

논문 2015-52-4-22

유전 알고리즘 기반 레이더 펄스 모호성 해결방법

(A Novel Ambiguity Resolution Method of Radar Pulses using Genetic Algorithm)

한진우*, 조제일*, 김산해*, 박진태*, 송규하*

(Jinwoo Han[Ⓢ], Jeil Jo, Sanhae Kim, Jintae Park, Kyuha Song)

요약

TDOA(Time Difference of Arrival) 기반 수동형 전자감시장비는 이격 동작하는 다수의 수신기에서 수신되는 전자파 신호의 펄스도착시간인 TOA(Time of Arrival) 정보를 이용하여 신호원의 공간상 위치를 탐지한다. 수신기 간 이격 거리 대비 신호원에서 방사되는 신호의 PRI(Pulse Repetition Interval)가 크지 않을 경우 TDOA 기반 위치탐지를 위한 각 수신기에서의 동일 펄스쌍 선정에 모호성이 발생될 수 있다. 본 논문에서는 이격 동작하는 각 수신기에서 수신한 펄스들과 신호원간의 순시방향탐지결과인 AOA(Angle of Arrival)를 이용하여 펄스 선택의 모호성을 신호원의 위치와 신호원으로부터 수신한 펄스들과의 TDOA 최적화 문제로 변경하고 이를 유전 알고리즘 기반으로 TDOA 기반 위치탐지 과정에서 발생될 수 있는 동일 펄스 선택 모호성을 최소화할 수 있는 새로운 기법을 제안하며, 다양한 모의실험을 통해 제안된 기법의 성능을 분석하였다.

Abstract

Passive Surveillance System based on the TDOA detects the emitter position in the air using TOA of pulses comprising emitter signal from multiple receivers. In case that PRI of pulses from the emitter is not enough big in comparison with the distance among receivers, it causes the ambiguity problem in selecting proper pulse pairs for TDOA emitter geolocation. In this paper, a novel ambiguity resolution method of radar pulses is presented by using genetic algorithm after changing ambiguity problem into optimization problem between TDOA of received pulses from each receiver and emitter position. Simulation results are presented to show the performance of the proposed method.

Keywords : TDOA, PRI, ambiguity, radar, Genetic algorithm, geolocation

I. 서론

수동형 전자감시장비는 이격 운용되는 다수의 수신기로부터 수신한 레이더 신호원의 정보를 중앙의 처리기로 전송하고, 중앙의 처리기는 수신기들로부터 수신한 신호원의 펄스정보를 이용하여 추정하려는 신호원의 위치를 TDOA 기반의 비선형 방정식으로 변환한 후,

반복적 혹은 비반복적 방법으로 비선형 방정식의 해를 구함으로써 신호원의 위치를 탐지한다. 신호원의 위치와 각 수신기 간의 거리는 식 (1)과 같이 정의할 수 있고, 이를 통해 식 (2)와 같이 TDOA를 이용한 비선형 방정식을 유도할 수 있다. 식 (1)의 R 은 각 수신기와 신호원간의 거리를 나타내고, n 은 각 수신기의 번호, e 는 신호원을 의미한다. 식 (2)에서 p 와 q 는 각 수신기의 번호를 의미하며, c 는 전파의 속도를 의미한다. 식 (2)에서 좌측 TDOA값은 수신된 펄스로부터 계산할 수 있고, 우측의 R 에서 각 수신기 위치는 계측을 통해 미리 알 수 있는 정보이므로 식 (2)와 같이 p, q 값을 변화시켜가며 3개의 TDOA 수식을 이용하면 신호원의 위

* 정회원, 국방과학연구소

(Agency for Defense Development)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: yahoo@add.re.kr)

Received ; October 15, 2014 Revised ; February 23, 2015

Accepted ; April 2, 2015

치를 탐지하기 위한 비선형 방정식이 완성된다.

$$R_{n,e} = \sqrt{(x_n - x_e)^2 + (y_n - y_e)^2 + (z_n - z_e)^2} \quad (1)$$

$$c \times TDOA_{p,q} = R_{p,e} - R_{q,e} \quad (2)$$

신호원의 위치를 탐지하기 위하여 TDOA를 계산하기 위해서는 신호원으로부터 각 수신기에 수신된 다수의 펄스 중 동일한 펄스를 선택해야 한다. 하지만 그림 1과 같이 각 수신기는 신호 환경의 영향으로 서로 다른 형태의 펄스열을 수신할 수 있으므로 펄스 선택 시 이에 대한 고려가 필요하다. 레이더가 펄스 신호를 방사하는 주기인 PRI가 수신기 간 이격 거리대비 충분히 크다면 TDOA 쌍을 위한 펄스 선택에 문제가 없으나, PRI가 수신기 간 이격 거리대비 작은 경우라면 각 수신기에 레이더 펄스가 도달 가능한 시간 범위 내에 2개 이상 존재하게 되어 위치탐지를 위한 펄스쌍 선택에 있어서 모호성이 발생한다.

이러한 펄스 모호성 문제는 수동형 전자감시장비의 고질적인 문제로서, 이를 해결하기 위해서는 신호의 도착시간이 아닌 다른 데이터를 이용하여 위치추정을 수행해야 한다. 각 수신기에서의 순시 방향탐지결과인 AOA는 그 대안이 될 수 있으며, AOA를 이용한 삼각법 위치탐지 방법에 대해서는 그동안 많은 이론적인 연구가 진행되어 왔다^[8]. 그 중 대표적인 방법이 Brown이 제안한 MSD(Mean Square Distance) 알고리즘과 Stansfield 알고리즘이다. MSD 알고리즘은 신호원위 위치라 가정되는 직선과의 오차 제곱값을 최소화하도록 계산하여 위치를 추정하는 방법^[1~3]이고, Stansfield 알

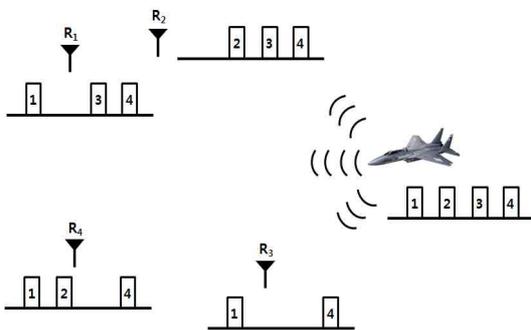


그림 1. TDOA 위치탐지 시 수신기에 수신되는 신호원의 레이더 펄스의 예

Fig. 1. Example of the radar pulses of emitter received at receivers at TDOA geolocation.

