

# 소형 무인기 탐지를 위한 패시브 레이더망 최적 배치 연구

백인선<sup>\*,1)</sup> · 이태식<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 한국과학기술원 산업및시스템공학과

## Study on the Optimal Deployment of the Passive Radar System for Detecting Small Unmanned Aerial Vehicles

Inseon Baek<sup>1)</sup> · Taesik Lee<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Industrial and Systems Engineering, KAIST, Korea

(Received 2 February 2016 / Revised 25 April 2016 / Accepted 8 July 2016)

### ABSTRACT

Current low-altitude radar system often fails to detect small unmanned aerial vehicles (UAV) because of their small radar cross section (RCS) compared with larger targets. As a potential alternative, a passive bistatic radar system has been considered. We study an optimal deployment problem for the passive bistatic radar system. We model this problem as a covering problem, and develop an integer programming model. The objective of the model is to maximize coverage of a passive bistatic radar system. Our model takes into account factors specific to a bistatic radar system, including bistatic RCS and transmitter-receiver pair coverage. Considering bistatic RCS instead of constant RCS is important because the slight difference of RCS value for small UAVs could significantly influence the detection probability. The paired radar coverage is defined by using the concept of gradual coverage and cooperative coverage to represent a realistic environment.

Key Words : Bistatic Radar(바이스태틱 레이더), Optimal Location(최적 배치), Covering Problem(커버 문제), Gradual Coverage(점진 커버리지), Cooperative Coverage(협력 커버리지)

### 1. 서론

우리나라의 방공 탐지 체계에서, 저고도로 진입하는 탐지 대상은 저고도 레이더망이 탐지한다. 따라서 저고도 비행을 하는 소형 무인기 역시 저고도 레이더망

으로 탐지하게 되는데, 최근 몇 차례 소형 무인기의 탐지 실패 사례에서 보듯이 소형 무인기는 기존 저고도 레이더망에서 탐지가 잘 되지 않는다. 그 원인 중 하나로 소형 무인기의 레이더 반사 면적(Radar Cross Section, RCS)이 매우 작은 것을 들 수 있다.

RCS란 표적이 레이더 신호를 수신기 방향으로 반사시키는 표적 특성을 나타내며, 표적에 입사된 전력 밀도와 표적으로부터 레이더 방향으로 반사된 전력의

\* Corresponding author, E-mail: bis0904@kaist.ac.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

비율을 의미한다<sup>[1]</sup>. 표적의 RCS 값이 클수록 탐지 가능성이 높으며, 이는 RCS가 큰 물체일수록 동일한 입사파를 받더라도 산란되는 신호의 세기가 크기 때문이다. 북한 소형 무인기의 경우 RCS가 매우 작은 값을 갖기 때문에, 작은 RCS 값으로 인해 소형 무인기는 탐지하기가 쉽지 않다.

효과적인 소형 무인기 탐지를 위한 많은 연구가 있는데, 본 연구에서는 그 중 하나인 패시브 바이스테틱 레이더망을 연구 대상으로 한다. 바이스테틱 레이더란 모노스테틱 레이더와 다른 개념의 레이더로써, 송신기와 수신기가 분리되어 위치한 레이더를 말한다<sup>[2]</sup>. 모노스테틱 레이더는 전파가 표적에 도달하여 산란된 후 송신 위치로 돌아오는 반사파를 이용하여 표적을 탐지하지만, 바이스테틱 레이더는 송신 위치가 아닌 다른 위치에 도달하는 반사파를 표적 탐지에 이용한다. 이에 따라 RCS는 모노스테틱 RCS와 바이스테틱 RCS로 나눌 수 있다. 모노스테틱 RCS는 입사 방향으로 되돌아가는 방향의 RCS를 가리키며, 바이스테틱 RCS는 임의의 반사 방향에 대한 RCS로써 입사 방향과 다른 방향의 RCS를 포함한 개념이다<sup>[3]</sup>. 이 때 어떤 비행체에 대해서 바이스테틱 RCS가 모노스테틱 RCS보다 클 수 있으며, 그러한 경우 바이스테틱 레이더를 이용한다면 탐지 확률을 높일 수 있다. 예를 들어, 스텔스기는 모노스테틱 레이더의 탐지를 회피하기 위해 모노스테틱 RCS가 작도록 만들어지는데, 바이스테틱 레이더를 사용하면 좀 더 유리한 RCS를 이용하게 되어 모노스테틱 레이더로 탐지하기 어려웠던 스텔스기 탐지를 가능하게 할 수 있다. 그리고 패시브 레이더란 이미 다른 용도로 존재하는 전파를 물체 탐지에 이용하는 레이더를 의미한다. 패시브 바이스테틱 레이더는 기존 전파를 이용하기 때문에 송신부를 제어할 수 없다는 단점이 존재하지만, 수신기만 설치하면 된다는 점에서 설치 비용이 적게 든다는 장점이 있다<sup>[4]</sup>. 따라서 패시브 바이스테틱 레이더를 소형 무인기 탐지에 이용하면 모노스테틱 레이더보다 다양한 위치에 여러 수신기를 더 많이 설치할 수 있고, 따라서 레이더망의 탐지 성능이 향상되어 작은 RCS를 갖는 소형 무인기 탐지에 효과적일 수 있다.

본 연구의 목표는 소형 무인기 탐지를 위한 패시브 레이더망 구축 시 레이더망의 탐지 성능을 최대화 하는 수신기의 위치를 선정하는 방안 도출이다. 레이더망 구축할 때 수신기를 어디에 배치할 것인가는 매우 중요하다. 설치할 수 있는 수신기의 수는 제한적이며

로 제한된 자원을 가지고 탐지 레이더망을 가장 효과적으로 운영해야하기 때문이다. 따라서 패시브 바이스테틱 레이더망 구축을 위해서는 최적 배치 연구가 필수적이다.

