 문제는 NP-hard 문제로 제시되었고, 이를 해결하기 위하여 그래프 이론(Graph Theory), 신경망(Neural Network), 모의 담금질(Simulated Annealing), 유전 알고리즘(Genetic Algorithm) 등을 적용한 다양한 방법이 연구되었다[4-8]. 그러나 기존 이동통신망에서의 주파수 지정에 관한 연구는 이동통신망과 전술통신망의 특성의 차이로 인하여 전술통신망 백본 무선 링크의 주파수 지정에는 한계가 있다[2]. 전술통신망에서 백본 무선 링크는 이동통신망의 기지국과 상이하게 점 대 점 통신을 제공하기 때문에 이동통신망에서 영역의 형태로 주파수를 지정하는 방식의 적용이 불가하다. 또한, 이동통신망에서는 상향링크와 하향링크가 분리된 주파수 대역을 사용하지만, 전술통신망에서는 송수신 링크가 동일한 주파수 대역을 사용하기 때문에 전파 간섭과 주파수 지정의 경우의 수가 증가된다.

현재 군에서는 ATDI사의 HTZ-warfare[9]를 도입하여 전술통신망의 백본 무선 링크에 대한 주파수 지정을 수행하고 있다. HTZ-warfare는 군 전장환경에 대한 다양한 주파수 분석이 가능하다. HTZ-warfare의 주파수 지정 기능은 전체 네트워크에서 간섭을 받는 링크의 수가 적도록 설계되었으며, 무선 통신장비가 정의된 순서 또는 임의의 순서로 무선링크에 임의의 주파수를 선택하고, 전파 간섭을 계산하여 주파수를 순차적으로 지정한다[10]. 이는 주파수의 재사용을 고려하지 않기 때문에 부족한 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 어렵고, 하나의 무선 링크에 주파수를 지정할 때마다 전파 간섭을 계산하기 때문에 반복적인 대량의 전파 간섭 계산이 필요하다. 미군의 CERDEC에서는 전술통신망의 주파수 계획을 위하여 Coalition Joint Spectrum Management Planning Tool(CJSMPT)를 개발하였다. CJSMPT는 그래프 컬러링을 이용한 주파수 지정을 수행하여 주파수의 사용 효율을 높였으나, 무선 링크에 주파수 지정 시 반복적인 대량의 전파 간섭 계산에 대한 문제는 여전히 존재한다[11].

본 논문에서는 통합 필터 변별도와 그래프 컬러링을 이용한 주파수 지정 방법을 제안한다. 전술통신망의 주파수 지정 문제를 통합 필터 변별도를 이용하여 가중치 그래프의 컬러링 문제로 변환하고, 통신 링크의 우선순위와 그래프 컬러링 이론에 따라 주파수 지정 순서를 생성하여 주파수 지정을 수행한다. 제안하는 방법은 단순 산술 비교만으로 백본 무선 링크에 전파 간섭이 없는 주파수 지정이 가능하며, 주파수의 재사용을 높여서 부족한 주파수 자원을 효율적으로 사용하는 장점을 가진다. 이는 성능 평가를 통하여 제안하는 방법이 35 MHz 주파수 대역폭만으로 6.25 MHz 대역폭의 백본 무선 링크 50개에 전파 간섭이 없는 주파수를 지정 가능하고, 현재 군에서 운용 중인 HTZ-warfare와 비교하여 주파수의 평균 재사용 수가 최대 3.08배 향상됨을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 2장에서는 제안하는 주파수 지정 방법에 관하여 설명한다. 3장에서는 성능평가를 위한 실험 환경을 기술하고, 실험 결과를 분석한다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 향후 연구에 관하여 기술한다.

2. 제안 방법

본 장에서는 통합 필터 변별도와 그래프 컬러링을 이용한 전술통신망에서의 백본 무선 링크의 주파수 지정 방법을 설명한다. 제안하는 주파수 지정 방법은 Fig. 1과 같이 가중치 유향그래프 생성, 가중치 무향그래프 변환, 주파수 지정 순서 생성, 주파수 지정의 4단계로 구성된다. 가중치 유향그래프 생성 단계에서는 전술통신망의 통신 링크와 간섭 링크를 꼭지와 유향모서리로 정의하고, 통합 필터 변별도를 이용하여 유향모서리의 가중치를 생성한다. 가중치 무향그래프 변환 단계에서는 그래프 컬러링 문제의 복잡도를 감소하기 위하여 가중치 유향그래프를 가중치 무향그래프로 변환하고, 통신 링크의 중요도를 표현하는 꼭지의 가중치를 생성한다. 주파수 지정 순서 생성 단계에서는 꼭지의 가중치와 모서리의 가중치를 기준으로 주파수를 지정할 통신 링크의 순서를 결정한다. 주파수 지정 단계에서는 그래프의 모서리 가중치를 이용한 단순 산술 비교를 이용하여 통신 링크에 주파수를 지정한다. 한정된 주파수 자원으로 인하여 전파 간섭이 없는 주파수 지정이 불가한 경우에는 주파수 지정 순서 생성 단계에서 새로운 주파수 지정 순서를 생성하고, 주파수 지정 단계를 반복 수행한다. 이를 통하여 제안하는 방법은 주파수 사용의 효율성이 높고, 전파 간섭이 없는 주파수 지정이 가능하다. 또한, 부족

한 주파수 자원으로 인하여 전파 간섭 회피가 불가한 상황에서도 주파수 지정 순서에 따른 중요 통신 링크의 개통이 가능한 최선의 주파수 지정이 가능하다.

