

NDGPS와 LORAN-C 기반의 항법 방안 연구

A Navigation Method Based on the NDGPS and LORAN-C

신미영, 박찬식, 이창복, 서상현, 이상정*

(Mi-Young Shin, Chansik Park, Chang Bok Lee, Sang Hyun Suh, and Sang Jeong Lee)

Abstract : The coverage of the NDGPS is nationwide currently and by 2007 more than 2 NDGPS signal will be available in most of Korean peninsula both coastal area and inland. The role of NDGPS beacon is transmitting pseudorange corrections however if range or pseudorange can be measured from NDGPS beacon signal, it might be possible to construct an independent regional navigation system: The range from NDGPS beacon signal can be used as additional measurements to remove GPS shadow area and to improve accuracy and reliability of GPS. Furthermore, by adding Loran-C, a regional radio navigation system without GPS can be possible. In this paper, a feasibility study on the regional positioning system using NDGPS and LORAN-C are given. The results show that the NDGPS and LORAN-C can be used as a ground based regional navigation system if requirements such as synchronization of NDGPS network, dual coverage of NDGPS, navigation algorithm for both NDGPS and LORAN-C measurements and an efficient ASF compensation method are met.

Keywords : NDGPS, LORAN-C, regional navigation, network synchronization, ASF

I. 서론

위치와 시각정보를 제공하는 위성 항법 시스템은 GPS의 성공적인 구축·운용으로 인해 전 세계적으로 더욱 더 중요한 인프라로 인식되고 있으며, 그 결과 EU는 독자적인 위성 항법 시스템인 갈릴레오 사업을 추진하고 있고 일본과 중국을 비롯한 세계열강들이 국제협력을 통해 위성 항법 시스템 구축에 참가하거나 자체 시스템 구축을 준비하고 있다. 위치와 시각정보를 제공하는 위성 항법은 필수 불가결한 국가 인프라라는 사실과 위성 항법 시스템은 그 특성상 지상에 도달한 전파의 세기가 아주 미약하여 전파 간섭이나 재밍에 취약하다는 두 가지 요인으로 GPS 유고시에 대한 대책 마련도 다양한 형태로 연구되고 있다. 우리나라는 별도의 위성항법 인프라가 없으며 현재는 미국의 GPS에 대부분 의존하고 있고, 위성항법 이외에 한국, 일본 및 러시아의 3개국으로 구성된 Korea LORAN-C(9930) 체인을 운영하고 있다[1]. LORAN-C 시스템은 지상파 항법 시스템으로 약 2,200km의 넓은 이용범위를 갖는 반면, GPS에 비하여 낮은 정확도와 불편함으로 인하여 항법 시스템으로의 이용이 감소하는 추세이다. 하지만 백업용으로써의 그 활용 가치가 높아 미국을 비롯한 다른 국가들은 기존 LORAN-C 시스템을 개량하여 GPS 백업 시스템(enhanced LORAN) 및 보정정보 전송용 시스템(eurofix)으로 활용하는 방안을 활발하게 연구 중이다[2]. 본 논문에서는 우리나라에서 운영하고 있는 전파 시스템 중 GPS 보정 데이터 전송 목적으로

현재 해양수산부에서 구축·운영하고 있는 NDGPS (Nation-wide DGPS) 기준국과 Korea Loran-C 체인 중 포항과 광주에 위치한 송신국을 연계한 지상파 전파 항법 시스템 구축 방안을 연구한다.

Loran-C는 두개 이상의 송신국에서 도착한 전파지연 차(TDOA: Time Difference Of Arrival)를 이용하여 위치를 구하는 쌍곡선 측위(hyperbolic positioning)에 기반한 시스템으로, 전파지연(TOA: Time Of Arrival)으로 거리를 구하고 삼각측위법(trilateration)을 이용하여 위치를 구하는 GPS와는 차이가 있다. 또한 NDGPS는 항법용이 아닌 GPS 보정 데이터 전송 목적으로 구현된 시스템으로 항법 시스템에 사용하기 위해서는 많은 부분의 변경 혹은 개선이 필요하다. NDGPS 비콘 신호를 이용하여 TOA 방법으로 거리를 구하기 위해서는 NDGPS 기준국 간에 동기가 이루어져야 하고, 이를 위하여 GPS 위성 동기 체계와 유사한 동기체계의 구축이 필요하다. 또한 MSK(Minimum Shift Keying) 복조를 통해 항법을 위한 측정치를 추출하기 위한 수신기 구조가 제안되어야 하며, 기존의 NDGPS 사용자에게 영향을 주지 않고 시각 동기 및 항법에 필요한 추가적인 정보의 전송이 가능하여야 한다. 이외에도 항법을 위한 충분한 측정치와 DOP(Dilution Of Precision)을 확보하기 위해 LORAN-C와 NDGPS 기준국 간에 GPS에 의존하지 않는 독자적인 시각 동기망의 구축과 서로 다른 의사거리 측정 방법을 갖는 NDGPS와 LORAN-C로부터 얻은 측정치를 동시에 사용하는 항법 알고리즘 개발이 필요하다. 추가로 지상파 항법시스템의 오차 요인을 분석하고 제거하는 기법의 개발과 이러한 조건을 고려하여 위치 정확도를 예측하는 기법도 필요하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 NDGPS 비콘 신호를 측위 목적으로 사용하기 위한 방안을 제시한다. 3장에서 NDGPS와 LORAN-C 기반 항법 시스템을 구축하기 위하여 혼합항법 알고리즘을 제안하고 예상되는 항법 정확도를 추정하는 다음 4장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 4. 30., 채택확정 : 2006. 6. 10.

