

산림자원 관리를 위한 항 재밍 기능을 보유한 무인항공기국 추적방법에 관한 연구

정진우* · 신용규**

A Study on UAV Tracking Method with Anti-Jamming Function for Forest Resource Management

Jin-Woo Jung* · Yong-Gyu Shin**

요약

산림자원의 효율적인 관리를 위한 정보획득을 위해서는 서로 다른 센서를 장착한 다수의 무인항공기가 동시에 운영되어야 한다. 이에 따라 지상제어국 안테나는 지속적으로 대국에 대한 추적을 수행해야 할 뿐만 아니라 타 무인항공기에 대한 전파간섭 영향을 억제해야 한다. 본 논문에서는 위상배열안테나 시스템을 기반으로 구축된 지상제어국에 있어, VPR 알고리즘을 기반으로 지속적인 추적 및 전파간섭 억제를 위한 빔 형성 기법에 관하여 연구하였다. 다양한 무인항공기 운영 환경에 대한 모의실험 결과, 제시된 기법을 기반으로 운항중인 무인항공국에 대한 지속적인 추적을 할 수 있을 뿐만 아니라, 다수의 전파간섭원에 대해 지속적인 패턴 널을 형성하여 전파간섭을 억제할 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

To efficiently manage forest resources, it is essential to deploy multiple unmanned aerial vehicles equipped with various sensors simultaneously. Consequently, the ground control station antenna should not only maintain continuous tracking of the target station but also minimize the impact of radio interference on other unmanned aerial vehicle stations. In this paper, we presented beam forming techniques based on the VPR algorithm within a ground control station constructed using a phased array antenna system. Through simulation experiments in diverse unmanned aerial vehicle operating environments, it was demonstrated that the presented method enables not only the continuous tracking of operational unmanned aerial vehicles but also the suppression of radio interference by establishing a continuous pattern null for multiple operational radio interference sources.

키워드

UAV, Wireless Communication, Tracking, Anti-Jamming, Phased Array Antenna
무인 항공기, 무선 통신, 추적, 항 재밍, 위상 배열 안테나

* 동신대학교 정보통신공학과(jungjw@dsu.ac.kr)

** 교신저자 : 동신대학교 산림조경학과

• 접수일 : 2023. 10. 11

• 수정완료일 : 2023. 11. 11

• 게재확정일 : 2023. 12. 27

• Received : Oct. 11, 2023, Revised : Nov. 11, 2023, Accepted : Dec. 27, 2023

• Corresponding Author : Yong-Gyu Shin

Dept. Forestry and Landscape Architecture, Dongshin University

Email : ygshin@dsu.ac.kr

1. 서 론

산림자원은 생태계와 인간사회에 영향을 미치는 중요한 자원 중 하나로, 생물 다양성을 지원하는 역할을 할 뿐만 아니라 자연환경과 삶에 긍정적인 영향을 미치는 중요한 문화적, 경제적 가치를 지니고 있다. 따라서 지속적인 관리와 보전이 필요하다[1].

산림자원 관리를 위한 정보는 다양한 센서(Sensor)를 통해 획득할 수 있다. 식물의 성장상태/생물다양성/토양특성 등의 정보는 다중분광 센서를 통해, 온도분포/동식물 추적/화재감지 등의 정보는 열화상 센서를 통해 그리고 지형 및 지면 고도/산림의 구조/지형 모델링(Modeling) 등의 정보는 LiDAR (Light Detection and Rangeing) 센서를 통해 획득할 수 있다. 이외에 대지 질 센서, 지리 정보 센서, 레이더(Radar) 등 다양한 센서가 활용되고 있다[2-6].

센서를 기반으로 원활한 산림자원 관리 정보를 획득하기 위해서는 넓은 지역에 대한 관측이 필요하다. 이에 따라 드론(Drone)과 같은 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)가 활용되고 있다[2, 3, 5, 6].

무인항공기의 원활한 제어와 실시간 정보 획득(화재 감지 등의 목적)을 위해서는 지상제어기의 통신장치(지상제어국)와 무인항공기의 통신장치(무인항공기국) 사이에 무선통신 기반 데이터 링크(Data Link)가 구축되어야 한다[7].

산림자원의 광역 탐색을 위해서는 무인항공기의 운항 고도가 높아야 한다. 이는 무선통신을 위한 통달거리가 멀어야 한다는 뜻이다. 무선통신에 있어 통달거리 확장을 위해서는 고출력 증폭기를 사용하는 방법과 고 지향성 안테나를 사용하는 방법이 있다. 그러나 드론 제어 및 정보 수신을 위한 무선통신 주파수는 ISM(Industry Science Medical) 대역으로 출력이 제한이 있다. 따라서 고 지향성 안테나를 기반으로 무선통신 통달거리를 확장해야 한다. 더불어, 무인항공기는 운항 시간 및 범위를 확보해야 하는데, 이를 위해서는 무인항공기 탑재 장비의 SWaP (Size, Weight and Power)를 고려해야 한다. 따라서 지상제어국은 고 지향 방사특성을 가지는 안테나가 필요하다.

고 지향 방사특성을 가지는 안테나 시스템은 주빔(Main Beam)의 빔폭(Beam Width)이 좁다. 따라서 지상제어국에서 무인항공기국을 향해 안테나 빔을 조

향함에 있어, 오차에 민감하게 반응하게 된다. 즉, 빔조향 오차가 있는 경우, 제어 불능 상태 혹은 획득 정보의 소실이 야기된다. 따라서 고 지향 방사특성을 가지는 지상제어국 안테나 시스템은 운항 상태에 있는 무인항공기국을 정밀 조향할 수 있어야 한다. 결과적으로 지상제어국 안테나 시스템은 운항중인 대국에 대하여 지속적인 빔 조향이 가능한 대국 추적 기능을 보유해야 한다[8-9].

산림자원 관리 정보획득을 위해서는 다양한 센서가 활용된다. 이에 따라 무인항공기국에는 다양한 정보 획득을 위한 다수의 센서가 장착되어야 한다. 그러나 상기 기술된 것과 같이, 무인항공기의 운항 시간 및 범위를 확보하기 위해서는 탑재 장비의 SWaP를 고려해야 한다. 즉, 다양한 산림자원 관리 정보획득을 위해서는 서로 다른 센서를 장착한 다수의 무인항공기가 동시에 운용되어야 한다. 무인항공기 운용을 위한 주파수 자원은 한정되어 있기 때문에 다수의 무인항공기 운용은 전파간섭을 야기하게 된다. 따라서 원활한 정보획득 및 무인항공기 제어를 위해, 지상제어국 안테나 시스템은 전파간섭 억제기능(항재밍, Anti-Jamming)을 보유해야 한다[10, 11].

결과적으로 산림자원 관리를 위한 무인항공기 운용에 있어, 지상제어국 안테나 시스템은 다음의 성능 및 기능이 요구된다.

