

향상된 성능의 전술형 모노펄스 MIMO 레이더

안 찬 호*, 진 현 보*, 양 장 훈***, 박 의 영**, 류 영 재**, 김 동 구°

On the Performance Enhancement of a Tactical Monopulse MIMO Radar

Chan-ho An*, Hyun Bo Jin*, Janghoon Yang***, Ui Young Pak**, Young-Jae Ryu**, Dong Ku Kim°

요 약

본 논문에서는 지상의 추적 장비들이 무선망으로 연결되어 협력하는 전술형 모노펄스(Monopulse) MIMO 레이더의 성능 향상 기법을 연구하였다. 우선, 기존의 모노펄스 MIMO 레이더에 $\alpha\beta$ 필터를 적용하여 각도 다이버시티(Angular Diversity)를 충분히 얻지 못하는 환경에서의 위치추적 성능을 크게 향상시키는 방법을 제안하였다. 또한 필터링 기법과 연계하여 무선망을 이용하는 지상 추적 장비간 피드백(Feedback)을 줄일 수 있는 기법을 제안하였다.

Key Words : coordinated tracking, monopulse, MIMO radar, $\alpha\beta$ filter, target localization

ABSTRACT

In this paper, we proposed an enhanced monopulse MIMO radar system for the tactical scenario where the ground receivers are connected wireless backhaul and closely spaced. By applying the $\alpha\beta$ filter to the conventional monopulse MIMO radar, we show that the localization performance can be improved significantly. We also propose an efficient localization algorithm for a system with lower rate feedback. Using numerical simulations, we demonstrate that the proposed scheme can improve the localization performance while reducing the feedback over conventional scheme.

I. 서 론

비교적 최근까지 레이더 시스템은 인접한 안테나 배열에 상관도가 높은 신호를 전송/수신하는 위상 배열(Phased Array) 방식 또는 빔 형성(Beam forming) 방식^[1]으로 신호를 집중/최대화 하는 방식이 선호되었다. 최근에는 넓게 분포한 안테나로부터 생기는 다이버시티 이득으로부터 페이딩으로 인한 성능저하를 완화하며, 타겟 검출 능력을 향상 시킬

수 있는 MIMO (Multiple-Input Multiple- Output) 레이더^[2]의 개념이 제안되어 많은 연구가 진행되고 있다^[4]. 따라서 다이버시티 이득을 통해 MIMO 레이더의 타겟 검출 성능은 높은 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 영역에서 기존의 위상 배열 레이더보다 우수하다. 반면 낮은 SNR 영역에서는 어레이 이득을 갖는 위상 배열 레이더가 우수한 성능을 나타낸다^[3]. 또한 MIMO 레이더와 위상 배열 레이더를 결합시킨 지향성 MIMO 레이더(Directional MIMO

※ 본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음. (영상정보용 공용데이터링크의 주파수 공유 기술구조 및 성능분석)

※ 본 연구의 일부 내용은 MILCOM2012 프로시딩에 게재됨[7].

◆ 저자 : 연세대학교 전기전자공학과 이동통신연구실, chanhoa@yonsei.ac.kr, 정희원

◦ 교신저자 : 연세대학교 전기전자공학과 이동통신연구실, dkkim@yonsei.ac.kr, 종신회원

* 연세대학교 전기전자공학과 이동통신연구실, jinhb1@yonsei.ac.kr

** 국방과학연구소 제2기술연구본부 3부, puy@add.re.kr, yjryu@add.re.kr, 정희원

*** 한독미디어대학원대학교 뉴미디어학부, jhyang@kgit.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2012-11-546, 접수일자 : 2012년 11월 23일, 최종논문접수일자 : 2012년 12월 10일

Radar)는 다이버시티 이득과 어레이 이득간의 트레이드 오프(Trade-off)가 필요하지만, 실제 레이더의 동작범위에서는 타겟 검출능력이 가장 우수하게 나타난다^[5].