신미영 : 충남대학교 전자공학과(snyh@cslab.cnu.ac.kr)

박찬식 : 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부(chansp@chungbuk.ac.kr)

이창복 : 한국표준과학연구원(cblee@kriss.re.kr)

서상현 : 한국해양연구원(shush@kriso.re.kr)

이상정 : 충남대학교 전기정보통신공학부(eesjl@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 해양수산부에서 지원하여 연구하였음.

II. NDGPS 기반 지상파 항법 시스템

NDGPS는 우리나라 연안 및 항만에서의 안전항해를 위하여 GPS 측위 오차를 m급으로 보정할 수 있는 GPS 보강 시스템으로, 현재 11개의 해안 기준국과 3개의 내륙 기준국에 2007년까지 3개의 내륙 기준국을 추가로 설치하여 내륙을 포함하는 전국 어디에서나 DGPS 신호를 활용할 수 있도록 계획중인 시스템이다[3]. NDGPS는 RTCM SC-104 (radio technical commission for maritime service, special committee 104)형식의 GPS 보정 데이터를 MSK 변조 방식을 이용하여 283.5kHz - 325.0kHz 대역으로 방송한다. 해안의 경우 기준국 별 신호 출력 세기는 300W이고 전파의 유효 거리는 185km이며, 내륙의 경우 산악지역의 영향을 고려하여 기준국 별 신호 출력 세기는 500W이고 전파의 유효 거리는 85km이다. NDGPS는 보정치의 전송을 목적으로 설계된 시스템으로, 현재 상태로 항법에 적용하는 것은 불가능하며 시스템 변경 및 추가를 통해 표 1의 조건을 만족하여야 한다.

1. 동기식 비콘 수신기 설계

동기식 비콘 수신기의 구성은 그림 1과 같다[5]. 상용의 비콘 수신기는 데이터 복조 기능이 목적이므로 비콘 수신기의 역할을 하면서 정밀시각 추출을 위해서 비콘 신호의 반송파 위상, 비트 타이밍이 추출 가능하도록 구현하였다. 크게 RF부, ADC부, DSP부, PC로 구성되며, RF부는 CSI Wireless사의 DGPS 수신기에서 RF부만을 사용하여 DGPS 비콘 신호를 수신하고, ADC부는 고정밀 GPS 시각동기장치로부터 기준 클럭을 입력받아 FPGA 내부에서 생성한 250kHz의 샘플 클럭에 따라 NDGPS 비콘 입력 신호를 A/D 변환한다. 고정밀 GPS 시각동기장치는 추후 한국표준과학연구원에서 운영하고 있는 국내 시각동기 시스템으로 대체가 가능하다. DSP부는 TI사의 TMS320C6711 보드를 사용하여 신호 처리 블록을 구현하였으며, PC에서는 DSP부로부터 출력 파라미터를 입력받아 저장한다. 구현한 동기식 비콘 수신기의 구조는 그림 2와 같다.

표 2. 항법 시스템으로 사용하기 위한 조건.

Table 2. Conditions to use the navigation system.

조건	설명
NDGPS 기준국 위치	<ul style="list-style-type: none"> 비콘 신호 송신 안테나의 위치 한번 측정하면 고정된 값으로 사용 위성항법중앙사무소 홈페이지에 게재
NDGPS 기준국간 망 동기	<ul style="list-style-type: none"> 망동기를 위한 기준 클럭 : 세습 원자시계 이용 기준국 간 동기 : 전용선 이용
항법 관련 부가정보 전송 라인	<ul style="list-style-type: none"> 기존 NDGPS 사용자에게 영향을 미치지 않아야 함 RTCM 메시지 타입 16(텍스트 전송용) 사용[4]
측정치 추출을 위한 수신기 구조	<ul style="list-style-type: none"> 반송파 위상, 비트 타이밍 추출이 가능한 동기식 비콘 수신기 구조
항법 알고리즘	<ul style="list-style-type: none"> 반송파 위상, 비트 타이밍을 이용한 의사 거리 측정기법 측정오차 및 보상방법

반송파 주파수 f_c 를 복원하고 그에 대응하는 반송파 위상과 데이터의 비트타이밍을 추출하는 기능을 갖는 동기식 비콘 수신기의 신호처리 블록은 그림 3과 같다. 기존의 비동기식 수신기에 비하여 변경된 부분은 반송파 추적 루프와 비트 타이밍 추적 루프이며, 반송파 위상과 데이터의 비트 타이밍을 추적하고, 측정치를 추출하는 기능을 수행한다. 신호처리 블록은 수신한 입력신호를 데이터 비트의 주기 T동안 수신기에서 생성한 I(In phase)-상위 주파수, I-하위 주파수, Q(Quadrature phase)-상위 주파수, Q-하위 주

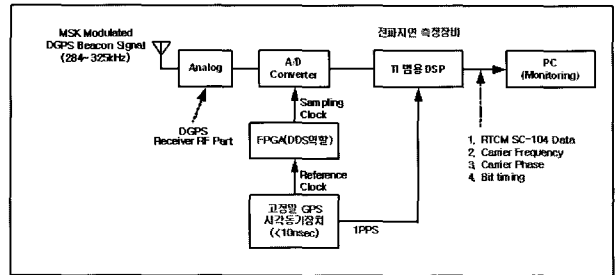


그림 1. 동기식 비콘 수신기 구성도.
Fig. 1. Structure of coherent beacon receiver.