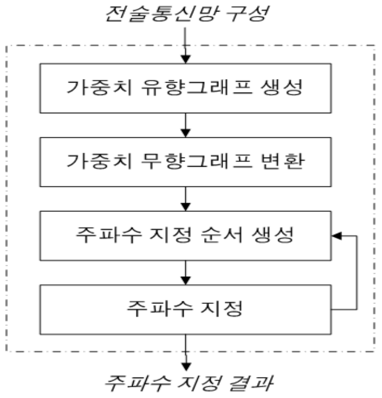


Fig. 1. Flow chart of frequency assignment using net filter discrimination(NFD) and Graph coloring

2.1 가중치 유향그래프 생성

본 절에서는 전술통신망의 주파수 지정 문제를 가중치 유향그래프 $G_d = \{V, A; g\}$로 생성하는 방법을 설명한다. 전술통신망에서 백본 무선 링크는 통신 링크와 간섭 링크로 분류된다. Fig. 2와 같이 3개의 백본 무선 링크로 구성된 전술통신망의 경우에 점 대 점 통신을 수행하는 푸른 실선이 통신 링크이고, 통신 링크에 간섭을 발생시키는 붉은 점선이 간섭 링크가 된다.

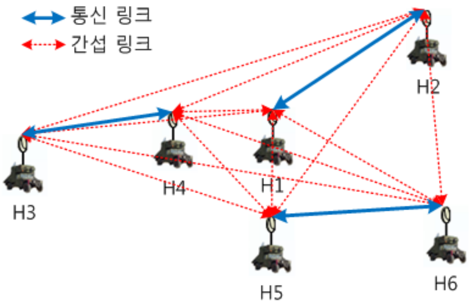


Fig. 2. Tactical communications network

전술통신망의 주파수 지정이 필요한 통신 링크를 그래프의 꼭지 집합 $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$로 정의하고, 통신 링크에 대한 간섭 링크를 그래프의 유향모서리 집합 $A = \{a_{v_1v_2}, a_{v_2v_1}, \cdots, a_{v_{n-1}v_n}, a_{v_nv_{n-1}}\}$로 정의한다. 그래프 유향모서리의 가중치는 간섭 링크가 피간섭 통신 링크에 발생시키는 전파 간섭이 소실되는데 필요한 중심 주파수 이격값으로 정의하고, 가중치 함수 $g(a)$는 식 (1)과 같다.

$$g(a) = \begin{cases} 0 & if\ EIL(a) \le 0,\ \ a \in A \\ F_{NFD}^{-1}(-EIL(a)) & if\ EIL(a) > 0,\ \ a \in A \end{cases} \tag{1}$$

여기서 F_{NFD}^{-1}는 통합 필터 변별도(Net Filter Discrimination)의 역함수이고, EIL은 유향모서리 a의 예상되는 전파 간섭량(Estimated Interference Level) 을 나타낸다. 예상되는 전파 간섭이 없다면 그래프의 모서리 가중치는 0이 되고, 예상되는 전파 간섭이 존재하면 통합 필터 변별도의 역함수를 이용하여 전파 간섭이 소실되는데 필요한 주파수 이격값을 산출한다.

통합 필터 변별도는 송신 무선장비의 송신전력 밀도(Power Spectral Density)와 수신 무선장비의 수신 마스크(Rejection Filter)를 조합하여 계산되며, 중심 주파수 이격에 따른 송신출력의 감쇠값을 계산하기 위하여 사용된다[12,13]. 통합 필터 변별도 그래프의 함수 $y = F_{NFD}(x)$는 Fig. 3과 같이 중심 주파수 이격(Δx)에 따른 송신출력 감쇠값(Δy)을 나타낸다.

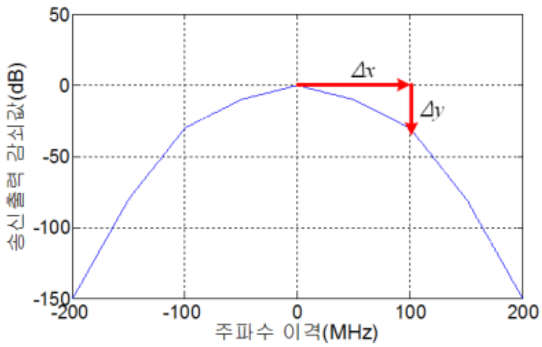


Fig. 3. NFD graph

본 논문에서는 간섭 링크의 전파 간섭 예측량이 소실되는데 필요한 주파수 이격값을 계산하기 위하여 통합 필터 변별도 그래프를 사용한다. 통합 필터 변별도 그래프의 함수 $y = F_{NFD}(x)$는 y축을 기준으로 대칭이므로 $x \ge 0$인 범위에서의 역함수인 $y = F_{NFD}^{-1}(x)$를 사용하여 간섭 무선장비의 송신출력이 전파 간섭

예측량 만큼 감쇠되는데 필요한 주파수 이격값을 산출하여 그래프의 모서리 가중치로 이용한다. 전파 간섭이 발생되는 통신 링크 간에 산출된 주파수 이격값 이상으로 중심 주파수를 이격하여 지정하면 전파 간섭이 제거되기 때문에, 모서리 가중치는 백본 무선 링크의 주파수 지정 단계에서 전파 간섭을 회피하는 조건으로 이용한다.

간섭 링크의 전파 간섭 예측량 $EIL(a)$은 간섭보호비와 계산된 간섭비의 차이로 산출한다. 즉, 간섭보호비가 계산된 간섭비보다 크면 전파 간섭이 발생하기 때문에 식 (2)와 같이 간섭보호비에서 계산된 간섭비를 뺀 값이 간섭 링크의 전파 간섭 예측량이 된다.

$$EIL(a) = IPR - IR \tag{2}$$

여기서 IPR은 간섭보호비이고, IR은 계산된 간섭비를 나타낸다. 간섭보호비는 T/I 보호비, C/I 보호비를 이용할 수 있다[13,14].