- a. 고 지향 방사특성
- b. 추적 기능
- c. 항재밍 기능

위상배열안테나(Phased Array Antenna)는 방사소자를 구조적으로 배열하여 고 지향 방사특성을 유도할 수 있다. 더불어 각 방사소자에 여기되는 신호에 특정 위상 가중 조합을 적용하면 전기적으로 빔조향기능과 함께 특정 형상으로 빔을 형성할 수 있다. 전기적으로 제어되는 빔조향 성능은 무인항공기국 추적에 적용할 수 있다. 그리고 빔성형 기법을 기반으로 전파간섭을 야기하는 타 무인항공기에 대해 패턴 널(Pattern Null) 형성을 통해 전파간섭 억제 기능 또한 구현할 수 있다. 따라서 산림자원 관리를 위한 지상제어국 안테나 시스템은 위상배열안테나 시스템이 적합함을 알 수 있다[12].

위상배열안테나 시스템을 기반으로 추적 기능 구현에 관한 연구는 많이 진행되어 왔다[8, 9]. 그리고 빔 형성 기법을 기반으로 빔 조향과 함께 패턴 널 형성에 관한 연구도 많이 진행되어 왔다[13, 14].

그러나 추적기능 구현 연구는 항 재밍을 위한 패턴 널 형성 기능이 미 구현되어 있을 뿐만 아니라, 대국에 대한 빔 조향 및 전파 간섭원에 대한 패턴 널 형성을 위한 연구는 지속적으로 변화되는 환경이 아닌 순시적인 상황에 대해서만 연구되어 왔다.

앞서 기술된 것과 같이 산림자원 관리를 위한 정보 획득을 위해서는 운항중인 무인항공기들에 대한 추적 기능과 항재밍 기능이 구현되어야 한다.

본 논문에서는 고 지향 방사특성을 가지는 위상배열안테나 기반 지상제어국 안테나 시스템에 있어, 지속적인 추적 및 항 재밍 기능을 구현하기 위한 기법을 제시하였다. 제시된 기법은 다변수 함수 최적화를 위한 휴리스틱 알고리즘(Hueristics Algorithm) 중, 지속적으로 변화되는 환경에 대한 다변수 최적화가 가능한 포복경 영양 번식(Vegetative Propagation by Runners, VPR) 최적화 알고리즘[15]을 기반으로 한다. 제시된 기법 적용을 위해, 지상제어국 안테나 시스템 구성하고 방사특성을 분석하였으며, 분석결과를 기반으로 VPR 알고리즘을 최적화 하였다. 지상제어국을 위한 위상배열안테나 시스템의 구성 및 방사특성 분석, VPR 알고리즘 적용을 위한 최적화 과정 그리고 모의실험에 따른 제시된 기법의 성능분석에 관한 상세한 내용을 다음 장에 상세히 기술하였다.

II. 지상제어국 안테나 시스템

지상제어국을 위한 안테나 시스템은 방사소자가 평면상에 선형 등간격 배열된 구성으로 설정하였다. 안테나의 구성에 있어, 배열된 방사소자 수와 방사소자 간 간격은 안테나의 방사특성 및 빔 조향 성능에 직접적인 영향을 준다.

본 논문에서는 안테나의 요구 방사특성에 있어, 지향성을 23 dBi 이상으로 설정하였다. 그리고 빔 조향 범위는 구 좌표계(r, θ, ϕ)를 기준으로 θ 방향 범위는 $0 \leq \theta \leq 30^\circ$ 으로 ϕ 방향 범위는 $0 \leq \phi < 360^\circ$ 로 설정하였다.

그리고 지향성 만족을 위해, 배열된 방사소자는 8×8 개로 설정하였다(방사소자 배열 평면은 $x-y$ 평면으로 가정). 각 방사소자 배열 축 기준 방사소자 간 간격은 식 (1)과 식 (2)를 기반으로 산출할 수 있다.

$$d_x \leq \frac{N-1}{N} \frac{\lambda}{1 + \sin\theta_m \cos\phi_m} \quad \dots (1)$$

$$d_y \leq \frac{N-1}{N} \frac{\lambda}{1 + \sin\theta_m \sin\phi_m} \quad \dots (2)$$

여기서 d_x 와 d_y 는 등간격으로 설정된 각 축 기준 방사소자 간 간격, N 은 각 축 기준 배열된 방사소자 수(설정에 따라 8), λ 는 파장(Wave Length) 그리고 θ_m 은 θ 방향으로 최대 빔 조향 각도(30°), ϕ_m 은 설정에 따른 ϕ 방향 빔 조향 범위 내 방사소자 간 간격이 최소가 되도록 설정하는 값(d_x 의 경우 $\phi = 0^\circ$, d_y 의 경우 $\phi = 90^\circ$)이다.

이에 따른 지상제어국 안테나 시스템의 각 축기준 방사소자 간 간격(d_x 와 d_y)은 빔 조향 오차를 고려하여 각각 0.5λ 로 설정하였다. 그림 1은 상기 설정에 따른 지상제어국 안테나 시스템의 구성도를 보여준다. 동작 주파수는 5.8 GHz로 가정하였으며, 방사소자는 마이크로스트립 패치(Microstrip Patch)로 가정하였다.

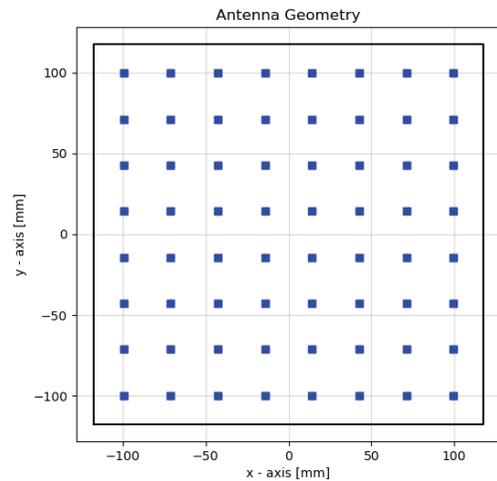


그림 1. 지상제어국 안테나 시스템 구성도
Fig. 1 Geometry of antenna system

일반적으로 배열안테나의 방사특성은 방사소자를 점전하원으로 대치한 AF(Array Factor)를 기반으로 분석한다. 식 (3)은 배열구성에 따른 AF 산출식을 보여준다.

$$AF = \sum I_n \exp(jk \hat{r} \cdot \vec{r}_n + j\alpha_n) \quad \dots (3)$$

여기서 I_n 는 n 번째 방사소자에 여기되는 신호, k 는 전파상수(Wave Number), \hat{r} 은 구 좌표계 기준 r 방향 단위벡터(Vector), \vec{r}_n 은 n 번째 방사소자 중심에 대한 위치벡터 그리고 α_n 은 빔 조향 및 형성을 위한 n 번째 방사소자 여기신호에 대한 위상 가중치이다.

만약 빔 성형이 아닌 빔 조향만 요구 될 경우, 위상 가중치(α_n)는 식 (4)를 통해 산출할 수 있다.

$$\alpha_n = -jk \hat{r} \cdot \vec{r}_n, (\theta = \theta_d, \phi = \phi_d) \quad \dots (4)$$

여기서 θ_d 와 ϕ_d 는 요구 빔 조향 각도이다.