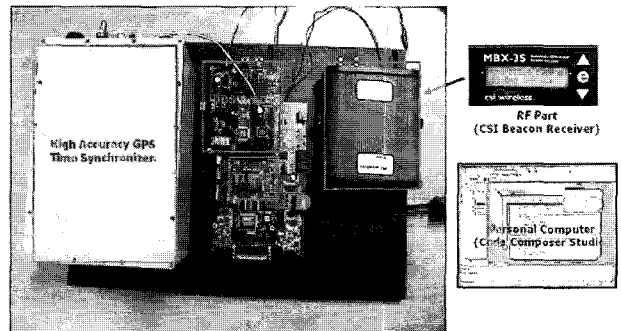


그림 2. 동기식 비콘 수신기.
Fig. 2. Coherent beacon receiver.

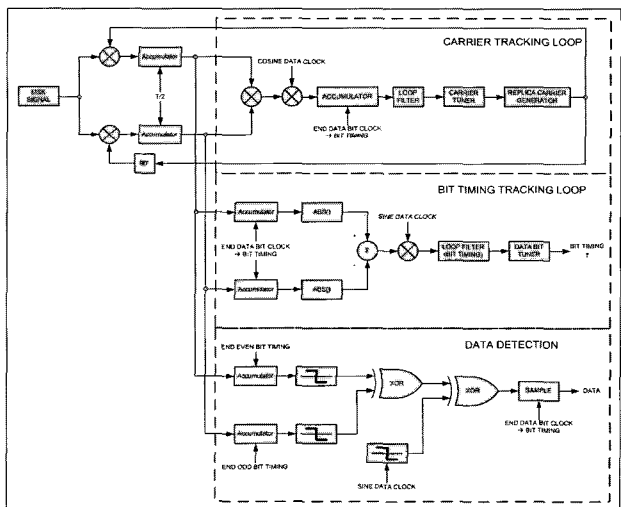


그림 3. 동기식 비콘 수신기 내부 블록도.
Fig. 3. Structure of coherent beacon receiver.

파수 신호와 상관한 후 출력값을 데이터 검출 블록과 반송파 추적루프 블록, 비트 타이밍 추적루프 블록에 입력하여 처리한다. 수신기를 통해 추출 가능한 측정치는 최종 출력단의 RTCM SC-104 타입의 보정 메시지, 반송파 주파수와 위상 및 비트 타이밍이다.

2. NDGPS 비콘 신호를 이용한 의사거리 측정기법

비콘 신호는 200bps의 데이터를 300kHz 대역의 중파에 실어 전송하므로 비콘 수신기에서의 측정치는 반송파 위상, 데이터 비트이며 이들 측정치를 사용하여 의사거리를 측정할 수 있다.

비콘 수신기는 수신한 신호를 MSK 복조하여 데이터를 추출하며, GPS와는 달리 별도의 측위용 코드가 없으므로 비트가 '0' 또는 '1'로 변환되는 시점을 검출하여 TOA를 측정할 수밖에 없다. MSK 변조방식은 채널의 정보 전송 효율을 높이기 위하여 사용되며 MSK 변조된 신호를 스펙트럼 영역에서 분석하면 사이드로브의 크기가 작고, 95% 이상의 신호 성분이 메인로브에 포함되므로 대역통과필터를 통과하더라도 신호의 감쇄정도가 작아 수신 데이터 신호의 왜곡이 작다. 따라서 데이터 비트 변환 시점을 측정하여 TOA 측정치로 활용할 수 있다. 즉, 기준국에서 보낸 데이터 비트의 변환시점과 수신된 변환시점의 시각차에 광속을 곱하면 측정치를 구할 수 있다. 이때 측정치는 실제거리 뿐 아니라 수신기 시계오차가 포함된 측정치이므로 (1)과 같이 기준국 i 와 수신기 A 사이의 의사거리로 나타난다. 식에서 r_i 는 기준국과 수신기 사이의 실제거리, ASF_i 는 지표파 전파로 인한 전파전달 지연오차, cB_A 는 수신기 시계오차, cB_i 는 기준국 시계오차, v_i 는 수신기 측정 잡음이다.

$$\Psi_i = r_i + ASF_i + cB_A + cB_i + v_i \quad (1)$$

반송파 위상을 이용하여 의사거리를 구하는 것은 (2)와 같다. 여기서 λ_i 는 반송파의 파장이고, N_i 는 미지정수로 기준국으로부터 수신기까지 신호의 전달경로 내의 파장개수를 나타낸다. 반송파 위상을 이용하여 구해진 의사거리는 데이터 비트의 변환시점을 이용하여 구해진 의사거리에 비해 측정 잡음이 작은 반면, 미지정수가 포함되어 있으므로 이를 결정해야 하는 문제가 있다.

$$\Phi_i = r_i + ASF_i + cB_A + cB_i + \lambda_i N_i + w_i \quad (2)$$

NDGPS를 이용한 항법에서 예상되는 주된 오차요인은 크게 전파전달 지연오차, 송신기 시계오차, 수신기 시계오차, 수신기 측정 잡음으로 나눌 수 있으며, 처리기법은 표 2와 같다.

2.1 전파전달 지연오차

비콘 신호는 300kHz 대역의 중파 신호로 지표파의 형태로 전파되므로 전파전달 시 지표의 상태에 따라 다른 형태의 시간지연을 갖는다. 이러한 신호의 전달지연시간은 (3)과 같이 표현할 수 있다[6,7].

$$t_{total} = t_{PF} + t_{SF} + t_{ASF} \quad (3)$$

여기서 t_{PF} 는 신호가 대기를 통해서 전달할 때의 시간

표 3. NDGPS를 이용한 항법 시 예상되는 오차요인.