본 연구에서는 레이더망 구축 문제를 입지 선정 문제(facility location problem) 중 커버 문제(covering problem)로 기술하여, 패시브 바이스테틱 레이더망 최적 배치 모형을 정수 계획법으로 제안하였다. 레이더의 커버리지를 정의함에 있어, 실제 레이더망과 유사한 표현을 위해 점진 커버리지(gradual coverage)와 협력 커버리지(cooperative coverage)를 사용하였다. 일반적인 커버 문제에서 쓰이는 커버리지 개념은 이진적 커버리지 개념으로, 수요 지점이 일정 임계 거리(covering distance) 내에 속하는 경우에는 커버되고, 해당 거리 바깥이면 전혀 커버되지 않음을 가정하게 된다. 그러나 점진 커버리지에서는 커버리지 함수(coverage function)를 사용하여 거리에 따라 커버리지의 정도가 감소하도록 정의한다<sup>[5]</sup>. 또 협력 커버리지란 모든 시설(facility)이 각 수요 지점의 커버에 기여하는 것을 말한다<sup>[5-7]</sup>. 이것은 한 수요 지점이 가장 가까운 시설 하나에 의해 커버되는지 판단하는 개별 커버(individual cover)를 대체하는 개념으로, 모든 시설로부터 받은 커버리지 값이 문턱값 이상이면 해당 지점이 커버되었다고 판단한다.

또 한 가지 본 연구의 모델이 기존 일반적 입지 선정 문제와 다른 점은 탐지 대상인 소형 무인기의 바이스테틱 RCS를 고려한다는 점이다. 바이스테틱 RCS를 정의하는 레이더 전파의 입사각과 반사각은 송신기에 대한 표적의 상대 위치뿐만 아니라 비행 방향에 따라서도 달라진다. 바이스테틱 RCS 값에 따라서 레이더와의 거리가 같은 두 지점이더라도 표적 탐지 여부가 달라질 수 있으며, 이는 물체가 같은 지점에 있더라도 탐지 여부가 달라질 수 있음을 의미한다. 따라서 바이스테틱 레이더망 최적 배치 연구에서는 바이스테틱 RCS를 고려하는 것이 필요하다.

본 연구를 위한 가정은 다음과 같다. 첫째, 본 연구가 고려하는 레이더망에서는 모든 수신기와 송신기가 각각 쌍을 이뤄 바이스테틱 레이더를 형성하며, 각 수신기는 다른 수신기에 영향을 받지 않고 독립적으로 무인기 탐지 여부를 결정한다. 둘째, 레이더망에서 무인기 출현 여부를 결정하기 위해 누적 탐지 확률을 사용하며, 적어도 하나의 바이스테틱 레이더가 무인기를 탐지하면 무인기 탐지에 성공한다고 판단한다. 셋

제, 송신기의 수와 위치는 미리 주어진다. 본 연구의 대상 레이더가 패시브 바이스태틱 레이더망이기 때문에, 송신기는 기존 방송 송출탑 등을 활용함을 가정하고, 송신기의 수와 위치가 주어질 때 레이더망의 성능을 최대화할 수 있도록 수신기의 최적 배치를 결정하도록 하였다.

## 2. 최적 배치 모형 설계

### 2.1 레이더 커버리지

레이더의 커버리지는 레이더의 탐지 확률(Probability of detection)이 설정 수준  $\alpha$  이상인 탐지 영역이다. 레이더의 탐지 확률이란 표적이 실제 탐지될 확률을 말하며, 식 (1)과 같이 표적의 신호 세기가 문턱값( $V_T$ )을 넘을 확률로 정의된다<sup>[8]</sup>.

$$P_d = \int_{V_T}^{\infty} P_s(R) dR \quad (1)$$

여기서  $P_d$ 는 탐지 확률이고,  $V_T$ 는 특정 오경보율 수준을 만족시키기 위해 설정한 문턱 값을 나타낸다.  $P_s(R)$ 은 잡음과 신호가 섞여 있을 때 신호의 확률 밀도 함수를 의미한다<sup>[8]</sup>.

탐지 확률  $P_d$ 는 식 (2)와 같이 신호 대 잡음비, 오경보율( $P_{fa}$ )과 marcum Q 함수로 나타낼 수 있다<sup>[9]</sup>. 오경보율을 특정 값으로 고정하는 경우, 탐지 확률 수준은 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)로 결정되며 신호 대 잡음비가 클수록 대응하는 탐지 확률도 커지는 관계를 갖는다.

$$P_d = Q[\sqrt{2SNR}, \sqrt{2\ln(\frac{1}{P_{fa}})}] \quad (2)$$

그러므로 레이더 커버리지는 특정 신호 대 잡음비 수준을 갖는 영역으로도 해석할 수 있다.

먼저 모노스태틱 레이더의 경우, 그 커버리지는 레이더를 중심으로 하는 원의 형태이다. 이러한 형태는 모노스태틱 레이더 방정식으로부터 정의할 수 있는데, 모노스태틱 레이더 방정식은 식 (3)과 같다<sup>[10]</sup>.

$$SNR = \frac{P_T G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_0 BFR^4 L_T L_R} \quad (3)$$

여기서  $SNR$ 은 신호 대 잡음비를 나타낸다.  $P_T$ 는 송신 전력,  $G$ 는 안테나 이득,  $\sigma$ 는 RCS,  $\lambda$ 는 파장,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $T_0$ 는 절대 온도,  $B$ 는 대역폭,  $F$ 는 잡음 계수,  $L_T$ 는 송신부 손실,  $L_R$ 은 수신부 손실,  $R$ 은 레이더와 표적간 거리를 의미한다. 이 식으로부터 신호 대 잡음비는 레이더와 표적 간 거리의 네제곱( $R^4$ )에 반비례함을 알 수 있다. 특정 탐지 대상에 대하여 같은 수준의 신호 대 잡음비를 갖는 위치는 모노스태틱 레이더를 중심으로 하는 원의 형태로 나타나며 식 (2)에 의해 같은 탐지 확률을 갖는다. 따라서 모노스태틱 레이더의 커버리지는 레이더를 중심으로 하는 원의 형태이다. 그리고 탐지 확률 설정 수준  $\alpha$ 가 클수록 원형 커버리지 크기는 작아진다.