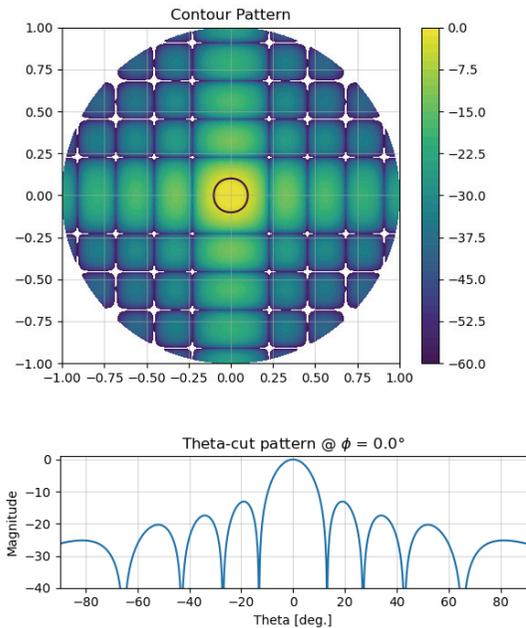
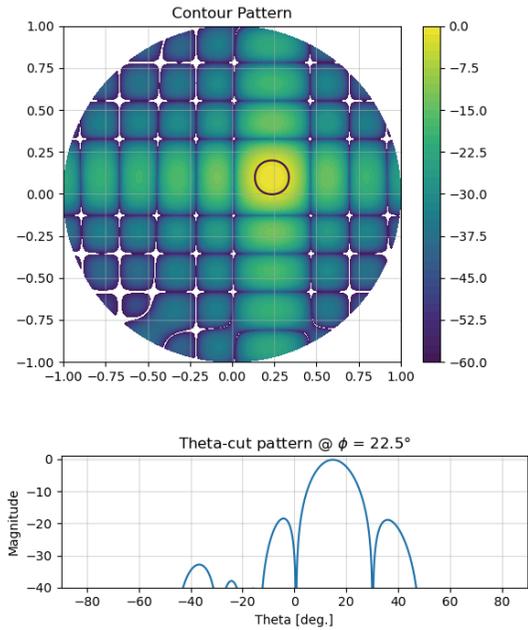
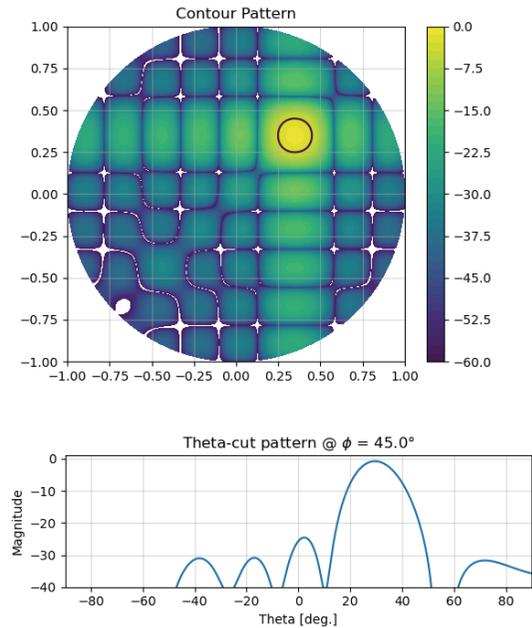


그림 2. 안테나 방사특성($(\theta_d, \phi_d) = (0^\circ, 0^\circ)$)
Fig. 2 Radiation characteristics($(\theta_d, \phi_d) = (0^\circ, 0^\circ)$)



(a) $(\theta_d, \phi_d) = (15^\circ, 22.5^\circ)$



(b) $(\theta_d, \phi_d) = (30^\circ, 45^\circ)$

그림 3. 안테나 방사특성
Fig. 3 Radiation characteristics

그림 2는 상기 설정에 따른 지상제어국 안테나 시스템에 있어, 방사주축($\theta_d = 0^\circ$, $\phi_d = 0^\circ$)으로 빔을 조향했을 때의 방사 특성을 보여준다. 분석결과, 지향성은 약 23.8 dBi 그리고 반치각(Half Power Beam Width, HPBW)은 10.6° 으로 분석되었다. 지상제어국 안테나 시스템은 θ 기준 최대 30° 로 빔 조향이 되도록 가정되었다. 그림 3은 요구 빔 조향 각도(θ_d , ϕ_d)가 각각 (15° , 22.5°)와 (30° , 45°)인 경우의 방사 특성을 보여준다. 분석결과, 각 요구 빔 조향 각도에 대해 지향성은 각각 23.6 dBi, 23.1 dBi 이고 반치각은 각각 12.1° , 13.6° 로 분석되었다. 지상제어국 안테나 시스템 구성에 따라 요구 지향성 및 빔 조향 성능을 만족할 수 있음을 알 수 있다.

III. 추적 및 항재밍 기능 구현

3.1 포복경 영양 번식 최적화 알고리즘

VPR 알고리즘은 식물의 뿌리에 의해 평가된 토양의 양분 정보를 기반으로 식물군이 영양기관(포복경)에 의해 이동 번식하면서 최고의 양분 위치를 탐색하는 것을 모사한 알고리즘으로 다변수 함수 최적화 문제에 적용이 가능하다.

탐색을 위한 식물군에 있어, i 번째 식물의 위치는 $X_i = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 와 같이 최적화하기 위한 다변수(x_n)에 대응해 다차원으로 정의된다. 각 식물은 직근(Taproot)과 측근(Fibrous Root)에 의해 토양의 정보(비용 평가 값)를 획득한다. 직근의 위치는 식물 위치와 동일하며, 측근은 식 (5)과 같이 직근 인근에 형성되도록 설정된다.

$$F_j^i = X_i + c_f \text{rndn} \quad \dots (5)$$

여기서 j 는 i 번째 식물의 측근을 구분하기 위한 지시자, c_f 는 측근 발생 계수 그리고 rndn 은 정규분포 난수 발생함수이다.

식물군 내,,, 각 식물의 직근에 의해 평가된 토양 정보 중, 최고 위치는 P 로 정의된다(직근에 의한 토양 평가값은 포복경에 의해 식물군이 공유한다). 그리고 각 식물에 있어, 측근들에 의해 평가된 토양 정보

중 최고 위치는 S^i 로 정의된다.

이동 번식을 위한 각 식물의 포복경은 식 (6)과 같이, 이전 세대의 식물군 내 최고 양분 위치와 각 식물의 측근에 의해 평가된 최고 양분 위치를 기반으로 생성 위치가 결정된다.

$$R_i[t] = c_s \text{rnd}(S_i - X_i) + c_p \text{rnd}(P - X_i) \quad \dots (6)$$

여기서 R_i 는 i 번째 식물의 포복경 위치, t 는 번식 세대 구분 지시자, c_s 와 c_p 는 각각 측근과 직근에 의해 획득한 토양 정보 기반 포복경 생성 계수 그리고 rnd 은 균일분포 난수 발생 함수이다.

