

정지위성 방위각 정보를 활용한 전자 컴퍼스 편차 자동보정기법 연구

† 이재원 · 이건호*

*,† 국방기술품질원

A Study on Automatic Correction Method of Electronic Compass Deviation Using the Geostationary Satellite Azimuth Information

† Jae-Won Lee · Geon-Ho Lee*

*,† Defense Agency for Technology and Quality, Jin-Ju 52851, Korea

요 약 : 이동형해상감시레이더는 해안을 따라 이동하며, 해역을 감시하는 기능을 수행한다. 초기 레이더의 방향은 차량의 선수방향으로 정렬되어 있기 때문에 전개지 이동 후 신속하게 표적의 방위각을 획득하기 위해서는 변경된 차량의 선수방향을 아는 것이 중요하다. 차량의 선수방위각은 자이로 컴퍼스, GPS 컴퍼스 혹은 전자 컴퍼스로 획득할 수 있다. 그 중에서 전자 컴퍼스는 가격이 저렴할 뿐만 아니라, 부피가 작고, 안정화 시간이 짧아서 빠른 기동성을 요구하는 이동형해상감시레이더에 적합하다. 하지만, 지자계 센서를 사용하다보니 주변 자장의 영향으로 오차가 발생될 수 있으며, 발생된 오차는 초기 위성의 자동추적을 어렵게 하고, 레이더의 탐지정확도를 떨어뜨린다. 따라서 본 논문에서는 이동형해상감시레이더 및 정지 위성간의 두 위치좌표로부터 측지학적 역 문제 해석을 통해 기준 방위각을 산출하고 이를 위성 안테나가 실제 지향한 방위각과 비교 산출하여 얻어진 보정값을 레이더에 반영하는 자동보정절차를 제안하고 제안된 방법을 실제 운용 중인 이동형해상감시레이더에 적용함으로써 운용가능성 및 편리성을 검증하였다.

핵심용어 : 이동형해상감시레이더, 선수방위각, 전자 컴퍼스, 지자계 센서, 측지학적 역 문제, 탐지정확도

Abstract : The Moving Search Radar System (MSRS) monitors sea areas by moving along the coast. Since the radar is initially aligned to the front of the vehicle, it is important to know the changes in the heading azimuth of the vehicle to quickly acquire the target azimuth from the radar after the MSRS has moved. The heading azimuth can be obtained using the gyro compass, the GPS compass or the electronic compass. The electronic compass is suitable for MSRS requiring fast maneuverability due to its small volume, short stabilization time and low price. However, using a geomagnetic sensor may result in an error due to the surrounding magnetic field. Errors can make early automatic tracking of the satellites difficult and can reduce the radar detection accuracy. Therefore, this paper proposes a method to automatically compensate for the error reflecting the correction value on the radar obtained by comparing the reference azimuth calculated by solving the geodesic inverse problem using two coordinates between the radar and the geostationary satellite with the actually-directed azimuth angle of the satellite antenna. The feasibility and convenience of the proposed method were verified by applying it to the MSRS in the field.

Key words : Moving Search Radar System, Heading Azimuth, Electronic Compass, Geomagnetic Sensor, Geodesic Inverse Problem, Detection Accuracy

1. 서 론

해상감시레이더는 선박의 위치, 속도, 침로 등 선박의 항해 정보를 획득하는 장비로써 안전한 해상 교통 관리를 위해 해상교통관제시스템에 활용되거나(Kim, 2013), 군에서는 유도무기실사격 시험 전 해상소개 상황을 판단하기 위해 적용되기도 한다(Hwang, 2012). 또한 해안감시기능으로 전방해역에 침투하는 적의 선박이나 함정 등을 실시간으로 탐지하는 임무를 수행한다. 해상감시레이더는 대공 탐색 및 추적레이더와 달리 2차원 레이더로써 표적의 고각을 제외한 거리와 방위각만을

측정한다(Byron, 1996). 표적의 정확한 방위각 정보를 획득하기 위해서는 안테나가 초기 위치한 차량의 선수방위각 정보를 알고 있어야 한다. 고정형 해상감시레이더의 경우 설치 시 초기 설정된 선수방위각을 유지하나, 본 논문의 이동형해상감시레이더는 일반적인 고정형의 해상감시레이더와 달리 차량위에 설치하여 전개지를 이동하며 운용이 가능해야 함으로, 전개지가 바뀔 때 마다, 차량의 선수 방향이 신속하게 반영되는 것이 필요하다. 정밀한 선수방위각을 얻기 위해서 고성능의 자이로스코프를 적용한 자동항법장치를 사용할 수 있지만, 고가이며, 장시간의 안정화 시간이 필요하고, 큰 부피로 인하여