Table 3. Main error sources of NDGPS.

오차요인	설 명
전파전달 지연오차	<ul style="list-style-type: none"> 저주파 전자기파의 전파특성으로 인함 PF(Primary Factor)와 SF(Secundary Factor) 제거 가능 지형 데이터(Terrain data map)로 ASF(Additional Secundary Phase Factor) 보상 가능
송신기 시계오차	<ul style="list-style-type: none"> 기준국간 시각동기 오차 송신기 시계의 불안정으로 인한 오차 원자시계 사용과 보정기법 적용으로 무시
수신기 시계오차	<ul style="list-style-type: none"> 수신기 시계와 기준국 시각과의 차이 구해야 할 미지수
수신기 측정 잡음	<ul style="list-style-type: none"> 수신기 내부 소자에 의한 잡음, 추적루프 오차, 수신기 시계 오차로 구성 데이터비트와 반송파 각각의 1%로 해상도 가정(수백~수천 km/수 m)

지연을 나타내고, t_{SF} 는 신호가 바닷물을 통해 이동할 때의 시간 지연을 나타낸다. t_{ASF} 는 신호가 내륙을 통해 전파할 때 겪는 부가적인 지연을 나타내며, 지형의 고도, 유전율, 도전을 등에 영향을 받는 가변적인 요소이다. t_{PF} 와 t_{SF} 는 t_{ASF} 와 비교했을 때 상당히 일정한 지연을 갖기 때문에 모델링이 간편하고 거리에 대한 영향만을 받으므로 계산을 통해 쉽게 제거할 수 있는 반면, t_{ASF} 는 시간과 위치에 따라 변하기 때문에 제거하기 어렵다[7]. 따라서 지상파 항법 시스템은 전파지연 오차요인으로 ASF에 의한 영향이 가장 크게 작용하며, 이것은 지형 데이터(terrain data map)를 이용한 모델링을 통해 보상할 수 있다. 유럽과 미국은 지상파 항법 시스템인 LORAN-C 시스템에 ASF 지연 예측을 적용하고 있으며, 영국 웨일즈 대학이 개발한 BALOR 시스템을 활용하고 있다[8]. ASF는 일정한 값을 갖는다고 가정할 수 있으므로 한번 측정으로 생성한 보정값을 계속 사용할 수 있다. ASF를 보상하지 않는 경우 최대 2km까지의 위치 오차를 나타내고 보정한 경우 최적의 환경에서 50m 이하의 정확도를 얻을 수 있다[9]. 국내 지형에 적용 가능한 지형 데이터를 모델링한다면 이를 LORAN-C 뿐만 아니라 NDGPS 기반 지상파 항법 시스템에 동일하게 적용할 수 있다.

2.2 송신기 시계오차

기준국간의 시각동기 오차는 기준국 시계들 사이의 시계 오차를 나타낸다. TOA방법으로 거리를 구하기 위하여 기준국으로부터 수신기까지 전파 도달 시간을 이용하여 측정치를 얻는다. 이때 모든 기준국 신호의 전송 시각이 정확하게 동기되어야 하며, 기준국간의 시각동기 오차는 의사거리 정확도에 직접 반영되고 수신기에서 제거가 불가능하다. 기준국간 시각동기는 원자시계의 이용과 전파를 이용한 기법을 적용할 수 있다. 원자시계는 자체가 안정적이므로 초기 위상 차이 값을 교정해 준 후에는 하루에 한번 정도의 주파수 오프셋 조정을 통해 수십 ns이내의 동기가 가능하다. 반면 전파를 사용할 경우에는 NDGPS 비콘 신호나 LORAN-C 신호와 같은 지상파는 일변화 및 계절 변화를 겪으므로 수

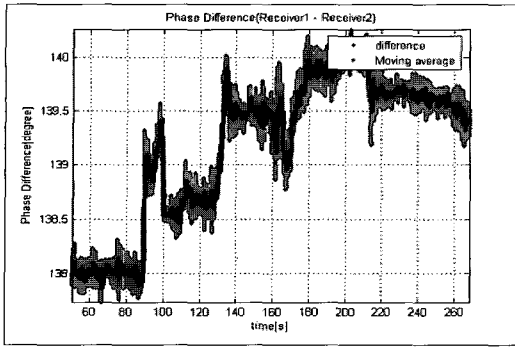


그림 4. 강신호 지역의 반송파 위상 오차.
Fig. 4. Carrier phase error at the strong power area.

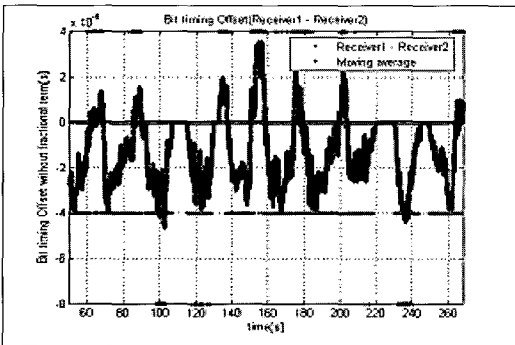


그림 5. 강신호 지역의 비트 타이밍 오차.
Fig. 5. Bit timing error at the strong power area.

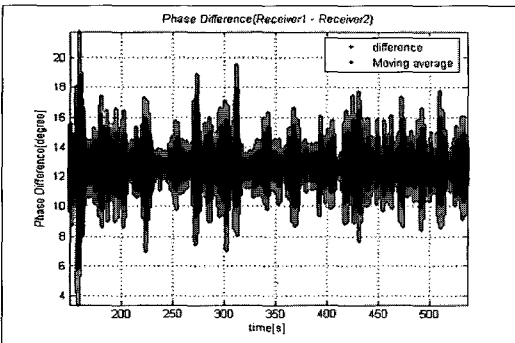


그림 6. 약신호 지역의 반송파 위상 오차.
Fig. 6. Carrier phase error at the low power area.