레이더 시스템에서 타겟을 검출한 이후에 타겟의 위치를 식별(Localization)하기 위한 알고리즘이 필요하다. MIMO 또는 지향성 MIMO 레이더의 경우 각 수신기에서의 위상차 정보를 이용하는 동기식 방식을 필요로 하는데, 넓게 분포한 수신 안테나 사이의 시간/위상 동기를 맞추는 데에는 많은 제약이 따르게 된다. 최근 이러한 동기화 과정이 필요 없는 모노펄스(Monopulse) MIMO 레이더가 제안되었다^[6]. 모노펄스 MIMO 레이더는 지향성 레이더[5]와 같이 MIMO 레이더의 각 수신단에 위상배열 안테나를 조합한 형태로, 모노펄스로 각도를 추정하고 추정한 각도를 조합한다. 그 후 각 수신단에서 추정한 각도는 퓨전센터(Fusion Center) 또는 대표되는 수신단으로 전송되고, 각각의 각도 정보를 조합하여 타겟의 위치를 식별하게 된다. 따라서 (지향성) MIMO 레이더의 공간 다이버시티 이득과 모노펄스를 통한 타겟의 각도 및 위치 식별 능력을 모두 갖게 된다. 모노펄스 수신기의 성능은 위상배열 어레이의 개수와 수신 SNR 등에 영향을 받는데, 낮은 SNR 또는 적은 어레이 개수로 인한 낮은 빔 해상도에서는 각도 추정 오차가 커지게 된다. 또한 각 모노펄스 수신기 사이의 거리가 가까워지면, 각도 다이버시티를 얻지 못해 최종 타겟의 위치 식별 성능도 낮아지게 된다.

본 논문에서는 이러한 환경을 뒷받침하는 전술형 모노펄스 MIMO 레이더를 가정하였다. 즉, 레이더의 위치가 미리 고정되어 있지 않고, 상황에 따라 유동적으로 이동성이 보장되어 무선망을 통해 협력하는 환경이다. 이러한 환경에서 모노펄스 MIMO 레이더에 $\alpha\beta$ 필터를 적용하여 위치식별 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 연구하였다. 또한 필터링 기법과 연계하여 무선망에서 피드백을 줄일 수 있는 위치식별 기법을 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, II장에서는 레이더 신호모델을 살펴보고, III장에서는 기존의 모노펄스 MIMO 레이더 방식을 설명한다. IV장에서는 기존 모노펄스 MIMO 레이더에서 성능이 향상되고 피드백을 줄일 수 있는 방식을 제안한다. V장에서는 성능평가를 위한 임의의 환경을 가정하고, 제안된 방식의 성능을 확인하였으며, 최종적으로 VI장에서 연구 결과를 정리한다.

