한국군사과학기술학회지 제14권 제5호, pp. 904~912, 2011년 10월

학술논문 센서 · 신호처리 부문

바이스태틱 레이더의 탐지 커버리지 분석 및 표적 위치 산출을 위한 M&S Tool

M&S Tool for Analysis of Detection Coverage and Target Localization in Bistatic Radar Systems

박 중 희* 이 원 우* 유 진 철*
Junghee Park Wonwoo Lee Jincheol Yoo
양 훈 기** 정 용 식** 배 경 빈***
Hoongee Yang Youngseek Chung Kyungbin Bae

Abstract

In this paper, we have proposed a M&S tool for analyzing detection coverage and target localization in bistatic radar system. The detection coverage determined by radar parameters is meaningful when it satisfies the clear line-of-sight condition. We improved the method to find the minimum altitudes of transmitter and receiver for meeting the condition by considering three-dimensional coverage. Its computational burden is not problematic because the calculation is for maximizing the performance of the radar and does not demand a real-time operation. In addition, target localization on three-dimensional earth model based on the information of the height, longitude, and latitude is proposed instead of the previous unpractical calculation on two-dimensional bistatic plane. Its precalculated result can reduce its computation burden and it is suitable for real-time estimation of target location.

Keywords : Bistatic Radar(바이스태틱 레이더), Detection Coverage(탐지 커버리지), Line-of-sight Constrained Coverage (가시선 확보 커버리지), Target Location(표적 위치)

1. 서 론

일반적인 모노스태틱 레이더(Monostatic Radar)는 송신기와 수신기가 같은 곳에 위치하여 송신된 전자기파가 다시 같은 지점으로 되돌아오는 것을 수신한다. 따라서 탐지 커버지리 영역을 산출하거나 표적의 위치를 산출하는 것에 대해 비교적 많은 연구가 진행되어 왔다[1~4]. 하지만 바이스태틱 레이더(Bistatic Radar)는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 송신기와 수신기의 위치가 다른 레이더로서 송신된 전자기파가 표적에 의해 반사되었을 때 송신된 곳과 다른 지점에서 그 반사파를

† 2011년 6월 13일 접수~2011년 8월 26일 게재승인
* 육군사관학교(Korea Military Academy)
** 광운대학교(Kwangwoon University)
*** 국방과학연구소(ADD)
책임저자 : 박중희(grstorm7@kma.ac.kr)

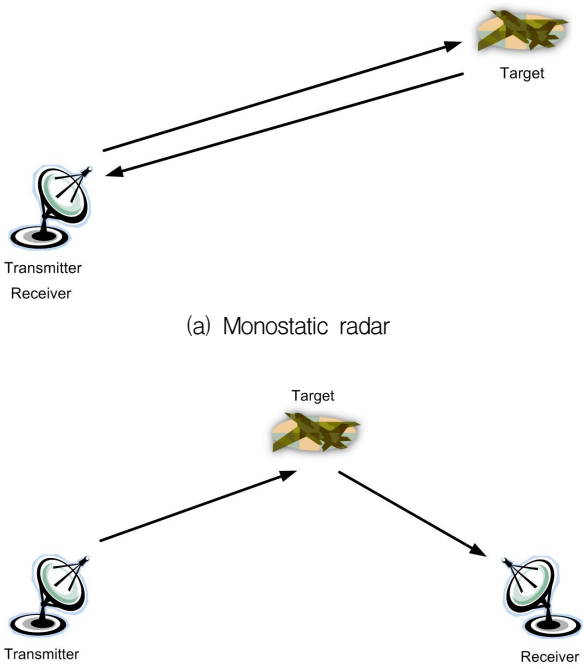


Fig. 1. Comparison of the transmitter and receiver position between monostatic and bistatic radar systems

측정하는 레이더이다. 일반적으로 스텔스(Stealth) 항공기는 전자기파를 송신된 지점이 아닌 다른 방향으로 반사시킴으로서 레이더의 탐지를 벗어난다. 바이스태틱 레이더는 이러한 스텔스 항공기를 탐지하는 데 유리하다는 점 때문에 주목을 받아왔다. 하지만 모노스태틱 레이더와 다르게 송신기와 수신기가 구분되어 다른 위치에 존재하기 때문에 탐지 커버리지를 분석하거나 표적의 위치를 탐지하는 기법이 상이하고 복잡하다.

본 논문에서는 바이스태틱 레이더의 탐지 가능한 영역을 분석하고 레이더에 의해 얻어진 정보를 통해 표적의 위치를 산출하는 M&S 시스템을 개발한 결과를 보여준다. 레이더의 성능에 따라 결정되는 탐지 영역에 대해 가시 조건을 만족시키도록 하는 레이더의 최소 고도를 찾아내는데 기존의 결과를 개선한 방법을 제안하고 그 결과를 비교한다. 또한 기존의 2차원 상에서의 표적 위치 산출의 비현실적인 측면을 개선하고 3차원 상에서의 표적의 위치를 찾아내는 방식을 제안하고 그 결과 식을 유도한다.