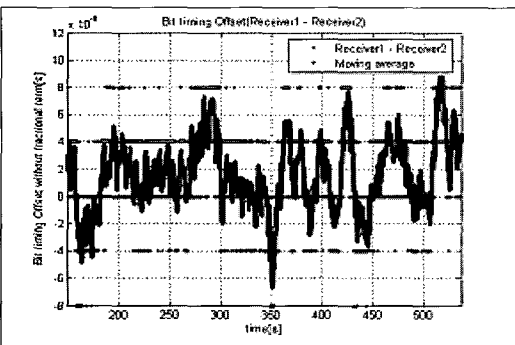


그림 7. 약신호 지역의 비트 타이밍 오차.
Fig. 7. Bit timing error at the low power area.

표 3. 측정오차.

Table 3. Measurement error.

장소	반송파 위상오차		비트 타이밍 오차	
	Meas.	M.A.	Meas.	M.A.
강신호지역	0.14°	0.104°	2.638us	2.232us
약신호지역	0.712°	0.168°	28.843us	11.442us

백 ns에서 수 us까지의 정밀도가 예상되며, 정확한 성능의 판단을 위해서는 장시간의 데이터 수집을 통한 분석이 선행되어야 한다[10].

기준국 시계오차는 송신기 시계의 불안정으로 인해 발생하는 기준국 시계와 기준 시계와의 차이이다. 이를 제거하기 위하여 GPS에서는 안정도가 높은 원자시계를 사용하고, GPS 지상 관제소에서 감시하여 구해진 시계오차 보정치를 항법 메시지로 전송한다. NDGPS도 같은 방법으로 각 기준국에서 고성능 원자시계를 사용하고, 이를 감시하여 구해진 보정치를 비콘 신호의 데이터로 전송하면 송신기 시계오차의 영향을 무시할 수 있다.

2.3 수신기 측정 잡음

정지 상태에서 동일한 위치에 놓인 두 대의 동기식 비콘 수신기로부터 반송파 위상과 비트 타이밍 측정치 획득 실험을 하였으며, 측정된 측정치 및 측정치 이동평균의 편차를 계산하여 수신기 측정오차 성능을 분석하였다.

측정치 이동평균값은 측정치 편차를 줄이기 위하여 200epoch만큼 이동평균을 취한 값이다. 실험은 NDGPS 기준국(무주)으로부터 100m 떨어진 지점(강신호 지역)과 55.2 km 떨어진 지점(약신호 지역)에서 오후 1시에 실시하였다. 강신호 지역에서의 실험결과는 그림 4, 5와 같고, 약신호 지역에서의 실험결과는 그림 6, 7과 같다. 실험결과를 정리하면 표 3과 같다. 실험 결과를 통해 반송파 위상오차는 강신호 지역과 약신호 지역에서 1m 이내이며, 비트 타이밍 오차는 강신호 지역의 경우 약 500m, 약신호 지역의 경우 수십~수백 km인 것을 확인하였다.

3. NDGPS 비콘 신호를 이용한 항법 알고리즘

(1), (2)의 의사거리 식에서 지표파 전파로 인한 전파전달 지연오차 ASF_i 는 ASF의 모델링을 통하여 보상이 가능하며, 기준국간 동기 오차 cB_i 는 안정적인 원자시계를 이용하고 주파수 오프셋 조정을 통해 수십 ns 이내의 동기가 가능하므로 무시할 수 있다고 가정하면 NDGPS 기준국 i 에 대하여 데이터 변환 시점을 이용한 의사거리와 반송파 위상을 이용한 의사거리는 각각 (4), (5)와 같이 표현할 수 있다. 이때 실제거리 r_i 는 $\sqrt{(X_i - x_A)^2 + (Y_i - y_A)^2 + (Z_i - z_A)^2}$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 (X_i, Y_i, Z_i) 는 알고 있는 기준국의 위치를 (x_A, y_A, z_A) 는 구하고자 하는 수신기의 위치를 나타낸다[11].

$$\Psi_i = r_i + cB_A + v_i, \text{cov}(v_i) = \sigma_v^2 \quad (4)$$

$$\Phi_i = r_i + cB_A + \lambda f_i N_i + w_i, \text{cov}(w_i) = \sigma_\phi^2 \quad (5)$$

선형화 기준점 $r_0 = [x_{A0} \ y_{A0} \ z_{A0}]$ 에서 선형화된 의사거리 (6), (7)과 같다.

$$\Psi_i - r_{i0} = h_{ix} \delta x + h_{iy} \delta y + h_{iz} \delta z + cB_A + v_i \quad (6)$$

$$\Phi_i - r_{i0} = h_{ix} \delta x + h_{iy} \delta y + h_{iz} \delta z + cB_A + \lambda_i N_i + w_i \quad (7)$$

여기서, 사용자와 기준국과의 거리 추정치는 $r_{i0} = \sqrt{(X_i - x_{A0})^2 + (Y_i - y_{A0})^2 + (Z_i - z_{A0})^2}$, 시선 벡터는 $(h_{ix}, h_{iy}, h_{iz}) = \left(\frac{X_i - x_{A0}}{\sqrt{r_{i0}}}, \frac{Y_i - y_{A0}}{\sqrt{r_{i0}}}, \frac{Z_i - z_{A0}}{\sqrt{r_{i0}}} \right)$ 로 나타난다.