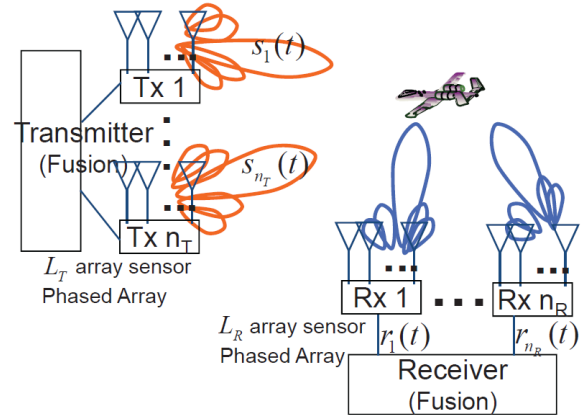


그림 1. 지향성 MIMO 레이더 시스템
Fig. 1. Directional MIMO Radar System

II. 레이더 신호 모델

그림 1에 나타난 바와 같이 지향성 MIMO 레이더는 L_T 개의 위상 배열 소자로 송신 빔 형성을 하며, 넓게 분포한 n_T 개의 개별 빔은 개별적인 직교 파형을 전송하게 된다. 마찬가지로 수신단에서는 L_R 개의 위상 배열 소자로 수신 빔 형성을 하여 n_R 개의 빔으로 수신하게 된다. 타겟의 위치와 송신 안테나 빔 방향이 일치하는 경우에 L_T 배의 이득을 얻을 수 있다. 각 송신 빔에서 송신하는 신호벡터를 $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_{n_T}(t)]^T$ 라 하면, i 번째 수신 안테나 빔을 형성하는 위상 배열 소자들이 수신하는 신호벡터 $\mathbf{r}(t)$ 는 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}_i(t) = L_T \sqrt{\frac{E_s}{n_T L_T}} \mathbf{a}(\theta_i) \boldsymbol{\alpha}^H \mathbf{s}(t - \tau) + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

여기서 $n_T \times 1$ 채널 벡터 $\boldsymbol{\alpha}$ 는 분산이 1인 복소 가우시안 랜덤 변수들로 구성되어 있으며, $\mathbf{n}(t)$ 는 복소 가산성 백색 가우시안 잡음으로 평균이 0이고 분산은 σ_n^2 을 가지고, $E_s = E[\mathbf{s}(t) \mathbf{s}^H(t)]$ 는 송신 신호전력을 나타낸다. $((\cdot)^T$ 와 $(\cdot)^H$ 는 전치(Transpose)와 복소공액 전치(Hermitian Transpose)를 나타내는 기호로 사용한다)

마찬가지로 i 번째 수신 안테나 빔을 형성하는 L_R 개의 위상 배열 소자들을 통해 수신 빔 형성을 하면, 어레이 이득을 얻을 수 있다. 타겟의 위치와 수신 빔의 방향이 일치하는 경우, 수식 (1)은 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_i(t) &= \mathbf{a}(\hat{\theta}_i) \mathbf{r}_i(t) \\ &= L_R L_T \sqrt{\frac{E_s}{n_T L_T}} \boldsymbol{\alpha} s(t-\tau) + n(t), \end{aligned} \quad (2)$$

보다 자세한 신호 모델은 [2]와 [5]에 나타나 있다.

III. 모노펄스 MIMO 레이더

모노펄스는 타겟 신호의 각도 정보를 추정할 수 있는 신호처리 기술이다. 본 논문에서는 합(\mathbf{w}_Σ)과 차(\mathbf{w}_Δ) 빔 가중치를 사용하는 진폭비교방식의 모노펄스 수신기를 고려한다.

빔 형성 조향(Steering) 벡터는 타겟과의 각도 θ_t 에 대한 복소 진폭 프로파일(Complex Amplitude Profile)로 정의된다. 예를 들어 타겟이 다음과 같은 지향벡터를 가진다고 하자.

$$\mathbf{d}(\theta_t, f_c) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(j2\pi d \sin(\theta_t)/\lambda) \\ \vdots \\ \exp(j2\pi d(L_R - 1) \sin(\theta_t)/\lambda) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 d 와 λ 는 어레이간의 간격과 주파수 f_c 에 따른 파장을 나타낸다.

각 수신단에서는 중심 방향으로부터 $\pm \theta_s/2$ 방향을 지향하는 두 개의 이중 빔을 형성한다. i 번째 수신 안테나에의 좌, 우 두 개의 빔을 \mathbf{w}_i^l 와 \mathbf{w}_i^r 이라 표기하면, 두 빔의 가중치(weight)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{w}_i^l = \mathbf{d}(\theta_i^0 - \theta_s/2, f_c) \quad (4)$$

$$\mathbf{w}_i^r = \mathbf{d}(\theta_i^0 + \theta_s/2, f_c) \quad (5)$$

여기서 θ_i^0 는 i 번째 수신기가 지향하는 중심 방향을 나타낸다. 수식 (4)와 (5)의 가중치를 이용하여 합 빔($\mathbf{w}_i^\Sigma = \mathbf{w}_i^l + \mathbf{w}_i^r$)과 차 빔($\mathbf{w}_i^\Delta = \mathbf{w}_i^l - \mathbf{w}_i^r$)을 나타낼 수 있으며, 모노펄스 비율(Monopulse Ratio)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i(\theta_i) = \mathbf{w}_i^\Delta \mathbf{d}(\theta_i, f_c) / \mathbf{w}_i^\Sigma \mathbf{d}(\theta_i, f_c) \quad (6)$$

