

레이더 스캔 패턴 분석을 위한 레이더 신호 모델링 기법

(Techniques on Radar Signal Modeling for Radar Scan Pattern Analysis)

김용희*, 김완진*, 이동원**, 송규하**, 한진우**, 김형남*
*부산대학교, **국방과학연구소

요약

전자전 지원 시스템에서 기본 식별변수들을 이용하여 레이더를 식별하는 기존의 방법은 현대의 고밀도 다중 신호 환경에서 그 성능에 한계를 가진다. 이러한 한계를 극복하고 전자전 지원 시스템의 식별성능을 향상시키기 위해 레이더의 스캔 패턴 정보를 이용하여 식별성능을 향상시키려는 노력이 지속되고 있다. 이 과정에서 레이더 스캔패턴 정보를 포함하는 정확한 레이더 신호의 확보는 필수적이지만 다양한 스캔패턴과 운용변수에 의해 결정되는 레이더 신호를 실제 전자전 환경에서 직접 수집하는 것은 현실적으로 어려움이 있다. 본 논문에서는 실제 전자전지원 시스템에서 레이더 신호 세기가 결정되는 원리를 기반으로 하는 레이더 신호 모델링 기법을 제안하고 제안된 모델에 의해 생성된 레이더 신호를 분석한다.

I. 서론

현대전의 양상이 인명손실의 최소화와 조기 종결로 변화함에 따라 전자전 (electronic warfare)의 중요성이 크게 부각되고 있다. 전자전은 전자전지원 (electronic warfare support), 전자공격 (electronic attack), 전자방어 (electronic protection)로 분류되며 전자전 지원은 효과적인 전자공격과 전자방어를 위해 우선적으로 요구되는 과정이다. 전자전 지원을 위해서는 우선 방사된 적 레이더 신호를 수집하고 분석해 운용변수를 추정한 후, 추정된 운용변수들을 기 확보된 식별 라이브러리와 비교해 레이더 명을 식별한다 [1]. 그러나 레이더의 종류가 다양해지고 다양한 장비에서 발생하는 전자파로 인해 신호 환경이 열악해지면 주파수, 펄스도착시간 (time of arrival, TOA), 펄스폭 등의 운용변수만으로는 레이더의 종류를 특징할 수 없는 식별 모호성이 발생하게 된다. [2],[3].

전장 환경 하에서 레이더 식별성능의 저하는 적의 위협에 대한 대응능력 저하, 즉 아군의 생존을 하락을 의미하므로, 기존의 운용변수 이외에 레이더의 스캔 패턴 정보를 분석하여 레이더 식별성능을 향상시키기 위한 연구들이

진행되었다 [1],[4]. 스캔패턴 정보를 분석하고 이를 모델링하기 위해서는 다양한 수신 환경에서 운용변수들의 설정에 따른 레이더 스캔 패턴 신호의 확보가 요구되나 실제 전자전 혹은 유사한 환경을 구성하여 신호를 수집하는 것은 현실적으로 많은 제약이 따른다. 그러므로 이를 효과적으로 대체할 수 있는 방법이 절실히 요구된다. 이를 위해 본 논문에서는 전자전지원 시스템에 수신되는 레이더 신호의 세기가 결정되는 과정을 분석하여 모델링하고, 레이더 스캔패턴 정보를 포함하는 레이더 신호를 생성하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 전자전지원 시스템의 수신신호의 세기를 결정하는 주요 요소들에 대해 분석하고, 3장에서는 이를 이용한 레이더 신호의 모델링 기법을 제안한다. 4장에서는 제안된 모델을 이용하여 대표적인 스캔패턴을 가지는 레이더 신호를 생성하고 그 결과를 분석한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 레이더 시스템 및 신호강도 결정변수 분석

전자전지원 시스템에 수신되는 레이더 신호

는 펄스반복주기(pulse repetition interval, PRI) 변조방식, 스캔주기, 송신 주파수 등의 다양한 레이더 운용변수에 대한 정보가 포함되어 있으며, 수신되는 신호 세기의 변화를 관찰하면 해당 레이더의 스캔패턴에 관한 정보를 추출할 수 있다 [4],[5]. 따라서 레이더 스캔패턴 정보를 포함하는 레이더 신호를 모델링하기 위해서는 우선 전자전지원 시스템에 수신되는 레이더 신호의 세기가 결정되는 과정을 이해하고 모델링 시 고려될 주요 요소들을 선정해야 한다.

