

차세대 전술이동통신체계를 위한 이동 기지국 배치 최적화 기법

이 기 훈*, 박 규 동*, 전 기 윤*,
 전 병 천**, 정 방 철*

An Optimal Mobile Subscriber Access Points Deployment Technique for Next-Generation Tactical Mobile Communication Systems

Ki-Hun Lee*, Gyudong Park*,
 Gi-Yoon Jeon*, Byungchun Jeon**,
 Bang Chul Jung*

요 약

본 논문에서는 차세대 전술이동통신체계(tactical mobile communication system: TMCS)를 위한 이동 기지국(mobile subscriber access point: MSAP) 배치 최적화 기법을 제안한다. 구체적으로, 백본 및 액세스 링크의 최소 통신 요구 성능을 고려하면서, 배치되는 MSAP의 대수를 최소화하는 기법을 제안했다. 건물이나 지형 등에 의한 비가시선 통신 환경 및 MSAP를 배치할 수 없는 영역과 같은 실질적인 제한 요소를 고려한 시스템 모델을 구현했으며, 모의실험을 기반으로 제안한 기법이 네트워크의 통신 요구 성능을 달성 하면서 배치되는 MSAP 수를 최적화하는 것을 확인 했다.

Key Words : tactical mobile communication system (TMCS), mobile subscriber access point (MSAP) deployment, integer linear programming (ILP), stochastic geometry

ABSTRACT

We propose a novel optimal mobile subscriber access points (MSAP) deployment scheme for tactical mobile communication systems (TMCS). The objective is to minimize the number of deployed MSAPs while ensuring the quality-of-service (QoS) requirements of the backbone and access links. Furthermore, we implemented a more realistic TMCS system model by considering blockages and areas where MSAP cannot be deployed. Simulation results show that the proposed technique can minimize the number of deployed MSAPs while ensuring the network requirements.

1. 서 론

무기체계의 위력과 사거리 증대 및 무인화 등과 함께 전장 환경이 확장됨에 따라 미래 전장은 기존 개별 플랫폼 중심에서 여러 전력 요소를 유기적으로 연결 하고 운영하는 네트워크 중심전(network centric warfare: NCW)으로 변하고 있다. 이러한 NCW의 핵심 요소 중 하나는 통신 기술이며, 이를 위해 국내에서도 기반 통신 체계로써 전술정보통신체계(tactical information communication network: TICN)를 개발

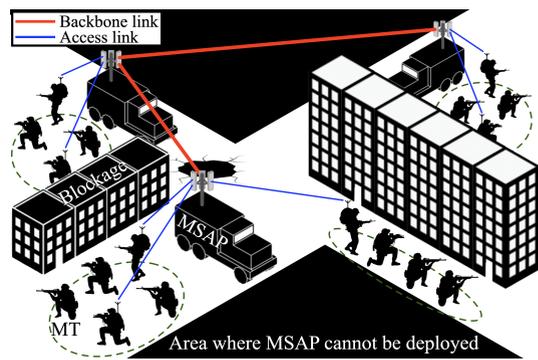


그림 1. 전술이동통신체계 시스템 모델
 Fig. 1. A system model of TMCS

※ 본 연구는 국방과학연구소의 국방 지휘통제 통합·연동 기반기술 특화연구실 과제의 지원을 받아 수행되었습니다(UD180010ED).

• First Author : (ORCID:0000-0002-0415-5603) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, kihun.h.lee@cnu.ac.kr, 학생(박사), 학생회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4485-9592) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr, 정교수, 중신회원

* Agency for Defense Development (ADD), iobject@add.re.kr, 책임연구원, 정회원; melong96@add.re.kr, 책임연구원, 정회원

** Netvision Telecom Inc., bcjeon@netvisiontel.co.kr, 대표이사, 중신회원

논문번호 : 202201-006-A-LU, Received January 8, 2022; Revised February 8, 2022; Accepted February 19, 2022