m개의 NDGPS 기준국으로부터 구한 측정치를 이용하여 (8)의 선형화된 측정치를 얻는다. 여기에 최소자승법을 적용하면 수신기 위치, 수신기 시계오차, 실수 영역에서의 미지정수를 구할 수 있다. 수신기 측정 잡음의 공분산 행렬은 (9)와 같다. (8)에서 보는 바와 같이 m개의 기준국으로부터 신호를 수신하면 2m개의 측정치를 얻으며 이 경우 3 + m + 1개의 미지수가 존재한다. 따라서 NDGPS만을 이용하는 경우 최소 4개 이상의 비콘 신호를 관측하여야 한다.

$$\begin{bmatrix} y_\Psi \\ y_\Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\Psi \\ v_\Phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{cov} \begin{bmatrix} v_\Psi \\ v_\Phi \end{bmatrix} = \text{diag}([\sigma_\Psi^2 \dots \sigma_\Psi^2 \sigma_\Phi^2 \dots \sigma_\Phi^2]) \equiv Q_{\text{NDGPS}} \quad (9)$$

여기서,

$$y_\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1 - r_{10} \\ \vdots \\ \Psi_m - r_{m0} \end{bmatrix}, \quad y_\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_1 - r_{10} \\ \vdots \\ \Phi_m - r_{m0} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} h_{1x} & h_{1y} & h_{1z} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{mx} & h_{my} & h_{mz} & 1 \end{bmatrix},$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_m \end{bmatrix}, \quad O = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ cB_A \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_m \end{bmatrix},$$

$$v_\Psi = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix}, \quad v_\Phi = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_m \end{bmatrix} \text{를 나타낸다.}$$

실수 영역에서 구해진 미지정수와 그 공분산 정보를 이용하여 정수 미지정수를 구할 수 있지만 본 논문에서 상세한 과정을 나타내지는 않았다. 만약 정수 미지정수가 구해졌다면 (8)은 (10)으로 변경된다. 이 경우 4개의 미지수가 존재하며 4개 미만의 NDGPS 비콘 신호를 수신하는 경우 역행렬이 존재하지 않아 해를 구할 수 없으므로 4개 이상의 비콘 신호를 수신하여야 한다.

$$\begin{bmatrix} y_\Psi \\ y_\Phi - \Lambda N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ H \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} v_\Psi \\ v_\Phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

보정치 전송을 목적으로 하는 NDGPS로부터 우리나라 전 지역을 대상으로 4개 이상의 비콘 신호의 관측을 기대하기는 어려우므로 추가의 측정치를 고려하여야 한다[12]. 본 논문에서는 2개 이하의 NDGPS 기준국으로부터 신호를 수신할 수 있다고 가정하였으며, 부족한 측정치는 해양수산부에서 운영하고 있는 LORAN-C를 이용한 항법을 고려하였다.

III. NDGPS와 LORAN-C기반 지상파 항법 시스템

NDGPS와 LORAN-C를 연계하여 항법 시스템을 구축하

기 위해 TOA와 TDOA 기법을 사용하는 두 시스템의 측정치를 이용할 수 있는 혼합항법 알고리즘이 필요하다. 편의를 위하여 LORAN-C 기준국과 NDGPS 기준국의 시차는 동기되었다고 가정하였으며 이는 NDGPS 기준국간 시각 동기 기법을 적용하면 가능하다. LORAN-C로부터 얻은 의사거리는 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 M은 주국을 나타내고 j는 종국을 나타내며 두 기준국과 수신기 간 거리의 차분은

$$\Delta r_j = \sqrt{(X_j - x_A)^2 + (Y_j - y_A)^2 + (Z_j - z_A)^2} - \sqrt{(X_M - x_A)^2 + (Y_M - y_A)^2 + (Z_M - z_A)^2}$$

이다.

$$\Delta \Psi_j = \Delta r_j + \Delta v_j, \quad \text{cov}(\Delta v_j) = \sigma_{\Delta}^2 \quad (11)$$

NDGPS와 같은 방법으로 선형화하면 (12)와 같다.

$$\Delta \Psi_j - r_{j0} + r_{M0} \quad (12)$$

$$= (h_{jx} - h_{Mx}) \delta x + (h_{jy} - h_{My}) \delta y + (h_{jz} - h_{Mz}) \delta z + \Delta v_j$$

m개의 NDGPS 기준국과 n개의 LORAN-C 기준국으로부터 관측한 측정치를 이용하여 벡터 행렬로 표현할 수 있으며, 미지정수 결정기법을 이용하여 정수 미지정수를 결정하였다면 행렬식은 (13)과 같으며 이를 (14)의 간략한 형태로 나타낸다. 이때 수신기 측정 잡음은 (15)의 특성을 갖는다.

$$\begin{bmatrix} y_\Psi \\ y_\Phi - \Lambda N \\ y_{\Delta \Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ H \\ H_{\Delta} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} v_\Psi \\ v_\Phi \\ v_{\Delta \Psi} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$y_{all} = H_{all} x + v_{all} \quad (14)$$

$$\text{cov}(v_{all}) = \text{diag}([\sigma_\Psi^2 \dots \sigma_\Psi^2 \sigma_\Phi^2 \dots \sigma_\Phi^2 \sigma_{\Delta \Psi}^2 \dots \sigma_{\Delta \Psi}^2]) \equiv Q_{all} \quad (15)$$

여기서,

$$y_{\Delta \Psi} = \begin{bmatrix} \Delta \Psi_1 - r_{10} + r_{M0} \\ \vdots \\ \Delta \Psi_n - r_{n0} + r_{M0} \end{bmatrix}, \quad v_{\Delta \Psi} = \begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \vdots \\ \Delta v_n \end{bmatrix},$$

$$H_{\Delta} = \begin{bmatrix} h_{1x} - h_{Mx} & h_{1y} - h_{My} & h_{1z} - h_{Mz} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{nx} - h_{Mx} & h_{ny} - h_{My} & h_{nz} - h_{Mz} & 1 \end{bmatrix}$$

이다.