† Corresponding author : 일반회원, 2341jw@dtaq.re.kr 02)961-1549

* 일반회원, ghlee@dtaq.re.kr 02)961-1595

설치공간이 확보 되어야 하는 제약이 있다(Hong, 2008). 따라서 단지 절대 방위각 획득만이 목적이려면 가격이 저렴하고, 소형이며, 안정화 시간이 짧은 전자 컴퍼스를 활용할 수 있다. 하지만, 전자 컴퍼스는 지구 자기장을 이용하는 지자계 센서임으로 외부 자기 환경의 영향으로 오차가 발생할 수 있으며, 발생한 오차는 방위각 정확도를 떨어뜨리는 요인이 될 수 있다(Kim, 2006; Zhang, 2010). 따라서 타 시스템으로부터 획득된 주변표적의 위치정보와 레이더 측정값을 비교하여 오차를 보정하는 기법이 주로 연구되어 왔다(Beasda, 2002). 그러나 이동형의 레이더인 경우 전개지 이동 시 주변지역의 정보를 다시 수집해야하는 불편함이 존재한다.

본 논문에서는 먼저 셀터 내 주변 전자장비의 운용에 따른 전자 컴퍼스의 자장 영향성을 확인하고, 설치위치를 선정 후, 이동형해상감시레이더와 정지위성의 경위도 정보를 활용하여 측지학적 역 문제 해석을 통해 기준방위각을 산출하고, 위성 안테나가 실제 지향한 방위각과 비교하여 보정값을 산출하여 자동적으로 레이더에 반영하는 자동보정절차를 제안한다. 이를 실제 운용중인 이동형해상감시레이더에 적용하여 개선효과 및 운용 편리성을 확인하였다.

2. 전자 컴퍼스 적용

2.1 전자 컴퍼스 역할

이동형해상감시레이더는 차량에 탑재하여 전개지를 이동하면서, 해상표적의 거리 및 방위각을 탐지하고 획득된 정보를 위성을 통해 타무기체계와 공유하는 시스템이다. 위성 및 레이더의 안테나는 구동 전 항상 차량의 선수방향으로 정렬되어 있기 때문에, 현재의 차량의 선수방향을 알아야 안테나가 위치한 방위각 및 그 위치로부터 탐지된 표적의 절대 방위각을 알 수 있다. 하지만, 차량의 선수방향은 고정되어 있지 않고, 이동 후 전개 시 주정차방향에 따라 변경됨으로 수시로 차량의 선수방위각을 획득하는 것이 필요하다. 이를 위해 전자 컴퍼스가 차량의 선수방위각을 획득하는 역할을 수행한다. 획득된 방위각은 진북을 기준으로한 절대방위각임으로 타 무기체계와 탐지된 목표의 정보를 공유할 수 있으며, 또한 현재 차량의 위치에서 위성을 자동추적하기 위한 기준으로도 활용된다.

2.2 전자 컴퍼스 오차발생 영향

지자계 센서를 사용하는 전자 컴퍼스는 자차나 편차에 의해 오차가 발생한다(Hong, 2008). 지구 자기장이 가리키는 북쪽, 즉 자북과 지구의 자전축인 진북간의 위치 차이로 편차가 발생하게 되며, 또한, 자기 컴퍼스 내의 자성체의 영향으로 컴퍼스의 북쪽과 실제 자북간에도 자차가 발생하기도 한다. 이는 시간의 경과 및 지역의 이동에 따라서도 달라진다. 또한, 지구자기장 외에 주변 자성체에 의한 외부자장의 변화로 인해

발생되는 Hard iron효과와 Soft iron효과로 오차가 발생하기도 한다(Markovic, 2010).