고리즘은 AOA의 오차가 Gaussian 분포를 따름을 가정하고 각 수신기에서의 AOA 값을 활용하여 확률 분포 함수가 최대가 되도록 계산하여 위치를 추정하는 방법^[2~3, 7]이다. 두 방법은 유사한 위치추정 성능을 보이는 AOA를 이용한 삼각법 위치탐지 방법으로서, 위치추정의 처리속도가 빠른 장점이 있지만, 전자감시장비의 주요한 성능인 위치추정 정확도가 떨어진다는 단점이 존재하였다. 최근 국내에서 MonteCarlo 방식에 의한 모호성 극복 방법에 대한 연구^[5]가 진행되었으나, 시나리오 맵의 해상도 설정에 따라 수렴 속도에 큰 차이가 존재하고, 정확도 개선이 크지 않은 한계가 존재하였다.

본 논문에서는 TDOA 기반 수동형 전자감시장비에서 레이더 펄스 선택에 있어서 모호성이 발생하는 경우, 높은 정확도의 위치 탐지를 위하여, 각 수신기에서 수신된 펄스정보를 이용하여 위치탐지 문제를 각 수신기와 신호원간의 거리와 수신된 펄스의 TDOA값들의 오차를 최소화하는 최적화 문제로 접근한 유전 알고리즘 기반의 레이더 펄스 모호성 해결방법을 제안하였다.

II. 레이더 펄스 모호성 문제

TDOA 기반의 수동형 전자감시장비에서 신호원에 대한 위치탐지는 신호원이 방사한 동일 펄스에 대하여 각 수신기가 해당 펄스를 수신한 시각의 차에 쌍곡선 개념을 이용하여 추정한다. 이 때, 위치추정은 해당 펄스에 대한 시각 측정 오차와 수신기 간 시각 동기화 오차가 반영된다 하더라도 이는 동일한 펄스를 선정한다는 조건 하에서 가능하며, 각 수신기가 서로 다른 펄스를 이용하여 TDOA를 계산하고 이를 바탕으로 위치추정을 한다면 의도치 않은 결과를 맞이하게 된다.

레이더 펄스의 모호성은 PRI와 전파속도(c)의 곱이 수신기 간 이격 거리(d)보다 작을 경우 발생하는데, PRI 혹은 주파수의 변조형태가 고정되어 아닌 경우라면 패턴을 서로 비교하여 동일 시점의 펄스 선택이 가능하지만, 문제는 PRI와 주파수 모두 변조형태가 고정일 경우 발생한다^[5].

그림 2는 수신기 간 이격 거리와 레이더 신호도착시간의 차와의 관계를 나타낸다. 신호원으로부터 방사된 동일한 레이더 펄스에 대해서 수신기 간 도착시간의 차는 그림 2에서와 같이 $d \cos \theta / c$ 가 된다. 최대값은 수신기의 직선방향과 동일한 방향, 즉 신호원과 수신기가

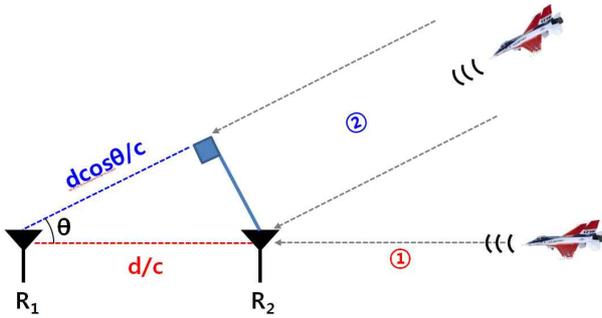


그림 2. 수신기 이격 거리와 레이더 신호도착시간 차
Fig. 2. Baseline and TDOA of radar signal.

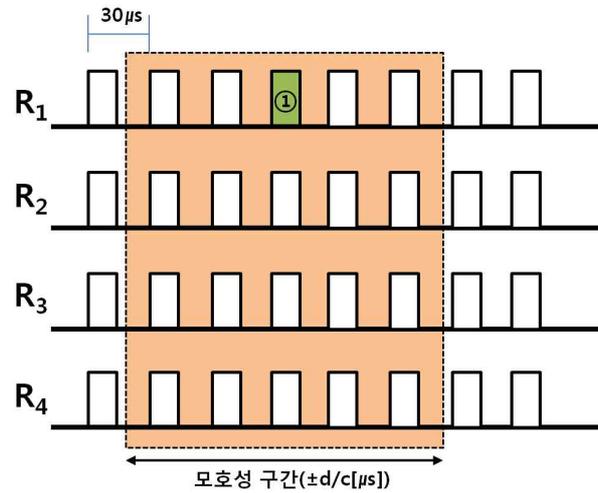


그림 3. 레이더 펄스 모호성 구간
Fig. 3. Ambiguity region of radar pulses.

이루는 각도가 0도(①)일 때 d/c 이며, PRI가 이 값보다 작을 경우 레이더 펄스 모호성 문제가 발생한다.

예를 들어, 수신기에서 분석된 신호원의 PRI가 $30\mu s$ 이고 수신기 이격 거리가 25km인 경우 신호원은 레이더 펄스를 $30\mu s$ 간격으로 방사하지만 각 수신기에서 수신하는 펄스의 시각차는 최대 약 $83.3\mu s$ 가 되므로, 그림 3 과 같이 수신기 1(R_1)의 펄스 ①에 해당하는 펄스를 다른 수신기에서 선택할 때 어떤 펄스가 수신기 1에서의 펄스 ①에 해당하는지를 판별할 수 없는 펄스 선택에 있어서의 모호성이 발생한다.