2. 바이스태틱 레이더의 탐지 커버리지 분석

가. 수신 파워 조건의 의한 커버리지 분석

레이더 방정식(Radar Range Equation)은 레이더의 송신 출력 등의 레이더 특성 정보가 주어져 있을 때 탐지 거리에 따라 수신되는 파워(Power)에 관한 방정식이다. 모노스태틱 레이더 방정식은 다음과 같이 나타난다[5].

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times A_e \tag{1}$$

여기서 P_r은 수신단에서 수신되는 파워, P_t는 송신 출력, G_t는 안테나 이득(Gain), σ는 표적의 레이더 단면적(RCS : Radar Cross Section), A_e는 안테나의 유효 면적(Effective Area), R은 레이더와 표적 사이의 거리를 나타낸다. 이 때 수신단에서 인지할 수 있는 최소의 파워를 $S_{\min}$이라고 했을 때 레이더가 탐지할 수 있는 최대의 거리 $R_{\max}$는 다음 식과 같이 나타난다.

$$R_{\max} = \left(\frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min}} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{2}$$

레이더 시스템의 파라미터 값들이 정해지면 위 식에 의해 레이더가 탐지 가능한 영역의 반지름이 결정되고 그 커버리지의 형태는 구의 형태를 가지게 된다.

이에 반해 바이스태틱 레이더의 레이더 방정식은 다음과 같다[5,6].

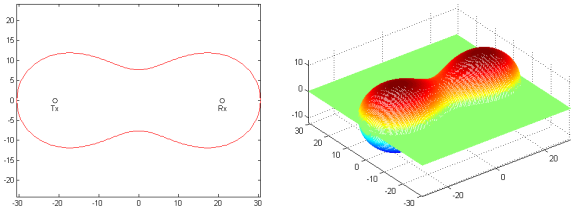
$$(R_t R_r)_{\max} = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_b F_t^2 F_r^2}{(4\pi)^3 k T_s B_n (S/N)_{\min} L_t L_r} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

이 때 R_t은 송신기로부터 표적사이의 거리, R_r은 표적과 수신기사이의 거리, P_t는 송신출력, G_t는 송신 안테나의 이득, G_r는 수신 안테나의 이득, λ는 사용되는 전자파의 파장, σ_b는 바이스태틱 레이더 단면적(RCS), F_t는 송신기부터 표적까지의 pattern propagation factor, F_r는 표적부터 수신기까지의 pattern propagation factor, k는 볼츠만상수, T_s와 B_n는 수신단의 noise

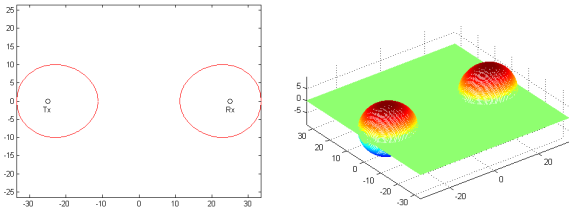
temperature와 noise bandwidth, $(S/N)_{\min}$는 탐지에 필요한 최소의 signal-to-noise power ratio, L_t와 L_r는 각각 송신단과 수신단의 loss를 의미한다. 모노스태틱 레이더 방정식과는 다르게 바이스태틱 레이더 방정식에서는 표적과 레이더 사이의 거리가 송신기로부터 표적까지의 거리 R_t와 다시 표적에서 수신기까지의 거리 R_r로 구분된다. 위의 레이더 방정식에서 우변의 항은 레이더 시스템에 따라 일정한 값으로 결정될 수 있고 이를 κ라고 표현하면 바이스태틱 레이더 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_t R_r \le \kappa \tag{4}$$

이 레이더방정식에 의해 결정되는 레이더의 탐지 가능 커버리지의 형태는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 송신기와 수신기 주변에 집중된 형태로서 모노스태틱 레이더와는 많이 다른 모습을 보인다. 레이더의 성능에 따라 κ값이 달라지면 그 탐지 커버리지의 형태도 달라지게 된다. 여기서 L은 송신기와 수신기 사이의 거리를 나타내며 베이스라인(Baseline)이라고 불린다.