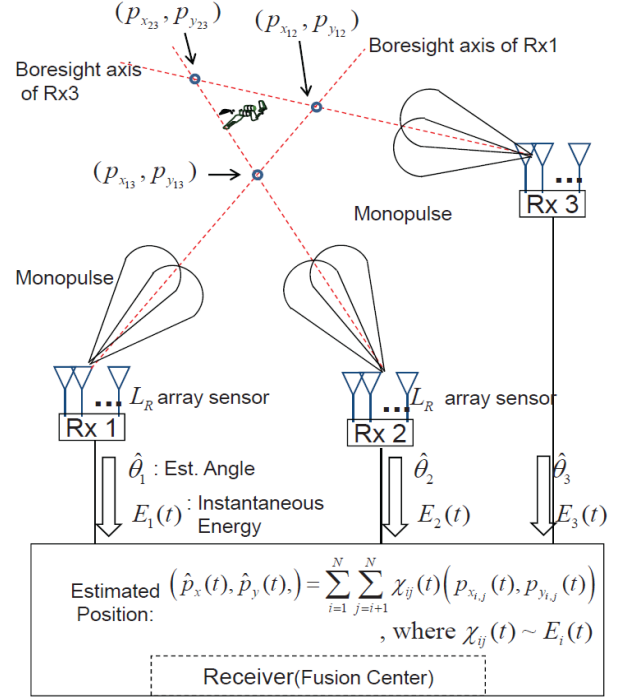


그림 2. 모노펄스 MIMO 레이더 수신기 구조
Fig. 2. Monopulse MIMO radar Receiver

수식 (6)에 대한 Look-up 테이블을 통해, 수신 신호 (1)에 대한 각도 추정($\hat{\theta}_i$)은 다음과 같이 할 수 있다.

$$\hat{\theta}_i = q_i^{-1}(\text{Re}[\mathbf{w}_i^\Delta \mathbf{r}_i / \mathbf{w}_i^\Sigma \mathbf{r}_i]) \quad (7)$$

이후, 각 수신단에서는 추정된 타겟 각도($\hat{\theta}_i$)와 순시전력(Instantaneous Energy: $E_i(t)$)을 퓨전센터로 보내게 된다. 이러한 정보를 수집한 퓨전센터는 $n_R(n_R - 1)/2$ 개의 각도 교차점($p_{x_{ij}}(t), p_{y_{ij}}(t)$)을 형성하고, 순시 전력($E_i(t)$)을 이용하여 최종 타겟의 위치($\hat{p}_x(t), \hat{p}_y(t)$)를 다음과 같이 결정하게 된다.

$$(\hat{p}_x(t), \hat{p}_y(t)) = \sum_{i=1}^{n_R} \sum_{j=i+1}^{n_R} \chi_{ij}(t) (p_{x_{ij}}(t), p_{y_{ij}}(t)) \quad (8)$$

여기서 각 교차점에 대한 가중치 $\chi_{ij}(t)$ 는 순시 전력($E_i(t)$)에 대한 비율로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\chi_{ij}(t) = \frac{E_i(t) + E_j(t)}{\sum_{i'=1}^{n_R} \sum_{j'=i'+1}^{n_R} E_{i'}(t) + E_{j'}(t)} \quad (9)$$