III. 유전 알고리즘 기반 펄스 모호성 해결방법

1. 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 개체군의 유전학적 변화 모델에 기

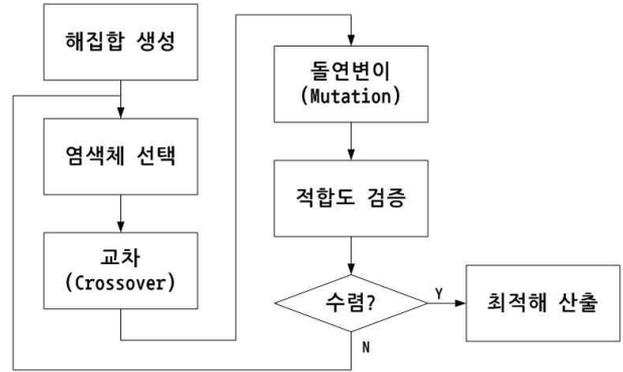


그림 4. 일반적인 유전 알고리즘의 흐름도
Fig. 4. General flow of genetic algorithm.

반을 둔 진화 알고리즘으로서 멘델의 법칙과 다윈의 자연도태론을 융합한 자연 선택 유전적 진화과정에 기초하고 있다. 유전 알고리즘은 확률론적 접근에 의한 최적화 기법으로서 변형, 필터링 등의 도구에 의존하는 결정론적 방법으로 해결하기 어려운 문제에 대한 최적화를 가능하게 한다^[4, 6]. 유전 알고리즘은 잠재적 해인 염색체들을 해의 집합으로 운용하는데, 각 염색체는 적자생존 법칙을 적용받아 상대적으로 적합도가 우수한 것이 살아남게 되어 진화한다. 진화는 적합도가 높은 염색체들이 선택되고, 이들의 교차 및 돌연변이를 통해 염색체들은 변화하는 과정을 통해 이루어진다. 그림 4는 일반적인 유전 알고리즘의 절차를 나타낸다.

유전 알고리즘은 전체 개체군에 걸친 변화 및 처리가 이루어지며, 확률적 원칙에 따라 세대를 거듭하고, 교차 및 돌연변이를 통해 해를 찾기 위한 임의성을 강조하지만 실제로는 각종 요소에 의해 축적된 정보에 따른 방향성을 가지고 최적해를 찾아가는 과정으로 구현하며, TSP(Traveling Sales Person)문제처럼 컴퓨터공학의 NP-Hard 문제군과 같이 일반적인 방법으로 좋은 해를 구할 수 없는 문제군의 최적화에 적합하다^[4].

2. 제안 알고리즘

레이더 펄스 모호성 해결은 TOA의 측정오차 및 신호누락, 잡음 및 반사파 등 실제 신호환경을 고려하여 설계되어야 한다. 제안한 방법은 유전 알고리즘의 확률론적 진화 방법을 도입하여 모호성이 생기는 구간에서도 높은 정확도의 위치탐지가 가능하도록 하였다. 다수의 모집단 구성원에서 최적해를 결정하기 위한 그림 4의 일반적인 유전 알고리즘 절차를 제안한 기법에서는

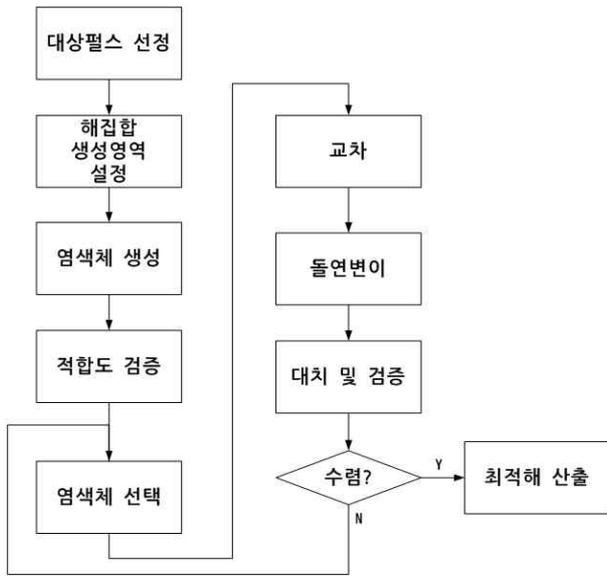


그림 5. 제안한 레이더 펄스 모호성 해결 방법의 흐름도

Fig. 5. The flow of proposed ambiguity resolution method of radar pulses.

수동형 전자감시장비의 펄스 모호성 해결 방안으로 사용하여 그림 5와 같이 구성하였다.

가. 대상펄스 선정

TDOA 위치탐지를 위한 레이더 펄스 모호성을 해결하기 위하여 먼저 각 수신기에서 수신한 펄스들 중에서 모호성 해결에 사용될 대상펄스의 수를 결정해야 한다. 대상펄스 개수(N)는 식 (3)과 같이 계산하며, 식에서 d 는 수신기 간 최대 이격 거리, c 는 전파속도를 의미한다.

$$N = 2 \times \left\lfloor \frac{d/c}{PRI} \right\rfloor + 1 \quad (3)$$

나. 해집합 생성영역 설정

유전 알고리즘을 적용하기 위해서는 가능한 해 공간 상에서 잠정해의 집합을 생성해야 한다. 해집합 생성은 생성영역이 먼저 결정되어야 하며, 이를 위해 각 수신기에서의 순시방향탐지 결과인 AOA값을 이용하여 LOB (Line of Bearing) 직선을 생성하고, 이 직선들의 교차영역을 계산한 후, 교차영역의 중심으로부터 교차영역의 가장자리 중 가장 먼 곳의 거리를 반지름 r 로 하는 원을 해집합의 생성영역으로 설정한다. 교차영역보다 큰 영역인 원을 해집합 생성영역으로 설정하는 이

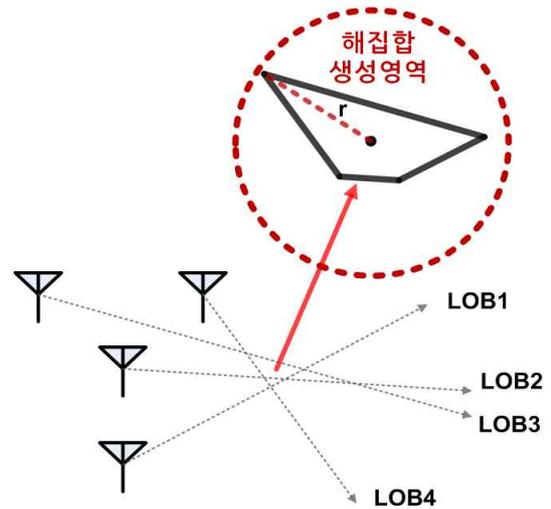


그림 6. 해집합 생성영역 설정

Fig. 6. Creation region setting of solution set.