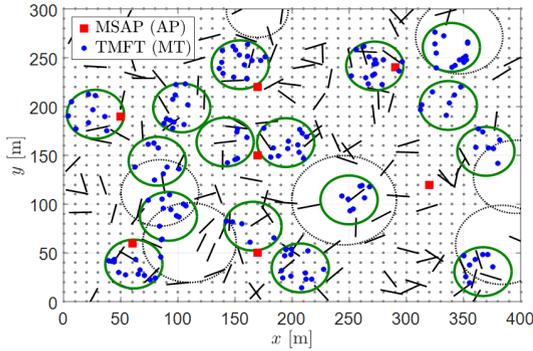


그림 2. 구현한 전술이동통신체계 시스템 모델
Fig. 2. An implemented system model of TMCS

하여 운용하고 있다¹¹⁾.

본 논문에서는 TICN 중 이동 기지국(MSAP)과 전술 다기능 단말기(tactical multi-functional terminal: TMFT)를 기반으로 기동 간 작전을 수행하는 전술이동통신체계(TMCS)를 고려한다. 이때, 통상적으로 TMCS의 가용 MSAP 대수는 제한되며, 이에 따라 네트워크의 통신 요구 성능(quality-of-service: QoS)을 만족하면서 배치되는 MSAP 수를 최소화하는 기술이 요구된다.

한편, 상용 이동통신 시스템에서 개발된 다양한 기지국 배치 기술이 있으나, 일반적으로 고정 기지국에 기반하며, 전 영역에 대한 커버리지 최적화를 고려한다¹²⁻¹⁵⁾. 이는 대개 일부 영역마다 군집 단위로 이동하며 작전을 수행하는 TMCS에 적용하기 적합하지 않으며, 이에 따라 군 통신망의 특징을 반영한 MSAP 배치 기술이 필요함을 시사한다.

특히, 본 논문에서는 기반 통신 장비의 파괴나 갑작스러운 통신 품질 저하에 따른 링크 단절 및 신뢰성 저하의 대안으로써 백본망은 두 개 이상의 링크를 확보하도록 하는 MSAP 배치 기법을 제안한다. 아울러, 건물이나 지형 등에 의한 비가시선 통신 환경 및 MSAP를 배치할 수 없는 영역 같은 현실적인 요소를 반영한 모의실험을 수행한다¹⁶⁾.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같은 TMCS를 고려하며, 이를 그림 2와 같이 $W[m] \times H[m]$ 2차원 네트워크로 모델링한다. 구체적으로, N_C 개 분대(cosite; \circ)가 이 영역 내에 무작위로 분포하며, TMFT (mobile terminal: MT; \bullet)는 분포된 각 분대의 중점을 기준으로 반경 $R_C[m]$ 내에 서로 독립적으로 $\lambda_{MT}[m^{-2}]$ 의 동

표 1. 주요 시스템 파라미터 표기법
Table 1. Key system parameters notation

Parameter	Notation
Area size: width \times height	$W[m] \times H[m]$
Step size between adjacent MSAP (AP) deployable points	$\Delta_{AP}[m]$
The number of Cosites	N_C
Cosite radius	$R_C[m]$
TMFT (MT) density	$\lambda_{MT}[m^{-2}]$
Blockage parameters: density and length	$\lambda_B[m^{-2}], l_B[m]$
MSAP non-deployable zone parameters: density, minimum and maximum radius	$\lambda_H[m^{-2}], \{R_{H,min}, R_{H,max}\}[m]$