T/I 보호비의 경우, IPR은 장비제조사에서 제공하는 T/I 보호비 값을 사용하고, IR은 식 (3), (4), (5)와 같이 무선 통신장비의 수신한계레벨(T)와 간섭신호의 수신전력(I)의 비로 계산한다.

$$IR = \min\left(T/I_{f=max},\, T/I_{f=min}\right) \tag{3}$$

$$T = 10\log(kT_cB) + NF + C/N \tag{4}$$

$$\begin{aligned} I_{f=max|min} = {} & P_{Tx} + G_{Tx} - L_{Tx} + \\ & PL_{Tx\to Rx}(f) + G_{Rx} - L_{Rx} \end{aligned} \tag{5}$$

식 (4)에서 k는 볼츠만 상수, T_c는 절대온도로 나타낸 현재온도, NF는 잡음지수(Noise Figure), C/N은 변조 방식별 신호 대 잡음비를 나타낸다. 식 (5)에서 f, P_{Tx}, G_{Tx}, L_{Tx}는 간섭 링크의 송신장비 주파수, 출력, 안테나 이득, 선로 손실을 나타내며, G_{Rx}, L_{Rx}는 간섭 링크의 수신장비 안테나 이득, 선로 손실을 나타낸다. $PL_{Tx\to Rx}$는 간섭 링크의 송신장비와 수신장비간의 전파 경로 손실을 의미한다. 전파 경로 손실을 계산하기 위해서는 간섭 링크의 송신장비 주파수가 필요하다. 이를 위하여 본 논문에서는 간섭 링크의 송수신장비가 동종 무선장비인 경우 무선장비에 할당된 주파수 대역의 최저 중심 주파수와 최고 중심 주파수를 사용하고, 이종 무선장비인 경우 각 무선장비에 할당된 주파수 대역이 겹치는 부분 또는 인접한 부분의 최저 중심 주파수와 최고 중심 주파수를 사용한다. 식 (3)에서는 주파수 지정의 전파 간섭 가능성을 제거하기 위하여 최저 중심 주파수와 최고 중심 주파수의 T/I 값 중에 최소값을 선택하여 전파 간섭 예측량은 최대값이 되도록 한다. 이는 주파수 지정 결과로 인한 전술통신망의 백본 무선 링크 간 전파 간섭 회피를 보장한다.

C/I 보호비의 경우, IPR은 장비제조사에서 제공하는 C/I 보호비 값을 사용하고, IR은 식 (6), (7), (5)와 같이 희망신호의 수신전력(C)과 간섭신호의 수신전력(I)의 비로 계산한다.

$$IR = \min\left(C_{f=max}/I_{f=max},\, C_{f=min}/I_{f=min}\right) \tag{6}$$

$$\begin{aligned} C_{f=max|min} = {} & P_{Tx} + G_{Tx} - L_{Tx} + \\ & PL_{Tx\to Rx}(f) + G_{Rx} - L_{Rx} \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)에서의 f, P_{Tx}, G_{Tx}, L_{Tx}는 간섭 링크의 영향을 받는 통신 링크의 송신장비 주파수, 출력, 안테나 이득, 선로 손실을 나타내며, G_{Rx}, L_{Rx}는 통신 링크의 수신장비 안테나 이득, 선로 손실을 나타낸다. $PL_{Tx\to Rx}$는 통신 링크의 송신장비와 수신장비간의 전파 경로 손실을 의미한다. 여기서 전파 경로 손실 계산을 위한 통신 링크의 송신장비 주파수는 송수신장비가 동종 무선장비인 경우이므로 무선장비에 할당된 주파수 대역의 최저 중심 주파수와 최고 중심 주파수를 사용한다. 식 (6)에서는 최저 중심 주파수와 최고 중심 주파수의 C/I 값 중에 최소값을 선택한다.

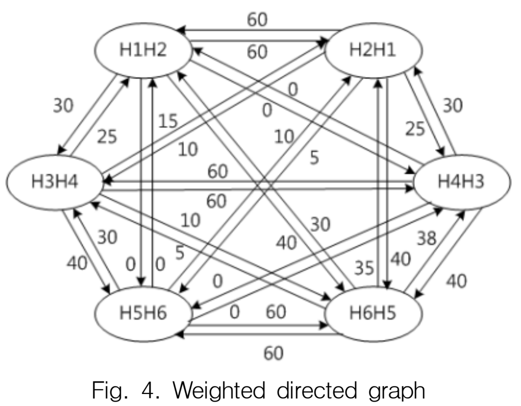


Fig. 4. Weighted directed graph

본 절에서 정의한 V, A, g(a)를 통하여 Fig. 2의 전술통신망의 백본 무선 링크 주파수 지정 문제는 Fig. 4의 가중치 유향그래프 $G_d = \{V, A; g\}$에서 유향모서리의 가중치를 고려한 꼭지 그래프 컬러링 문제로 표현된다. Fig. 4에서 꼭지는 통신링크를 나타내며, 꼭지 명칭의 앞부분과 뒷부분은 각각 송신장비와 수신장비를 의미한다. 유향모서리는 통신링크에 영향을 주는 간섭링크를 나타내며, 두 꼭지 사이에 전파 간섭을 회피하기 위한 유향모서리 가중치는 각 유향모서리 위에 표시한다.