포복경 위치가 결정되면 식물들은 식 (7)을 기반으로 이동 번식한다.

$$X_i[t+1] = X_i[t] + R_i[t] \quad \dots (7)$$

VPR 알고리즘은 식물의 노화현상이 반영되어 있다. 식물의 노화는 식 (8)과 (9)와 같이 식물에 의해 획득한 식물군 최고 양분값과 각 식물의 측근에 의해 획득한 최고 양분값이 세대 증가에 따라 감소하는 것으로 모사된다.

$$P = P \exp(-\alpha_p \text{age}) \quad \dots (8)$$

$$S_i = S_i \exp(-\alpha_s \text{age}) \quad \dots (9)$$

여기서 α_p 와 α_s 는 각 식물의 직근 및 측근의 노화 계수이고, age 는 식물 노화시간(알고리즘 수행 횟수에 비례해서 증가)이다. 만약, 식물 번식 세대가 증가함에 따라 각 최고 양분 위치가 갱신되는 경우, age 는 0으로 초기화 된다.

이와 같은 VPR 알고리즘을 살펴보면, 식물군의 이동 번식에 의해 최고 양분 위치가 확정되더라도, 측근에 의한 주변 탐색 및 포복경 생성 절차와 식물의 노화에 의해, 기 탐색된 최고 양분 위치 주변을 지속적으로 탐색하게 된다.

결과적으로 VPR 알고리즘은 비용평가 값이 지속적으로 변화하는 다변수 함수 최적화 문제에 대응하여 활용할 수 있음을 알 수 있다[16].

3.2 VPR 알고리즘 최적화

위상배열안테나 시스템을 사용하는 지상제어국에 있어, 운항중인 무인항공국과 전파간섭원에 대응하여 원활한 데이터 링크 구축을 위한 지속적인 빔 형성을 위해 VPR 알고리즘을 적용하였다. 이에 따른 VPR 알고리즘의 주요 변수값(Parameters)는 표 1과 같다.

표 1. VPR 알고리즘 주요 변수값
Table 1. VPR algorithm parameters

Plant(Taproot) Num.	2
Fibrous Root Num.	4
c_p	1.0
c_s	0.3
α_p	0.00001
α_s	0.00002

각 식물의 위치(X_i)는 위상배열안테나의 위상 가중 조합에 대응된다. 여기서 각 방사소자의 위상 가중치(x_n)는 $0 \leq x_n < 2\pi$ 범위로 제한하였다.

VPR 알고리즘 정의에 따라, 알고리즘 1회 수행(특정 세대)에 따른 비용 평가 횟수는 주근 수 + (주근 수 \times 측근 수)로 결정된다. 본 논문에서는 알고리즘 1회 수행에 따른 비용 평가를 10회로 결정하기 위해 주근 수와 측근 수를 각각 2와 4로 설정하였다.

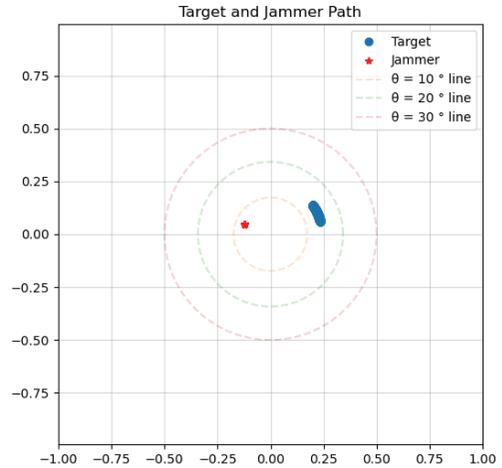
VPR 알고리즘은 주근과 측근에 의해 평가된 양분 정보를 기반으로 포복경을 생성하여 탐색 범위 내 최고 양분 위치를 탐색한다. 전체 탐색 영역에 있어, 최적 위치 탐색을 위해서는 주근에 의한 비용 평가 정보가 측근에 의한 정보보다 상대적으로 중요하다. 따라서, 포복경 생성 계수인 c_p 와 c_s 를 각각 1.0과 0.3으로 설정하였다.

탐색 범위 내 최적 위치가 탐색된 이후, 연속적으로 최적의 위치가 변경되는 경우는 측근에 의한 주변 탐색 영향이 중요하다. 이에 따라 지속적인 주변 탐색을 강화하기 위해, 주근의 식물 노화 계수는 0.00001로 측근의 식물 노화 계수는 0.00002로 설정하였다.

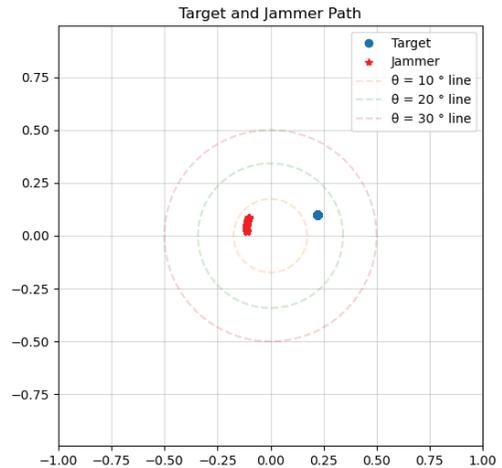
VPR 알고리즘은 측근을 통해 최적 위치 인근 탐색이 가능하다. 그러나 측근 발생은 강제적으로 위치 정보를 변경하는 절차이다. 위상배열안테나에 있어, 강제적인 위치 변경(위상 가중치 변경)은 빔 형성에

영향을 준다. 본 논문에서는 VPR 알고리즘의 주요 변수인 측근 발생 계수(c_f)를 최적화하기 위해, 다음 두 가지 상황에 대한 모의실험을 진행하였다.

- 대국 위치 변경, 전파간섭원 위치 고정
- 대국 위치 고정, 전파간섭원 위치 변경



(a) Target Motion, Jammer Fix



(b) Target Fix, Jammer Motion

그림 4. 모의실험 경로 구성
Fig. 4 Simulation path planning

그림 4는 상기 모의실험 구성에 따른 무인항공국 및 전파간섭원의 경로를 보여준다. 모의경로에 대한 시간은 총 300초로 설정하였다. VPR 알고리즘은 1초에 10회 진행되는 것으로 가정되었으며, 표 1의 구성에 따라 위상 가중치 조합은 알고리즘 1회당 10회 변경된다.

VPR 알고리즘을 기반으로 대국 추적 및 항 재밍 기능을 확인하기 위해서는 비용 평가값이 산출되어야 한다. 모의실험을 위한 비용 평가 함수는 위상 가중 조합에 의해 형성된 빔을 기반으로 무인항공국 및 전파간섭원 방향에서 수신되는 신호의 강도(Received Signal Strength Indicator, RSSI)를 기반으로 식 (10)과 같이 설정하였다.

$$cost = \frac{RF(\theta_i, \phi_i)}{1 + RF(\theta_j, \phi_j)} \quad \dots (10)$$

여기서 RF 는 위상 가중 조합에 의해 형성된 안테나 방사특성으로 식 (11)과 같다.