바이스태틱 레이더의 커버리지는 모노스태틱 레이더와 달리 송신기와 수신기를 초점으로 하는 카시니 난형선(ovals of Cassini) 형태이다. 카시니 난형선이란 두 점에 대해 두 점과의 거리 곱이 일정한 점들의 집합을 말한다<sup>[2]</sup>. 바이스태틱 레이더 커버리지는 바이스태틱 레이더 방정식으로부터 정의할 수 있으며, 식은 (4)와 같다<sup>[9]</sup>.

$$SNR = \frac{P_T G_T G_R \sigma_B (\Phi_T, \Phi_R) \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_0 BFR_T^2 R_R^2 L_T L_R} \quad (4)$$

모노스태틱 레이더에서는 레이더와 표적 간 거리만 존재하지만, 바이스태틱 레이더에서는 표적과의 거리가 송신부와 표적 간 거리( $R_T$ ), 수신부와 표적 간 거리( $R_R$ )로 구분된다. 또한 안테나 이득을 송신부의 안테나 이득  $G_T$ , 수신부의 안테나 이득  $G_R$ 로 구분하여 사용한다.  $\sigma_B$ 는 바이스태틱 RCS 값을 의미하고,  $\Phi_T$ 와  $\Phi_R$ 은 표적을 기준으로 한 입사각과 반사각이다. 이 식으로부터 신호 대 잡음비는 송신부와 표적 간 거리 제곱( $R_T^2$ ), 수신부와 표적 간 거리 제곱의 곱( $R_R^2$ )에 반비례함을 알 수 있다. 특정 탐지 대상에 대하여 같은 수준의 신호 대 잡음비를 갖는 위치는 바이스태틱 레이더의 송신부와 수신부를 초점으로 하는 카시니 난형선의 형태로 나타나며 식 (2)에 의해 같은 탐지 확률을 갖는다. 따라서 바이스태틱 레이더의 커버리지는 송수신기를 초점으로 하는 카시니 난형선 형태이다. 송신부와 수신부가 멀리 떨어져 위치할수록 Fig. 1과 같이 점점 길쭉한 형태가 되며, 탐지 확률 설정 수준  $\alpha$ 가 클수록 커버리지 크기가 작아진다.

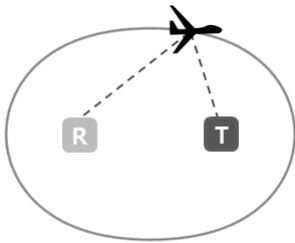


Fig. 1. The shape of the bistatic radar coverage following the length of the baseline

위에서 기술한 커버리지는 레이더의 커버리지를 정의하기 위하여 일반적으로 쓰이는 이진적 커버리지(all or nothing coverage)를 가정하였다. 즉 목표하는 탐지 확률 수준에 해당하는 최소 SNR 값을 가지는 영역을 레이더의 커버리지로 정의한다. 이렇게 이진적 커버리지를 적용한다면, 레이더가 일정 반경 안에 출현한 표적은 모두 탐지하고 반경 밖에 출현한 표적은 아예 탐지할 수 없음을 의미한다. 그러나 현실적으로는 표적과 레이더 간 거리가 멀어질수록 표적 탐지 확률이 점점 감소하는 것이지 표적을 아예 탐지할 수 없는 것은 아니다. 따라서 본 모델에서는 특정 거리에서의 커버리지 정도를 나타내는 커버리지 함수(general coverage function)를 사용하는 점진 커버를 사용하여 레이더 커버리지를 정의하였다. 커버리지 함수는 일반적으로 거리에 따른 비증가 함수(non-increasing function)이며, 본 연구에서는 커버리지 함수를 거리에 따른 탐지 확률 함수로 정의하였다. 점진 커버를 이용하여 탐지 확률 수준에 따라 표적을 탐지할 수 있음을 나타내도록 레이더 커버리지를 정의하였으며, Fig. 2에 나타내었다.

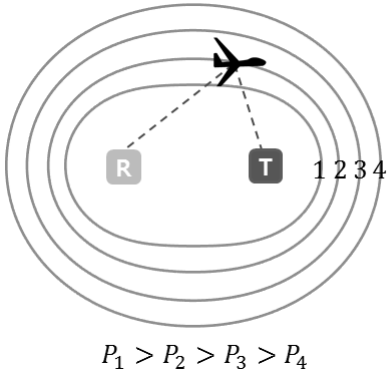


Fig. 2. Gradual coverage of the bistatic radar

이 때 탐지 확률은 레이더와 표적 간 거리  $R_T, R_R$ 에 의해 결정되며 계산식은 다음과 같다.

$$P_d = (e^{\frac{\ln(0.62/P_{fa}) - \hat{k}\sigma_B(R_T R_R)^{-2}}{0.12 \ln(0.62/P_{fa}) + 1.7}} + 1)^{-1} \tag{5}$$

$$\hat{k} = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_0 B F L_T L_R} \tag{6}$$

이 식은 표적과 레이더 간 거리를 기반으로 탐지 확률을 구하는 것으로, 식 (2)를 Albersheim의 실험식(empirical formula)로 나타낸 식<sup>[8]</sup>과 식 (4)를 이용하여 유도한다.  $\hat{k}$ 은 레이더 방정식의 파라미터 값으로, 식 (4)에서 SNR을 결정하는 모든 요소 중 표적의 RCS 값, 표적과 레이더 간 거리를 제외한 모든 파라미터를 포함한 값이다.

