

L1/L2 측정치 조합을 이용한 GPS 기준국간 반송파 미지정수 결정 기법

Ambiguity Determination Technique for Multiple GPS Reference Stations using the Combination of L1/L2 Carrier Phase

박병운*, 송준솔**, 기창돈**

Byung-Woon Park*, June-Sol Song** and Chang-Don Kee**

요 약

본 논문에서는 Network RTK 보정정보 생성 프로세스에서 핵심 process인 기준국간 미지정수 결정을 위해 Hatch filter를 이용한 방법과 L1/L2 측정치 조합을 활용하는 방법에 대해 소개하고 시뮬레이션 데이터 및 실측 데이터를 활용하여 그 성능을 비교 및 검증하였다. 각각의 방법에 대해 수식 전개를 수행하였으며, 사용자 성능 검증을 위해서 다중 기준국 네트워크에 대해 생성한 보정정보와 사용자 위치에서 생성한 보정정보의 차이값을 비교하였다. 각각의 기준국간 미지정수 결정 방법을 실측 데이터에 적용하여 사용자 성능을 예측한 결과, Hatch filter를 사용한 경우에는 단일 기준국 RTK 기반의 방법에 비해 다중 기준국 네트워크에서 생성된 보정정보를 사용하는 것이 사용자 성능을 크게 향상시키는 결과를 확인하였다. 그러나 사용자의 미지정수에 영향은 없으나, 상당한 크기의 바이어스 오차가 포함되는 것을 확인하였고 그 원인에 대해 분석하였다. L1/L2 측정치 조합을 이용한 경우, Hatch filter를 사용한 방법에 비해 사용자에 발생하는 오차의 크기가 훨씬 감소하였으며 잔차의 경향성도 훨씬 감소한 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we introduce two techniques for resolving integer ambiguities between reference stations, which is one of the most important processes in Network RTK correction generation process. Each techniques uses Hatch filter and combination of L1/L2 measurements and we used simulation data and real data to evaluate performance of the techniques. For evaluating performance of each technique, we compared corrections generated from user site and Network RTK. As a result, Network RTK with the technique which uses Hatch filter improves user performance much more than single baseline RTK does. Residual of user is smaller than a half size of wavelength so it does not affect user integer ambiguity resolution, however, it contains significant bias error. On the other hand, when we used the technique which uses combination of L1/L2 measurements, residual error of user is largely reduced compared to the technique using Hatch filter.

Key words : Network RTK, Ambiguity Resolution, Wide-lane Observables, Carrier Phase Linear Combination, Master-Auxiliary Reference Station

* 대한지적공사 지적연구원(Korea Cadastral Survey Corp., Cadastral Research Institute)

** 서울대학교 기계항공공학부(Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University)

· 제1저자 (First Author) : 박병운

· 투고일자 : 2011년 10월 4일

· 심사(수정)일자 : 2011년 10월 26일 (수정일자 : 2011년 10월 26일)

· 게재일자 : 2011년 10월 30일

I. 서 론

1990년대 제안된 RTK(Real-Time Kinematics)는 GPS 반송파 위상(carrier phase) 측정치를 이용한 방식으로 cm수준의 정확도를 실시간으로 산출할 수 있어 측지·측량 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 그러나 한 가지 중요한 단점은 이 방식을 사용하는 기준국(RS, Reference Station)과 이동국(Rover)는 10~20km 이내에 존재해야만 빠르고 신뢰할 수 있는 해를 산출할 수 있다는 점이다. 이는 궤도오차, 대류층 및 전리층 오차에 공간 상관성이 있기(spatially correlated) 때문인데, 사용자 주변을 둘러싼 기준국들의 측정치를 조합하여 보상이거나 모델링하여 줄이는 방식인 network RTK 알고리즘이 제안되어 사용되고 있다. [1]

Network RTK 시스템 구성을 위해서는 우선 다수의 상시관측소(CORS, Continuous Operating RS)와 이를 처리할 수 있는 서버, 그리고 상시관측소 측정치를 실시간으로 서버로 전송할 수 있는 통신 채널이 필요하다. 상시관측소의 3차원 정밀 좌표 산출과 Network RTK 인프라를 구축을 완료한 이후의 Network RTK 서버 내 프로세스는 그림 1에 도시된 바와 같다.