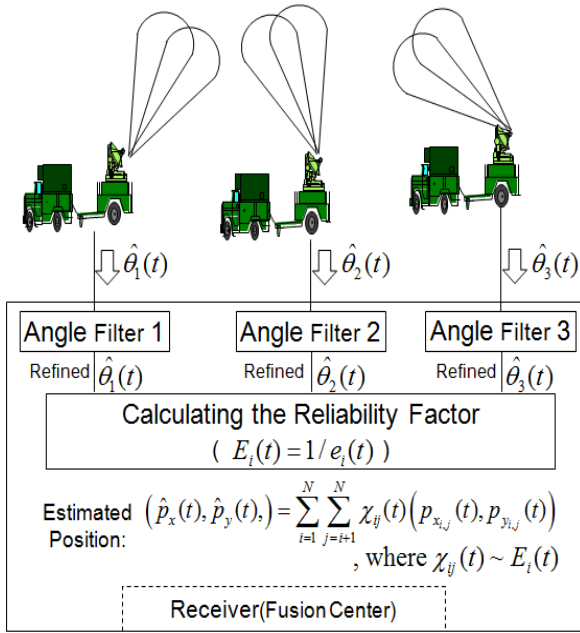


그림 3. 제안된 모노펄스 MIMO 레이더 수신기 구조
Fig. 3. Proposed Monopulse MIMO Radar Receiver

여기서 각 수신단으로 부터의 순시전력($E_i(t)$)은 다음과 같다.

$$E_i(t) = |(\mathbf{w}_i^{\Sigma})^H \mathbf{r}_i(t)| \quad (10)$$

IV. 제안된 모노펄스 MIMO 레이더

본 장에서는 기존의 모노펄스 MIMO 레이더의 위치식별 성능을 향상시키며, 무선망에서 피드백을 줄일 수 있는 위치식별 기법을 제안하였다. 특히, 낮은 SNR로 인해 각도 추정 오차가 큰 경우와, 각도 다이버시티를 얻기 힘든 경우, 타겟 위치 식별에 큰 이득을 얻을 수 있는 기법이다. 제안된 방식은 수식 (3)-(7)까지의 기존 모노펄스 MIMO 레이더와 동일한 방식을 가지며, 수식 (7)에서 추정된 타겟 각도($\hat{\theta}_i$)는 퓨전센터로 보내진다. 이 때, 기존 방식과는 다르게 순시전력($E_i(t)$)의 정보는 전송되지 않는다. 즉, 순시전력에 대한 피드백을 없애므로써 그림 3에서의 같이 유동적이며 무선으로 연결된 전술형 시스템에 유용한 장점을 갖는다.

먼저 각 수신단에서 추정된 각도는 $\alpha\beta$ 필터를 통해 보정을 하게 된다. 또한 필터링 과정으로부터 순시전력을 대체하기 위한 신뢰도 인자를 적용하여 타겟의 위치를 추정하게 된다. 본 장에서는 제안된 방식의 주요 메커니즘인 $\alpha\beta$ 필터와 신뢰도 인자에

대해 설명한다.

4.1. $\alpha\beta$ 필터링

$\alpha\beta$ 필터는 수식 (7)에서의 추정된 현재 타겟 각도($\hat{\theta}_i(t)$)를 이전 샘플시간에서의 추정 값($\hat{\theta}_i(t-1)$)을 토대로 보정하는 역할을 수행한다. $\alpha\beta$ 필터에 근거하여 본 연구에서 사용하는 i 번째 수신기의 각도 필터의 한 주기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\mathbf{s}}_i(t|t-1) = \Phi \hat{\mathbf{s}}_i(t-1|t-1) \quad (11)$$

$$e_i(t) = \hat{\theta}_i(t) - \mathbf{A} \hat{\mathbf{s}}_i(t|t-1) \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{s}}_i(t|t) = \hat{\mathbf{s}}_i(t|t-1) + \mathbf{K}_i e_i(t) \quad (13)$$

여기서 $\hat{\mathbf{s}}_i(t|t) = [\hat{\theta}_i(t), \nu_i(t)]^T$ 는 필터링 모델의 상태추정(state estimate)이고 $\nu_i(t)$ 는 필터링 모델에 의해 추정된 각속도이다. 또한 상태추정 행렬(State transition matrix) Φ 와 측정 행렬(Measurement matrix) \mathbf{A} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = [1 \quad 0] \quad (14)$$