전자 컴퍼스에서 발생한 오차는 이동형해상감시레이더 운용 시 초기 위성의 자동추적 및 표적의 탐지정확도에 영향을 미친다. 위성장비는 전원인가 후 위성추적 시, 이전에 추적된 방위각 정보를 기억하였다가 그 위치에서 위성추적을 시작하게 된다. 하지만, 전개지가 바뀌어서 차량의 선수방향이 바뀌면, 위성 추적 시작점이 달라짐으로, 전자 컴퍼스로부터 최신화된 차량의 선수방위각 정보를 받아서, 이전의 차량 선수방위각과의 차이를 감안한 위치에서 정지위성을 자동 추적함으로써 추적시간을 줄이게 된다. 만약, Fig. 1과 같이 전자 컴퍼스가 β 각도만큼 오차가 발생하면, 위성안테나는 β 각도만큼 틀어진 방위각에서 정지위성을 지향하게 되므로 신속하게 위성을 자동 추적하는 것이 어렵게 된다. 또한, 레이더에서 탐지된 표적이 데이터처리 및 전시기에 전시 시 전자 컴퍼스에 발생한 오차가 탐지 표적의 방위각에 반영됨으로 탐지정확도를 떨어뜨리게 된다. 따라서 전자 컴퍼스의 오차를 최소화하는 것이 중요하다.

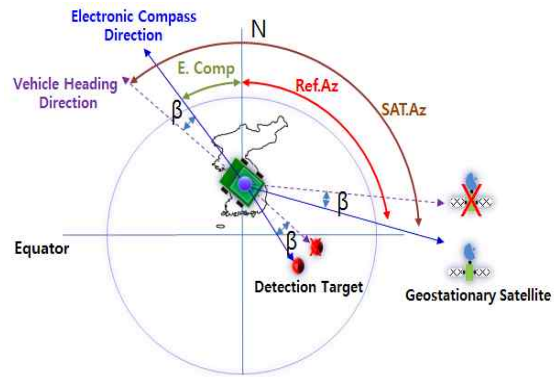


Fig. 1 The influence of the electronic compass error on radar operation

2.3 주변장비 작동의 영향성 확인

셀터 내 주변전자장비의 운용 시 외부 자기장의 변화로 자이로 컴퍼스의 방위각 정확도가 받는 영향성을 확인하기 위하여, Table 1과 같이 장비운용 시 셀터 내 주변자장 변화에 가장 영향을 미칠 것으로 판단되는 레이더 전원부, 안테나 구동부 및 레이더 송수신부가 위치한 셀터 앞쪽에 전자 컴퍼스를 설치한 경우와 전시기 등 셀터 내 타 장비와의 설치간섭이 적 으면서 레이더 구성장비와 이격 거리가 가장 먼 천장 중앙에 설치하였을 경우에 대해 장비 동작에 따른 방위각 오차발생 범위를 확인하였다.

Table 1 The error of the electric compass from other device operation

Operation	Setup Position	
	at front wall	at center ceiling
Electric compass On	337.1°	331.4°
Radar Power On	333.1°	331.4°
Radar Antenna Up/Down/Rotation	326.5°	332.4°
Radar Radiation	328.9°	332.4°
Max Error	10.6°	1°

전자 컴퍼스가 레이더 구성장비가 모여 있는 셀터 앞쪽에 설치되어 있을 경우, 레이더 구동 시 주변 자기영향으로 전자 컴퍼스의 오차가 최대 10.6°까지 발생됨을 확인할 수 있었다. 반면, 셀터 내 전자장비로부터 가장 떨어진 천장 중앙에 설치되었을 경우에는 발생편차가 1°로 가장 낮게 발생됨을 알 수 있다. 따라서 전자컴퍼스는 설치 위치에 따라 주변 전자장비의 구동에 영향을 받음을 알 수 있다. 만약 셀터 내 주변장비에서 발생하는 자기 영향성을 고려하지 않고, 전자 컴퍼스가 설치된다면, 그로 인해 발생된 오차가 시스템을 오작동 시킬 수 있으므로 설치 전 주변장비의 자기영향성을 확인하고 설치 위치를 선정하는 것이 중요하다.

2.4 전자 컴퍼스 연동(개선 전)

개선 전 전자 컴퍼스와 타 장비간의 연동흐름은 Fig. 2와 같이, 전자 컴퍼스로부터 차량의 선수방위각정보와 GPS로부터 차량의 위치정보를 수신한다. 수신된 정보는 NMEA연동모듈을 통해 전송규격으로 변환되어 타 장비로 전송하게 된다. 위성통신장비는 수신된 위치정보와 선수방위각정보를 바탕으로 현 위치에서 추적해야 할 위성까지의 방위각을 계산하여, 위성안테나의 초기구동 범위를 결정한다. 또한 레이더장비인 데이터링크처리기와 전시기는 이를 기준으로 진북방향대비 표적의 방위각 정보를 산출하고 표시하는 기능을 수행한다. 따라서 개선 전 구성에서는 전자 컴퍼스의 오차가 발생되면, 발생된 오차가 위성통신장비 및 레이더장비에 그대로 반영되어 초기 위성 자동추적이 불가능하게 되고, 레이더의 표적위치정보가 부정확하게 되는 원인을 제공하게 된다.