유는 방향탐지 오차를 보상하기 위한 것이다.

다. 염색체 생성

생성영역이 결정되면, 이 영역에 유전 알고리즘을 적용할 해집합을 생성한다. 해집합은 M 개의 염색체(C)로 구성되며, 각 염색체의 값은 임의의 신호원 위치 $[x, y]$ 를 의미한다. 염색체 생성은 해집합 생성영역에 M 개의 염색체를 랜덤하게 배치하는 것으로 식 (4)의 함수를 이용하여 식 (5)에 사용될 부호 s_1 과 s_2 를 결정한 후, 식 (5)를 통해 염색체를 생성한다. 식 (5)에서 x_c 와 y_c 는 생성영역의 중심, r 은 생성영역의 반지름, Δ 는 $[-1, 1]$ 범위의 랜덤 값을 의미한다.

$$rect(t) = \begin{cases} -1, & 0 \leq t \leq 1 \\ +1, & 1 < t \leq 2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} s_1 &= rect(2 \times \Delta) \\ s_2 &= rect(2 \times \Delta) \\ x_i &= \Delta \times r + x_c \\ y_i &= \Delta \times \sqrt{r^2 - x_i^2} + y_c \\ C_i &= [s_1 \times x_i, s_2 \times y_i] \\ &, \text{ where } i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \end{aligned} \quad (5)$$

라. 적합도 검증

생성된 염색체에 대하여 한 세대에 살아남고 다음 세대로의 진화를 위한 과정인 교차와 돌연변이를 수행하기 위해서는 각 염색체에 대한 적합도를 검증해야 한다. 적합도는 각 염색체와 수신기 간의 거리를 전파속

도로 나눈 값과 실제 각 수신기에서 수신한 대상 펄스들과의 TDOA(τ)의 차를 계산하여 그 최소값들의 합의 역수로 표현한다. 식 (6)은 검색체와 수신기 간의 거리를 통해 TDOA를 계산하는 방법으로, R 은 각 수신기의 좌표를 의미하며, 거리 계산은 유클리디언 거리를 이용하였다. 식 (7)은 적합도 검증방법을 나타낸 것으로, f_i 는 i 번째 검색체에 대한 적합도를 의미하고, p 는 각 수신기에서 수신한 펄스의 도착시간을 의미한다. 식 (6)과 식 (7)에서 사용된 인덱스 j, k 는 수신기 번호를 나타낸다.

$$\tau(i)_{jk} = \frac{|C_i - R_j| - |C_i - R_k|}{c} \quad (6)$$

$$f_i = \frac{1}{\sum_j \sum_k \min|p_j(a) - p_k(b) - \tau(i)_{jk}|}, \text{ where } a, b = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (7)$$

마. 검색체 선택

검색체 선택은 교차에 사용될 두 개의 검색체를 고르기 위한 것으로 다양한 방법이 존재하고 있으나, 본 논문에서는 적합도 비례 룰렛휠 선택 방법^[6]을 사용하였다. 적합도 비례 룰렛휠 선택 방법은 적합도가 높은 검색체를 교차에 사용될 확률이 높도록 선택하는 방법으로서, 식 (8)의 검색체의 누적 적합도 함수 F 를 이용하여 구현하였다.

$$F_i = \sum_{j=0}^i f_j \quad (8)$$

F 를 이용한 검색체 선택방법은 식 (9)와 같다. 랜덤 함수를 이용하여 $[0,1]$ 범위의 임의의 값을 선택하고 이를 식 (9)에 대입하여 이를 만족하는 i 를 계산한다. 식 (9)의 과정을 2번 수행하여 교차에 사용될 2개 검색체의 인덱스를 선택한다. 검색체 선택은 총 검색체 생성 개수인 M 개의 쌍이 선택될 때까지 반복한다. 수식에서 Δ 는 $[-1,1]$ 범위의 랜덤값을 의미한다.

$$F_{i-1} < \Delta \times F_{M-1} \leq F_i \quad (9)$$

바. 교차

검색체 선택 단계를 거쳐 선택된 각 검색체 쌍에 대

하여 유전 형질을 공유하고 이를 통해 자손을 만들어내는 유전연산인 교차를 수행한다. 교차에 사용될 각 검색체 쌍은 적합도 비례 룰렛휠 선택방법을 이용하여 선택했으므로, 교차를 통해 생성될 검색체는 좀 더 나은 적합도를 가질 확률이 높아지게 된다. 두 검색체(C_j, C_k)를 이용하여 하나의 자손 검색체(C')를 만드는 교차의 방법은 식 (10)과 같다.

$$C' = \frac{(C_j \times f_j) + (C_k \times f_k)}{f_j + f_k} \quad (10)$$

사. 돌연변이

돌연변이는 검색체에 임의의 변형을 유도하여 새로운 형질의 검색체 생성을 유도하는 것으로, 최적화 과정에서 지역 최적점을 탈출하는 주요 메커니즘을 제공한다^[6]. 돌연변이는 M 개의 검색체 중에서 돌연변이 발생률(U)만큼만 발생시켰는데, 본 논문에서는 그 값을 0.3으로 설정하였다. 돌연변이(* C) 생성 방법은 식 (11)과 같으며, 식에서 r 은 해집합 생성영역의 반지름이고, Δ 는 $[-1,1]$ 범위의 랜덤값을 의미한다.

$$*C = C_i \times r \times \Delta \quad (11)$$

돌연변이 적용을 위해 선택하는 M 개의 검색체는 최적해에 수렴하는 속도를 향상시킬 목적으로 적합도가 낮은 순서대로 선택하였다.