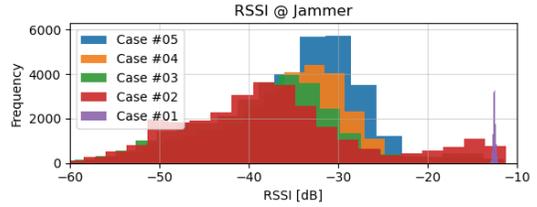
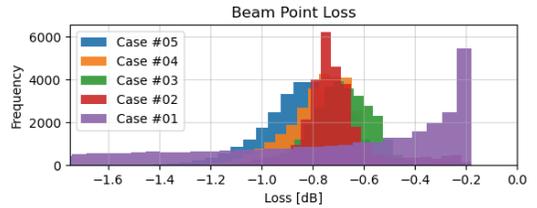
$$RF = EF \sum I_n \exp(jkr \hat{r} \cdot \vec{r}_n + jx_n) \quad \dots (11)$$

여기서 EF 는 방사소자 방사특성으로 2장의 설정에 따라 마이크로스트립 패치의 방사특성이다. 그리고 x_n 은 위상 천이 가중 조합의 n 번째 요소값(n 번째 방사소자에 가중되는 위상 가중치)이다.

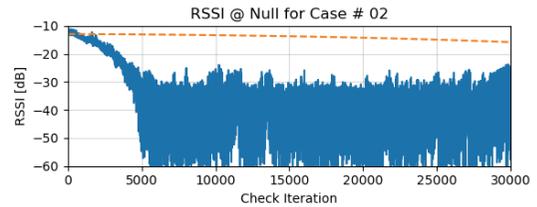
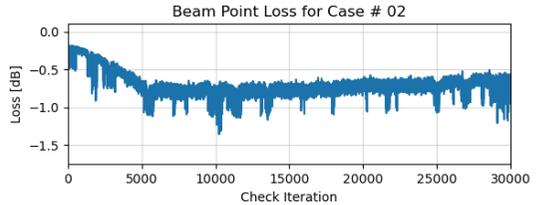
그림 4의 각 모의경로에 대한 모의실험을 진행함에 있어, 측근 발생 계수는 2.6125(case #01), 5.625(case #02), 6.93125(case #03), 8.4375(case #04) 그리고 11.25(case #05)의 경우로 설정하였다.

그림 5는 상기 조건을 기반으로, 그림 4(a)의 경로에 대한 모의실험 결과를 보여준다. 그림 5(a)는 각 측근 발생 계수가 적용된 VPR 알고리즘 수행에 있어, 위상 가중 조합에 의해 형성된 빔을 기준으로 무인항공국과 전파간섭원 방향에 대한 수신 신호 강도 분포를 보여준다.

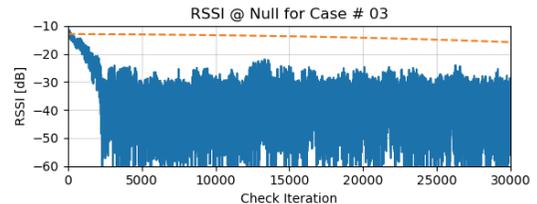
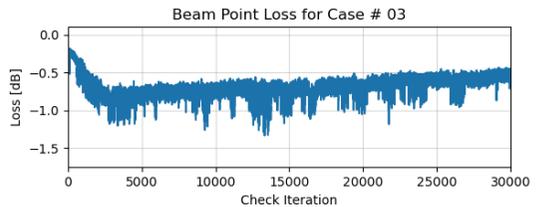
분석결과 $c_f = 2.6125$ 인 경우, 측근 발생 계수값이 작아 추적 및 패턴 넓이 형성되지 않음을 알 수 있다. 이 외의 경우에는 c_f 값이 낮을수록 추적 및 항 재밍을 위한 안정적인 빔이 형성됨을 알 수 있다.



(a) RSSI Histogram



(b) Case #02 Result



(c) Case #03 Result

그림 5. 모의실험결과 (그림 4(a))
Fig. 5 Simulation results (Fig. 4(a))

그러나 그림 5(b)의 결과를 통해 확인할 수 있듯이, c_f 가 5.625인 경우에는 패턴 널 형성을 위한 탐색 시간이 상대적으로 많이 필요함을 알 수 있다. 다수의 무인항공국 운용 환경에서 패턴 널을 형성하는 시간 또한 중요한 요구 성능이다. 따라서 측근 발생 계수는 6.93125로 설정하였다.

각 측근 발생 계수에 대한 무인항공국 및 전파간섭원 방향 평균 수신신호강도는 표 2와 같다.

표 2. 모의실험 분석 결과(그림 4(a))
Table 2. Simulation results(Fig. 4(a))

	for Target	for Jammer
Case #01	-0.717 dB	-12.552 dB
Case #02	-0.703 dB	-37.364 dB
Case #03	-0.685 dB	-37.737 dB
Case #04	-0.762 dB	-35.823 dB
Case #05	-0.833 dB	-34.529 dB
Ideal Beam Forming	-	-13.914 dB

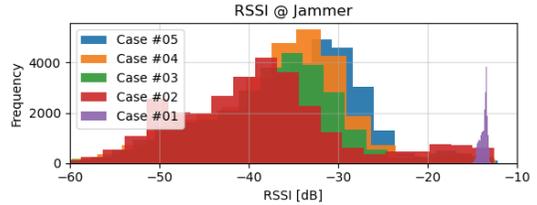
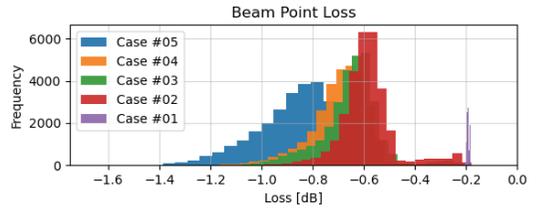
표 2에 있어, 이상적인 빔 형성은 식 (3)과 (4)를 기반으로 무인항공국 방향으로 빔을 형성한 경우, 전파간섭원 방향에 대한 평균 수신신호강도를 나타낸 것이다(그림 5 (b)에 ‘--’ 선으로 도시되어 있다).

분석결과, 본 논문에서 선정한 측근 발생 계수 값 ($c_f = 6.39125$)을 기반으로 빔을 형성한 경우, 전파간섭원에 대해 이상적인 경우 대비 약 -25 dB의 간섭 영향을 억제시킬 수 있음을 알 수 있다.

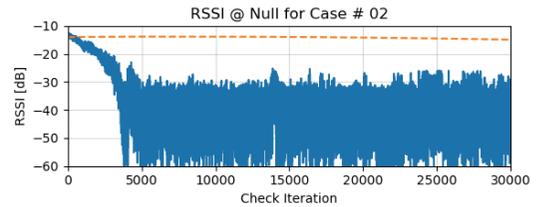
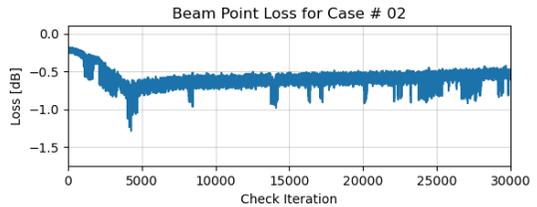
그림 6은 그림 4(b)의 경로에 대해, 각 측근 발생 계수에 따른 영향을 보여준다. 결과는 그림 4(a)의 경우와 유사함을 알 수 있다.