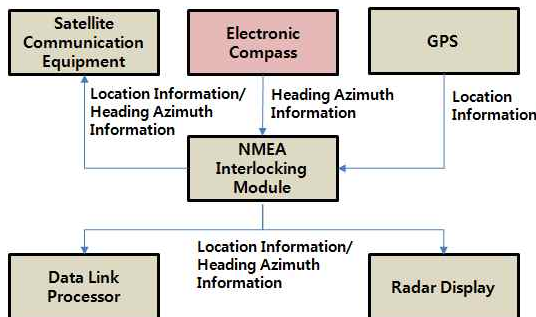


Fig. 2 The link between electric compass and other devices

3. GPS 위치정보 활용

3.1 측지학적 역문제 해석을 통한 기준방위각 산출

두 지점의 경위도를 알면, 측지학적 역 문제 해석을 통해서 두 지점간의 거리 및 방위각을 알 수 있다. 측지학적 역문제 해석 기법에는 Karney, Vincenty 및 Pittman 기법 등이 있지만, 그 중에서 Vincenty 기법은 전산매체에 손쉽게 적용할 수 있고, 최소한의 순환해석을 통해 단시간 내에 결과를 산출할 수 있어 널리 활용되고 있다(Lee, 2011). Vincenty 역문제는 기지점 두 점의 위도(ψ_1, ψ_2) 및 경도(λ_1, λ_2)로부터 타원체 면상의 방위각 α_{12} 을 계산한다(National Geographic Information Institute, 2012). 여기서 U 는 화성위도(reduced latitude), σ 는 구체의 각거리 (angular distance), f 는 편평도 (flatness)를 나타내며, C 는 계산을 위한 중간값이다.

$$\tan U_1 = (1 - f) \tan \Psi_1 \tag{1}$$

$$\tan U_2 = (1 - f) \tan \Psi_2 \tag{2}$$

초기 근사값으로 $\lambda = \omega = \lambda_2 - \lambda_1$ 를 사용하고 λ 에 변화가 없을 때까지 다음식을 반복하여 계산한다.

$$\sin^2 \sigma = (\cos U_2 \sin \lambda)^2 + (\cos U_1 \sin U_2 - \sin U_1 \cos U_2 \cos \lambda)^2 \tag{3}$$

$$\cos^2 \sigma = \sin U_1 \sin U_2 + \cos U_1 \cos U_2 \cos \lambda \tag{4}$$

$$\tan \sigma = \frac{\sin \sigma}{\cos \sigma} \tag{5}$$

$$\sin \sigma = \cos U_1 \cos U_2 \frac{\sin \lambda}{\sin \sigma} \tag{6}$$

$$\cos 2\sigma_m = \cos \sigma - (2 \sin U_1 \frac{\sin U_2}{\cos 2\sigma}) \tag{7}$$

$$C = \frac{f}{16} \cos^2 \alpha [4 + f(4 - 3 \cos^2 \alpha)] \tag{8}$$

$$\lambda = \omega + (1 - C) f \sin \alpha \sigma + C \sin \alpha [\cos 2\sigma_m + C \cos \sigma (-1 + 2 \cos 2\sigma_m)] \tag{9}$$

마지막 단계에서 다음을 계산하여 α_{12} 을 구한다.

$$\tan(\alpha_{12}) = \frac{\cos U_2 \sin \lambda}{\cos U_1 \sin U_2 - \sin U_1 \cos U_2 \cos \lambda} \tag{10}$$

3.2 기준방위각 간편 산출식

이동형해상감시레이더는 GPS로부터 현 위치정보를 획득할 수 있고, 정지위성의 위치정보를 알 수 있기 때문에, 측지학적 역 문제 해석을 통해서 레이더로부터 정지위성간의 기준방위