2.2 가중치 무향그래프 변환

본 절에서는 가중치 유향그래프 $G_d = \{V, A; g\}$를 꼭지 그래프 컬러링 문제의 복잡도를 감소시키고, 중요 통신 링크의 우선순위를 부여한 무향그래프 $G_u = \{V; w_v, E; w_e\}$로 변환하는 방법을 설명한다.

가중치 유향그래프 $G_d = \{V, A; g\}$의 꼭지 그래프 컬러링 문제의 복잡도를 감소시키기 위하여 모서리 집합 A의 모든 유향모서리를 무향모서리로 변경하고, 동일한 끝점을 가지는 나란한 모서리는 하나만 남기고 삭제하여 모서리 집합 $E = \{e_{v_1 v_2}, e_{v_1 v_3}, \cdots, e_{v_{n-1} v_n}\}$를 생성한다. 이때 모서리 가중치 함수($w_e$)는 식 (8)과 같이 나란한 유향모서리 가중치의 최대값으로 정의한다.

$$w_e(e_{vu}) = \max(g(a_{vu}), g(a_{uv})), \ \ a \in A, e \in E \tag{8}$$

또한, 예상되는 전파 간섭이 없는 간섭 링크인 모서리의 가중치가 0인 모서리는 식 (9)와 같이 모서리 집합에서 삭제한다.

$$E = E - e \quad if\, w_e(e) = 0, \ \ e \in E \tag{9}$$

전술통신망에서의 중요 통신 링크에 주파수 지정 우선순위를 부여하기 위하여 통신 링크의 중요도를 표현하는 그래프의 꼭지 가중치 $w_v(v)$를 식 (10)과 같이 정의한다. 정의된 꼭지 가중치는 주파수 지정 순서 생성 시에 우선권을 부여하여 중요한 통신 링크에 우선적으로 주파수가 지정되도록 함으로써, 통신 링크의 중요도 반영이 가능하다.

$$w_v(v) = \text{통신링크의 중요도 값}, \ \ v \in V \tag{10}$$

본 절에서 정의한 E, w_e, w_v를 통하여 전술통신망의 백본 무선 링크 주파수 지정 문제는 Fig. 5의 가중치 무향그래프 $G_u = \{V; w_v, E; w_e\}$에서 꼭지와 모서리의 가중치를 고려한 꼭지 그래프 컬러링 문제로 최종적으로 변환된다.

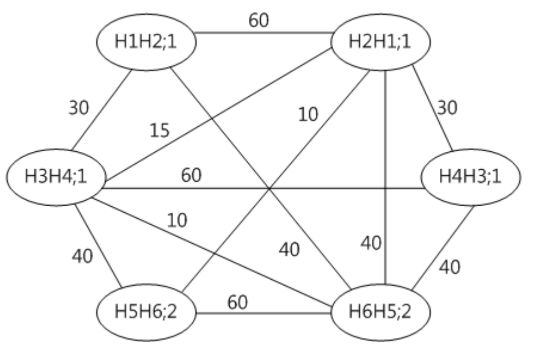


Fig. 5. Weighted undirected graph

Fig. 5에서 꼭지 가중치는 꼭지 명칭 뒤에 표시하고, 숫자가 낮을수록 높은 우선권을 가진다. 모서리 가중치는 두 꼭지 사이에 전파 간섭을 회피하기 위하여 필요한 주파수 이격값으로 각 모서리 위에 표시한다. 예로 H5H6의 통신 링크의 중요도는 2이고, H5H6가 연결된 H3H4, H2H1, H6H5와 전파 간섭을 회피하기 위한 모서리 가중치 값은 각각 40, 10, 60이 된다.

2.3 주파수 지정 순서 생성

본 절에서는 주파수를 지정할 통신 링크의 순서를 생성하기 위한 가중치 무향그래프 $G_u = \{V; w_v, E; w_e\}$에서의 꼭지 정렬 방법을 기술한다.

본 논문에서는 통신 링크의 중요도를 나타내는 꼭지의 가중치 $w_v(v)$, 통신 링크에 대한 간섭 링크 개수를 나타내는 꼭지에 이웃한 모서리의 개수 $d_G(v)$, 통신 링크에 대한 각 간섭 링크의 전파 간섭 예측량의 총합을 의미하는 꼭지에 이웃한 모서리의 가중치의 총합 $\Sigma w_e(e)$로 우선순위를 부여하여 주파수 지정 순서를 생성하기 위한 꼭지 정렬을 수행한다. 통신 링크의 중요도에 의한 우선순위는 전술통신망에 필수적인 통신 링크의 중심 주파수 우선 지정이 가능하며, $d_G(v)$와 $\Sigma w_e(e)$에 의한 우선순위는 주파수의 효율적 사용이 가능하다[15].