바이스태틱 레이더망에서는 송신기에서 송출된 전파가 표적에서 산란되어 여러 수신기에 도달하기 때문에 한 지점에 나타난 표적이 여러 송신기에 의해 탐지되게 된다. 따라서 송신기나 수신기가 많을수록, 즉 바이스태틱 레이더 쌍이 많을수록 표적을 탐지할 가능성이 커진다. 한 표적에 대한 탐지 확률이 여러 송수신기 쌍의 개별적 탐지 확률이 종합되어 정해지는 이러한 특성을 일반적으로 협력 커버링이라 한다. 협력 커버링 문제에서는 한 수요 지점에 대한 각 서버의 커버리지 값을 합이나 곱 등으로 종합하여 해당 지점의 커버리지 값을 구하고 이 값을 특정 임계값과 비교하여 커버 여부를 결정한다. 본 모델에서는 여러 바이스태틱 레이더의 탐지 확률 수준을 종합하여 해당 표적 지점의 종합적 탐지 확률을 나타낼 수 있도록 협력 커버를 사용하였으며, 이 개념은 Fig. 3에 나타내었다.

표적 출현 지점  $i$ 의 탐지 확률은 적어도 한 쌍의 바이스태틱 레이더가 무인기를 탐지할 확률로 정의하였으며 계산은 식 (7)과 같다. 그리고 무인기 출현 지점  $i$ 의 탐지 확률이 목표 수준  $\alpha$  이상일 경우 커버됨으로 정의하였다.

$$P_i = 1 - P(\text{all receivers fail to detect the UAV}) \\ = 1 - \prod_{j \in \text{receivers}} \prod_{k \in \text{transmitters}} (1 - P_{ijk}) \tag{7}$$

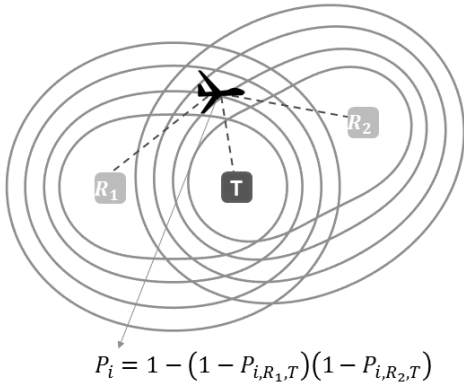


Fig. 3. Cooperative coverage of the bistatic radar

### 2.2 바이스테틱 레이더망 최적 배치 모델

2.1에서 정의한 커버리지를 이용하여, 제한된 수신기 자원을 이용하여 최대한 많은 지점을 탐지할 수 있도록 Maximum Covering Location Problem(MCLP)에 기반한 수리 모델을 구축하였다. 패시브 레이더이기 때문에 송신기의 수와 위치 지점이 정해져 있으며, 수신기 위치 후보지는 후보 지점의 집합으로 고려하였다. 표적 출현 지역은 탐지 대상 지역 전역이지만 이산화하여 탐지 지점의 집합으로 모델에 적용하였다. 탐지 대상 지역을 여러 세부 지역으로 나누고, 각 세부 지역을 대표하는 점을 지정하였다. 점진 커버와 협조 커버를 사용하여 표현한 커버 문제의 수리 모델은 다음과 같다.

$$\text{Maximize } \sum_{i \in N} w_i y_i \quad (8)$$

Subject to

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} x_j^* \sum_{k \in K} \ln(1 - P_{ijk}) \leq \ln(1 - \alpha) * y_i \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (11)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N \quad (12)$$

$k$ 는  $k$ 번째 송신기를 나타내며  $K$ 는 모든 송신기의 집합이다.  $j$ 는 수신기 위치 후보 지점의 인덱스이며  $J$

는 수신기 후보지 집합이다.  $i$ 는 탐지 대상 지점의 인덱스이며  $N$ 은 탐지 대상 지점 집합이다. 입력 변수  $w_i$ 는 지점  $i$ 의 중요도,  $p$ 는 설치할 수신기 수,  $\alpha$ 는 커버 기준이 되는 탐지 확률이다.  $P_{ijk}$ 는  $j$ 위치 수신기와 송신기  $k$ 가 이루는 바이스테틱 레이더가 지점  $i$ 에 위치한 표적을 탐지할 확률이며 계산식 (5)를 수정한 식 (13)으로부터 구할 수 있다.

$$P_d = \left( e^{\frac{\ln(0.62/P_{fa}) - \hat{k}\sigma_B(R_{ik}R_{ij})^{-2}}{0.12\ln(0.62/P_{fa}) + 1.7}} + 1 \right)^{-1} \quad (13)$$

결정 변수는  $x_j, y_i$ 이며 모두 이진 변수이다.  $x_j$ 는 수신기 위치 후보지  $j$ 의 수신기 배치 여부를 나타내고,  $y_i$ 는 탐지 대상 지점  $i$ 의 커버 여부를 나타낸다.