각을 산출할 수 있다. 산출된 기준방위각은 위성추적 시 구동된 방위각과 비교하여 전자 컴퍼스의 발생 오차를 판단한다. 물론 지구형상과 가까운 타원체(WGS84) 평면도(f)로 방위각을 계산한다면, 구체보다는 정확도가 높을 수 있지만, 프로세스 복잡도 및 처리 로드엔 영향을 미친다. 따라서, 시스템 허용가능 오차범위에 있다면 프로세서 처리로드를 낮추기 위해서 구체로도 해석이 가능하다. 지구형상을 구체로 가정하게 되면, 식 (1)의 타원체의 편평도(f)값이 0이 되어, 식 (11)로 단순화 될 수 있다.

$$U_1 = \Psi_1, U_2 = \Psi_2, \lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (11)$$

지구형상을 타원체(WGS84)인 경우 대비 이상적인 구체로 적용 시 정지위성을 지향하는 기준방위각의 차이를 확인하기 위하여, 한반도 지역내 불특정 지역을 선정하여 Table 2와 같이 차이를 산출하였다(National Geographic Information Institute, 2012).

Table 2 The comparison of the geostationary satellite azimuth according to the earth shape

Region	GPS position		The Azimuth of satellite		
	latitude	longitude	Ellipsoid	Sphere	Dev.
A	38-31-20	128-25-21	203.997°	203.89°	0.107°
B	37-33-05	129-07-05	205.481°	205.367°	0.114°
C	37-03-31	129-25-44	206.189°	206.072°	0.117°
D	36-04-49	129-33-14	206.902°	206.78°	0.122°
E	35-06-04	129-06-32	206.79°	206.668°	0.122°
F	37-49-12	126-23-55	201.328°	201.23°	0.098°
G	36-46-25	126-07-19	201.375°	201.275°	0.1°
H	35-58-14	126-31-28	202.374°	202.269°	0.105°
I	34-18-09	126-31-16	203.218°	203.107°	0.111°
Average deviation					0.111°

산출결과, 두 지구형상간 방위각 차이는 약 0.1°로 레이더에 적용중인 전자 컴퍼스의 방위정확도가 1°rms이내(Maretron, 2012)임을 감안 시 지구형상을 구체로 고려한다 해도, 발생하는 방위각 차이는 수용 가능한 범위 내에 있음을 확인할 수 있다.

4. 자동보정절차

4.1 전자 컴퍼스 연동(개선 후)

전자 컴퍼스의 오차를 자동보정하기 위해서는 Fig. 3과 같이 NMEA연동 모듈은 위성통신장비로부터 정지위성 추적을

위해 회전된 위성지향방위각(Sat. Az), 위성추적상태 및 위성 정보를 받아야 한다. 위성정보와 추적상태 확인을 통해 정상적으로 위성을 추적 할 경우, 차량과 정지위성 간 두 위치정보로부터 기준방위각(Ref. Az)을 산출하고, 전자 컴퍼스로부터 차량의 선수방위각(E comp. Az)을 획득 후 식 (12)에 따라 보정값(β)을 산출한다.

$$\text{보정값}(\beta) = \text{Sat Az} - (\text{E Comp. Az} + \text{Ref. Az}) \quad (12)$$

산출된 보정값은 그 차이만큼 가감하여 다시 전자 컴퍼스의 선수방위각을 보정하게 되며, 보정된 선수방위각은 각각의 장비로 분배되는 구조이다.