최초 주파수 지정 순서를 생성하기 위하여, 먼저 그

래프 꼭지 v를 $w_v(v)$의 값에 대해서 정렬한다. 동일한 $w_v(v)$값을 가지는 그룹 내에서는 $d_G(v)$값으로 정렬한다. 동일한 $w_v(v)$와 $d_G(v)$값을 가지는 그룹 내에서는 마지막으로 $\Sigma w_e(e)$값으로 정렬한다. $\Sigma w_e(e)$값까지 동일한 그룹 내에서는 임의의 순서로 꼭지를 정렬한다. 한정된 주파수 자원 때문에 최초 생성된 주파수 순서로 전파 간섭이 없는 주파수 지정 결과가 산출되지 않으면 추가적인 주파수 지정 순서 생성이 필요하다. 이 때에는 우선순위가 높은 그룹 내에서부터 임의로 정렬한 꼭지 순서를 변경하여 새로운 주파수 지정 순서를 생성한다. 이는 주파수 지정 결과에 대한 영향이 높은 그룹 내의 꼭지 순서를 먼저 변경하기 때문에 한정된 주파수 자원에서의 주파수 지정 가능성을 높일 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 가중치 그래프에서 주파수 지정 순서를 생성하는 예를 보여준다. Fig. 6의 좌측에는 꼭지의 중요도 $w_v(v)$, 이웃 모서리의 수 $d_G(v)$, 이웃한 모서리의 가중치의 총합 $\Sigma w_e(e)$을 우선순위로 정렬한 결과를 나타낸다. 그룹 1과 그룹 2는 각각 $w_v(v)$와 $d_G(v)$, $\Sigma w_e(e)$ 값이 동일한 우선순위를 갖는 꼭지를 모은 그룹 이다. 최초 주파수 지정 순서에서는 동일한 우선순위를 갖는 그룹 내에서는 임의로 꼭지를 정렬하여 순서를 결정한다. 추가적인 주파수 지정 순서가 필요하면 그룹 1과 그룹 2중에서 우선순위가 높은 그룹 1 내에서의 꼭지의 순서를 변경하여 전파 간섭 없는 주파수 지정 결과를 산출할 수 있는 가능성을 높인다.

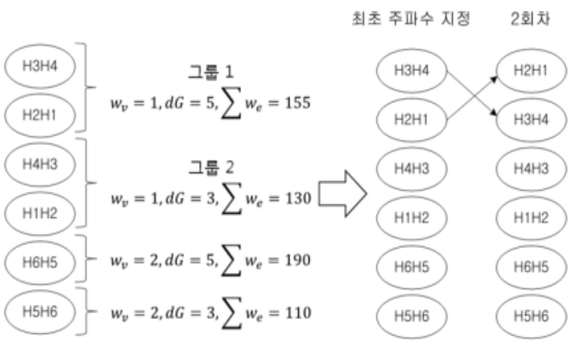


Fig. 6. Frequency assignment sequences

2.4 주파수 지정

본 절에서는 가중치 무향그래프 $G_u = \{V; w_v, E; w_e\}$에서 주파수 지정 순서에 따라 통신 링크에 중심 주파수를 지정하는 방법을 기술한다. 그래프의 모서리 가중치는 간섭 링크의 전파 간섭이 소실되는데 필요한 주파수 이격값이므로, 통신 링크에 전파 간섭이 없는 주파수 지정은 이웃 꼭지의 중심 주파수에 모서리 가중치 이상 이격된 중심 주파수를 선택하여 수행된다.

통신 링크에 지정 가능한 중심 주파수의 집합을 $F = \{f_1, f_2, \cdots, f_n\}$라 정의하고, 주파수 지정 빈도 함수 $p(f)$를 식 (11)과 같이 정의한다.

$$p(f) = \text{중심주파수 지정 횟수},\ f \in F \tag{11}$$

그래프 컬러링 함수가 $C: V \rightarrow F$ 일 때, 꼭지 v에 전파 간섭을 회피하여 지정 가능한 중심 주파수 후보 집합 F_v는 식 (12)를 만족하는 중심 주파수의 집합이 된다.

$$F_v = \left\{ \begin{array}{c} f \mid minfreq_v + \dfrac{BW_v}{2} \le f \le maxfreq_v - \dfrac{BW_v}{2}, \\ f \le C(u) - w_e(e_{vu}) \text{ or } f \ge C(u) + w_e(e_{vu}) \end{array} \right\} \tag{12}$$
$$f \in F,\ u\ is\ adjacent\ to\ v,\ v \text{ and } u \in V,\ e \in E$$

여기서 $minfreq_v$와 $maxfreq_v$는 꼭지 v의 무선통신 장비에 할당된 주파수 대역폭의 최저 주파수와 최고 주파수를 나타내며, BW_v는 통신장비의 대역폭을 나타낸다. u는 v와 이웃하고 중심 주파수가 지정된 꼭지로 $C(u)$는 u에 지정된 중심 주파수 이고, $w_e(e_{vu})$는 v와 u가 전파 간섭 회피를 위해 필요한 주파수 이격값이다. 따라서 꼭지 v에 해당 장비에 할당된 최대/최소의 중심 주파수 범위 내에서 $C(u) - w_e(e_{vu})$ 이하이거나, $C(u) + w_e(e_{vu})$ 이상인 중심 주파수를 지정하면 전파 간섭 회피가 가능하다. 이것은 제안하는 주파수 지정 방법이 그래프의 모서리 가중치 $w_e(e_{vu})$를 이용한 단순 산술 비교로 백본 무선 링크에 전파 간섭이 없는 주파수 지정이 가능함을 보여준다.

최종적으로 F_v의 중심 주파수 중에서 주파수 지정 빈도 $p(f)$ 값이 높은 중심 주파수를 꼭지 v에 지정한다. $p(f)$ 값이 동일하면 F_v 중 최저 중심 주파수를 꼭지 v에 지정한다. 이렇게 주파수 지정 빈도, 최저 중심 주파수에 우선순위를 부여하여 주파수를 지정하면 중심 주파수의 재사용을 높여서 부족한 주파수 자원의 효율적 사용이 가능하다.