여기서 T 는 레이더의 스캔 주기이며, 필터 계수 $\mathbf{K}_i = [\alpha \quad \beta]^T$ 는 필터인자 ξ ($0 \leq \xi \leq 1$)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha = 1 - \xi^2, \quad \beta = (1 - \xi)^2 \quad (15)$$

4.2. 신뢰도 측정

제안된 모노펄스 MIMO 레이더는 각 수신기로부터 각도 정보만을 퓨전센터로 피드백한다. 기존 방식에서는 순시전력에 대한 정보를 함께 피드백하며, 각 수신기 각도의 꼭지점에 가중치를 순시전력에 대한 비율로 정하여 최종 타겟의 위치를 추정하였다. 이러한 순시전력에 대한 정보를 피드백하지 않는 제안된 방식에서는 가중치를 정하는 새로운 방식이 필요하다. 본 소장에서는 필터링과 연계하여 가중치를 정하고 최종 위치를 결정하는 방법을 제시한다.

수식 (12)의 $e_i(t)$ 는 현재의 측정된 각도($e\hat{\theta}_i(t)$)와 이전 샘플정보를 통해 예측된 각도($\mathbf{A}\hat{\mathbf{s}}_i(t|t-1)$)의 차이를 나타낸다. 현재의 측정된 신호가 필터링

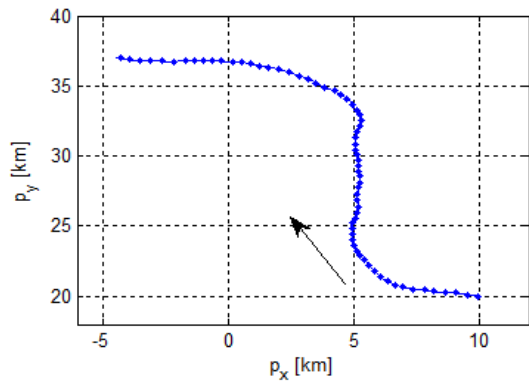
자체에서 모델링한 신호와의 신뢰도를 나타내어준다. 만일 $e_i(t)$ 의 차이가 크게 나타나면, 필터링 모델에서 가지고 있는 움직임 정보와 측정된 움직임 정보가 상이하게 나타나는 것이다. 이러한 현상은 측정값이 잡음의 영향을 크게 받은 결과로 $e_i(t)$ 는 순시전력과 역수의 관계로 나타낼 수 있다. 따라서 수식 (9)와 (10)에서의 순시전력으로 사용된 $E_i(t)$ 값을 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$E_i(t) = 1/(e_i(t) + \epsilon) \quad (16)$$

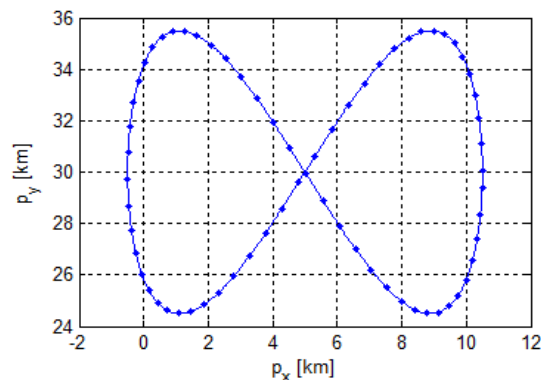
여기서 ϵ 은 $E_i(t)$ 가 무한대로 발산하는 것을 막기 위한 임의의 작은 실수이다.