(a) The shape of detection coverage for the case of $2\sqrt{\kappa} > L(\kappa = 500\text{km}^2,\ L = 42\text{km})$

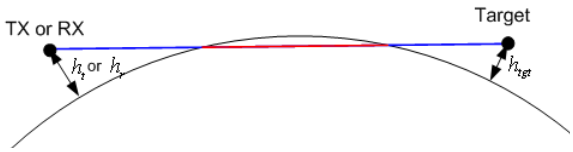


(b) The shape of detection coverage for the case of $2\sqrt{\kappa} < L(\kappa = 500\text{km}^2,\ L = 50\text{km})$

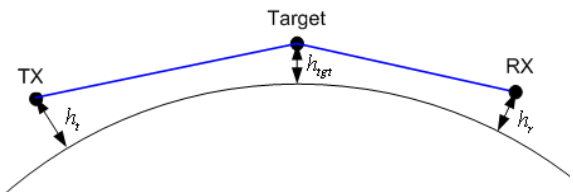
Fig. 2. Detection coverage determined by bistatic radar equation

나. 가시성 확보 조건

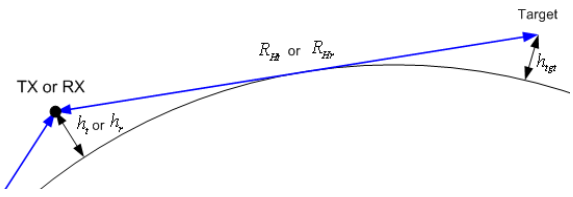
레이더에 의해 표적이 탐지되기 위해서는 표적에 의해 반사되어 수신단에 돌아온 전자파의 세기가 일정 값 이상이어야 한다는 조건도 만족하여야 하지만 그 외에도 송신기로부터 표적까지, 표적에서부터 수신기까지의 가시선(Line-of-sight)이 확보되는 조건도 만족해야 한다. Fig. 3(a)는 송신기(혹은 수신기)와 표적 사이의 가시선이 확보되지 않은 예이다. 이 경우는 송신기에서 출력된 전자파가 표적에 전달되지 않거나 표적에서 반사된 전자파가 수신기로 전달되지 않기 때문에 표적을 탐지할 수 없다. Fig. 3(b)의 경우는 송신기에서부터 표적까지, 그리고 표적에서 수신기까지 가시선이 확보되는 경우의 바이스태틱 레이더이다. 이 경우는 전자파가 방해 받지 않고 원활히 전달되기 때문에 표적 탐지가 가능하다.



(a) The case that line-of-sight between a transmitter(or receiver) and target is not clear



(b) The case that line-of-sight from the transmitter to the target and from the target to the receiver is clear



(c) The maximum distance between the transmitter(or receiver) and target which have a clear line-of-sight

Fig. 3. Condition of clear line-of-sight for the transmitter, receiver, and target

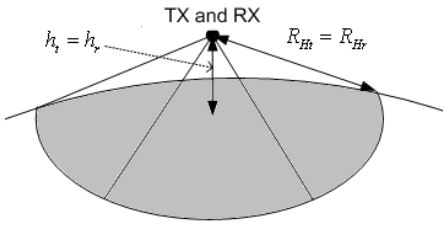
Fig. 3(c)는 가시선 확보가 보장되는 가장 먼 거리의 송신기(혹은 수신기)와 표적을 보여준다. 이 때 이 최대 거리를 R_{Ht}(혹은 R_{Hr})이라고 한다면 그 값은 4/3 지구 모델에 의해 보통 다음 식과 같이 근사화한다[7].

$$R_{Ht} = 130(\sqrt{h_{tgt}} + \sqrt{h_t}) \quad (5)$$

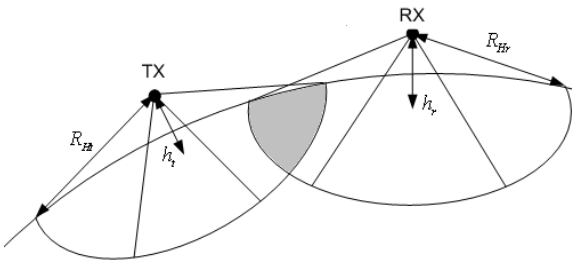
$$R_{Hr} = 130(\sqrt{h_{tgt}} + \sqrt{h_r}) \quad (6)$$

이 때 h_t, h_r, h_{tgt}는 각각 송신기, 수신기, 그리고 표적의 고도를 의미하고 각 단위는 km로 표기되었을 때 위 식의 결과 R_{Ht} 또는 R_{Hr}도 km단위로 표기된다.

이렇게 근사화 된 최대가시영역 반지름 값을 이용해 가시 커버리지를 확인해보면 Fig. 4와 같은 결과를 확인할 수있다. 이 경우는 표적의 고도가 0인 경우, 즉, 표적이 지구 표면에 존재할 때를 나타낸다. Fig. 4(a)의 경우는 모노스태틱 레이더의 가시 커버리지를 나타낸 것이고 Fig. 4(b)는 바이스태틱 레이더의 가시 커버리지를 나타낸 것이다. 두 그림에서 알 수 있듯이



(a) Monostatic radar's coverage area guaranteeing clear line-of-sight



(b) Bistatic radar's coverage area guaranteeing clear line-of-sight with both of the transmitter and receiver

Fig. 4. Line-of-sight constrained coverage area(The case when the target is existed on the surface of the earth)

바이스태틱 레이더는 송신기에서 표적까지, 표적에서 수신기까지 가시선 확보의 조건을 두 번 만족해야 하기 때문에 그 커버리지 넓이가 상대적으로 작다.