표 3. 모의실험 분석 결과(그림 4(b))
Table 3. Simulation results(Fig. 4(b))

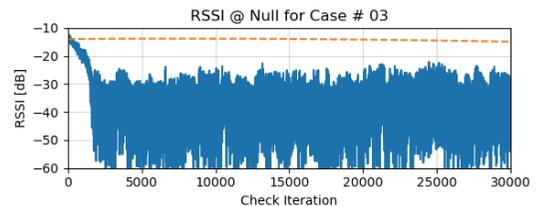
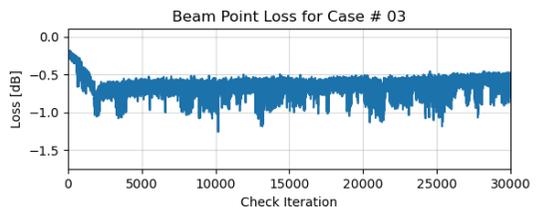
	for Target	for Jammer
Case #01	-0.192 dB	-13.724 dB
Case #02	-0.585 dB	-38.864 dB
Case #03	-0.651 dB	-37.496 dB
Case #04	-0.691 dB	-36.863 dB
Case #05	-0.85 dB	-34.115 dB
Ideal Beam Forming	-	-14.114 dB



(a) RSSI Histogram



(b) Case #02 Result



(c) Case #03 Result

그림 6. 모의실험결과 (그림 4(b))
Fig. 6 Simulation results (Fig. 4(b))

모의실험 분석결과를 기반으로, VPR 알고리즘 기반 무인항공기국 추적 및 전파간섭영 영향 억제에 위한 측근 발생 계수는 6.93125로 설정하였다.

IV. 모의실험

본 장에서는 무인항공기국과 전파간섭원이 동시에 운항되고 있는 상황에 대한 지속적인 빔 형성에 대한 모의실험을 수행하고, 이를 기반으로 지상제어국 안테나 시스템의 추적 및 항 재밍 성능을 분석하였다.

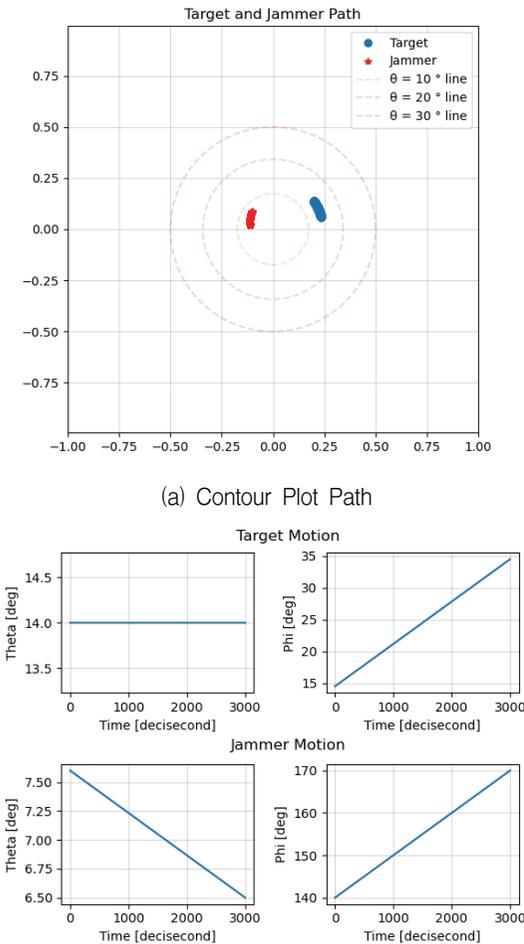
모의실험은 다음 두 조건으로 구성된다.

- a. 무인항공기 1대, 전파간섭원 1대
- b. 무인항공기 1대, 전파간섭원 2대

4.1 단일 전파간섭원

그림 7은 무인항공기국과 전파간섭원에 대한 운항 경로를 보여준다. 모의경로에 대한 시간은 총 300초로 설정하였고, VPR 알고리즘은 1초에 10회 진행, VPR 알고리즘 수행에 따른 위상 가중 조합은 알고리즘 1회당 10회 변경되는 것으로 하였다.

모의실험을 위한 VPR 알고리즘의 설정값은 표 2와 동일하고, 측근 발생 계수는 3장의 분석결과를 기반으로 6.93125로 설정하였다. 그리고 비용 평가 함수는 식 (10)과 같다. 모의실험 결과, 전체경로에 대해 탐색된 위상 가중 조합에 의해 형성된 빔 기반, 무인항공기국 방향 평균 수신신호강도는 -0.681 dB로 확인되었다. 그리고 전파간섭원 방향 평균 수신신호강도는 -36.422 dB로 확인되었다.



(b) Path based on Angles
그림 7. 모의실험 경로
Fig. 7 Simulation path

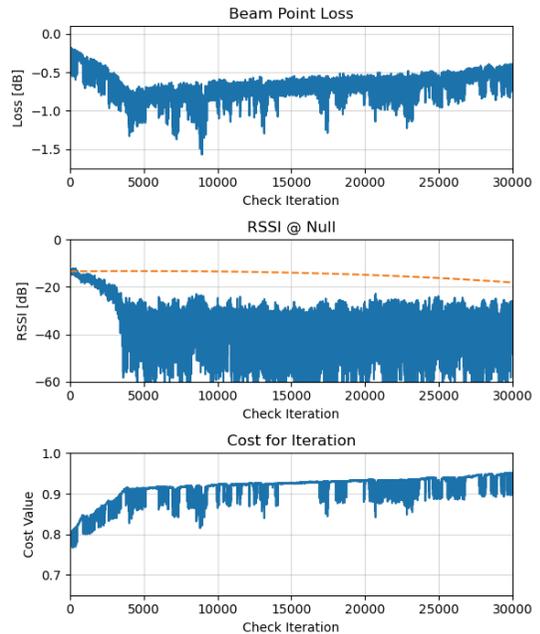


그림 8. 모의실험 결과
Fig. 8 Simulation results

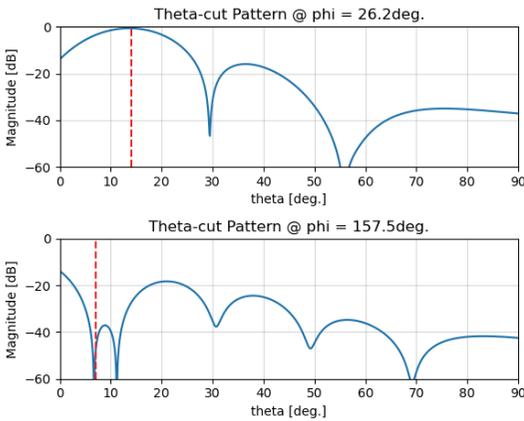


그림 9. 방사패턴 분석 (Iteration = 1750)
 Fig. 9 Radiation pattern (Iteration = 1750)