목적식 (8)은 전체 커버리지 값을 최대화한다. 제약식 (9)는 배치 가능한 수신기 수를  $p$ 대로 제한한다. 제약식 (10)은 탐지 대상 지점  $i$ 의 탐지 확률이  $\alpha$  이상일 경우 그 지점이 커버되도록 한 것으로, 동등한 본래의 식은 식 (14)이다.

$$\prod_{j \in J} \prod_{k \in K} (1 - P_{ijk})^{x_j} \leq (1 - \alpha)^{y_i} \quad \forall i \in N \quad (14)$$

식 (14)는 지점  $i$ 가 탐지되지 못할 확률이  $1 - \alpha$ 보다 작아야 그 지점이 커버됨을 의미한다. 수신기가 위치하지 않는 지점  $j$ 는  $x_j$ 값이 0이기 때문에 해당  $j$ 에 대한  $(1 - P_{ijk})$  값이 1이 되어 탐지되지 못할 확률에 영향을 주지 않는다. 수신기가 위치하는 지점  $j$ 는  $x_j$  값이 1이기 때문에 해당  $j$ 에 대한  $(1 - P_{ijk})$  값이 탐지되지 못할 확률 계산에 사용된다.

레이더 배치의 정확성을 위해서는 탐지 대상인 소형 무인기의 바이스테틱 RCS를 고려해야 한다. RCS 값은 전파의 입사 방향과 반사 방향에 따라 다른 값을 가지기 때문에 RCS는 상수가 아니라 무인기 진행 방향을 기준으로 하는 전파 입사각  $\Phi_T$ 와 반사각  $\Phi_R$ 에 대한 함수  $\sigma(\Phi_T, \Phi_R)$ 로 표현된다. 그러므로 탐지 확률 계산식 (13)은 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$P_d = \left( e^{\frac{\ln(0.62/P_{fa}) - \hat{k}\sigma_B(\Phi_T, \Phi_R)(R_{ik}R_{ij})^{-2}}{0.12\ln(0.62/P_{fa}) + 1.7}} + 1 \right)^{-1} \quad (15)$$

RCS는 바이스테틱 레이더의 탐지 확률을 결정하는

요인이기 때문에, 동일한 카시니 난형선 상의 두 지점이더라도 바이스테틱 RCS 값에 따라 탐지 확률이 크게 다를 수 있다(Fig. 4A). 또한 같은 지점이더라도 무인기의 방향에 따라 바이스테틱 RCS가 다르기 때문에, 같은 지점에서 탐지 확률이 달라진다(Fig. 4B). 따라서 본 연구에서 바이스테틱 RCS를 고려하는 것이 필수적이며, 더불어 무인기의 방향도 고려해야 한다.

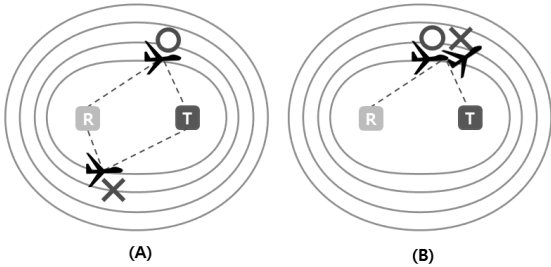


Fig. 4. Target detection result on the difference of the bistatic RCS value

앞서 작성한 수리 모델에서 소형 무인기 방향과 바이스테틱 RCS를 고려하게 되면 탐지 대상 지점의 탐지 확률과 커버 기준이 달라진다. 이에 따라 본 모델에서 커버 기준은 해당 지점에 대해 탐지 확률이 최악인 방향으로 무인기가 존재할 때의 탐지 확률이  $\alpha$  이상이면 커버됨으로 재정의한다. 특정 탐지 지점에서 무인기가 어떤 방향으로 위치라도 탐지할 확률  $\alpha$ 를 보장할 수 있어야만 그 지점이 커버된다고 할 수 있기 때문이다.

바이스테틱 RCS 함수  $\sigma_B(\Phi_T, \Phi_R)$ 는 식 (16)과 같이 쓸 수 있다. 방위각  $\theta_{ik}$ 는 송신기  $k$ 와 지점  $i$ 가 이루는 각도, 방위각  $\theta_{ij}$ 는 지점  $i$ 와 수신기 후보지  $j$ 가 이루는 각도를 가리킨다.  $\theta_{ik}$ 와  $\theta_{ij}$ 는  $i$ 의 좌표  $(i_x, i_y)$ ,  $k$ 의 좌표  $(k_x, k_y)$ ,  $j$ 의 좌표  $(j_x, j_y)$ 를 바탕으로 식 (17)과 같이 구할 수 있다(방위각은 정남향을 0°로 하고 서쪽 방향으로 측정한다). 방위각  $\theta_0$ 는 소형 무인기의 머리가 향한 방향을 나타낸다. 지점  $i$ 에서 무인기 방향이  $\theta_0$ 만큼 시계 방향으로 회전할 경우 모든  $\Phi_T$ ,  $\Phi_R$ 의 크기는  $\theta_0$ 만큼 변화한다(Fig. 5). 최종적으로 무인기 방향까지 고려한 탐지 확률 계산식은 식 (18)과 같다.

$$\sigma_B(\Phi_T, \Phi_R) = \sigma_B(\theta_0 + \theta_{ik}, \theta_0 + \theta_{ij}) \quad (16)$$

$$\theta_{ik} = \sin^{-1}\left(\frac{i_x - k_x}{\sqrt{(i_x - k_x)^2 + (i_y - k_y)^2}}\right)$$

$$\theta_{ij} = \sin^{-1}\left(\frac{i_x - j_x}{\sqrt{(i_x - j_x)^2 + (i_y - j_y)^2}}\right) \quad (17)$$

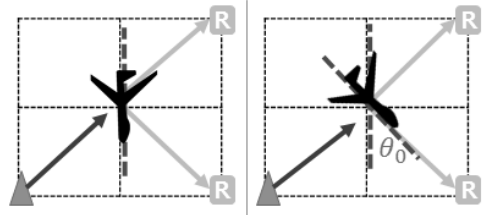


Fig. 5. Relationship between the direction of UAV and  $\Phi_T$  and  $\Phi_R$

$$P_{ijk, \theta_0} = \left( e^{\frac{\ln(0.62/P_{j_a}) - \hat{k}\sigma_B(\theta_0 + \theta_{ik}, \theta_0 + \theta_{ij})(R_{ik}R_{ij})^{-2}}{0.12\ln(0.62/P_{j_a}) + 1.7}} + 1 \right)^{-1} \quad (18)$$