아. 대치 및 검증

기존 세대의 검색체는 교차와 돌연변이를 통해 생성된 새로운 검색체들로 대치한다. 대치는 기존의 검색체와 새롭게 생성된 검색체의 적합도를 비교하여 새롭게 생성된 검색체의 적합도가 큰 경우에만 대치하였고, 대치를 위해 생성된 모든 검색체에 대한 적합도 계산을 수행하였다.

자. 수렴 및 최적해 산출

유전 알고리즘은 교차 및 돌연변이를 통해 새로운 검색체를 생성하여 기존의 검색체를 대치하는 일련의 과정인 세대를 반복하며 최적해에 수렴하는 방법이다. 세대가 반복될수록 최적해에 근접해지지만, 수행시간도 그에 비례하여 증가하므로, 세대 반복을 종료할 수렴 조건을 확립할 필요가 있다^[4, 6].

수렴 조건은 최대 세대(G)에 도달하였거나, 해집단을 구성하는 염색체 전체 적합도의 합(F_{M-1})이 이전 세대 대비 변화율이 임계치(θ)이하인 경우가 2세대 연속일 때 종료한다. 본 논문에서는 G 는 20으로, θ 는 F_{M-1} 대비 1%로 설정한다.

수렴조건을 만족하여 세대가 종료되면, 현존하는 염색체들을 바탕으로 최적해를 산출한다. 최적해는 적합도의 평균(F_{M-1}/M)에서 가까운 적합도 순으로 50%의 염색체만을 선택하고 이들의 평균으로 신호원의 최종 위치를 결정한다.

III. 실험

제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 AOA 기반 신호원 위치추정 방법인 MSD 알고리즘과 모호성 구간에서의 위치추정 성능을 비교 분석하였다. 위치추정 성능을 검증하기 위하여 2개의 시나리오를 구성하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 수신기는 2개의 시나리오 모두 4개의 수신기를 1번 수신기(0,0)를 기준으로 나머지 3개의 수신기를 20km 이격하여 Y자형 구조로 배치하였다. 수신기 간 이격 거리가 20km이므로 신호원이 $66.6\mu s$ 이하의 PRI를 가지는 경우 모호성이 발생하므로, 2개의 시나리오 모두 신호원은 평균 PRI는 $30\mu s$ 의 고정 PRI 형태를 가진다고 가정하였다. 결과의 신뢰성을 위하여 신호원의 각 위치별로 제안한 알고리즘 및 MSD의 위치추정을 시나리오 1은 1000회, 시나리오 2는 200회 실시하여 실제 위치와의 오차인 TLE(True Location Error)의 평균을 산출하여 비교하였으며, 제안한 유전 알고리즘 기반 모호성 해결 알고리즘은 표 1과 같이 설정하여 수행하였다. 표 1의 설정값 중 교차율과 돌연변이 발생률을 다른 값으로 변경하여 실험을 수행하

표 1. 실험을 위한 제안한 알고리즘의 설정값
Table 1. Parameters of proposed algorithm for simulation.

구분	설정값
염색체 개수(M)	$100 \leq M \leq 500$ (M =해집합생성영역/1km ²)
교차율	1.0
돌연변이 발생률	0.3
최대반복횟수	50회
최대 세대(G)	20세대
변화율 임계치(θ)	1%

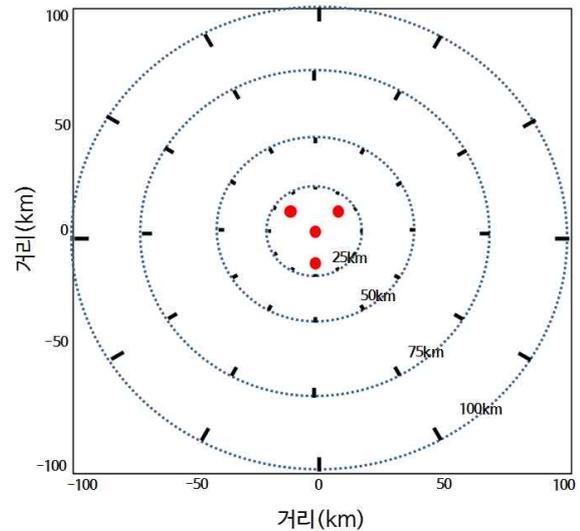


그림 7. 모의실험 시나리오 1
Fig. 7. Simulation Scenario 1.

표 2. 위치추정 성능비교
Table 2. Location estimation performance comparison.

	TLE(km)				개선율(%)	
	GA		MSD			
	#1	#2	#1	#2	#1	#2
30°	0.23	5.81	1.17	10.51	80.6	44.7
60°	0.31	6.77	0.98	10.41	68.5	34.9
90°	0.31	8.02	0.67	9.38	53.6	14.5
120°	0.42	8.96	0.97	10.23	56.9	12.4
150°	0.27	6.41	1.10	10.65	75.7	39.8
180°	0.41	7.95	0.85	8.60	51.4	7.5
210°	0.16	3.87	0.76	8.73	78.7	55.7
240°	0.12	5.03	1.02	11.51	87.8	56.3
270°	0.88	13.86	1.83	14.76	51.8	6.1
300°	0.29	6.67	1.01	11.12	71.6	40.0
330°	0.28	6.10	0.76	8.53	63.3	28.5
360°	0.22	6.57	0.83	8.30	73.9	20.8

여 보았으나 성능 측면에서는 큰 차이는 보이지 않았다.

시나리오 1은 그림 7과 같이 1번 수신기를 중심으로 반경이 25km, 50km, 75km, 100km인 원 상에 신호원을 30도 간격으로 배치시켰고, 방향탐지 정확도를 0.5° RMS에서 5° RMS까지 변경시켜가며 실험을 수행하여 수신기와 신호원간의 방향, 거리 및 방향탐지 정확도에 따른 위치추정 성능을 분석하였다.