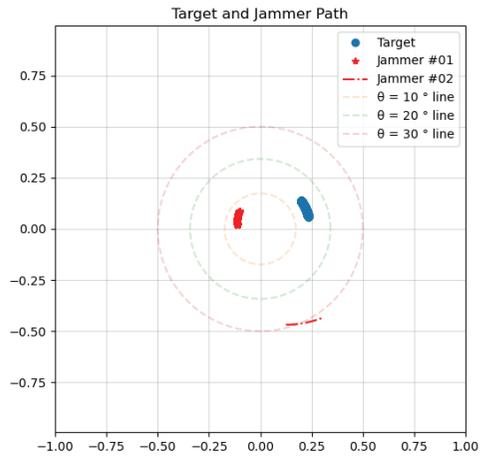
전체경로에 대해, 무인항공국 방향을 기준으로 식 (3)과 (4)를 기반으로 이상적인 빔을 형성했을 경우, 전파간섭원 방향에 대한 평균 수신신호강도(그림 8의 ‘--’ 표기)가 -14.532 dB 인점을 고려할 때, 본 논문에서 제시된 기법을 적용하면 약 -22 dB의 전파 간섭 영향을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 8의 마지막 그래프는 VPR 알고리즘 수행에 따른 식 (10) 기반 비용 평가값을 보여준다. 측근 발생에 의해 비용 평가값이 불안정한 경우를 확인할 수 있으나, 이는 지속적인 빔 형성을 가능하게 하기 위한 필수적인 절차에 의한 반응이다.

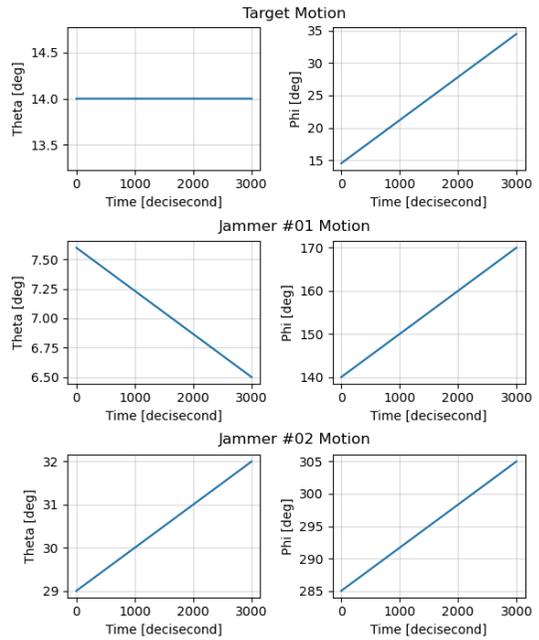
그림 9는 그림 8의 분석에 있어, VPR 알고리즘이 1750번 수행되었을 때(경로 시작 후 175초 지점), 식물군 내 최고 양분 위치를 기반으로 형성된 빔에 대한 방사패턴(Radiation Pattern)을 보여준다. 여기서, ‘--’ 선은 무인항공국 및 전파간섭원의 위치이다. 분석결과, 무인항공국 방향으로는 주빔이 형성되었으며, 전파간섭원 방향으로는 패턴 널이 형성되었음을 알 수 있다.

4.2 이중 전파간섭원

산림자원의 효율적인 관리를 위한 정보획득을 위해서는 다수의 무인항공국을 동시에 운영되어야 하는 경우가 있다. 본 절에서는 총 3대의 무인항공국이 운영되는 경우에 대한 모의실험을 수행하였다.



(a) Contour Plot Path



(b) Path based on Angles

그림 10. 모의실험 경로
 Fig. 10 Simulation path

그림 10은 무인항공국과 2대의 전파간섭원에 대한 운항 경로를 보여준다. 모의경로에 대한 시간(300초)과 VPR 알고리즘 수행 횟수에 대한 위상 가중 조합 변경 횟수는 4-1결과 동일하게 설정하였다.

모의실험을 위한 VPR 알고리즘의 설정은 4-1절과 동일하다. 다만 2대의 전파간섭원 운영에 따라 각 전파간섭원에 대한 영향을 반영하기 위해 VPR 알고리즘의 비용 평가 함수는 식 (12)와 같이 설정하였다.

$$\text{cost} = \frac{RF(\theta_i, \phi_i)}{1 + 0.5[RF(\theta_j^1, \phi_j^1) + RF(\theta_j^2, \phi_j^2)]} \dots (12)$$

모의실험 결과, 전체 경로에 있어 탐색된 위상 가중 조합에 의해 형성된 빔 기반, 무인항공기국 방향 평균 수신신호강도는 -0.721 dB로 확인되었다. 그리고 전파간섭원 #01 및 전파간섭원 #02 방향에 대한 평균 수신신호강도는 각각 -34.073 dB와 -36.634 dB로 확인되었다.

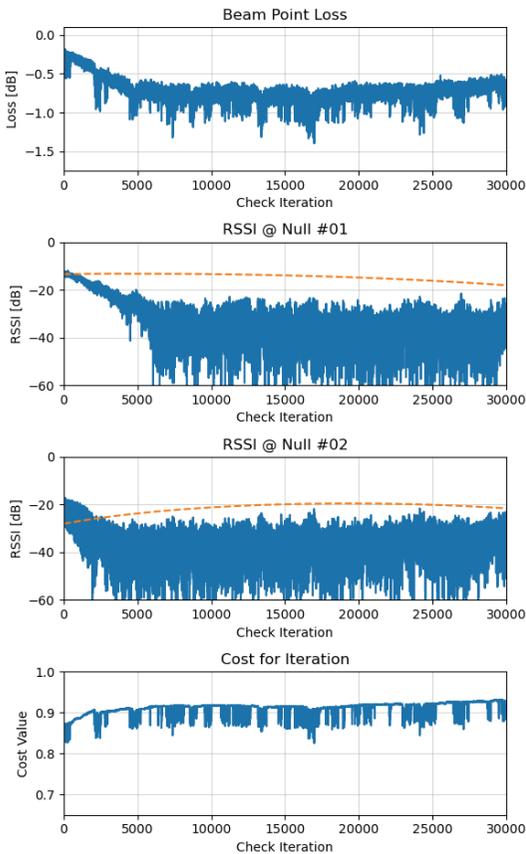


그림 11. 모의실험 결과
Fig. 11 Simulation Results

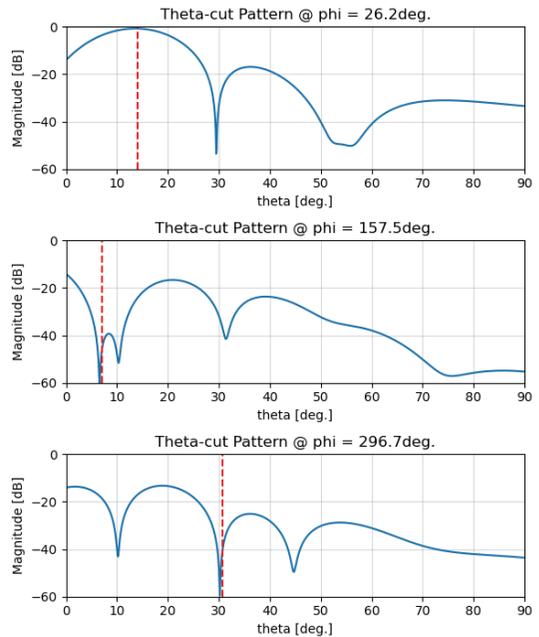


그림 12. 방사패턴 분석 (Iteration = 1750)
Fig. 12 Radiation pattern (Iteration = 1750)