상시관측소 별로 cycle-slip, 데이터의 유효성 검증 등 원시데이터 검사(Raw Data Analysis)를 한 후, 동

일 GPS Time에 대하여 데이터 동기화(Synchronize) 및 정렬을 거쳐 미지정수 검색 및 결정(Ambiguity Search & Fix) 전 단계로 측정치와 오차 성분별 filtering을 수행한다. 기준국간 미지정수가 결정되면 결정된 미지정수에 대하여 잔차 분석(Residual Management)후 최종 Network RTK 보정정보를 생성하고 동시에 무결성 추정도 수행한다.

이상의 Network RTK 보정정보 생성 프로세스에서 기준국간 미지정수 결정은 전 과정의 핵심 process라고 할 수 있으며, 관련된 많은 기술들이 제안되어 왔다. Long baseline RTK에 대해서는 1980년대 말부터 현재까지 꾸준히 연구되고 있다. 1980년대 말 Blewitt [3]에 의해 전리층 제거 조합과 전리층 조합, 그리고 widelane 반송파 위상 조합을 활용한 미지정수 검색 방법에 대해 연구가 되었으며, 이후에도 widelane 측정치를 활용한 방법은 Gao[4], Colombo[5] 등 많은 연구자에 의해 널리 활용되었다. 한편, 최근에는 L1, L2 측정치 조합에 의해 측정치의 잡음 수준이 증가하는 영향을 피하기 위해 L1, L2 반송파 위상 및 의사거리를 그대로 측정치로 사용하여 사용자 위치 및 속도, 기준국간 차분된 전리층 수직성분, 대류층 wet 수직 성분을 Kalman filter를 통해 추정하는 방법에 대해 연구된 바 있다[6, 7]. 이상의 연구들은 대부분 사용자 미지정수 결정을 위한 연구이며, 오차 추정을 위해 정확한 모델을 사용해야 하거나, 수렴시

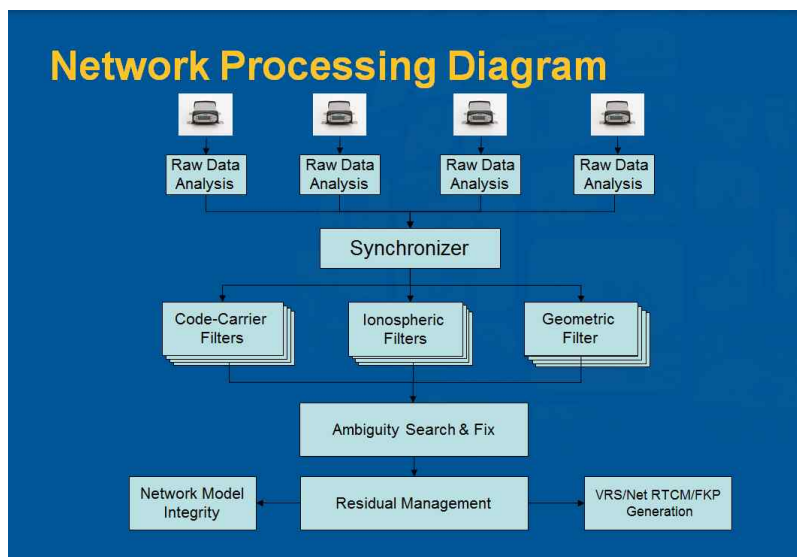


그림 1. Network RTK 프로세싱 과정 [2]
Fig. 1. Network RTK Processing Diagram [2]

간이 길다는 단점이 있어 기준국간 미지정수 결정에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 기준국간 미지정수 결정에 사용될 수 있는 방법으로 Hatch Filtering에 의한 검색과 L1/L2 조합에 의한 검색 방식을 고려하고, 그 결과를 비교함으로써 현실적으로 시스템에 적용 가능한 기법을 검토하고자 한다.

II. Network RTK 프로세스

2-1 Network RTK 보정정보 생성 프로세스

기준국의 좌표는 일반적으로 24시간 연속데이터 측정치를 이용하여 3차원으로 정밀하게 측정한다. rover가 cm 레벨의 정확도를 달성하기 위해서는 네트워크 내에 있는 모든 기준국이 원하는 결과보다 더 좋은 네트워크 정확도를 가져야 한다.