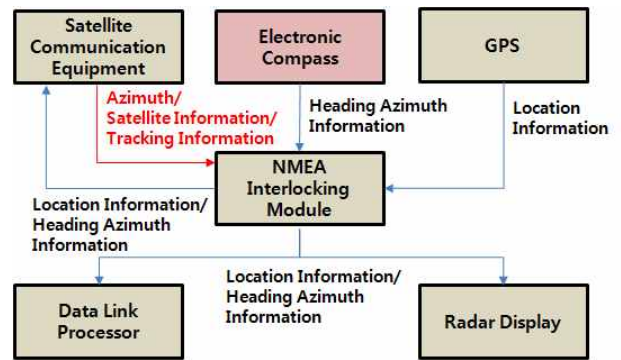


Fig. 3 The additional link to apply for the automatic correction process

4.2 자동보정절차 알고리즘

Fig. 4는 전자 컴퍼스의 오차 자동보정에 대한 세부적인 절차를 도시한 것이다. 우선, 장비 전원이 인가되면 전자 컴퍼스로부터 차량의 선수방위각을 수신 한다. 수신된 값들을 평균하여 전자컴퍼스의 선수방위각(E Comp Az)을 저장한다. 그와 동시에 위성통신장비로부터 위성안테나 상태정보 메시지(Ni 메시지)가 수신되는지 확인한다. 이때 위성안테나가 목표 위성을 추적할 경우, “트래킹 및 Tuner Lock 모드”로 동작되기 때문에 수신된 상태정보 메시지(Ni 메시지)를 통해 위성추적여부를 확인한다. 위성 추적 후 연속 수신된 10개의 Ni 메시지에서 안테나 지향각 정보의 편차가 ± 0.3 도 이내로 안정화되었는지 확인 후 누적된 안테나 지향각의 평균값을 위성지향방위각(SAT Az)값으로 저장한다. GPS 수신기로 부터는 차량의 위치정보가 수신되고 있는지 확인하고, 위치정보 메시지를 수신하고 있으면, 현재 차량과 정지위성 간 두 지점의 위치를 기반으로 식 (10)을 통해 정지위성에 대한 기준방위각(Ref. Az)을 산출한다. 획득된 전자 컴퍼스의 선수방위각(E Comp Az), 위성지향방위각(SAT Az) 및 정지위성기준방위각(Ref. Az)에서 식 (12)을 통해 보정값을 산출한다. 안정화된 데이터 확보를 위해 3개의 누적결과 값이 편차 $\pm 0.3^\circ$ 이내로 안정화되는지 확인 후 평균값을 보정값으로 적용하여 반영한다.