다. 수신 파워 조건에 의한 커버리지의 가시 조건 확보

실제로 레이더가 표적을 탐지할 수 있는 커버리지를 산출하기 위해서는 표적에 반사되어 돌아오는 전자파의 세기 조건(레이더 방정식에 의해 결정되는 조건)과 가시선의 확보 조건 두 가지가 모두 만족되어야 한다. 이 때 송신기와 수신기의 고도를 높임으로써 가시조건이 만족되는 커버리지를 향상시킬 수 있기 때문에 레이더의 성능에 의해 결정되는 수신 파워 조건에 의한 커버리지를 모두 포함할 수 있는 가시 조건 커버리지를 만드는 것이 중요한 주제이다. 즉, 수신 파워 조건의 의한 커버리지 전 영역이 모두 가시조건이 확보되도록 하는 송신기 및 수신기의 고도를 찾아낼 필요가 있다.

기존의 연구들은 수신 파워에 의한 커버리지와 가시 조건에 의한 커버리지를 모두 2차원 평면으로 가정하고 전자가 후자에 포함되도록 하는 송신기 및 수신기의 고도 값을 수식 (5), (6)에서 찾아 계산하였다[7,8]. 2차원 평면에서 이 조건이 확보되는 식은 다음과 같고 그 결과 모습은 Fig. 5와 같다.

$$(h)_{\min} = \left[\max\left(\frac{(\kappa + \frac{L^2}{4})^{\frac{1}{2}} + \frac{L}{2}}{130} - \sqrt{h_{tgt}}, 0 \right) \right]^2 \quad (7)$$

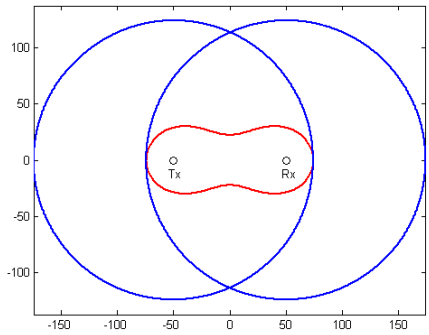


Fig. 5. Two-dimensional plane where coverage determined by received signal power condition is included by coverage determined by clear line-of-sight condition(κ = 3000km^2, L = 100km, h_{tgt} = 0km)[8]

하지만 실제로는 이와 다르게 커버리지는 3차원 영역이고 표적의 고도가 달라지면 가시 조건 커버리지 영역도 달라지게 된다. 표적의 고도 변화에 따른 가시 조건을 고려하여 수신 파워 조건에 의한 커버리지의 3차원 전 영역이 모두 가시 조건을 만족할 수 있도록 하는 송·수신기의 고도를 계산하였다. 또한 보다 정확도를 높이기 위해 가시 조건의 최대 반지름을 수식 (5), (6)과 같은 근사화 된 식이 아니라 구(Shpere) 모델에 의해 계산할 수 있는 다음의 식을 그대로 적용했다.

$$R_{Ht} = \sqrt{2R_{earth}h_{tgt} + h_{tgt}^2} + \sqrt{2R_{earth}h_t + h_t^2} \tag{8}$$

$$R_{Hr} = \sqrt{2R_{earth}h_{tgt} + h_{tgt}^2} + \sqrt{2R_{earth}h_r + h_r^2} \tag{9}$$

이 때 R_{earth}는 지구의 반지름을 의미하고 그 값은 6400km를 적용하였다.

이렇게 수신 파워 조건에 의한 3차원 커버리지 모두가 가시 조건을 만족하도록 하기 위해서는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 지표면과 만나는 수신 파워 조건에 의한 커버리지 경계가 가시조건을 만족해야 한다. Fig. 6(a)는 지표면과 만나는 커버리지 경계가 가시조건을 만족하지 않는 경우를 나타내고 Fig. 6(b)는 만족하는 경우를 나타낸다. 후자의 경우 이 경계가 가시조건을 만족하면 모든 커버지지가 경계 조건을 만족하는 것을 확인할 수 있다. 이를 고려하여 조건을 만족하는 최소의 송·수신기 고도를 찾아내는 최적화 문제는 다음과 같이 수식화 될 수 있다.