소형 무인기의 바이스테틱 RCS 성질을 고려하도록 작성된 최종 수리 모델은 다음과 같다. 앞서 작성한 수리 모델과 같이 제한된 자원을 이용하여 최대한 많은 지점을 탐지할 수 있도록 MCLP로 작성하였다. 앞서 사용된  $P_{ijk}$  대신  $P_{ijk, \theta_0}$ 가 사용되었다.  $P_{ijk, \theta_0}$ 는  $j$  위치 수신기, 송신기  $k$ 가 이루는 바이스테틱 레이다가 지점  $i$ 에 위치한  $\theta_0$ 방향 무인기를 탐지할 확률이며, 식 (18)과 같이 계산되어 사용되었다.

$$\text{Maximize } \sum_{i \in N} w_i y_i \quad (19)$$

Subject to

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (20)$$

$$\sum_{j \in J} x_j^* \sum_{k \in K} \ln(1 - P_{ijk, \theta_0}) \leq \ln(1 - \alpha) * y_i \quad \forall i \in N, \forall \theta_0 \quad (21)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (22)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N \quad (23)$$

목적식 (19), 제약식 (20), 제약식 (22), 제약식 (23)은

이전 수리 모델과 동일하다. 제약식 (21)은 무인기 출현 지점  $i$ 의 탐지 확률이 무인기의 모든 방향에서  $\alpha$  이상이면 그 지점이 커버되도록 하며, 식 (24)로부터 유도하였다. 식 (24)의 좌변은 지점  $i$ 의 최악 탐지 확률을 나타내며, 따라서 전체 식은 지점  $i$ 이 최악 탐지 확률을 갖는 경우에도 탐지 확률이  $\alpha$  이상이라면 지점  $i$ 가 커버됨을 나타낸다.  $\max$  함수를 포함한 제약식을 선형 제약식으로 만들기 위하여,  $\max$  함수의 인수  $\theta_0$ 의 모든 값에 대하여 탐지 확률이  $\alpha$  이상이어야 커버되도록 제약식을 수정하여 식 (21)을 완성하였다.

$$\begin{aligned} \max_{\theta_0} & \left[ \sum_{j \in J} x_j^* \sum_{k \in K} \ln(1 - P_{ijk, \theta_0}) \right] & (24) \\ & \leq \ln(1 - \alpha) * y_i \quad \forall i \in N \\ \Leftrightarrow & \sum_{j \in J} x_j^* \sum_{k \in K} \ln(1 - P_{ijk, \theta_0}) \\ & \leq \ln(1 - \alpha) * y_i \quad \forall i \in N, \forall \theta_0 \end{aligned}$$

### 3. 결과 도출 및 비교

2장에서 제안한 모델로부터 최적 배치 결과를 도출하였으며 점진 커버, 협력 커버, 바이스테틱 RCS 적용의 유효성을 확인하기 위해 결과를 비교하였다. 우선 3.2.1절에서는 제안한 정수계획법 모델에 대한 최적 배치 결과를 보였으며, 이 결과를 개별 커버(individual cover)를 사용한 최적 배치 결과와 비교하여 3.2.2절에, 바이스테틱 RCS 대신 RCS 상수 값을 이용한 최적 배치 결과와 비교하여 3.2.3절에 제시하였다. 모든 최적 배치 결과는 CPLEX를 통해 도출하였다. 먼저 3.1절에서 실험 대상 지역을 비롯한 모든 결과 도출 환경을 서술하였다.

#### 3.1 결과 도출 환경

바이스테틱 레이더망의 최적 배치 결과 도출 대상으로는 정부대전청사, 연구시설, 군사시설 등 국가중요시설이 다수 위치한 대전광역시를 선정하였고, Table 1과 Fig. 6에 결과 도출 환경을 제시하였다. 수신기 후보지는 가로 간격이 약 1.4 km, 세로 간격 약 1.8 km로 일정한 220개의 지점으로 설정하였으며, 무인기 탐지 대상 지점도 수신기 후보지 집합과 동일하게 설정하였다. 또한 연구 대상이 패시브 레이더망이기 때문에 현재 대전시에 위치한 FM 라디오 송출탑 2대를 송신기 위치로 설정하였다. 무인기 출현지의 커버 기준은 탐지

확률 0.95 이상으로, 소형 무인기 출현을 레이더 망에서 잘 탐지하기 위해 보수적 수준으로 설정하였다. 또한 전체 레이더망의 오경보율은  $10^{-6}$ 으로 설정하였다.



Fig. 6. Locations of transmitters, detection points and receiver candidate locations

Table 1. Condition for the optimal deployment on Daejeon City

| 대상 영역         | 대전광역시         |
|---------------|---------------|
| 수신기 후보지       | 총 220개 지점     |
| 무인기 출현지       | 총 220개 지점     |
| 송신기 정보        | 총 2대          |
| 무인기 출현지 커버 기준 | 탐지 확률 0.95 이상 |
| 오경보율          | $10^{-6}$     |

소형 무인기의 바이스테틱 RCS 값은 입사각, 반사각 모두  $10^\circ$  단위로 이산화하였으며, 스텔스기의 성질과 유사하게 입사 방향으로 되돌아가는 반사 방향 RCS 값이 가장 작고 입사 방향과 정반대 방향의 RCS가 가장 큰 값을 갖도록 가정하였다. 입사 방향으로 되돌아가는 설정한 바이스테틱 RCS의 최솟값은  $0.03 \text{ m}^2$ , 평균값은  $0.1765 \text{ m}^2$ , 최댓값은  $0.55 \text{ m}^2$ 이다. 그리고 바이스테틱 레이더 방정식에 사용한 레이더 성질은 Table 2와 같다.