자유공간 경로 손실 (free-space path loss)과 같은 외부변수들의 효과를 고려하지 않았을 때 전자전지원 시스템에 수신되는 레이더 신호의 세기는 그 순간 레이더가 전자전지원 시스템 방향으로 방사하는 신호의 파워에 해당한다고 가정할 수 있다. 이 때 수신되는 신호의 강도는 거리에 대한 영향을 무시하였으므로 방사패턴의 종류와 레이더-전자전지원 시스템간의 상대적인 위치에 따라 결정된다. 방사패턴은 주엽 (mainlobe)의 폭, 부엽 (sidelobe)의 개수 및 감쇠 (attenuation) 정도 등의 변수에 의해 결정되며, 본 논문에서는 두 가지 방사패턴이 사용되었다. 첫 번째는 sinc 함수에 기반한 방사패턴 (RP_A)으로 다음과 같이 정의된다 [6].

$$\frac{E(\theta, \phi)}{E(0,0)} = \left[\frac{\sin(k(\theta^2 + \phi^2))}{k(\theta^2 + \phi^2)} \right]^r \quad (1)$$

여기서 k 는 부엽의 개수, r 은 부엽의 감쇠정도를 결정하는 변수이며, θ 와 ϕ 는 그림 1에서 보는 바와 같이 각각 boresight에 대한 방위각과 고도각을 나타낸다. 다음은 rectangular aperture 안테나의 방사패턴 (RP_B)으로 다음과 같이 정의된다 [7].

$$\frac{E(\theta, \phi)}{E(0,0)} = \left[\frac{\sin\left(k_1 \sin \frac{\theta}{k_3} \cos \frac{\phi}{k_3}\right) \sin\left(k_2 \sin \frac{\phi}{k_3} \cos \frac{\theta}{k_3}\right)}{\left(k_1 \sin \frac{\theta}{k_3} \cos \frac{\phi}{k_3}\right) \left(k_2 \sin \frac{\phi}{k_3} \cos \frac{\theta}{k_3}\right)} \right]^r \quad (2)$$

여기서 k_1 과 k_2 는 주엽의 형태를 결정하며 파

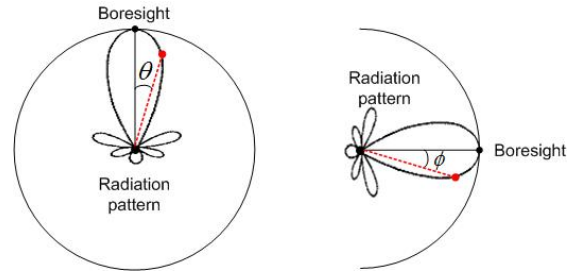
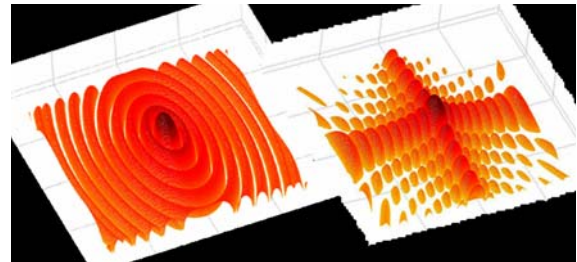
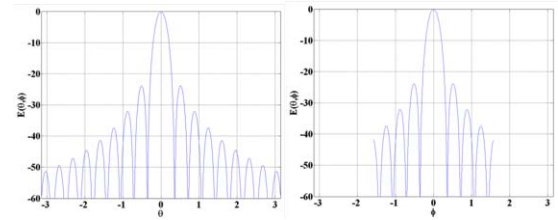


그림 1. Boresight에 대한 방위각 (θ)과 고도각 (ϕ)



(a) (b)



(c) (d)

그림 2. (a) sinc 함수에 기반한 방사패턴 (3-D), (b) rectangular aperture 안테나의 레이더 방사 패턴 (3-D), (c) (a)의 수평단면도, (d) (b)의 수평단면도.