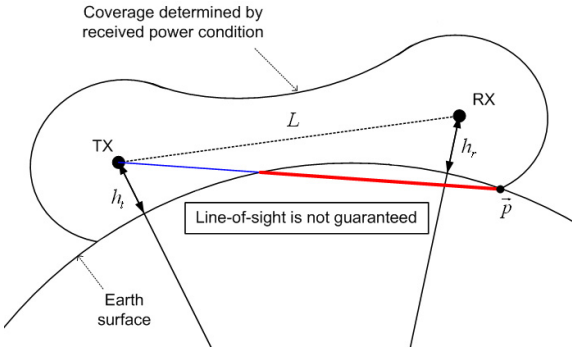
To minimize h_t and h_r

subject to $\| \vec{p} - \vec{p_t} \| \le \sqrt{2R_{earth}h_t + h_t^2}$ (10)

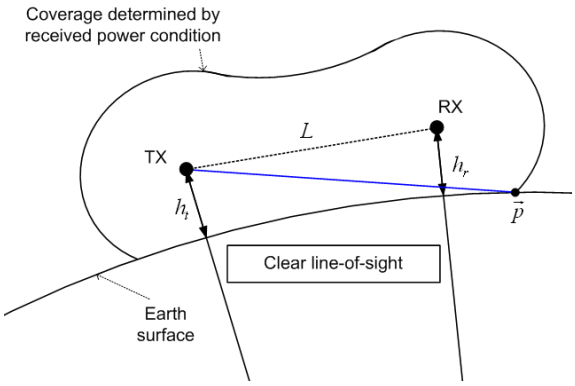
$$\| \vec{p} - \vec{p_r} \| \le \sqrt{2R_{earth}h_r + h_r^2} \tag{11}$$

for $\forall \vec{p}$ such that

1. $\| \vec{p} - \vec{p_t} \| \cdot \| \vec{p} - \vec{p_r} \| = \kappa$ (12)
2. $\| \vec{p} \| = R_{earth}$ (13)
3. $\| \vec{p_t} - \vec{p_r} \| = L$ (14)



(a) The point $\vec{p}$ does not have clear line-of-sight with the transmitter



(b) Everys point in the coverage determined by received power condition have clear line-of-sight with the transmitter

Fig. 6. The coverage determined by received power condition is meaningful when it has clear line-of-sight

4. $\| \vec{p_t} \| = R_{earth} + h_t$ (15)
5. $\| \vec{p_r} \| = R_{earth} + h_r$ (16)

수식 (12)과 (13)에 의해 점 $\vec{p}$ 를 지표면에서의 커버리지의 경계에서 지표면에 존재하는 점으로 제한하고 수식(10), (11)은 이 커버리지의 경계점이 가시 조건을 만족하도록 제한하는 조건이다. 또한 수식 (14), (15), (16)은 송신기와 수신기 간의 정해진 거리와 송·수신기의 고도에 대한 정의를 식으로 표현한 조건이다.

Table 1. The minimum altitudes of h_t and h_r which guarantee clear line-of-sight(which assumes that h_t and h_r are the same)

κ	L	가시조건 확보를 위한 최소의 h_t, h_r		근사화 오차
		근사화[7]된 산출 값	개선된 산출 값	
1000km	50km	253m	324m	-21.9%
1000km	100km	706m	912m	-22.6%
1000km	200km	2484m	3187m	-22.1%
2000km	50km	344m	453m	-24.1%
2000km	100km	812m	1053m	-22.9%
2000km	200km	2599m	3380m	-23.1%
3000km	50km	430m	558m	-22.9%
3000km	100km	913m	1204m	-24.2%
3000km	200km	2711m	3512m	-22.8%
5000km	100km	1105m	1449m	-23.7%
5000km	200km	2929m	3853m	-24.0%
5000km	300km	5903m	7600m	-22.3%

이렇게 구한 송·수신기의 고도값과 기존의 연구에서 근사화한 고도값을 비교한 결과를 Table 1에 나타내었다. 이 결과를 통해 기존의 연구에서 근사화 한 값의 오차가 약 23%내외임을 확인할 수 있다.

3. 바이스태틱 레이더의 표적 위치 산출

가. 바이스태틱 평면상에서의 표적 위치 산출

모노스태틱 레이더와는 달리 바이스태틱 레이더는 표적의 위치를 산출하는 방식이 기하학적으로 좀 더 복잡하다. 우선 송신기, 수신기 그리고 표적을 포함하는 평면인 바이스태틱 평면상에서 표적의 위치를 산출하는 기법은 기존에 충분히 연구되어 왔다[7]. Fig. 7에서 바이스태틱 평면의 정의와 관련 파라미터를 정의했다. 우선 송신기와 수신기 사이의 거리, 즉 베이스라인 L은 미리 알 수 있다. 또한 송신기에서 송신된 전자기파가 표적에 반사된 후 수신기에서 수신될 때까지의 시간을 통해 송신기와 표적사이의 거리 R_t

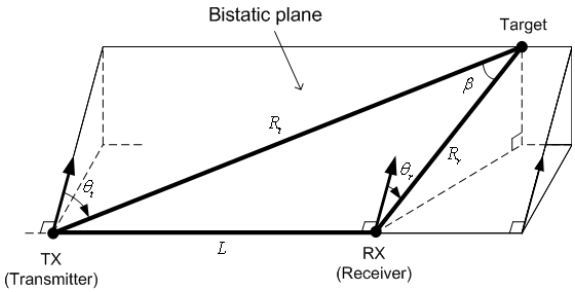


Fig. 7. Definition of the bistatic plane and other parameters

와 표적과 수신기 사이의 거리 R_r의 합(R_t+R_r)을 얻을 수 있다. 이와 함께 바이스태틱 평면상에서의 송신기 안테나의 지향 방향 θ_t 또는 수신기 안테나의 지향 방향 θ_r 둘 중 하나를 알고 있을 경우 표적의 위치를 단일 위치로 결정할 수 있다. 그 결과로서 R_t, R_r, β를 독립적으로 계산할 수 있게 된다.