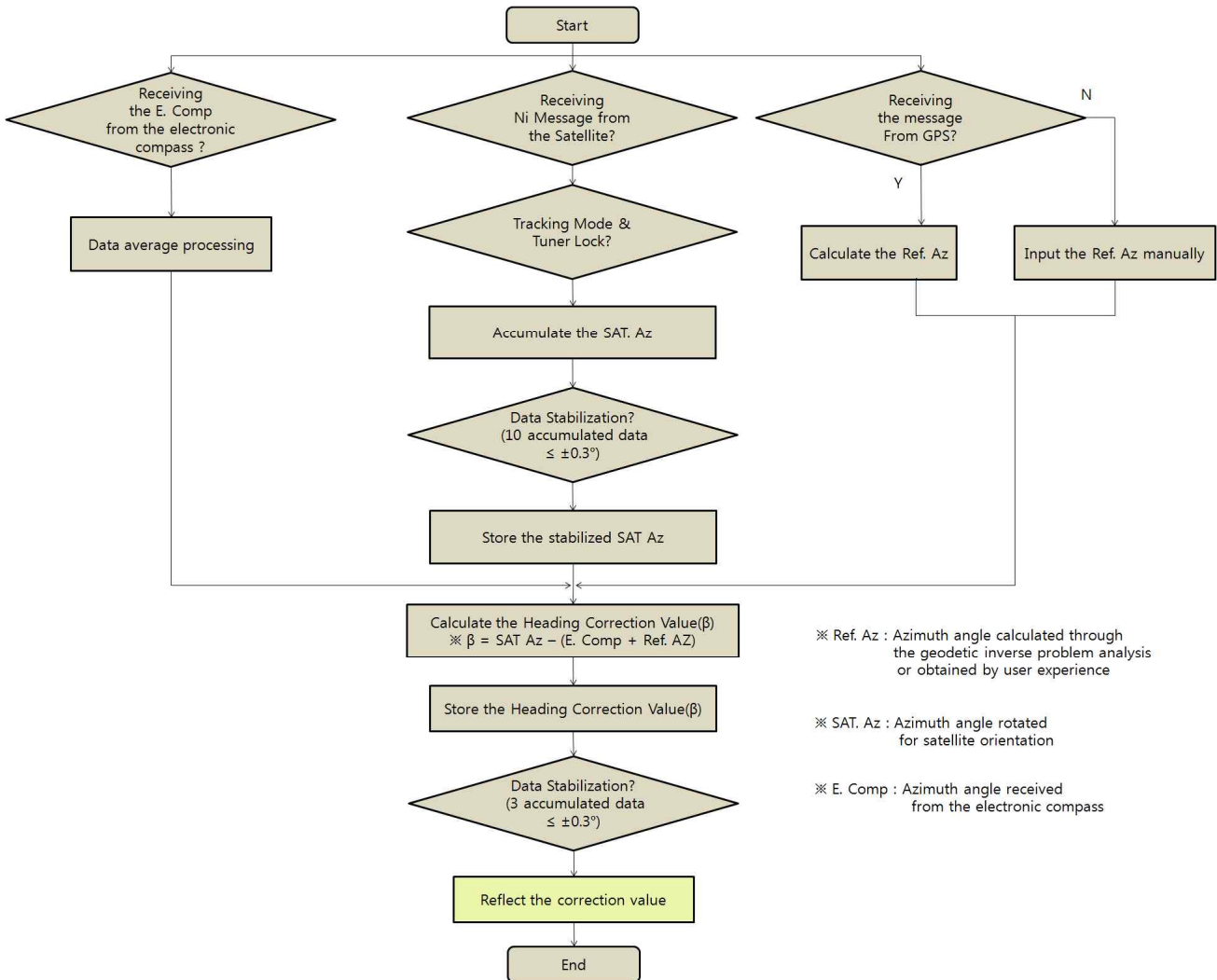


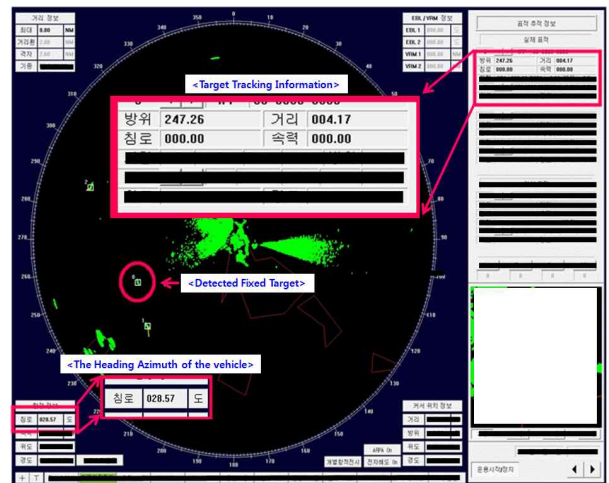
Fig. 4 The calibration algorithm of the electric compass

heading information at NMEA module

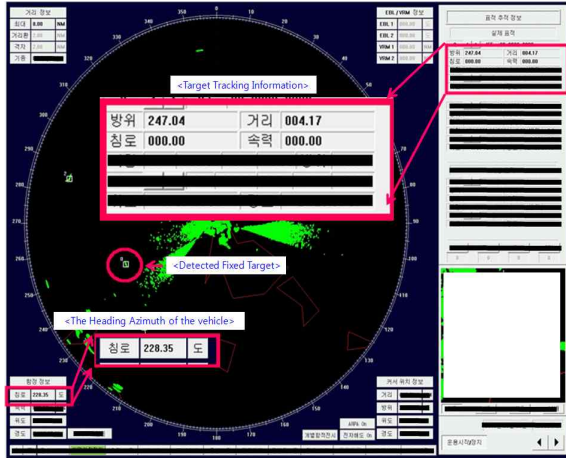
4.3 자동보정절차 적용 후 검증

자동보정절차를 적용 후 레이더에서 측정되는 표적 방위각 정확도를 확인하기 위하여, 차량의 선수방향을 회전하며, 방위각 247°에 위치한 특정 고정표적에 대해 레이더에서 측정되는 고정표적의 방위각과 비교하며 변화정도를 확인하였다.

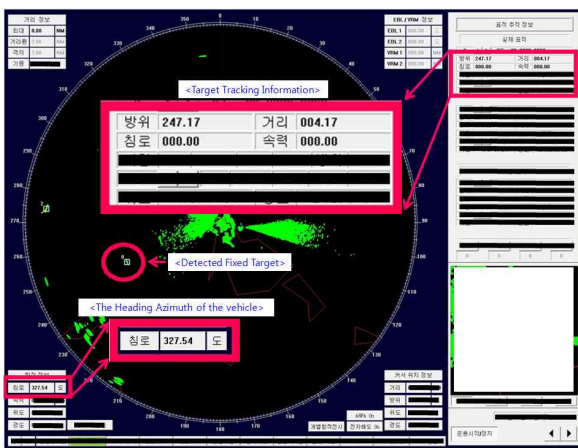
Fig. 5은 차량의 선수방위각을 28.57°, 228.3° 및 327.54°로 변경하였을 때, 실제 레이더 전시기에서 확인되는 고정표적의 방위각 측정 사진이다. 차량의 선수방위각 회전 시, 고정표적의 방위각은 각각 247.26°, 247.04° 및 247.17°로 탐지되었으며, 실제 방위각 247°와 비교 시 최대 0.26°의 편차가 발생함을 알 수 있었다. 이는 레이더에서 요구되는 방위각 오차 범위내에 있으며, 자동보정절차 적용 전 단독으로 운용 시 전자 컴퍼스에서 발생하는 최대편차 1°보다도 개선됨을 확인 할 수 있다.