Table 2. Radar equation parameters value

| 레이더 파라미터  | 사용한 값            |
|-----------|------------------|
| $P_T$     | 5 kW             |
| $G_T$     | 20 dB            |
| $G_R$     | 20 dB            |
| $\lambda$ | 3 m (100 MHz 적용) |
| $T_0$     | 290 K            |
| $B$       | 55 kHz           |
| $F$       | 25 dB            |
| $L_T L_R$ | 5 dB             |

3.2 배치 결과 및 비교

3.2.1 제안 모델 배치 결과

3.1절에서 서술한 결과 도출 환경에서 최적 배치를 구한 결과, 대전광역시 전역을 커버하기 위해 필요한 수신기는 총 11대이며 위치는 Fig. 7과 같다. 이 결과는 점진 커버, 협력 커버, 무인기의 바이스태틱 RCS를 사용해 구한 결과이다. 전파 입사 방향과 밀수록 바이스태틱 RCS가 큰 값을 갖도록 설정하였기 때문에, 많은 수신기가 대전광역시 외곽에 위치하는 결과가 도출되었다.



Fig. 7. Optimal deployment result on Daejeon City

커버 기준 탐지 확률( $\alpha$ ) 설정 수준에 따라 전역을 커버하기 위해 필요한 수신기 수가 달라지며 Table 3과 같다. 커버 기준 탐지 확률 수준을 낮춤에 따라 전역을 커버하는 데 적은 수신기 수가 요구되며, 설정 수준별 최적 배치 결과는 Fig. 8과 같다.

Table 3. Relationship between the detection probability standard( $\alpha$ ) and the number of receivers required for covering the entire region

| 커버 기준 탐지 확률( $\alpha$ ) 설정 수준 | 전역 커버에 필요한 수신기 수 (대) |
|-------------------------------|----------------------|
| [0.98, 0.99]                  | 12                   |
| [0.89, 0.97]                  | 11                   |
| [0.75, 0.88]                  | 10                   |
| [0.72, 0.74]                  | 9                    |
| [0.60, 0.71]                  | 8                    |
| [0.38, 0.59]                  | 7                    |

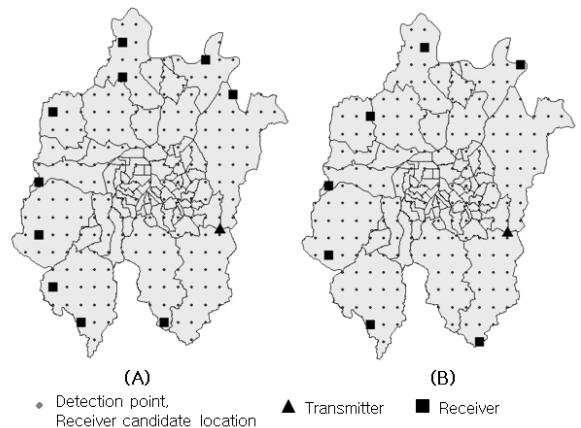


Fig. 8. Optimal deployment results using different value of the detection probability standard: (A)  $\alpha = 0.88$ , (B)  $\alpha = 0.59$

3.2.2 점진 커버, 협력 커버 사용과 개별 커버 사용 비교

점진 커버, 협력 커버 대신 개별 커버를 사용하여 최적 배치 결과를 도출하였다. 개별 커버는 탐지 확률이  $\alpha$  이상인 영역만 커버리지에 포함되며, 그 영역 밖에 출현한 표적이 탐지될 확률은 아예 없다고 간주



한다. 또 레이더 두 대의 커버리지가 겹치는 지점이라도 여러 수신기의 성능을 취합하지 않고 가장 큰 탐지 확률 하나만을 가지고 탐지 여부를 판단한다. 개별 커버를 사용한 최적 배치 결과는 Fig. 9와 같고, 전역 커버를 위해 필요한 수신기 수는 14대이다. 개별 커버는 점진 커버, 협력 커버를 사용한 결과보다 전역 커버에 필요한 수신기 수를 더 책정함을 확인할 수 있다.



Fig. 9. Optimal deployment result with the individual cover

### 3.2.3 바이스테틱 RCS 값 사용과 상수 RCS 사용 비교

바이스테틱 RCS를 사용하지 않고 RCS 상수 값을 사용해 최적 배치 결과를 도출하였다. 상수 RCS 값 수준에 따라 실제로 커버되지 않는 지점을 커버로 오인하거나, 혹은 전역 커버에 필요한 수신기 수를 제안 모델의 결과보다 많게 산출한다. 따라서, 최적 배치 도출에 바이스테틱 RCS 성질을 고려하는 것이 커버 지점 집합의 정확한 규명과 효율적인 레이더 망 설계를 위해 효과적임을 확인하였다.

첫째, 상수 RCS 값을 바이스테틱 RCS의 최솟값보다 크게 설정할 때, 커버되지 않는 지점임에도 커버로

오인되는 경우가 발생하였다. 바이스테틱 RCS 평균값 ( $0.1765 \text{ m}^2$ )을 상수 RCS 설정하여 도출한 최적 배치는 Fig. 10과 같다. 전역 커버에 필요한 수신기가 총 6대로, 바이스테틱 RCS를 사용한 최적 배치 결과에 비해 전역 커버에 요구되는 수신기 수가 적다. 하지만 이 최적 배치 상에서 무인기 방향과 바이스테틱 RCS를 고려하여 탐지 확률을 계산해본 결과, 실제로는 49개 지점(약 22%)이 커버 기준을 만족하지 못한다. 이런 탐지 오인 지점은 그 지점의 실제 RCS가 설정한 RCS 수준  $0.1765 \text{ m}^2$  보다 작은 경우에 발생한다.