나. 3차원 지구 모델에서의 표적 위치 산출

앞서 설명했듯이 바이스태틱 평면상에서의 표적 위치 산출은 간단하게 도출될 수 있다. 하지만 실제로 표적의 위치를 모르는 상태에서 바이스태틱 평면이 정의가 될 수 없기 때문에 이 방식으로는 현실적으로 표적의 위치를 산출하기 어렵다. 따라서 3차원 상에서의 표적 위치 산출을 위한 연산 방법을 제안한다. 그

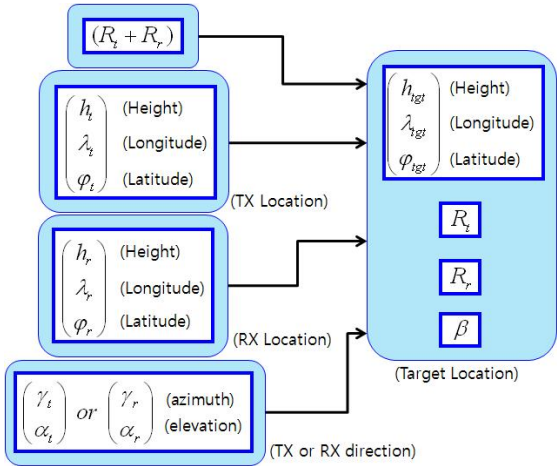


Fig. 8. Data flow diagram for target localization on the three-dimensional earth model in the bistatic radar system

데이터 흐름도는 Fig. 8에 나타내었다. 바이스태틱 평면 상에서 전자파의 이동거리 R_t+R_r를 쉽게 얻었던 것과 마찬가지로 3차원 공간에서도 R_t+R_r을 쉽게 얻을 수 있다. 또한 송신기 및 수신기사이의 거리 L 대신 좀 더 높은 단계의 정보인 송신기의 위치 및 수신기의 위치를 고도, 경도, 위도 값을 통해 얻을 수 있다. 또한 송신기 및 수신기의 안테나 지향 방향도 방위각과 고각을 통해 3차원 방향 정보로 얻을 수 있다. 이 정보들을 이용해 표적의 위치를 마찬가지로 고도, 경도, 위도로 산출할 수 있고 바이스태틱 평면에서의 표적 위치 산출과 마찬가지로 R_t, R_r, β을 독립적으로 구할 수 있다.

3차원 지구 모델 상에서 고도(Height) h, 경도(Longitude) λ, 위도(Latitude) φ를 통해 한 지점의 절대적 위치 $\vec{p}$를 Fig. 9와 같이 구 좌표계(Spherical Coordinate)를 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{p}=(R_{earth}+h)\cdot\overrightarrow{a_R} \tag{17}$$

또한 방위각(Azimuth) γ와 고각(Elevation) α를 통해 결정되는 안테나의 지향 방향 단위 벡터 $\vec{k}$는 다음과 같고 Fig. 9와 Fig. 10에서 그 방향을 표시한다.

$$\begin{aligned}\vec{k}=&[\cos(90^\circ-\alpha)]\cdot\overrightarrow{a_R}+[-\sin(90^\circ-\alpha)\cos\gamma]\cdot\overrightarrow{a_\theta}\\&+[-\sin(90^\circ-\alpha)\sin\gamma]\cdot\overrightarrow{a_\phi}\end{aligned} \tag{18}$$

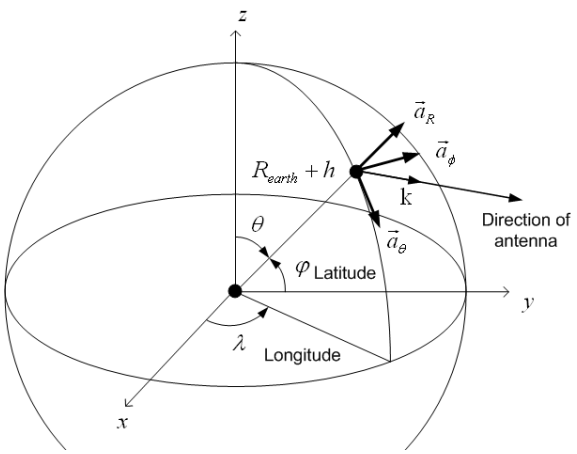


Fig. 9. Positions of the transmitter and receiver according to the altitude, longitude, and latitude on the three-dimensional earth model

따라서 송 · 수신기가 예상하는 표적의 위치는 다음의 위치 중 하나일 것이다.