일한 밀도를 갖는 푸아송 점 과정(Poisson point process: PPP)에 따라 분포한다. 또한, 건물 등과 같이 전파의 투과 손실을 야기하는 방해물(blockage; \dashv)은 선분들($\Phi_B = \{\mathbf{p}_B, l_B, \theta_B\}$)로 모델링하며, 여기서 $\mathbf{p}_B = [x_B, y_B]$, l_B 및 θ_B 는 각 선분의 중심 위치, 길이 및 방향을 각각 나타낸다. 이때, 중심 위치는 밀도 $\lambda_B[m^{-2}]$ 의 PPP에 따라 분포하며, 방향은 모두 서로 독립적으로 $\mathcal{U}(0, 2\pi)[rad]$ 의 균등 분포에 따라 정의된다. MSAP (AP) 배치 불가 영역(\circ)은 분대와 같이 원으로 정의하며, 중점은 $\lambda_H[m^{-2}]$ 의 밀도를 갖는 PPP에 따라 분포하고 반경은 모두 서로 독립적으로 $\mathcal{U}(R_{H,min}, R_{H,max})[m]$ 의 동일한 균등 분포에 따라 정의된다. 마지막으로, MSAP 배치 후보 위치는 그림 2의 영역을 $\Delta_{AP}[m]$ 의 길이를 갖는 정사각형 영역으로 나누었을 때 도출되는 격자점(grid point) 중 앞서 정의한 MSAP 배치 불가 영역에 포함되지 않는 점들(\bullet)로 정의한다. 시스템 모델의 파라미터에 대한 표기법(notation)을 정리하면 표 1과 같다.

이에 따라 분포되는 MT들의 위치 집합을 \mathcal{L}_{MT} , MSAP 배치 후보 위치의 집합을 \mathcal{L}_{AP} 로 정의하며, 배치되는 MT와 MSAP는 최대 신호 수신 전력에 기반하여 링크를 형성한다. 한편, 통상적으로 MT가 MSAP 대비 낮은 송신 전력과 안테나 이득을 가지므로 상향링크 수신 신호 세기를 고려하며, 노드 $j(\in \mathcal{L}_{AP})$ 가 노드 $i(\in \mathcal{L}_{\psi}; \psi = \{AP, MT\})$ 로부터 받는 수신 신호 세기 $r_{j,i}$ 는 다음과 같이 정의한다:

$$r_{j,i}^{(\psi)} = P_i^{(\psi)} G_i^{(\psi)} G_j L_{(1m)} L_{j,i}(\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|), \quad (1)$$

여기서 $P_i^{(\psi)}$ 는 노드 i 의 송신 전력을 나타내며, $G_i^{(\psi)}$ 와 G_j 는 각각 노드 i 의 송신 안테나 이득 및 노드 j 의 수신 안테나 이득을 의미한다. MSAP는 지향성 안테나를 사용하며, 어떠한 방향이든 빔포밍할 수 있다고 가정하여, 주엽 이득만을 고려한다. 아울러, $L_{(1m)} = (c/(4\pi f_c))^2$ 은 단위 거리(1m) 당 전파 손실을 의미하며, 여기서 c 와 f_c 는 각각 빛의 속도와 반송파(carrier)의 주파수 대역을 나타낸다. 송수신 노드의 2차원 위치인 \mathbf{p}_i 와 \mathbf{p}_j 사이 거리에 따른 함수로 정의되는 $L_{j,i}(\delta)$ 는 경로 손실을 의미하며, 두 노드 사이 링크와 선분으로 모델링한 방해물 간 교점이 없는 경우 해당 링크는 가시선(line-of-sight: LoS) 전파로 간주하여 $L_{j,i}(\delta) = \delta^{-\alpha_L}$, 하나 이상의 교점이 있으면 비가시선(non-LoS: NLoS) 전파로 간주하여 $L_{j,i}(\delta) = \delta^{-\alpha_N}$ 로 정의한다⁶⁾.

III. 제안하는 MSAP 배치 최적화 기법

본 절에서는 정수 선형 계획법(integer linear programming: ILP) 기반의 MSAP 배치 최적화 기법을 제시한다. 문제 정의에 앞서, TMCS에서 링크의 안정성을 확보할 수 있도록, 각 링크에는 서로 직교하는 채널이 할당된다고 가정한다. 즉, 다른 링크 간 간섭은 없다고 가정하며, 이에 따라 링크의 통신 요구 성능을 임계 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR) γ_{ψ} [dB]로 정의한다. 이때, γ_{AP} 와 γ_{MT} 는 각각 백본 링크(MSAP-MSAP) 및 액세스 링크(MSAP-MT)의 임계 SNR을 나타낸다.