표 2는 방향탐지 정확도와 신호원과의 거리에 따른 위치추정 정확도를 나타낸 것으로 #1은 방향탐지 정확도를 1° RMS, 신호원과의 거리를 50km로 설정하였고, #2는 방향탐지 정확도를 3° RMS, 신호원과의 거리를

100km로 설정하였다. 표 2에서 GA는 제안한 유전알고리즘 기반 레이더 펄스 모호성 해결방법을 의미하고, 개선율은 MSD 알고리즘 대비 성능개선 정도를 표현한 것으로, 다음의 수식을 적용하였다.

$$\text{개선율} = \frac{MSD - GA}{MSD} \times 100 \quad (12)$$

표 2로부터 제안한 방법(GA)이 MSD 대비 높은 위치추정 정확도를 나타냄을 확인할 수 있다. 신호원의 각도가 90°의 배수, 즉 90°, 180°, 270°, 360°인 경우 MSD 대비 개선율이 다른 각도에 비해 낮는데, 그 이유는 수신기가 수평 및 수직으로 2개씩 일직선 상에 배치되어 있기 때문에 수평 혹은 수직을 이루는 두 수신기로 들어오는 신호의 기울기(LOB)가 거의 유사하여 평행에 가까우므로 교차점의 위치가 실제 신호원 위치 대비 먼곳에 위치하게 되어 해집합 생성영역이 커지기 때문이다. 표 2의 #1 대비 #2의 결과가 좋지 않은 이유는 신호원의 거리가 멀어짐에 따라 방향탐지 정확도가 위치추정 정확도에 미치는 영향이 커지기 때문이다.

그림 8은 시나리오 1의 상황에서 방향탐지 정확도 및 신호원과의 거리를 기준으로 MSD 대비 제안한 방법의 평균 위치추정 성능 개선을 나타낸 것이다. 시나리오 1의 모든 경우에서 제안한 방법이 MSD 대비 평균적으로 약 48%가 높은 위치추정 성능을 보였고, 특히, 방향탐지 정확도가 높을수록 더 좋은 성능 개선율을 보였다. 수신기와 신호원간의 거리가 멀어짐에 따라 성능 개선율은 조금씩 낮아지는데, 이는 다수의 LOB 교차점을 기반으로 교차면적을 생성하고 이를 기반으로 해집합을 생성하므로, 같은 방향탐지 정확도라 하더라도 거

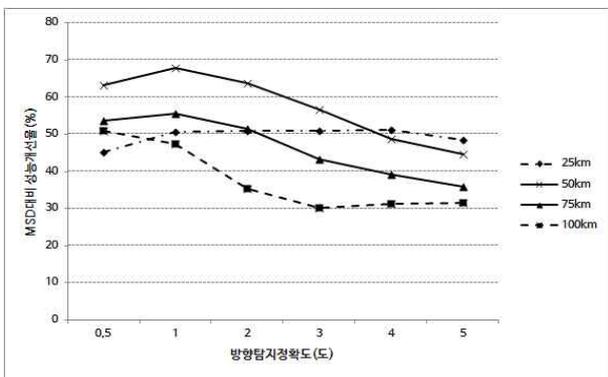


그림 8. MSD 대비 제안한 방법의 평균 성능 개선율
Fig. 8. Average Performance Improvement rate of proposed method in comparison with MSD.

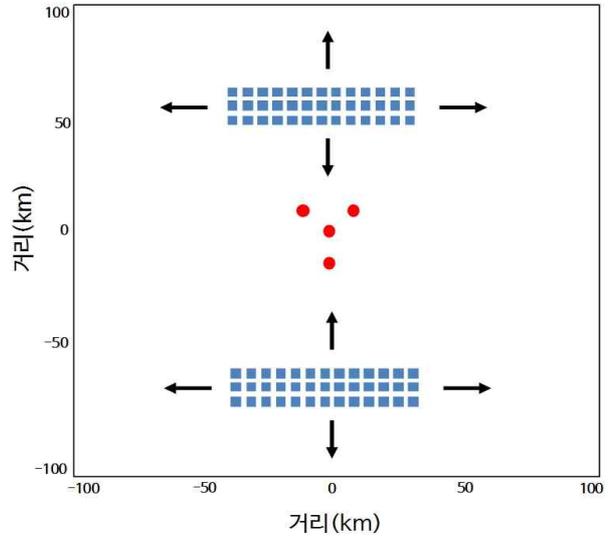


그림 9. 모의실험 시나리오 2
Fig. 9. Simulation Scenario 2.

리에 따라 LOB의 교차면적이 커져서 검색체 해를 생성할 면적이 늘어나 위치추정 정확도가 낮아지기 때문이다.

시나리오 2에서는 그림 9와 같이 신호원을 X축 [-100km, 100km], Y축 [-100km, 100km]의 영역에서 2km 간격으로 총 10,000개의 위치에 신호원을 배치하고 방향탐지 정확도를 1° RMS에서 3° RMS로 변경시켜가며 MSD 방법과 제안한 방법의 위치추정 성능을 비교하였다. 그림 10과 그림 11은 1° RMS의 방향탐지 정확도 조건 하에서 제안한 방법과 MSD 방법의 위치추정결과에 대한 TLE 그래프를 나타낸 것이다. TLE는 실제 위치와의 오차를 의미하므로, 작은 값을 가지는 지역의

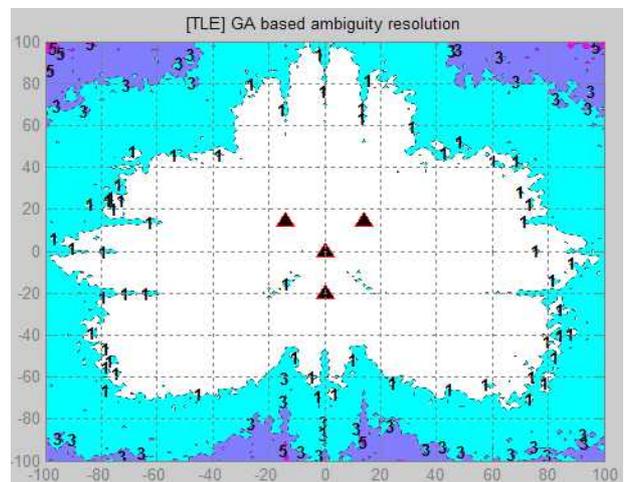


그림 10. 제안한 방법의 TLE 그래프(1° RMS)
Fig. 10. TLE Graph of proposed method(1° RMS).