$$\vec{p}+l\cdot\vec{k},\ l\geq 0 \tag{19}$$

이 때 $\vec{p}$와 $\vec{k}$를 각각 직교 좌표계(Cartesian Coordinate)상의 벡터값으로 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{p}=\begin{bmatrix}(R_{earth}+h)\sin(90^\circ-\varphi)\cos\lambda\\(R_{earth}+h)\sin(90^\circ-\varphi)\sin\lambda\\(R_{earth}+h)\cos(90^\circ-\varphi)\end{bmatrix} \tag{20}$$

$$\vec{k}=\begin{bmatrix}[k_R][\sin(90^\circ-\varphi)\cos\lambda]+[k_\theta][\cos(90^\circ-\varphi)\cos\lambda]\\-[k_\phi][\sin\lambda]\\[k_R][\sin(90^\circ-\varphi)\sin\lambda]+[k_\theta][\cos(90^\circ-\varphi)\sin\lambda]\\-[k_\phi][\cos\lambda]\\[k_R][\cos(90^\circ-\varphi)]-[k_\theta][\sin(90^\circ-\varphi)]\end{bmatrix} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}&k_R=\cos(90^\circ-\alpha)\\\text{where }\ &k_\theta=-\sin(90^\circ-\alpha)\cos\gamma\\&k_\phi=-\sin(90^\circ-\alpha)\sin\gamma\end{aligned} \tag{22}$$

이 때 송신기와 수신기의 위치 정보 $\overrightarrow{p_t}$, $\overrightarrow{p_r}$은 모두 구해지고 송 · 수신기 둘 중 하나의 안테나의 지향 방향 $\overrightarrow{k_t}$또는 $\overrightarrow{k_r}$이 결정되어 있다. 송신기의 지향 방향 $\overrightarrow{k_t}$가 입력으로 주어졌다고 가정했을 때 표적의 추정 위치 $\overrightarrow{p_{tgt}}$는 다음 방정식을 풀어 구할 수 있다.

$$\|\overrightarrow{p_{tgt}}-\overrightarrow{p_t}\|+\|\overrightarrow{p_{tgt}}-\overrightarrow{p_r}\|=d \tag{23}$$

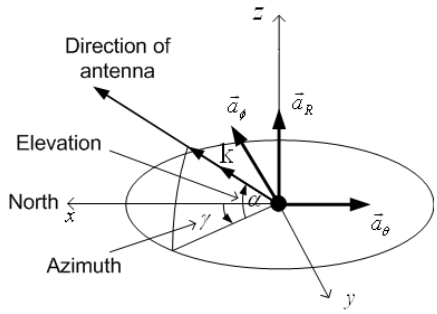


Fig. 10. Direction of the antenna determined by the azimuth and elevation

$$\frac{\overrightarrow{p_{tgt}}-\overrightarrow{p_t}}{\|\overrightarrow{p_{tgt}}-\overrightarrow{p_t}\|}=\overrightarrow{k_t} \tag{24}$$

이 때 $\|\overrightarrow{p_{tgt}}-\overrightarrow{p_t}\|=R_t$, $\|\overrightarrow{p_{tgt}}-\overrightarrow{p_r}\|=R_r$이라 하고 R_t에 대한 식을 세우면 다음과 같다.

$$\|\overrightarrow{p_{tgt}}-\overrightarrow{p_r}\|=\|\overrightarrow{p_t}+(R_t\bullet\overrightarrow{k_t})-\overrightarrow{p_r}\|=R_r=d-R_t \tag{25}$$

즉, $$\|\overrightarrow{p_t}+(R_t\bullet\overrightarrow{k_t})-\overrightarrow{p_r}\|^2=(d-R_t)^2 \tag{26}$$

이 식을 풀어 R_t와 R_r을 구하면 다음과 같다.

$$R_t=\frac{d^2-\|\overrightarrow{p_t}-\overrightarrow{p_r}\|^2}{2(\overrightarrow{k_t})^T\bullet(\overrightarrow{p_t}-\overrightarrow{p_r})+d},\quad R_r=d-R_t \tag{27}$$

표적의 추정 위치 $\overrightarrow{p_{tgt}}$는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\overrightarrow{p_{tgt}}&=[x_{tgt}\quad y_{tgt}\quad z_{tgt}]^T\\&=\overrightarrow{p_t}+\frac{d^2-\|\overrightarrow{p_t}-\overrightarrow{p_r}\|^2}{2\{(\overrightarrow{k_t})^T\bullet(\overrightarrow{p_t}-\overrightarrow{p_r})+d\}}\bullet\overrightarrow{k_t}\end{aligned} \tag{28}$$

여기서 구한 표적의 위치 정보를 고도 h_{tgt}, 경도 λ_{tgt}, 위도 φ_{tgt} 정보를 변환하기 위해 다음 식을 이용하면 된다.