이와 같은 정확도로 기준국의 3D 위치 벡터가 결정되면, 측정치 방정식에서 기준국의 위치는 알고 있는 항으로 간주한다. 이를 바탕으로 모든 가시위성에 대해 기준국간 미지정수를 결정하면, 이중 차분된 반송파 위상은 이중 차분된 위상 range 측정치와 동일해진다. 또한 한번 미지정수가 결정되면, 네트워크 내의 common ambiguity level을 유지하는 알고리즘 등을 통해 그 값이 고정되고 서비스 제공의 연속성이 보장되므로 기준국간 이중차분 미지정수의 결정은 Network RTK 프로세스 중 가장 핵심 과정이라고 할 수 있다.

그러나 기준국간 기선 거리가 멀어질수록 공간 비상관(Spatially-decorrelation) 오차에 의해 미지정수 해결 과정이 오래 걸리게 되므로 즉각적인 미지정수의 결정은 불가능하다. 이와 같은 네트워크의 초기화 시간 동안 기준국 네트워크 서버는 보정정보를 생성할 수 없고, 사용자는 보정정보를 제공받을 수 없으므로 네트워크를 활용한 방법이 불가능하다. 따라서 실시간 서비스 운영을 위해 신속하고 정확한 미지정수의 결정 방법이 필수적이며, 이를 해결하기 위한 목적으로 수년간 다양한 기법이 연구되고 있다.

2-2 Network RTK 측정치 기준국 간 이중차분

Network RTK 기준국간 측정치의 이중차분을 수식으로 전개하면 다음과 같다.

$$\nabla \Delta \phi = \nabla \Delta d + \nabla \Delta (-I + T + \delta R) + \nabla \Delta N\lambda + \nabla \Delta \epsilon \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 반송파 측정치, ∇ 는 위성간 차분, Δ 은 기준국-사용자간 차분, d 는 위성-기준국간 거리, I 는 전리층 오차, T 는 대류층 오차, δR 은 위성 궤도 오차, N 은 반송파 측정치 미지정수, λ 는 반송파 파장, ϵ 는 측정치 잡음을 뜻한다.

GPS 기준국간 거리가 10km 이상 멀리 떨어질 경우 반송파 위상 측정치의 오차가 반송파 위상의 반 파장을 넘는 경우가 발생할 수 있으므로 공간 비상관 오차를 제거하지 않는 미지정수의 결정은 불가능하다.

식(1)에서 $\Delta \nabla d$ 는 기준국의 정밀 좌표 산출로 추정 가능하고, $\Delta \nabla \epsilon$ 는 gaussian 분포라고 가정하며 $\Delta \nabla \delta R$ 는 타 오차 성분에 비해 그 영향이 크지 않으므로, 정확한 $\Delta \nabla N$ 를 결정하기 위해서는 대기권 오차 이중차분의 정확한 추정이 필수적이다.

III. Hatch Filter를 이용한 Network RTK

기준국간 이중차분 미지정수 결정 방법

3-1 기준국간 이중차분 미지정수결정 알고리즘

식 (1)의 $\Delta \nabla N$ 결정을 위해서 $\Delta \nabla I$ 와 $\Delta \nabla T$ 추정이 필요하다. 대류층 오차의 경우 다양한 모델을 적용할 수 있으나, 이중차분될 경우 그 절대값보다는 위성 양각에 의한 영향이 지배적이어서 $\Delta \nabla T$ 값은 모델별로 대동소이하므로 본 논문에서는 적용이 간단한 WAAS model[8]을 사용한다.