V. 시뮬레이션 결과 및 성능 비교

본 장에서는 제안된 방식과 기존 방식의 모노펄스 MIMO 레이더의 성능을 비교한다, 실험환경은 4개($L_T=4$)의 위상 배열 소자로 송신 빔을 형성하는 2개($n_T=2$)의 전송 안테나에서 신호를 전송한다. 수



(a) 'ㄱ' 이동 궤적



(b) '8' 이동 궤적

그림 4. 타겟의 이동경로
Fig. 4. Target Trajectory

신 안테나는 총 3개($n_R=3$)로 10개($L_R=10$)의 위상 배열 소자로 모노펄스 빔을 형성한다. 모노펄스 수신기는 5km간격으로 [0,0], [5,0km], [10,0km]에 위치하고 있으며, 모노펄스 좌우 두 빔은 지향 방향을 중심으로 5°씩 벌어져 있다(즉, $\theta_s = 10^\circ$). 그림 4에 나타낸 바와 같이, 타겟은 'ㄱ' 이동 궤적과 '8' 이동 궤적(평균속도186km/h, 최저속도:을 1000샘플 사용 하였으며, 신호대 잡음 비율은 SNR=10dB를 가정하였다. 또한 'ㄱ' 이동 궤적에서는 필터인자 ξ 는 0.97을 사용하였으며, '8' 이동 궤적에서는 0.95를 사용하였다.

표 1. 'ㄱ' 이동 궤적에서 Outage 확률에 대한 위치추적 오차 [단위: km]

Table 1. Outage Localization Performance for 'ㄱ'-shape trajectory [Unit: km]

Outage Prob.	Conventional Monopulse	Monopulse with Filtering	Proposed Scheme
0.1 %	6.92	0.93	0.93
0.2 %	5.98	0.85	0.85
0.5 %	4.81	0.75	0.74
1 %	3.92	0.66	0.66
2 %	3.06	0.58	0.58
5 %	2.03	0.47	0.47
10 %	1.39	0.38	0.38
20 %	0.89	0.31	0.31
50 %	0.36	0.20	0.20

표 2. '8' 이동궤적에서 Outage 확률에 대한 위치추적 오차 [단위: km]

Table 2. Outage Localization Performance for '8'-shape trajectory [Unit: km]

Outage Prob.	Conventional Monopulse	Monopulse with Filtering	Proposed Scheme
0.1 %	6.12	1.24	1.23
0.2 %	5.34	1.14	1.13
0.5 %	4.37	1.00	0.99
1 %	6.65	0.90	0.89
2 %	2.90	0.79	0.78
5 %	1.99	0.64	0.64
10 %	1.37	0.53	0.53
20 %	0.88	0.41	0.41
50 %	0.38	0.23	0.23

표 1은 '7c' 이동 궤적에서 기존 위치추적 방법(기존 모노펄스)과 기존 방법에 필터링을 적용한 방식(모노펄스+필터링), 그리고 필터링과 신뢰도를 사용하는 방법(모노펄스+필터+신뢰)을 적용한 경우의 위치추적 오차를 각 Outage에 대해 나타내었다. 기존 모노펄스 MIMO 레이더에 $\alpha\beta$ 필터를 적용하는 방법으로 타겟 위치추정 성능이 크게 향상되는 것을 볼 수 있다. 낮은 Outage 확률에서의 위치추정의 성능 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 50%의 Outage에서는 필터링의 유무에 대한 위치추정 오차가 약 0.16km 나타나지만, 0.1%의 Outage에서는 6km 가까이 위치추정오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 순시전력에 대한 피드백없이 신뢰도 측정방식을 사용하는 경우에도 기존의 방식에 필터링을 적용한 것과 동일한 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

표 2는 '8' 이동 궤적에서 위치추적오차를 Outage로 나타내었다. 보다ダイナミック한 이동궤적으로 인해 낮은 Outage에서 필터링으로 인한 효과가 다소 약해졌지만, 이러한 환경에서도 제안된 알고리즘으로 인한 이득이 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 지향성 MIMO 레이더의 특성을 갖는 모노펄스 MIMO 레이더의 성능향상에 대한 연구를 하였다. 우선, 타겟의 위치 추정을 보정하기 위해 $\alpha\beta$ 필터를 적용하여 기존 레이더 방식보다 Outage발생 확률을 크게 낮출 수 있는 방식을 제안하였다. 또한 기존 모노펄스 MIMO 레이더에서 요구되던 피드백 정보를 줄이면서도, 동일한 성능을 보일 수 있는 방식을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 방식은 수신 레이더가 무선으로 연결되어, 거리와 피드백이 제한되어 있는 환경인 전술형 모노펄스 MIMO 레이더에서 큰 이득을 보일 수 있다.