(14)의 측정식을 이용하여 최소자승법으로 구한 추정치 \hat{x} 과 공분산은 (16), (17)과 같다.

$$\hat{x} = (H_{all}^T Q_{all}^{-1} H_{all})^{-1} H_{all}^T Q_{all}^{-1} y_{all} \quad (16)$$

$$\text{cov}(\hat{x}) = (H_{all}^T Q_{all}^{-1} H_{all})^{-1} = Q_x \quad (17)$$

NDGPS와 LORAN-C를 동시에 사용하는 혼합항법의 경우에는 HDOP(Horizontal DOP)을 이용하여 정확한 오차해석을 할 수 없으며, 다른 형태의 위치오차 성능지표가 필요하다. 여기서는 항법성능 지표로서 HNSP(Horizontal Navigation System Precision)를 (18)로 정의한다[13]. 항법 정확도가 의사거리 측정오차와 기준국의 기하학적 배치에 따라 결정되는 것을 고려할 때 HNSP를 항법 정확도의 척도로 볼 수

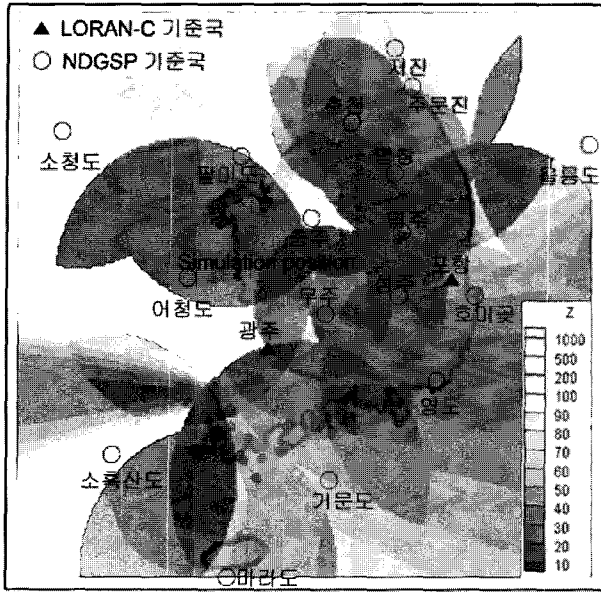


그림 8. NDGPS와 LORAN-C를 고려한 HNSP.
Fig. 8. HNSP considering NDGPS and LORAN-C.

있으므로 HNSP는 미터 단위의 수평오차로 해석할 수 있다.

$$HNSP = \sqrt{Q_x(1, 1) + Q_x(2, 2)} \quad (18)$$

NDGPS와 LORAN-C를 동시에 이용하는 혼합항법의 항법 정확도를 분석하기 위하여 2007년 NDGPS 망이 완성될 경우의 HNSP 분포를 그림 8에 보였다. 시뮬레이션에는 총 17개의 NDGPS 기준국과 포항과 광주에 위치한 LORAN-C 기준국을 포함하였다. NDGPS 기준국 신호의 도달범위는 내륙의 경우 85km, 해안의 경우 120km로 두었으며, LORAN-C 신호의 도달거리는 2200km로 두었다. 또한 NDGPS 기준국 간에 시각동기 망이 구축되었고, ASF_i 및 σ_{B_i} 를 보상하였으며, 미지정수를 결정하였다고 가정하였다. 수신기 오차는 동기식 비콘 수신기를 구현하여 실험한 표 3의 결과를 바탕으로 결정하였다.

즉, σ_{θ} 는 반송파 위상 측정오차의 표준편차인 5m, σ_{ψ} 는 비트타이밍 측정오차의 표준편차인 500m, σ_{Δ} 는 LORAN-C 신호의 6번째 zero-crossing 측정오차의 표준편차인 $50/\sqrt{2}$ m로 가정하였다. 시뮬레이션 결과로부터 혼합항법 시 대부분의 내륙지역에서 100m 이내의 항법 정확도를 얻을 수 있음을 확인하였다. 좋은 성능을 나타내는 중부 내륙지역에서는 20m 이내의 정확도를, 가장 나쁜 동해안 먼 바다 지역에서는 1km 정도의 정확도를 기대할 수 있다. 이 결과를 통해 현재 우리나라에서 운영하고 있는 NDGPS와 LORAN-C 기반의 혼합항법 시스템을 구축하면 우리나라 전역에 대하여 서비스가 가능함을 확인할 수 있으며, 성능 향상이 필요한 경우 추가로 설치해야 할 기준국의 위치도 파악할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 해양수산부에서 운용 중인 GPS 의사거리 보정 정보 전송용 NDGPS 시스템과 지상파 항법 시스템을