라미터이다. $k_1 > k_2$ 이면 방위각 방향으로, $k_1 < k_2$ 이면 고도각 방향으로 넓은 빔폭을 가지는 형태가 된다. 그리고 k_3 는 부엽의 수를 결정하는 변수이다. 그림 2는 RP_A와 RP_B를 3차원으로 그린 것이며, 그림 2(b)와 (d)에서 보듯이 rectangular aperture 안테나의 방사패턴은 단방향성을 가지도록 backlobe를 제거하여 사용하였다.

레이더는 레이더 정면에 파워를 집중하여 조사하므로, 일정 영역에 대한 탐지 활동을 수행하기 위해서는 일정한 패턴으로 공간을 스캔해야 한다. 레이더가 공간을 스캔할 경우

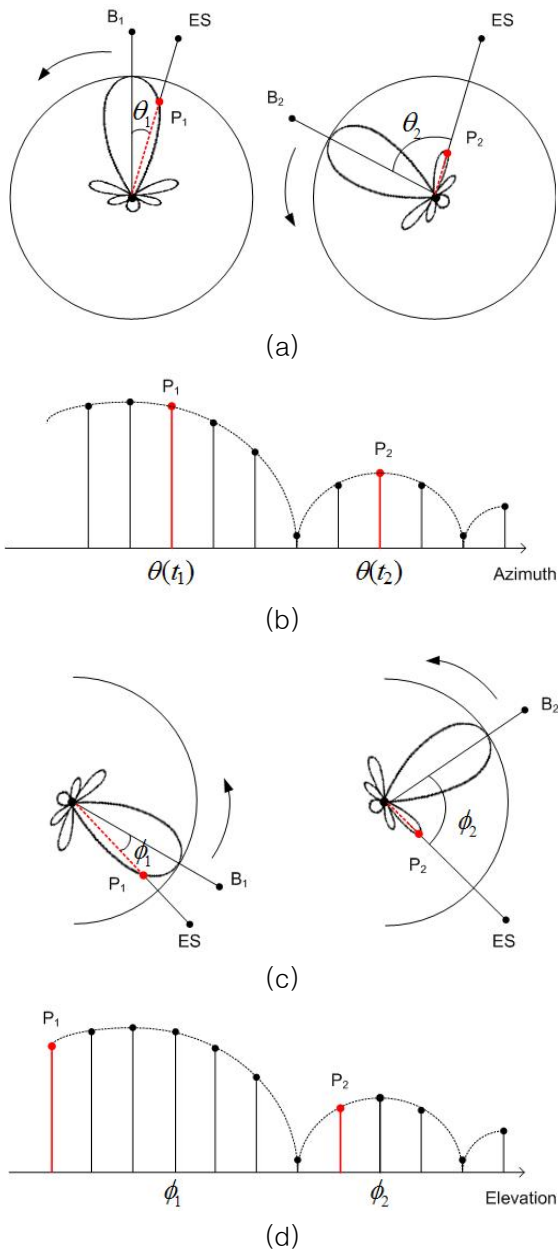


그림 3. (a) 방위각 변화에 따른 boresight의 움직임, (b) 방위각 변화에 따른 수신파워의 변화, (c) 방위각 변화에 따른 boresight의 움직임, (d) 고도각 변화에 따른 수신파워의 변화.