(a) The heading azimuth of the vehicle : 28.57°



(b) The heading azimuth of the vehicle : 228.35°



(c) The heading azimuth of the vehicle : 327.54°

Fig. 5 The measured azimuth of the fixed target in radar according to the vehicle heading direction

5. 결론

전자 컴퍼스는 소형이며, 안정화 시간이 짧고, 저비용이란 장점이 있는 반면, 외부자장의 변화로 운용 중 과도한 오차가 발생할 수 있다. 발생한 오차는 이동형해상감시레이더의 위성 자동추적을 어렵게 만들거나, 레이더의 탐지정확도를 떨어뜨리는 원인을 제공한다. 따라서 자동보정절차 적용 전, 오차를 줄이기 위해 전자 컴퍼스의 잦은 보정이 필요하였으며, 경우에 따라서는 주변지형을 활용한 경험치의 보정값을 수동으로 입력하는 불편함이 상존하였다.

본 논문에서는 자동보정절차를 적용함으로써, 이와 같은 잦은 보정과 수동 입력의 불편함을 해결하였다. 정지위성 및 차량 간의 위치정보로부터 기준방위각을 산출하고, 이를 전자 컴퍼스의 측정방위각을 포함한 실제 위성안테나의 지향방위각과 비교하여 전자 컴퍼스의 보정값을 산출하는 자동보정절차를 제안함으로써, 전자 컴퍼스의 오차로 발생하는 문제점을 해소하였다. 이를 실제 야전에서 운용중인 이동형해상감시레이더에 적용하여 장비 신뢰도 및 운용 편리성 증대를 가져올

수 있었다. 또한, 향후 전자 컴퍼스와 위성장비를 함께 이용하는 유사 시스템에 본 자동보정절차를 활용한다면 저비용으로 고성능의 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] Besada Portas J. A. et al.(2002), "Radar bias correction based on GPSe measurements for ATC applicaions," IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, Vol. 149, No. 3, pp. 137-144.
- [2] Byron Edde(1996), "Radar Principles, technology, Applications", pp 46~51, Prentice Hall, 1993. Ringsven MK, Bond D. Gerontology and Leadership skills for nurses. pp.15-80, Delmar Publishers.
- [3] Hong, C. H., Kim, Y. C., Chong, K. T.(2008), "Development of Electronic Compass using Magnetic Sensors" Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 14, No. 2, pp. 118-124.
- [4] Hwang, G. H., Kim, M. K., Kang, D. K.(2012), "Displaying Multiple Maritime Surveillance Radar Data", The Transactions of the Korea Institute of Electrical Engineers, Vol. 61, No. 7, pp. 1041-1048.
- [5] Kim, B. D., Kim, D. H., Lee, B. G.(2013), "Systematic Error Correction of Sea Surveillance Radar using AtoN Information", J. Navig. Port Res, Vol. 37, No. 5. pp. 447-452.
- [6] Kim, Y. H., Choi, B. S., Lee, J. M.(2006), "Hybrid Navigation System Using GPS and Dual Electric Compass" Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 12, No. 2.
- [7] Lee, Y. C.(2011) "The Accuracy Analysis of Methods to solve the Geodetic Inverse Problem" Korean Journal of Geomatics, Vol. 29, No. 4. pp. 329-341.
- [8] Maretron, LLP(2012), "SSC200 Solid Sate Rate/Gyro Compass User's Manual" Maretron Manual, Revision 1.8, p. 18.
- [9] Markovic, R., Krajnc, A., Matko, D.(2010) "Calibration of a solid state magnetic compass using angular rate information from low cost sensors" IET Sci. Meas. Technol. Vol. 5, Iss. 2, pp. 54-58.
- [10] National Geographic Information Institute(2012), <http://www.ngii.go.kr/kor/board/list.do?rbsIdx=31&Scate=4&page=5>
- [11] Zhang, Q., Shui, L., Fan, J., Liu, S.(2010) "Autocalibration of a magnetic compass without heading reference" 2010 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology, Vol. 2, pp. 422-425.

Received 6 July 2017

Revised 2 August 2017

Accepted 2 August 2017