Fig. 7은 Fig. 6에서의 최초 주파수 지정 순서로 꼭지 H4H3의 중심 주파수를 지정하는 예를 나타낸다. 여기서 무선 통신장비의 주파수 대역폭은 10이고, 통신장비에 할당된 주파수 대역폭의 최저 주파수 $minfreq_{H4H3}$은 700, 최고 주파수 $maxfreq_{H4H3}$은 800이다. 중심 주파수간 대역폭을 10으로 가정하면 통신 링크에 지정 가능한 중심 주파수 집합은 $F=\{f_1, f_2, \cdots, f_9\}$가 된다. Fig. 7에서 꼭지 H4H3과 이웃한 꼭지 H3H4와 H2H1에는 각각 f_1과 f_3이 지정되었기 때문에, 식 (12)에 의거하여 꼭지 H3H4와 H2H1의 전파 간섭 영향을 받는 중심 주파수를 제외하면 꼭지 H4H3에 전파 간섭 없이 지정 가능한 중심 주파수 후보 집합은 $F_{H4H3}=\{f_7, f_8, f_9\}$가 된다. 이 중에서 $p(f_7)$과 $p(f_8)$, $p(f_9)$의 값이 동일하기 때문에 최저 중심 주파수 f_7을 꼭지 H4H3에 지정한다.

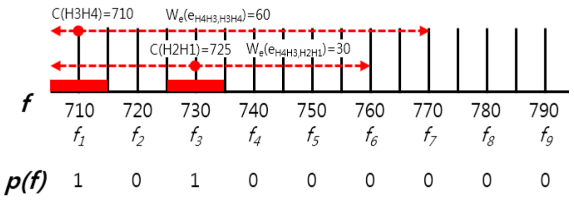


Fig. 7. Frequency assignment

3. 성능 평가

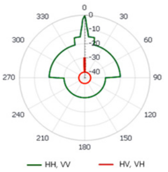
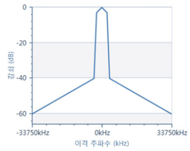
본 장에서는 제안하는 주파수 지정 방법과 군에서 운용 중인 HTZ-warfare에서 전술통신망의 백본 무선 링크에 대한 주파수 지정을 수행하고, 주파수 지정 결과를 비교 분석한다.

3.1 실험 환경

제안하는 주파수 지정 방법을 Frequency Planning System(FPS)으로 구현하였고, 성능평가를 위하여 가상의 무선 통신장비와 전술통신망을 구성하였다. 무선 통신장비 제원은 Table 1과 같다.

전술통신망은 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 대전지역을 중심으로 50개의 백본 무선 링크로 FPS와 HTZ-warfare에 구성하였다. 동일한 위치에 Table 1과 같은 동일한 제원의 무선 통신장비 50개를 배치하고, 동일한 백본 무선 링크 50개를 연결하였다.

Table 1. Wireless communications equipment characteristics

장비 제원	장비 속성
장비의 주파수 대역	7 GHz ~ 8 GHz
송수신 아테나 이득	29 dBi
송수신 안테나 높이	10 m
송신 출력	1 W
송수신 대역폭	6.25 MHz
선로 손실	0.8 dB
안테나 패턴	
송수신 마스크	

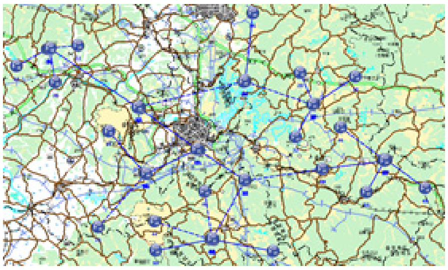


Fig. 8. Tactical communications network on FPS

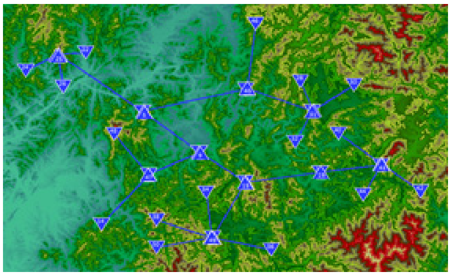


Fig. 9. Tactical communications network on HTZ-warfare

실험 주파수는 최저 주파수를 7 GHz로 설정한 후 주파수 대역폭을 20 MHz부터 5 MHz씩 증가시켜 Table

2와 같이 19개의 주파수 대역폭을 고려하였다. 이때, 중심 주파수의 간격은 0.125 MHz로 사용하였다. 간섭보호비는 FPS와 HTZ-warfare에 공통 적용 가능한 C/I 보호비를 사용하였고, C/I보호비는 43 dB로 설정하였다.

본 논문에서는 전술통신망의 구성을 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 고정하고, Table 2와 같이 주파수 대역폭을 증가시키면서 제안하는 방법과 HTZ-warfare의 전술통신망의 백본 무선링크 50개에 대한 주파수 지정 결과를 분석하였다. 이는 주파수 자원이 부족한 환경과 충분한 환경에서의 주파수 지정 성능을 확인할 수 있다.

Table 2. Frequency range

주파수 대역폭 (MHz)	주파수 범위 (MHz)	주파수 대역폭 (MHz)	주파수 범위 (MHz)
20	7000 ~ 7020	70	7000 ~ 7070
25	7000 ~ 7025	75	7000 ~ 7075
30	7000 ~ 7030	80	7000 ~ 7080
35	7000 ~ 7035	85	7000 ~ 7085
40	7000 ~ 7040	90	7000 ~ 7090
45	7000 ~ 7045	95	7000 ~ 7095
50	7000 ~ 7050	100	7000 ~ 7100
55	7000 ~ 7055	105	7000 ~ 7105
60	7000 ~ 7060	110	7000 ~ 7110
65	7000 ~ 7065		

3.2 평가 요소

주파수 지정 결과에 대한 성능 평가 요소로 전파 간섭 없는 주파수가 지정된 무선 링크 수와 주파수의 평균 재사용 수를 사용한다[10]. 주파수가 지정된 무선 링크 수는 주어진 주파수 대역폭에서 전파 간섭 없이 중심 주파수가 지정된 백본 무선 링크의 수를 말하며, 전술통신망에서 필요한 것보다 부족한 주파수 자원에서도 최대한의 백본 무선 링크에 중심 주파수 지정이 가능한지 확인한다. 주파수의 평균 재사용 수는 백본 무선 링크에 지정된 중심 주파수의 평균 재사용 수를 나타내며, 충분한 주파수 자원에서 주파수의 재사용을 높여서 주파수 자원의 효율적 사용이 가능한지 확인한다.