boresight 위치가 시간에 따라 변하게 되므로, 전자전지원 시스템에 수신되는 신호의 강도 역시 시간에 따라 변하게 된다. Boresight의 위치 변화에 따라 전자전지원 시스템에서 수신 신호가 변화하는 과정을 원형 (circular) 스캔

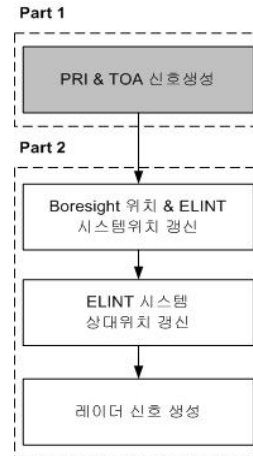


그림 4. 알고리즘 기본 블록도

레이더의 예를 들어 설명하면 그림 3과 같으며, 설명의 편의를 위해 전자전지원 시스템의 위치는 고정되어 있다고 가정한다. 그림 3(a)와 같이 boresight가 전자전지원 시스템의 근방에 있으면 수신신호는 그림 3(b)의 P_1 과 같이 나타나게 되고, boresight가 반시계방향으로 회전하면 boresight와 전자전지원 시스템의 상대적인 위치차이가 커지면서 수신신호 세기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 수신신호 세기의 변화는 그림 3(c)와 (d)에서 보는 바와 같이 고도각에 대해서도 동일하다.

III. 스캔패턴 신호 모델링 기법

2장에 살펴본 바와 같이 전자전지원 시스템에 수신되는 신호의 강도는 방사패턴과 boresight의 시간적 변화에 따른 전자전지원 시스템과의 상대적 거리에 의해 결정된다. 그러므로 시간에 따른 레이더 수신신호의 세기를 결정하기 위해서는 매 펄스도착시간(time of arrival, TOA) 마다 전자전지원 시스템에 수신되는 신호 세기 정보의 연속으로 갱신되도록 (1)과 (2)를 수정하여야 한다. 이를 위한 시간 변화에 따른 제안된 레이더 신호의 생성알고리즘은 그림 4와 같다. 레이더 신호 생성알고리즘은 크게 펄스도착시간을 결정하는 부분과 레이더 신호의 세기를 결정하는 두 부분으로 구분되어지며, 먼저 선택된 PRI 변조방식에 따라

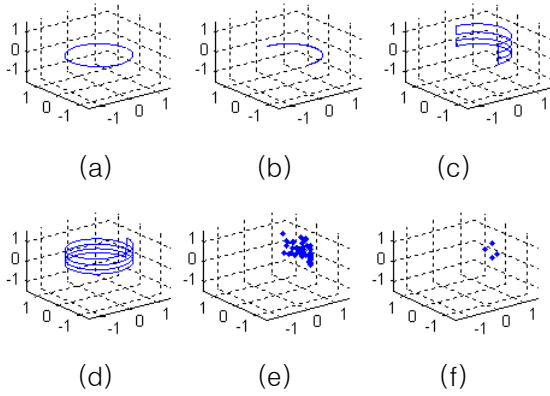


그림 5. 스캔패턴에 따른 boresight의 경로
(a)Circular scan (b)Sector scan (c)Raster scan (d)Helical scan (e)Electronic lobe switching (f)Lobe switching

전자전지원 시스템에 레이더 신호의 TOA가 결정되면 레이더의 boresight의 위치 B 와 전자전지원 시스템의 위치 A 를 갱신하는 식은 다음과 같다.

$$t_n = t_{n-1} + \Delta t (= PRI) \quad (2)$$

$$B(\theta_B(t_n), \phi_B(t_n)) \leftarrow B(\theta_B(t_{n-1}), \phi_B(t_{n-1})) \quad (3)$$

$$A(\theta_E(t_n), \phi_E(t_n)) \leftarrow A(\theta_E(t_{n-1}), \phi_E(t_{n-1})) \quad (4)$$

여기서 t_n 은 펄스도착시간, θ_B , ϕ_B , θ_E , 그리고 ϕ_E 는 각각 boresight의 위치와 전자전지원 시스템의 위치를 나타낸다. 생성된 펄스도착시간 t_n 에서 레이더 boresight의 위치는 레이더의 스캔패턴 특성과 운용변수에 의해 결정되며, 그림 5는 다양한 레이더 스캔패턴 종류에 따른 boresight의 이동 경로를 보이고 있다.