전리층은 아래 식과 같이 코드와 반송파로 각각 추정이 가능하다. 식(2)와 같이 코드에 의한 추정의 경우 잡음의 크기는 sub-meter 혹은 meter 수준이지만, 추정치의 bias는 존재하지 않는다. 반면, 식(3)과 같이 반송파에 의한 추정의 경우 cm 수준의 정밀한 추정은 가능하지만 미지정수에 의한 bias가 포함되어 이를 추정해야만 전리층의 추정이 가능하다.

$$\hat{I}_{\rho}^i = \frac{\rho_{L1}^i - \rho_{L2}^i}{\gamma - 1} \quad (2)$$

$$\hat{I}_{\phi}^i = \frac{\phi_{L1}^i - \phi_{L2}^i}{\gamma - 1} - \frac{\lambda_1 \hat{N}_1^i - \lambda_2 \hat{N}_2^i}{\gamma - 1} \quad (3)$$

여기서, ρ 는 코드 측정치, 아래첨자 L1/L2는 각각 L1/L2 주파수, $\hat{}$ 는 추정치, $\gamma = (\frac{f_{L1}}{f_{L2}})^2$

따라서 위의 식을 조합하되, 코드에 포함된 측정치 잡음을 줄이기 위하여 Divergence-free Hatch-filter 가 적용된 $\tilde{\rho}$ 를 다음 식과 같이 이용한다.

$$\frac{\lambda_1 \hat{N}_1^i - \lambda_2 \hat{N}_2^i}{\gamma - 1} = \frac{\phi_{L1}^i - \phi_{L2}^i}{\gamma - 1} - \frac{\tilde{\rho}_{L1}^i - \tilde{\rho}_{L2}^i}{\gamma - 1} \quad (4)$$

이후 (4)를 (3)에 적용하여 정밀한 \hat{I}_{ϕ}^i 를 구하여 식 (1)에 대입한다.

3-2 측정치를 이용한 성능 평가

Hatch filter를 이용한 이중차분 미지정수 결정의 유효성 검증을 위하여 다음 그림과 같이 진천, 척북, 천안, 청원 지역에 설치된 간이 기준국과 네트워크의 중심인 오창 지역에 사용자로 가정하여 설치된 수신기 데이터를 사용하였다. 데이터 저장에 사용된 수신기는 Novatel OEM이고 2011년 7월 22일 약 3시간 데이터를 로깅하였다.

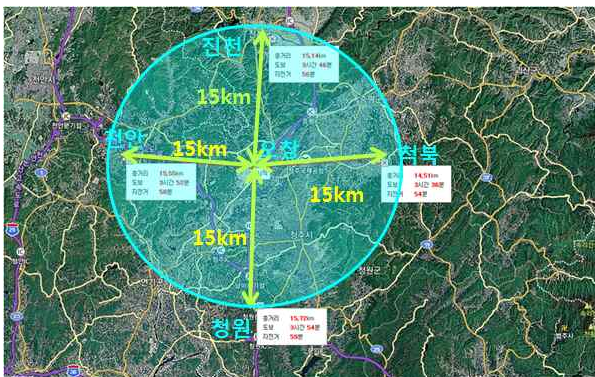


그림 2 GPS 기준국 배치도
Fig. 2. Map of GPS Reference Station

성능 검증을 위해 다중 기준국 네트워크에서 거리에 반비례한 가중치를 두어 생성한 보정정보와 사용자 위치에서 생성한 보정정보의 차이값을 확인하였다. 또한, 네트워크에 의한 공간 비상관 오차 감소량을 확인하기 위하여 단일 기준국 보정정보를 사용한 경우 잔여 오차도 함께 계산하였고 그 결과는 아래 그림과 같다.

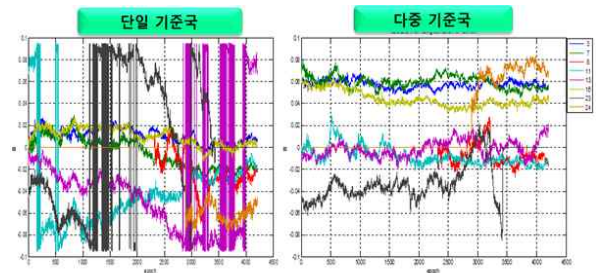


그림 3. Hatch Filter에 의한 기준국간 미지정수 결정시 공간비상관 오차 감소(좌:Single RTK, 우: Network RTK)
Fig. 3. Decrease of Spatial Decorrelation Error due to the Ambiguity Determination of RS Network by Hatch Filter (Left: Single RTK, Right: Network RTK)