주파수가 지정된 무선 링크의 수는 N_{assign}으로 정의하고, 주파수의 평균 재사용 수 α는 식 (13)과 같이 정의한다.

$$\alpha = \frac{BW_{eq} \times N_{assign}}{BW_{assign}} \tag{13}$$

여기서 BW_{eq}는 무선 통신장비의 대역폭 6.25 MHz이고, N_{assign}는 주파수가 지정된 링크의 수를 나타내며, BW_{assign}는 주파수 지정에 사용된 주파수 대역폭을 나타낸다.

3.3 실험 결과 및 분석

본 절에서는 무선 통신장비에 할당된 주파수 대역폭을 20 MHz부터 5 MHz씩 증가시키면서 수행한 주파수 지정 결과 및 분석 내용을 기술한다.

Fig. 10은 각 주파수 대역폭에서 전파 간섭 없는 주파수가 지정된 무선 링크 수를 나타낸다. 제안한 방법은 주파수 대역폭이 35 MHz일 때부터 모든 무선 링크에 주파수 지정이 가능하였다. 이는 제안하는 방법이 35 MHz 주파수 대역폭만으로 6.25 MHz 대역폭의 백본 무선 링크 50개에 전파 간섭이 없는 주파수 지정이 가능함을 보여준다. 또한, 제안하는 방법은 대부분의 주파수 대역폭에서 HTZ-warfare보다 많은 수의 무선 링크에 중심 주파수를 지정하였다. Fig. 10에서 그래프의 기울기는 제안하는 방법과 HTZ-warfare에서 모두 점차적으로 감소한다. 25 MHz와 30 MHz 사이에서 HTZ-warfare의 기울기가 더 높은 이유는 HTZ-warfare에서 임의로 주파수를 선택할 때 30 MHz에서 주파수가 효율적으로 선택되는 경우가 발생하였기 때문이다.

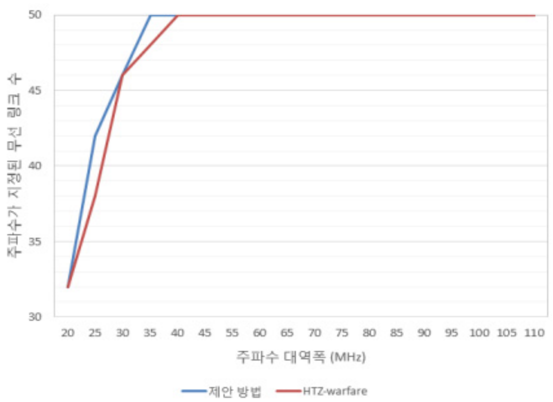


Fig. 10. Number of wireless links that center frequency is assigned to without frequency interferences

주파수 지정 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 주파수 대역폭이 35 MHz일 때의 제안하는 방법의 주파수 지정 결과를 사용하여 FPS와 HTZ-warfare에서 C/I보호비를 이용한 간섭 분석을 수행하였다. Table 3의 간섭 분석 결과는 주파수가 지정된 모든 무선 링크에서 간섭 링크에 대한 C/I비가 C/I보호비 43 dB보다 큰 조건을 만족하여 제안하는 방법이 전파 간섭이 없는 주파수 지정이 가능함을 보여준다. Table 3에서의 링크번호는 전술통신망을 구성한 무선 링크의 번호를 나타내며, C/I 비는 각 무선 링크에 대한 간섭 링크의 C/I비 최소값을 나타낸다.

Table 3. Interference analysis result using frequency assignment result of 35 MHz frequency bandwidth

링크 번호	FPS C/I (dB)	HTZ-warfare C/I (dB)	링크 번호	FPS C/I (dB)	HTZ-warfare C/I (dB)
1	46	47	26	51	51
2	50	46	27	64	96
3	58	46	28	45	46
4	60	52	29	66	56
5	60	62	30	53	53
6	47	49	31	88	95
7	46	68	32	49	49
8	57	57	33	50	51
9	54	57	34	49	50
10	45	46	35	64	65
11	48	49	36	70	71
12	46	47	37	55	46
13	79	73	38	69	65
14	52	60	39	70	80
15	47	48	40	58	59
16	49	43	41	46	47
17	46	46	42	63	64
18	48	49	43	49	49
19	47	48	44	51	44
20	52	54	45	52	53
21	63	65	46	49	43
22	47	48	47	53	51
23	82	87	48	65	56
24	65	66	49	47	48
25	47	48	50	68	59

Fig. 11은 각 주파수 대역폭에서 주파수의 평균 재사용 수를 나타낸다. 제안하는 방법은 최대 평균 10.65개의 중심 주파수를 재사용하고, 주파수 대역폭이 증가하여도 평균 10.12개의 중심 주파수 재사용을 유지하였다. 그리고 모든 주파수 대역폭에서 제안하는 방법의 주파수 평균 재사용 수가 HTZ-warfare 보다 높았다. 더욱이 주파수 대역폭이 증가될수록 제안하는 방법과 HTZ-warfare의 주파수 평균 재사용 수의 차이가 증가되어 제안하는 방법이 105 MHz 주파수 대역폭에서 최대 3.08배까지 향상됨을 확인하였다. 이는 제안하는 방법이 무선 통신장비가 정의된 순서 또는 임의의 순서로 무선링크에 임의의 주파수를 선택하고, 전파 간섭을 계산하여 주파수를 순차적으로 지정하는 HTZ-warfare에 비교하여 주파수의 재사용을 높여서 부족한 주파수 자원을 효율적으로 사용함을 보여준다.