수신신호의 세기는 펄스도착시간 t_n 에서 레이더의 boresight를 기준으로 한 전자전지원 시스템의 상대위치와 해당 좌표에서의 레이더 방사패턴 값에 의해 결정된다. 수식 (3)과 (4)를 이용하여 전자전지원 시스템의 상대위치 C 를 계산하면 다음과 같다.

$$C(\theta_R(t_n), \phi_R(t_n)) = A(\theta_E(t_n), \phi_E(t_n)) - B(\theta_B(t_n), \phi_B(t_n)) \quad (4)$$

$$P(t_n) = E\{C(\theta_R(t_n), \phi_R(t_n))\} \quad (5)$$

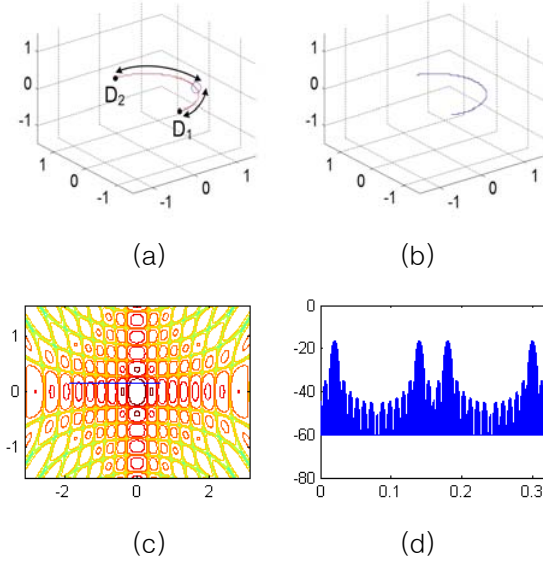


그림 6. 레이더 신호 생성 과정 (sector scan)

여기서 $P(t_n)$ 은 수신되는 레이더 신호의 강도를 의미하며, C 위치에 해당하는 레이더 방사패턴의 값을 계산하거나 매핑(mapping)함으로써 결정된다. 그림 6은 sector 스캔에서 제안된 레이더 신호 생성알고리즘을 통해 신호를 생성하는 과정을 보여주고 있다. 그림 6(a)는 레이더 boresight의 이동경로와 전자전지원 시스템의 위치이며, 그림 6(b)는 전자전지원 시스템의 상대위치의 변화를 연속적으로 표현한 것이다. 그림 6(c)는 레이더의 방사패턴 상에서 전자전지원 시스템의 상대위치의 변화를 보여주고 있으며, 그림 6(d)에서 보듯이 최종 생성된 레이더 신호는 매 펄스도착시간에 전자전지원 시스템의 상대위치에 해당하는 레이더 방사 패턴 값을 크기로 갖는 펄스열의 형태를 보인다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안된 레이더 신호 생성방법을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 분석하였으며, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1과 2에 제시되어 있다. 그림 7(a)와 (b)는 각각 circular 스캔과 sector 스캔을 사용하여 신호를 생성했을 때 전자전지원 시스템에 수신되는 신호를 나타내고 있다. Circular 스캔은 주