범위가 클수록 좋은 위치추정 성능을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 2개의 수신기와 평행을 이루는 일부분을 제외하고는 대부분의 위치에서 MSD 방법에 비하여 높은 위치추정 결과를 나타내었다.

그림 12와 그림 13은 방향탐지 정확도를 2° RMS로 설정하여 시나리오 2의 조건에서 제안한 방법과 MSD 방법의 위치추정 결과를 TLE 그래프로 나타낸 것으로, 1° RMS 방향탐지 정확도 조건과 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 수신기 주위에서 2개의 수신기와 평행을 이루는 위치에서는 제안한 방법이 MSD 방법에 비해 성능이 약간 떨어짐을 보이지만, 대부분의 위치에서는 MSD 방법 대비 높은 성능 향상이 있음을 확인하였다. 수동형 전자감시장비의 목적상 수신기 주변보다는

전방을 감시하는 것이 주목적이므로 전방에 대한 성능만을 비교한다면 제안한 알고리즘이 기존 MSD 방법보다 매우 우수함을 확인할 수 있다.

그림 14와 그림 15는 방향탐지 정확도를 3° RMS로 설정하여 신호원의 위치를 추정한 결과를 나타낸 것으로, 방향탐지 정확도가 2° RMS인 경우에 비해 숫자가 작은 영역의 크기가 줄어들음을 확인할 수 있는데, 이는 방향탐지 정확도가 나빠짐에 따라 순시방향탐지 결과인 AOA를 이용한 위치추정의 정확도가 떨어짐을 의미한다. MSD 알고리즘에 비하여 수신기 근처에서 정확도가 다소 떨어지는 부분이 존재하지만, 주 탐지 타겟이 되는 원거리의 신호원에 대해서는 MSD 방법 대비 여전히 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

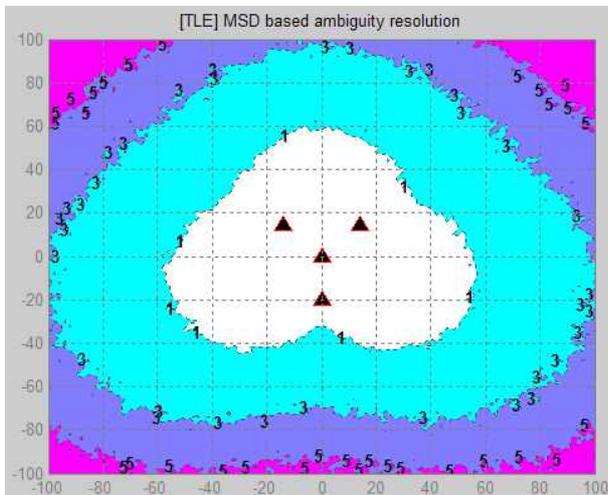


그림 11. MSD 방법의 TLE 그래프(1° RMS)
Fig. 11. TLE Graph of MSD method(1° RMS).

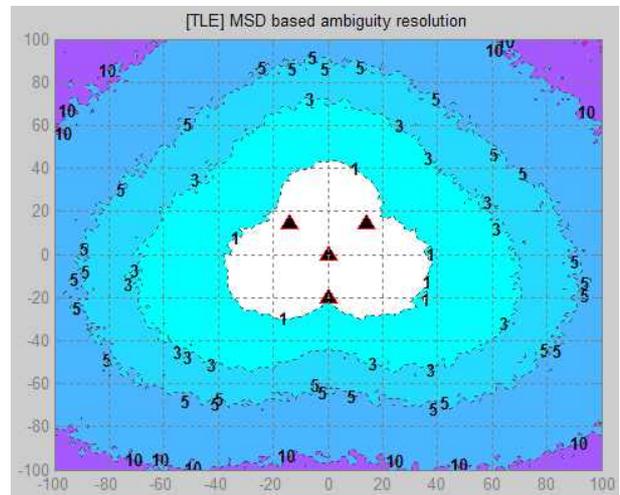


그림 13. MSD 방법의 TLE 그래프(2° RMS)
Fig. 13. TLE Graph of MSD method(2° RMS).

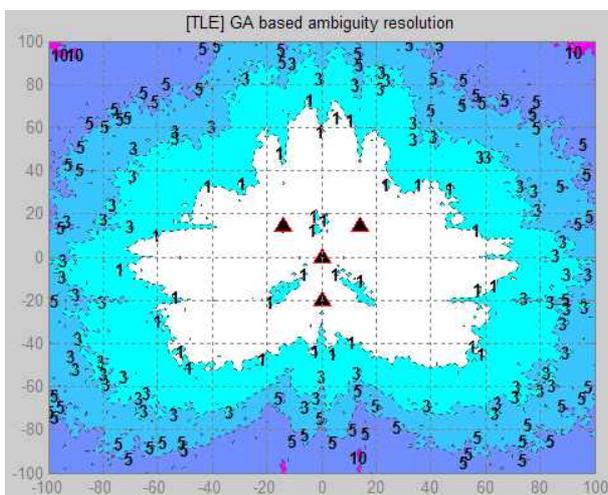


그림 12. 제안한 방법의 TLE 그래프(2° RMS)
Fig. 12. TLE Graph of proposed method(2° RMS).

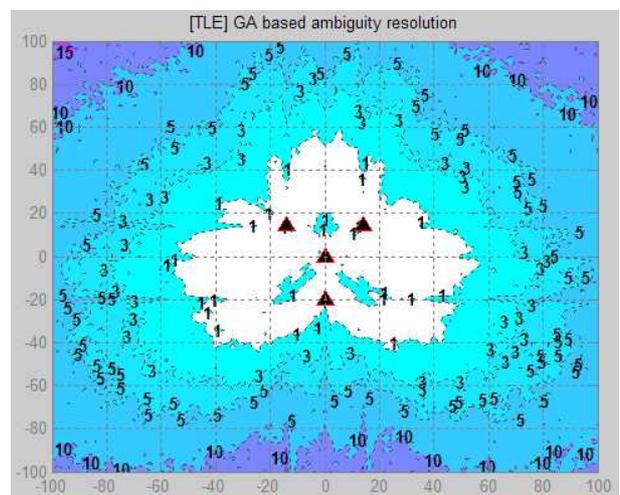


그림 14. 제안한 방법의 TLE 그래프(3° RMS)
Fig. 14. TLE Graph of proposed method(3° RMS).