또한, MSAP 배치 문제의 복잡도 완화를 위해 SNR 지표 행렬 $\mathbf{A}^{(\psi)}$ 을 정의하며, 각 행렬의 원소는 $a_{j,i}^{(\psi)} = \mathbf{1}(r_{j,i}^{(\psi)}/N^{(\psi)} \geq \gamma_{\psi})$ 로 구성된다. 여기서 $N^{(\psi)}$ ($= -174[\text{dBm/Hz}] + 10\log_{10} W^{(\psi)} + NF$)는 링크에 할당된 채널의 대역폭($W^{(\psi)}$) 및 잡음지수(noise figure; NF)를 고려한 잡음 전력을 나타낸다. 나아가 다음과 같이 두 가지 최적화 파라미터를 정의한다. 우선, z_j 는 위치 j 에 MSAP의 배치 여부를 나타내는 최적화 파라미터로써, 후보 위치 j 에 MSAP가 배치되는 경우 1, 그 외의 경우 0의 값을 갖는다; $c_{j,i}^{(\psi)}$ 는 링크 연결 여부를 나타내는 최적화 파라미터로써, 노드 $i(i \in \mathcal{L}_{\psi})$ 가 위치 j 에 배치된 MSAP와 연결되는 경우 1, 그 외의 경우 0의 값을 갖는다.

본 논문에서 제안하는 정수 선형 계획법 기반

표 2. 모의실험 시스템 파라미터
Table 2. System parameters of simulations

Parameter	Value
Area size $W \times H$	400 × 300
Step size between adjacent MSAP deployable points Δ_{AP}	10
Cosite and MT parameters R_C, λ_{MT}	25, 5×10^{-3}
Blockage parameters $\{\lambda_B, l_B\}$	$\{10^{-3}, 20\}$
MSAP non-deployable zone parameters $\{\lambda_H, R_{H,\min}, R_{H,\max}\}$	$\{5 \times 10^{-5}, 25, 50\}$
Carrier frequency f_c	7GHz (X-band)
Noise figure NF	3dB
Path loss exponents α_L, α_N	2, 4
Channel bandwidth $W^{(AP)}, W^{(MT)}$	50MHz, 10MHz
Transmit power $P_i^{(AP)}, P_i^{(MT)}$	30dBm, 10dBm
Antenna gains of MSAP $G_i^{(AP)}, G_j$	10dBi, 10dBi
SNR threshold γ_{AP}, γ_{MT}	10dB, 5dB

MSAP 배치 최적화 기법은 다음과 같이 정의 (formulation)한다.

$$\min \sum_{j \in \mathcal{L}_{AP}} z_j \quad (2a)$$

$$\text{s.t. } z_j \geq \sum_{k \in \Psi} \frac{1}{L_k} \sum_{i \in \mathcal{L}_k^{(k)}} c_{j,i}^{(k)}, \quad \forall j \in \mathcal{L}_{AP}, \quad (2b)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}_{AP}} a_{j,i}^{(MT)} c_{j,i}^{(MT)} \geq 1, \quad \forall i \in \mathcal{L}_{MT}, \quad (2c)$$

$$2(1 - z_k) + \sum_{\substack{j \in \mathcal{L}_{AP} \\ j \neq k}} a_{j,k}^{(AP)} c_{j,k}^{(AP)} \geq 2, \quad \forall k \in \mathcal{L}_{AP}, \quad (2d)$$

여기서 $L_k = |\mathcal{L}_k|$ 이다. 구체적으로, 목적함수 (2a)는 배치되는 MSAP의 수를 최소화한다. 제약조건 (2b)는 배치된 MT 또는 배치될 MSAP i 가 위치 j 와 연결(association)되는 경우, 해당 위치에 MSAP가 배치되어야 함을 나타내며, 제약조건 (2c)는 각 MT가 요구 SNR 조건을 충족하는 하나 이상의 MSAP와 연결되어야 함을 내포한다. 또한, 제약조건 (2d)는 배치되는 MSAP가 요구 SNR 조건을 충족하는 둘 이상의 MSAP와 연결되어야 함을 정의한다.

결론적으로, 최적화 파라미터 z_j 와 $c_{j,i}^{(\psi)}$ 에 따라 MSAP를 배치하고 노드 간 링크를 연결함으로써 앞서 서술한 제약조건을 모두 만족하면서 MSAP 수를 최소화하는 배치 결과가 도출된다.