LORAN-C를 이용하여 GPS에 의존하지 않는 독자적인 항법 시스템 구축을 위하여 필요한 조건 및 그 해결 방안을 나타내었다. 현재 NDGPS 망의 구조로는 항법을 수행하기 어려우며 NDGPS 기준국 간 시각동기와 이를 이용한 보정 데이터의 전송시점과 반송파 위상을 동기시키면 TOA 기법에 의한 항법이 가능할 수 있음을 보였다. 그러나 항법을 위해서는 최소 4개 이상의 NDGPS 기준국으로부터 신호를 수신하여야 하며 이를 만족하는 지역은 극히 한정되므로 여기에 LORAN-C를 추가하는 지상파 기반의 항법 시스템을 제안하였고, 항법 시 예상되는 오차요인 및 보상기법을 제시하였다. 위의 조건을 만족하도록 환경이 구축된다는 가정하에, NDGPS 기준국 간 시각동기망 구축 및 효과적인 ASF 보상기법이 추가되고, 반송파의 측정오차가 5m 이내, 데이터 비트의 측정오차가 500m 이내로 측정이 가능하며, 미지정수를 결정할 수 있다면 우리나라의 대부분 지역에서 100m 이내의 항법 정확도를 얻을 수 있음을 오차해석과 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 또한 NDGPS와 LORAN-C 시스템을 이용한 혼합항법이 GPS에 비하여 정확도는 떨어지지만 독자적인 항법 시스템으로 활용 가능성을 확인하였다. 이는 국가의 중요한 위치·시각 정보를 제공하는 인프라를 외국의 위성항법 시스템이 아닌 독자적인 지상파 기반의 전파항법 시스템으로 확보할 수 있음을 나타내며 군사적으로도 중요한 의미를 갖는다. 본 연구의 결과를 바탕으로 독자적인 전파항법 시스템을 구축하기 위해서는 NDGPS 시각동기망, 동기식 비콘 수신기, 항법 시 예상되는 오차 제거 등의 필요조건을 만족시키고 그 성능을 향상시키기 위한 추가적이고 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] <http://loran9930.go.kr/>
- [2] <http://www.navcen.uscg.gov/loran/>
- [3] <http://www.ndgps.go.kr/>
- [4] 윤상준, 이창복, 이상정, “DGPS 비콘 기준국 반송파 동기의 활용방안 연구,” 제10차 GNSS Workshop, pp. 339-341, 11. 2003.
- [5] (주)네비콤, “NDGPS 신호의 전파지연 특성 분석 장비 개발,” 해양수산부, NDGPS 시각동기망 기반 항법체계 기술개발 연구 결과보고서, pp. 102-159, 9. 2005.
- [6] G. Abwerzger, “Sensor fusion of GPS and Loran-C A raw-data based technique,” *GNSS 2002, The European Navigation Conference*, Copenhagen, Denmark, May 27-30, 2002.
- [7] W. Pelgrum J. & D. van Willigen, “LORAN-C Challenges GNSS : From a Quarter Nautical Mile Down to Meter-Level Accuracy,” *ENC GNSS 2003*, Graz, Austria, 22-25 April 2003.
- [8] U. S. Coast Guard Academy, Loran-C Engineering Course
- [9] 부산카톨릭대학교, “Terrain 데이터 맵을 이용한 지형의 전파 지연 영향 분석,” 해양수산부, NDGPS 시각동기망 기반 항법체계 기술개발 연구 결과보고서, pp. 161-212, 9. 2005.

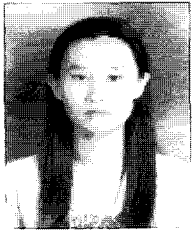
[10] 표준과학연구원, “NDGPS 신호의 전파지연 성능 분석 및 기준국 망동기 방안 연구,” 해양수산부, NDGPS 시각동기망 기반 항법체계 기술개발 연구 결과보고서, pp. 56-101, 9. 2005.

[11] E. D. Kaplan, *Understanding GPS Principles and Application*, Artech House, 1996.

[12] 신미영, 윤상준, 이창복, 서상현, 박찬식, 이상정,

“NDGPS 시각동기망과 LORAN-C 기반의 지상파 항법 방안 연구,” KACC 2005, 대전, 10. 2005.

[13] M. Y. Shin, S. S. Han, S. J. Lee, C. S. Park, C. B. Lee, and S. H. Suh, “A feasibility study on positioning technologies using the synchronized NDGPS beacon signal,” *International Symposium on GPS/GNSS 2005*, Hong Kong, December, 2005.



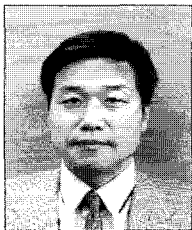
신미영

2004년 배재대 컴퓨터전자정보통신공학부 졸업. 2006년 충남 대학교 석사. 2006년~현재 충남대학교 전자공학과 박사과정. 관심분야는 소프트웨어 GNSS 수신기.



박찬식

1984년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1986년 동 대학원 석사. 1997년 동 대학원 박사. 1997년~현재 충북대학교 전기컴퓨터공학부 부교수. 관심분야는 GNSS 신호처리.



이창복

1980년 서강대 전자과 졸업. 1982년 동대학원 석사. 1994년 동 대학원 박사. 1982년~현재 한국표준과학연구원 기반 표준부장. 관심분야는 Satellite tomog.



서상현

1979년 서울대 선박해양공학과 졸업. 1982년 동 대학원 석사. 1991년 (미) University of Michigan 박사. 1982년~현재 한국해양연구원 해양시스템 안전연구소 해양시스템기술연구본부 본부장. 관심분야는 항해안전, 해양 정보화, 지리정보 표준화, GNSS 활용.



이상정

1979년 서울대 전자과 졸업. 1981년 동 대학원 석사. 1987년 동 대학원 박사. 1988년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부 교수. 관심분야는 강인제어, GNSS.