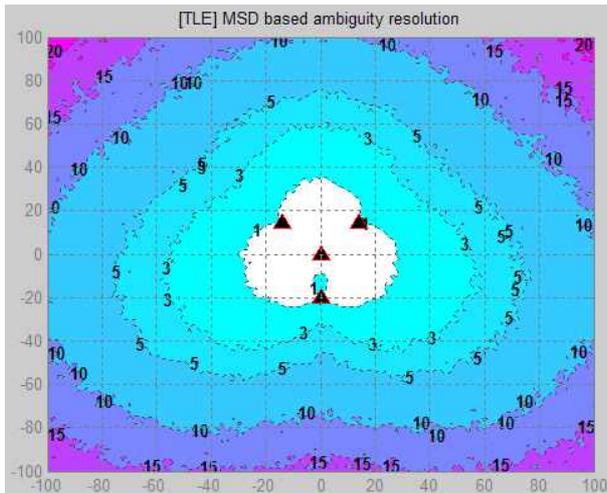


그림 15. MSD 방법의 TLE 그래프(3° RMS)
Fig. 15. TLE Graph of MSD method(3° RMS).

제안한 방법은 수신기 주위가 아닌 대부분의 위치에서는 MSD 대비 높은 위치추정 정확도를 보이지만, 수신기 주위, 특히 수신기 2개의 연장선상에 신호원이 위치하는 경우에는 위치추정 정확도가 약간 떨어지는 현상이 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 해집합 생성영역을 결정하는 단계에서 각 수신기에서의 LOB 중 2개가 거의 평행을 이루게 되어 교차점이 다른 교차점 집합 대비 원거리에 위치하는 현상 때문인데, 이를 해결하기 위해서는 교차점을 선별적으로 선택하거나 수신기 안쪽의 신호원에 대해서는 MSD 방법을 적용하는 하이브리드 방식을 사용함으로써 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

TDOA를 이용한 수동형 전자감시장비는 이격 수신기 간 신호의 수신시각의 차를 이용하여 신호원의 위치를 탐지하는데, 신호원의 PRI가 수신기 간 이격 거리 대비 크지 않은 경우에는 TDOA 계산을 하기 위한 펄스 선정에 있어서 모호성이 발생한다. 본 논문에서는 유전 알고리즘을 기반으로 해집합을 생성하고 각 해와 수신기 간 거리차이와 실제 수집된 펄스 간의 TDOA를 적합도로 설정하고 이를 교차, 돌연변이 및 세대변화의 지표로 설정하여 각 세대를 진행함으로써 최적해를 산출하여 레이더 펄스 모호성을 해결하는 방법을 제안하였다.

제안한 방법에 대한 성능을 확인하기 위하여 방향탐

지 정확도를 변화시켜가며 MSD 방법과의 모호성을 해결한 위치추정 성능을 비교하였다. 실험 결과 모든 방향탐지 정확도에서 수신기 2개와 평행을 이루는 일부 위치를 제외하고는 대부분의 위치에서 제안한 방법이 MSD 방법 대비 높은 성능 향상이 있음을 확인하였다. 제안한 유전 알고리즘 기반 레이더 펄스 모호성 해결방법은 모호성이 발생하는 경우 신호원의 위치를 높은 정확도로 추정할 수 있게 함으로써 TDOA를 이용할 수동형 전자감시장비의 성능 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] Brown, R.M., "Emitter Location Using Bearing Measurements from a Moving Platform," *NRL Report 8483*, Naval Research Laboratory, Washington D.C., June 1981.
- [2] Richard A. Poisel, *Electronic Warfare Target Location Methods*, Artech House, 2012.
- [3] Richard A. Poisel, *Introduction to Communication Electronic Warfare System*, Artech House, 2002.
- [4] David E. Goldberg, *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [5] 조제일, 한진우, 김산해, 송규하, "펄스 모호성 극복을 위한 AOA를 이용한 반복적 TDOA 위치추정 방법," *대한전자공학회 하계학술대회*, pp.968-970, 2013.7
- [6] 문병로, *쉽게 배우는 유전 알고리즘*, 한빛미디어, 2008.
- [7] R. G. Stansfield, "Statistical Theory of D.F. Fixing," *Journal of IEE*, 14 Part IIIA, 1947.
- [8] Don Terrieri, "Statistical Theory of Passive Location Systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, No. 2, pp. 183-198, March 1984.

저 자 소 개



한 진 우(정회원)
2001년 경북대학교 컴퓨터공학과
학사 졸업.
2004년 경북대학교 컴퓨터공학과
석사 졸업.
2004년~현재 국방과학연구소
선임연구원

<주관심분야 : 전자전, 신호처리, 패턴인식>



조 제 일(정회원)
2000년 경북대학교 전자전기
공학부 학사 졸업.
2005년 경북대학교 전자공학과
석사 졸업.
2005년~현재 국방과학연구소
선임연구원

<주관심분야 : 전자전, 통신, 신호처리, M&S>



김 산 해(정회원)
2000년 숭실대학교 전자공학과
학사 졸업.
2002년 숭실대학교 전자공학과
석사 졸업.
2010년 숭실대학교 전자공학과
박사 졸업.

2011년~현재 국방과학연구소 선임 연구원.
<주관심분야 : 전자전, 통신, 신호처리>



박 진 태(정회원)
2004년 금오공과대학교 전자공학
부 학사 졸업.
2006년 광주과학기술원 정보통신
공학과 석사 졸업.
2011년 광주과학기술원 정보기전
공학부 박사 졸업.

2011년~현재 국방과학연구소 선임 연구원.
<주관심분야 : 통신 및 신호처리>



송 규 하(정회원)
1996년 경북대학교 전자공학과
학사 졸업.
1998년 포항공과대학교 전자전기
공학과 석사 졸업.
1998년~현재 국방과학연구소
선임연구원

2012년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과
박사과정
<주관심분야 : 신호처리, 패턴인식, 위치탐지>