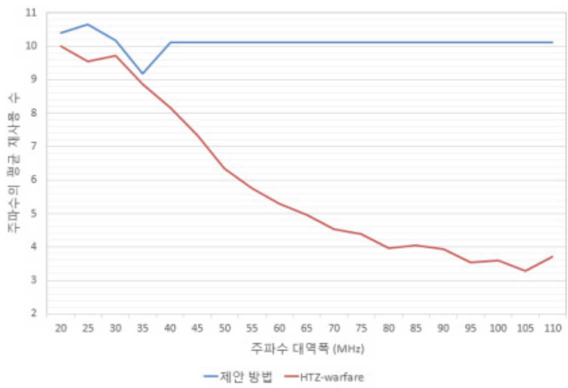


Fig. 11. Average reuse number of center frequencies that are assigned to wireless links

4. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 전술통신망의 백본 무선 링크에 전파 간섭을 회피하는 주파수 지정을 위하여 통합 필터 변별도와 그래프 컬러링을 이용한 주파수 지정 방법을 제안하였다. 전술통신망의 주파수 지정 문제를 통합 필터 변별도를 이용하여 가중치 그래프의 컬러링 문제로 변환하고, 통신 링크의 우선순위와 그래프 컬러링 이론에 따라 주파수 지정 순서를 생성하여 주파수 지정을 수행한다.

제안하는 방법은 단순 산술 비교만으로 전술통신망의 백본 무선 링크에 전파 간섭이 없는 주파수 지정

이 가능하며, 주파수의 재사용을 높여서 부족한 주파수 자원을 효율적으로 사용하는 장점을 가진다. 이는 성능 평가를 통하여 제안하는 방법이 35 MHz 주파수 대역폭만으로 6.25 MHz 대역폭의 백본 무선 링크 50개에 전파 간섭이 없는 주파수를 지정 가능하고, 현재 군에서 운용 중인 HTZ-warfare와 비교하여 주파수의 평균 재사용 수가 최대 3.08배 향상됨을 확인하였다.

향후 제안하는 방법을 확장하여 무선 통신장비의 이동에 따른 전파 간섭을 고려한 주파수 지정 방법의 연구를 진행할 예정이다.

References

[1] J. L. Burbank, P. F. Chimento, B. K. Haberman, and W. Kasch, “Key Challenges of Military Tactical Networking and the Elusive Promise of MANET Technology,” IEEE Communications Magazine, Vol. 44, No. 11, pp. 39-45, 2006.

[2] P. Boyer, P. Vicharelli, S. Reddy, and D. Fagen, “Automated Frequency Deconfliction for Tactical Networks,” in Proc. of IEEE Military Communications Conference, pp. 1-7, October, 2006.

[3] W. K. Hale, “Frequency Assignment : Theory and Applications,” in Proc. of IEEE, Vol. 68, pp. 1497-1514, December, 1980.

[4] S. J. Kim and I. Cho, “Graph-Based Dynamic Channel Assignment Scheme for Femtocell Networks,” IEEE Communications Letters, Vol. 17, No. 9, pp. 1718-1721, 2013.

[5] K. Smith and M. Palaniswami, “Static and Dynamic Channel Assignment using Neural Networks,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 15, No. 2, pp. 238-249, 1997.

[6] M. Duque-Anton, D. Kunz, and B. Ruber, “Channel Assignment for Cellular Radio using Simulated Annealing,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 1, pp. 14-21, 1993.

[7] S. C. Ghosh, B. P. Sinha, and N. Das, “Channel Assignment using Genetic Algorithm based on Geometric Symmetry,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 52, No 4, pp. 860-875, 2003.

[8] P. Yangjie, W. Lipo, and S. Boon Hee, “Optimal Channel Assignment in Cellular Systems using Tabu Search,” in Proc. of IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, Vol. 1, pp. 31-35, September, 2003.

[9] HTZ-warfare, http://www.atdi.com/htz-warfare/

[10] A. Graham, N. C. Kirkman, and P. M. Paul, “Mobile Radio Network Design in the VHF and UHF Bands : A Practical Approach,” John Wiley & Sons, 2007.

[11] R. Poe, R. Shaw, H. Zebrowitz, W. Kline, W. Heisey, F. Loso, et al., “Optimal Spectrum Planning and Management with Coalition Joint Spectrum Management Planning Tool(CJSMPT),” in Proc. of IEEE Military Communications Conference, pp. 1-7, November, 2008.

[12] ETSI, “Derivation of Receiver Interference Parameters Useful for Planning Fixed Service Point-to-Point Systems Operating Different Equipment Classes and/or Capacities,” ETSI TR 101 854, 2005.

[13] K. W. Suh, “A Study on Calculation of NFD and Protection Ratio of Fixed Radio Relay System for Analyzing Adjacent Channel Interference,” The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 16, No 11, pp. 1138-1146, 2005.

[14] K. W. Suh, “A Study on Calculation of Protection Ratio for Frequency Coordination in Microwave Relay System Networks,” The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 17, No 2, pp. 139-147, 2006.

[15] D. J. A. Welsh and M. B. Powell, “An Upper Bound for the Chromatic Number of a Graph and its Application to Timetabling Problems,” The Computer Journal, Vol. 10, No 1, pp. 85-86, 1967.