참 고 문 헌

[1] S. Haykin, J. Litva, and T. J. Shepherd, *Radar Array Processing*, 1st Ed, New York, 1993
 [2] E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum, L. Cimini, D. Chizhik, and R. Valenzuela, "MIMO radar: an idea whose time has come," in *Proc IEEE Intr. Conf. on Radar*, pp. 71-78, Philadelphia, USA, Apr. 2004

[3] E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum, L. Cimini, D. Chizhik, and R. Valenzuela, "Spatial diversity in radars-models and detection performance," *IEEE Trans. Signal. Proces.*, vol. 54, no. 3, pp. 823-838, Mar. 2006.
 [4] J. Li and P. Stoica, *MIMO Radar Signal Processing*, 1st Ed. New York: Wiley, 2009
 [5] C.-H. An, J. Yang, U.Y. Pak, Y.-J. Ryu, D.C. Han, and D.K. Kim, "Detection Performance of Noncoherent Radar: MIMO Radar, Phased Array Radar, Directional MIMO Radar," *J. KICS*, vol. 36, no. 12, pp. 1752-1757, Dec. 2011.
 [6] S. Gogineni, and A. Nehorai, "Monopulse MIMO radar for target tracking," *IEEE Trans. Aero Elec Sys.*, vol. 47, no. 1, pp. 755-768, Jan. 2011
 [7] C. H. An, J. Yang, R. Ran, U. Y. Pak, Y. J. Ryu, and D. K. Kim "Enhanced monopulse MIMO radar using reliable alpha beta filtering," in *Proc. MILCOM 2012*, pp. 425-430, Orlando, USA, Nov. 2012.

안 찬 호 (Chan-ho An)



2006년 2월 경희대학교 전자정보학부 (공학사)
 2008년 2월 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2008년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 <관심분야> MIMO 송수신 기법, Lattice Reduction, 통신신호처리, OFDMA/SC-FDMA, MIMO Radar, 이동체 추적 알고리즘

진 현 보 (Hyun Bo Jin)



2012년 8월 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2012년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
 <관심분야> MIMO 송수신 기법, MIMO Radar, 이동체 추적 알고리즘

양 장 훈 (Janghoon Yang)



1996년 2월 연세대학교 전파공학과 (공학사)
2001년 U.S.C. Dept of Electrical Engineering (공학석사)
2001년 U.S.C. Dept of Electrical Engineering (공학박사)
2001년~2006년 삼성전자 책임 연구원

2006년~2010년 연세대학교 공과대학 전기전자공학부 연구 교수
2010년~현재 한독미디어대학원대학교 뉴미디어학부 조교수
<관심분야> CDMA, OFDMA, MIMO, Relay, Cross layer optimization, 간섭 채널, 정보이론, neural signal processing

박 의 영 (Ui Young Pak)



2003년 3월 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
현재 국방과학연구소
<관심분야> 이동통신, 데이터 링크

류 영 재 (Young-Jae Ryu)



2000년 2월 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)
2002년 2월 경북대학교 전자공학과 석사 (공학석사)
2002년~현재 국방과학연구소 <관심분야> 대역확산통신, 디지털신호처리

김 동 구 (Dong Ku Kim)



1983년 2월 한국항공대학교 통신공학과 졸업
1985년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 석사
1992년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 박사
1994년~현재 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 교수

<관심분야> 4세대 이동통신 시스템, 협력 MIMO 기술, 무선 이동 Relay 기술, Compressed Sensing, 차세대 에너지 효율 무선 시스템 기술