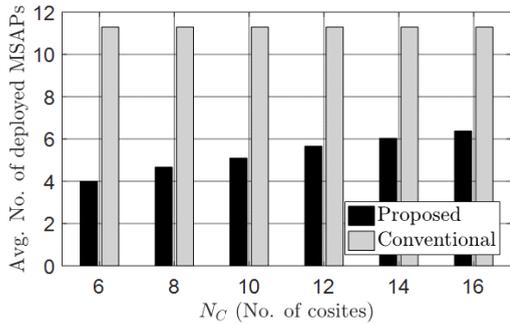


그림 3. 분대 수에 따라 배치되는 평균 MSAP 대수
 Fig. 3. The average number of deployed MSAPs according to the number of cosites

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위한 시스템 파라미터는 시가전을 고려하여 표 2와 같이 정의했다. 통상적으로 백본은 액세스 망 대비 많은 트래픽을 수용해야 하므로, 더 넓은 채널 대역폭과 높은 SNR 임계치를 정의했다. 구체적으로, 표 2의 파라미터와 분대 수를 기반으로 생성되는 100개의 네트워크 모델에서 MSAP 배치 최적화를 수행했으며, CPLEX를 이용하여 최적화 문제 (2a)-(2d) 솔루션을 도출했다. 그림 3은 본 논문에서 제안한 MSAP 배치 최적화 기법의 모의실험 결과이며, 분대 수에 따라 배치되는 평균 MSAP의 수를 나타낸다. 전 영역에 대한 커버리지를 고려하는 상용 망의 기지국 배치 기술은 분대 수와 무관하게 평균 11.3대의 기지국이 필요하지만, 제안하는 기법은 매우 적은 수의 MSAP를 필요로 한다. 아울러, 그림 2와 같이 각 분대가 영역 전반에 걸쳐 분산하여 배치되는 경우 ($N_C = 16$)에도 훨씬 적은 수의 MSAP를 필요로 하는 결과를 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 차세대 전술이동통신체계(TMCS)를 위한 정수 선형 계획법(ILP) 기반 이동 기지국(MSAP) 배치 최적화 기술을 제안했다. 구체적으로, 네트워크에서 요구되는 통신 성능을 만족하면서 배치되는 MSAP 수를 최소화했으며, 백본망의 안정성 향상을 위해 두 개 이상의 링크를 확보하는 배치 기법을 제안했다. 모의실험에는 방해물에 의한 전파 손실 및 MSAP 배치 불가 영역과 같은 현실적인 요소를 반영했으며, 결과적으로 고려한 네트워크의 통신 요구 성능을 만족하면서 MSAP 수를 최소화하는 것을 확인했다.

References

- [1] J. Kim, S. Park, J. Cha, and Y. Kim, "Future tactical communication system development plan," *J. Convergence Inf. Technol.*, vol. 11, no. 6, pp. 14-23, Jun. 2021.
- [2] Y. Zhang, L. Dai, and E. W. M. Wong, "Optimal BS deployment and user association for 5G millimeter wave communication networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 5, pp. 2776-2791, May 2021.
- [3] M. Dong, T. Kim, J. Wu, and E. W.-M. Wong, "Millimeter-wave base station deployment using the scenario sampling approach," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 11, pp. 14013- 14018, Nov. 2020.
- [4] H. U. Lee, W. S. Jeon, and D. G. Jeong, "An effective AP placement scheme for reliable WiFi connection in industrial environment," in *Proc. 35th Annu. ACM SAC '20*, pp. 2137-2143, Brno, Czech Republic, Mar. 2020.
- [5] S. Qiu, X. Chu, Y.-W. Leung, and J. K. Yin Ng, "Joint access point placement and power-channel-resource-unit assignment for 802.11ax based dense WiFi with QoS requirements," in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 2569-2578, Toronto, ON, Canada, Jul. 2020.
- [6] C. Madapatha, *et al.*, "On integrated access and backhaul networks: Current status and potentials," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 1374-1389, Sep. 2020.