표 1. 시뮬레이션 파라미터 1

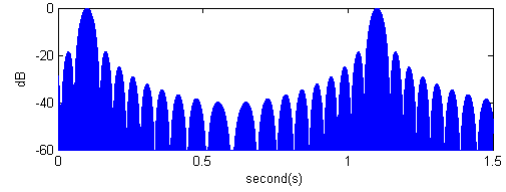
스캔 패턴 종류	스캔 주기 (s)	스캔범위		방사 패턴
		방위각	고도각	
Circular	1	-	-	RP _B
Sector	1	$-\pi/2, \pi/2$	-	RP _B
4단 Raster	1	$-\pi/2, \pi/2$	$0, \pi/4$	RP _B
4단 Helical	1	-	$0, \pi/4$	RP _A
Palmer_4_Raster	1	$-\pi/2, \pi/2$	$0, \pi/4$	RP _B
Palmer_4_Helical	1	-	$0, \pi/4$	RP _A

표 2. 시뮬레이션 파라미터 2

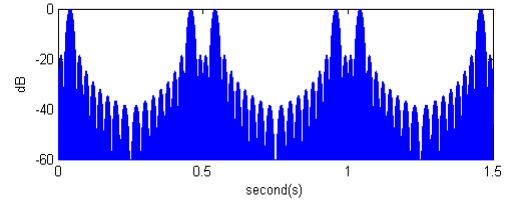
스캔 패턴 종류	스캔 주기 (s)	빔폭	스캔중심 이동	방사 패턴
conical	0.02	0.01	$[\pi/10, 0] \rightarrow [0, 0]$	RP _B

기마다 전자전지원 시스템과 boresight가 동일 선상에 위치하게 되므로 주엽이 동일한 간격으로 분포한다. Sector 스캔은 그림 6(a)와 같이 boresight가 스캔영역의 끝점 D₁에서 전자전지원 시스템과 일직선상이 되는 위치까지의 거리가 다른 끝점 D₂에서의 거리보다 근접하므로 생성된 레이더 신호에서 더 좁은 피크 간격을 가진다. 그림 8(a)는 4단 raster 스캔을, 그림 8(b)는 4단 helical 스캔을 도시하고 있다. 그림 8(a)의 raster 스캔의 경우 고도각이 다른 단방향 sector 스캔으로 간주할 수 있으므로, 시간에 따라 피크의 크기가 감소하나 피크가 나타나는 패턴은 sector 스캔과 유사한 것을 볼 수 있다. 그림 8(b)의 4단 helical 스캔의 경우 고도각이 연속적으로 변화하는 circular 스캔을 가지므로 boresight와 전자전지원 시스템간의 고도각이 커지면서 파워가 감소하나 피크가 주기적으로 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 그림 8(c)는 conical 스캔을 도시한 것으로 전자전지원 시스템의 근방에서 원운동을 함에 따라 스캔 패턴이 정현파의 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다.

그림 9는 palmer 스캔패턴 계열의 레이더 신호로 탐색 레이더인 raster 스캔패턴에 추적 레이더인 conical 스캔패턴이 더해진 형태로 구성된다. 그림 9(a)에서 보듯이 palmer-raster 스

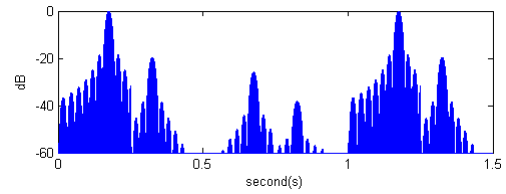


(a)

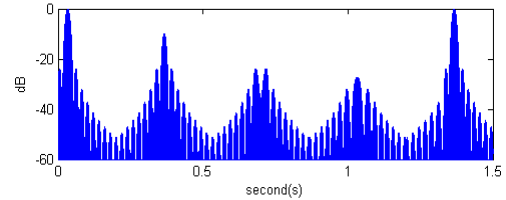


(b)

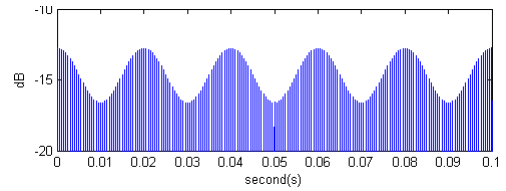
그림 7. (a) circular 스캔, (b) sector 스캔.