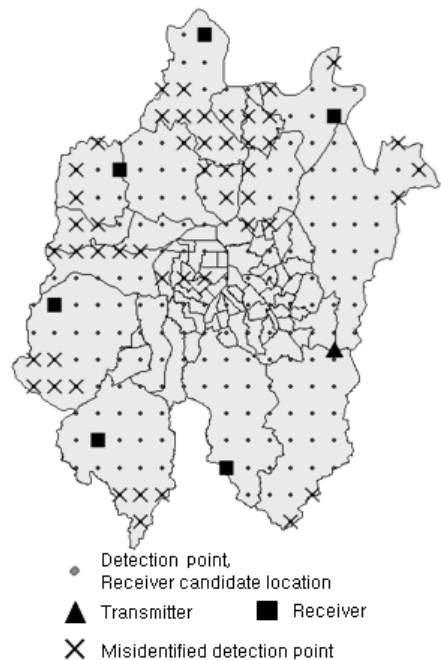


Fig. 10. Optimal deployment result and misidentified detection points derived by the constant RCS value

둘째, RCS 상수 값을 바이스테틱 RCS의 최솟값으로 설정할 때, 전역 커버에 필요한 수신기 수는 21대이며, 바이스테틱 RCS를 사용한 결과 11대보다 매우 많다. 바이스테틱 RCS 최솟값( $0.03 \text{ m}^2$ )을 상수 RCS로 설정하였을 때 설치 수신기 수에 따른 커버 지점 수는 Table 4와 같다. RCS 최솟값을 상수로 이용할 경우, 바이스테틱 RCS를 이용할 경우에 비해 같은 수신기 수로 커버하는 지점 수가 적은 배치를 도출함을 확인하였다.

Table 4. Comparing the number of covered points derived by constant RCS value and bistatic RCS value

| 설치 수신기 수 | 상수 RCS 사용 | 바이스태틱 RCS 사용 |
|----------|-----------|--------------|
| 6        | 135개      | 192개         |
| 11       | 177개      | 220개         |
| 21       | 220개      |              |

#### 4. 결론

본 연구에서는 패시브 바이스태틱 레이더를 대상으로, 수신기와 기존의 송신기가 각각 쌍을 이뤄 바이스태틱 레이더를 형성하며 각 수신기가 독립적으로 무인기 탐지 여부를 결정하는 환경 상에서 최적 배치를 도출하는 방안을 커버 문제를 이용하여 제안하였다. 탐지 거리에 따라 레이더의 탐지 성능이 다른 점을 표현하기 위해 점진 커버리지를 사용하였으며, 여러 바이스태틱 레이더 쌍의 성능을 취합하기 위하여 협조 커버리지로 표현하였다. 그리고 탐지 대상 소형 무인기의 바이스태틱 RCS를 고려하여 정수계획법으로 모델을 구축하였다. 또한 대전광역시를 대상으로 한 최적 배치 결과 비교를 통해 제안한 모델로부터 구한 최적 배치가 의미가 있음을 보였다.

본 연구에서는 연구 대상을 패시브 바이스태틱 레이더로 국한하였지만, 향후 대상 레이더를 액티브 바이스태틱 레이더나 모노스태틱 레이더로 확장할 수 있을 것이다. 액티브 바이스태틱 레이더 최적 배치 연구에서는 수신기 위치뿐만 아니라 송신기 위치를 결정하는 것이 요구된다. 그리고 모노스태틱 레이더는 바이스태틱 레이더 최적 배치 중 송신기, 수신기 위치가 동일하도록 제약하는 특별 케이스로 볼 수 있다. 따라서 바이스태틱 레이더 최적 배치 연구를 기반으로 송수신기를 동일한 곳에 배치하는 제약을 추가하

는 방향으로 연구할 수 있을 것이다. 또한 실제 레이더 운용에 본 최적 배치 도출 방안을 활용하기 위해서는 해상도(resolution)를 고려해야 하며, 따라서 본 연구의 제안 모델에서는 확인할 수 없는 크로스레인지 해상도(cross-range resolution)를 추가적으로 확인해야 할 것이다.

#### References

- [1] I. Kim, et. al. "Radar Engineering and Applications in Electronic Warfare," Daeyoung Pub., Seoul, Republic of Korea, 2006.
- [2] N. J. Willis, "Bistatic Radar," SciTECH Publishing Inc, Raleigh, North Carolina, 2005.
- [3] L. Gürel, et. al. "Validation Through Comparison: Measurement and Calculation of the Bistatic Radar Cross Section of a Stealth Target," Radio science, Vol. 38, No. 3, pp. 1046-1058, 2003.
- [4] J. Brown, "FM Airborne Passive Radar," Ph.D. Thesis, University College London, UK, 2013.
- [5] O. Berman, et. al. "Generalized Coverage: New Developments in Covering Location Models," Computers and Operations Research, Vol. 37, No. 10, pp. 1675-1687, 2010.
- [6] O. Berman, et. al. "Discrete Cooperative Covering Problems," Journal of the Operational Research Society, Vol. 62, No. 11, pp. 2002-2012, 2011.
- [7] O. Berman, et. al. "Cooperative Cover Location Problems: The Planar Case," IIE Transactions, Vol. 42, No. 3, pp. 232-246, 2009.
- [8] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems," McGraw Hill, 2001.
- [9] H. Won, "Optimal Placement of Multistatic Radar for Stealth Target Detection," M.A. thesis, KAIST, Republic of Korea, 2010.