$$h_{tgt}=\sqrt{x_{tgt}^2+y_{tgt}^2+z_{tgt}^2}-R_{earth} \tag{29}$$

$$\lambda_{tgt}\ \text{such that}\ \cos\lambda_{tgt}=(x_{tgt}/\sqrt{x_{tgt}^2+y_{tgt}^2}) \tag{30}$$

$$\sin\lambda_{tgt}=(y_{tgt}/\sqrt{x_{tgt}^2+y_{tgt}^2}) \tag{31}$$

$$\varphi_{tgt}=90^\circ-\tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{x_{tgt}^2+y_{tgt}^2}}{z}\right) \tag{32}$$

그리고 바이스태틱 각도 β는 다음과 같이 계산된다.

$$\beta=\cos^{-1}\left(\frac{\|\overrightarrow{p_{tgt}}-\overrightarrow{p_t}\|^2+\|\overrightarrow{p_{tgt}}-\overrightarrow{p_r}\|^2-\|\overrightarrow{p_t}-\overrightarrow{p_r}\|^2}{2\bullet\|\overrightarrow{p_{tgt}}-\overrightarrow{p_t}\|\bullet\|\overrightarrow{p_{tgt}}-\overrightarrow{p_r}\|}\right) \tag{33}$$

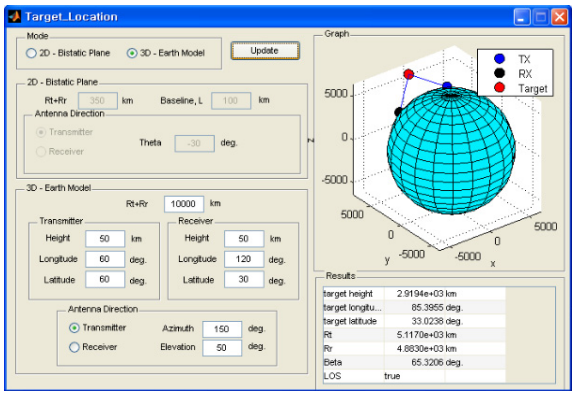


Fig. 11. M&S tool for target localization on the three-dimensional earth model

이와 같은 방식으로 계산된 표적 위치 산출 결과의 예가 Fig. 11에 나타난다. 이 M&S 시스템에서는 표적의 위치 정보 뿐 아니라 송신기에서 표적까지 그리고 표적에서 수신기까지의 가시선 확보 여부도 산출할 수 있도록 설계하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 레이더의 성능에 의해 결정되는 탐지 영역이 모두 가시조건이 확보되도록 하는 송·수신기의 최소 고도를 좀 더 정확도 높게 계산하였다. 이는 같은 레이더 성능으로도 탐지 가능 영역을 최대로 유지하기 위한 주제로서 연산 시간을 좀 더 필요로 하더라도 정확한 계산을 통해 결과 값을 산출해 내는 것이 필요하다. 또한 기존의 바이스태틱 평면상에서의 표적 위치 산출 방식의 비현실성에서 벗어나 바이스태틱 레이더에서 얻어지는 정보를 통해 3차원 상에서의 표적의 고도, 경도, 위도를 찾아내는 방법을 제안하고 그 식을 유도하였다. 이 때 실시간으로 표적의 위치를 찾아내기 위해서는 연산 시간을 최소로 줄이는 것이 필요하기 때문에 본 연구에서 유도한 식을 통해 표적의 위치를 한번에 계산해 내는 것이 유리하다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로

수행되었습니다.

References

[1] Robert A. Maddox, Jian Zhang, Jonathan J. Gourley, and Kenneth W. Howard, “Weather Radar Coverage over the Contiguous United States”, American Meteorological Society, Vol. 17, Issue 4, pp. 927～934, 2002.

[2] M. Gavish, A. J. Weiss, A. J, “Performance Analysis of Bearing-only Target Location Algorithms”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 28, Issue 3, 1992.

[3] C. A. Evers, Method and Apparatus for Improving the Surveillance Coverage and Target Identification in a Radar Based Surveillance System, US Patent 5,999,116, 1999.

[4] K.-T. Kim, D.-K. Seo. H.-T. Kim, “Radar Target Identification Using One-dimensional Scattering Centres”, IEEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, Vol. 148, Issue 5, 2001.

[5] Merrill I. Skolnik, Radar Handbook, Third Edition, Mc Graw Hill, pp. 1.11～22.5, 2008.

[6] Mikhail Cherniakov, Bistatic Radar : Emerging Technology, John Wiley & Sons Ltd. pp. 251～252, 2008.

[7] Nicholas J. Willis, Bistatic Radar, SciTech Publishing Inc, pp. 108～111, 2005.

[8] Junghee Park, Wonwoo Lee, Jincheol Yoo, Hoon-gee Yang, Young-seek Chung, Kyung-bin Bae, “M&S Tool for Analysis of Line-of-sight Assurance in Bistatic Radar”, The Proceedings of Korea Information and Communications Society Autumn Conference, p. 170, 2010.