(a)



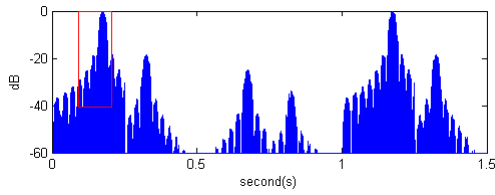
(b)



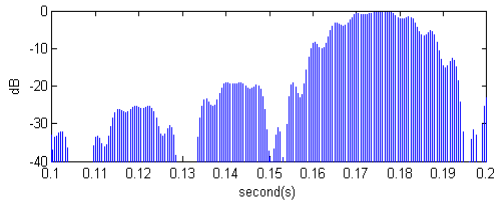
(c)

그림 8. (a) raster 스캔, (b) helical 스캔, (c) conical 스캔.

캔의 전체 envelope은 탐색레이더인 raster 스캔과 유사하나, 그림 9(b)와 같이 확대하면 conical 스캔패턴을 가짐을 관찰할 수 있다. 그림 10은 palmer-helical 스캔을 나타내고 있으며 palmer-raster 스캔과 유사한 특성을 보임을 볼 수 있다.

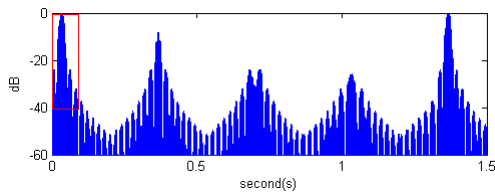


(a)

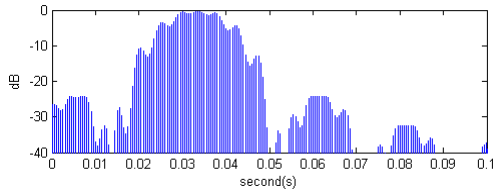


(b)

그림 9. (a) 4단 palmer-raster scan, (b) 확대된 4단 palmer-raster scan



(a)



(b)

그림 10. (a) 4단 palmer-helical scan, (b) 확대된 4단 palmer-helical scan

V. 결론

본 논문에서는 전자전 지원시스템에서 발생될 수 있는 식별 모호성을 향상시키기 위한 스캔패턴 인식 알고리즘 개발을 위해 다양한 스캔패턴을 모델링하고 이를 모의 생성할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 레이더 신호를 모델링하기 위해 실제 전자전 시스템에서 수신 신호의 세기가 결정되는 과정을 고려하여 모의 신호의 신뢰성을 높였으며 다양한 스캔패턴을 가지는 레이더 신호의 생성을 가능하게 함으로

써 그 활용도를 높였다. 그러나 전자전지원 시스템이 이동하는 환경에 대한 고찰과 거리에 따른 파워손실을 배제하였으므로, 추후연구에서는 이러한 요소들을 반영하여 제안된 레이더 신호 모델링 방법의 정확성을 높이기 위한 연구가 필요할 것으로 보인다.

참고 문헌

- [1] 류영진, 하현주, 김환우, "원형스캔 레이더 식별을 위한 스캔변수 추정기법," 전자공학회 논문지, 제 6호, pp605-6122006년 11월.
- [2] C. L. Davies and P. Holland, "Automatic processing for ESM" *IEEE Proc. F, Commun. Radar & Signal Process*, pp. 164-171, vol 129, 1982.
- [3] J. Roe, S. Cussons, and A. Feltham, "Knowledge-based signals processing for radar ESM systems" *IEEE Proc. F, Commun. Radar & Signal Process*, pp. 293-301, vol 129, 1990.
- [4] David L. Adamy, "Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation" Artech House, 2003.
- [5] Richard G. Wiley, "Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals" Artech House, 1993.
- [6] Skolnik, Merrill I, "Radar Handbook" McGraw-Hill, 2007.
- [7] Skolnik, Merrill I, "Introduction to radar system" McGraw-Hill, 2007.