전체경로에 대해, 무인항공기국 방향을 기준으로 식 (3)과 (4)를 기반으로 이상적인 빔을 형성했을 경우, 전파간섭원 방향에 대한 평균 수신신호강도(그림 10의 ‘--’ 표기)가 각각 -14.532 dB 와 -21.428 dB인 점을 고려할 때, 본 논문에서 제시된 기법을 적용하면 각 전파간섭원에 대해 -20 dB 및 -15 dB의 전파간섭 영향을 억제할 수 있음을 알 수 있다.

그림 12는 그림 11의 분석에 있어, VPR 알고리즘이 1750번 수행되었을 때(경로 시작 후, 175초 지점), 식물군 내 최고 양분 위치를 기반으로 형성된 빔에 대한 방사특성을 보여준다. 분석결과, 무인항공기국 방향 기준으로 주빔이 형성되었으며, 각 전파간섭원 방향으로는 패턴 널이 형성되었음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 산림자원의 효율적인 관리를 위해 다수의 무인항공기가 동시 운영되는 상황에 있어, 무선 데이터 링크 기반 무인항공기의 제어 및 실시간

정보획득을 위한 지상제어국 안테나 시스템의 지속적인 빔 형성 기법에 관하여 연구하였다. 원활한 데이터 링크 구축을 위해, 본 논문에서 제시한 기법은 지속적으로 최적의 값이 변화하는 환경에 대응해 다변수 최적화가 가능한 VPR 알고리즘을 기반으로 빔을 형성하는 기법이다. 이를 위해 지상제어국 안테나를 구성하고 방사특성을 분석하였으며, 방사특성을 기반으로 VPR 알고리즘을 최적화하였다. 그리고 다양한 모의 환경을 구축하여, 제시된 기법의 성능을 검증하였다. 분석결과 제시된 기법은 단일 전파간섭원이 존재하는 경우 뿐만 아니라, 다수의 전파간섭원이 존재하는 경우에도 대국에 대한 추적 및 전파간섭원에 대한 패턴 널을 형성할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 제시된 기법은 무인항공국 운영 뿐만 아니라 GPS(: Global Positioning System) 등 전파간섭원 영향에 민감한 통신 환경에도 적용가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로, 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO.2021R1G1A1092209)

References

- [1] J. Lim, H. Shin, D. Lee, and S. Suh, "Climate Change Impacts on Forest Ecosystems: Research Status and Challenges in Korea," *Korean J. of Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 8, no. 3, 2006, pp. 199-207.
- [2] H. Lee, W. Seo, C. Woo, and K. Lee, "Derivation and Evaluation of Surface Reflectance from UAV Multispectral Image for Monitoring Forest Vegetation," *Korean J. of Remote Sensing*, vol. 35, no. 6, Dec. 2019, pp. 1149-1160.
- [3] G. Ham, J. Lee, K. Bae, and H. Park, "A Study on Agricultural Drought Monitoring using Drone Thermal and Hyperspectral Sensor," *J. of The Korean Association of Geographic Information Studies*, vol. 22, no.3, Sept. 2019, pp. 107-119.
- [4] Y. Choi, J. Lee, and H. Yun, "Extraction of Forest Resources Using High Density LiDAR Data," *J. of The Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, vol. 33, no. 2, Apr. 2015, pp. 73-81.
- [5] J. Park and K. Jung, "Investigation and Analysis of Forest Geospatial Information Using Drone," *J. of The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 19, no. 2, Feb. 2018, pp. 602-607.
- [6] Y. Lee, D. Lee, Y. Yu, and H. Lee, "Application of Drone Photogrammetry for Current State Analysis of Damage in Forest Damage Areas," *J. of Korean Society for Geospatial Information System*, vol. 24, no. 3, Sept. 2016, pp. 49-58.
- [7] I. Cuhadar, "Unmanned Air Vehicle System's Data Links," *J. of Automation and Control Engineering*, vol. 4, no. 3, June 2016, pp. 189-193.
- [8] J. Jung, "A Study on Optimization of Single-Channel Monopulse Tracking System using Phased Array Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 4, Aug. 2018, pp. 705-712.
- [9] J. Jung and Y. Lim, "A Study on Tracking Method for Phased Array Tracking Antenna System," *J. of The Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 55, no. 7, July 2018, pp. 9-18.
- [10] K. Kim and J. Jung, "A Study on Design Optimization for Anti-Jamming GPS Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 2, Apr. 2022, pp. 245-254.
- [11] J. Han, S. Kim, H. Kim, H. Choi, and K. Kim, "Analysis of adaptive digital signal processing for anti-jamming GPS system," *J. of Korea Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 32, no. 8, 2007, pp. 745-757.
- [12] R. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*. Boston: Artech House, 1994.
- [13] J. Jung, "Improved genetic algorithm for pattern synthesis of phased array antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 2, Apr. 2018, pp. 299-304.

- [14] J. Jung, "Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Adaptive Beam Forming System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 3, June 2018, pp. 587-592.
- [15] J. Jung, "Vegetative propagation by runners optimization algorithm," *J. of The Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 55, no. 9, Sept. 2018, pp. 25-31.
- [16] J. Jung, K. Jung, T. Lee, S. Park, and Y. Son, "A Study on Vegetative Propagation by Runner Optimization Algorithm-based Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 3, June 2021, pp. 493-502.

저자 소개



정진우(Jin-Woo Jung)

2005년 전남대학교 정보통신공학과 졸업 (공학사)

2007년 전남대학교 대학원 전자정보통신공학과 졸업 (공학석사)

2011년 전남대학교 대학원 전자컴퓨터공학과 졸업 (공학박사)

2012년 ~ 2017년 국방과학연구소 선임연구원

2018년 ~ 현재 동신대학교 정보통신공학과 조교수

※ 관심분야 : 안테나, 위상배열안테나, 적응형 빔 형성 알고리즘



신용규(Yong-Gyu Shin)

2003년 동신대학교 환경조경학과 졸업(이학사)

2005년 동신대학교 대학원 환경조경학과 졸업(조경학석사)

2014년 전남대학교 대학원 건축학과 졸업(공학박사)

2018년 동신대학교 산림조경학과 교수

2019년 ~ 현재 한국환경공단 기술자문위원

※ 관심분야 : 사운드스케이프, 건축음향