단일 기준국 기반 보정정보를 적용할 경우에 비해 다중 기준국 기반 보정정보의 경우 PRN 11, 13, 23 위성 측정치의 잔차가 반파장 이상이 되고 시간에 대해서도 계속 변하여 rover의 미지정수 결정에 지장을 초래할 수 있다. 그러나 Hatch filtering된 의사거리를 이용하여 Network RTK 보정정보를 사용자에 적용할 경우 모든 위성 측정치 잔차가 반파장 이내로 줄어들고 시간에 대해서도 그 값이 대부분 일정하여 rover의 미지정수 결정이 용이하다. 다만, 사용자 잔여오차가 0에 가까워야 참(true) 위치에 가까운 결과를 산출할 수 있는데, 위성별로 상당한 크기의 바이어스 오차가 포함되다는 것을 확인할 수 있다. 이는 주-부 기준국간 차분된 보정정보 추정시 이중 차분된 미지정수가 정확하게 추정되지 못해서 생기는 오차로 추정된다.

이에 대한 분석을 위해 상기 데이터 중 PRN3-19 조합의 코드와 반송파에 의해 추정된 전리층 오차의 이중차분 값을 기준국별로 비교하였다. 용이한 비교를 위하여 반송파에 포함된 bias 항을 코드에 의한 전리층 추정치의 초기항으로 세팅하여 도시하였고, 결과는 다음 그림과 같다.

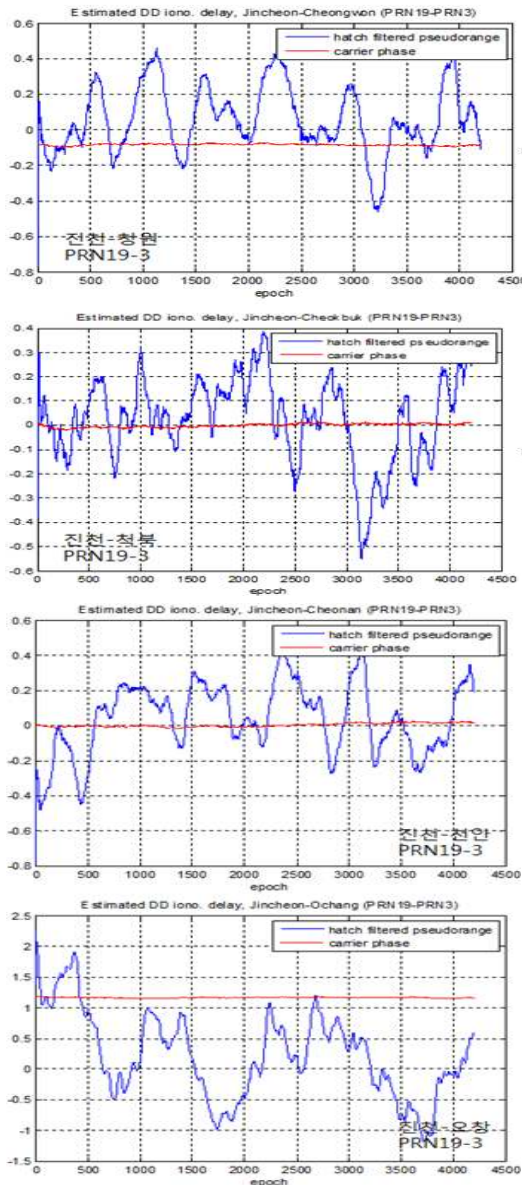


그림 4. 코드와 반송파 측정치에 의해 추정된 전리층 오차(m) 비교

Fig. 4. Ionospheric Delay Estimation by Code and Carrier Observables

위 그림에서 확인할 수 있듯이, phase와 code에 의해 추정된 전리층 오차의 경향성은 매우 상이하다. 전반적으로 코드에 의한 추정이 반송파와는 다른 주기성을 띄고 있는 것으로 미루어 multi-path에 의한 것으로 추정되며, 그 크기도 약 0.4m~2.5m 수준에 까지 달해 19cm/24.4cm의 반송파 파장으로는 검출이 불가능하다. 일반적으로 code에 인가되는 multipath는 0.2~3m 수준이고[9], L2의 경우 그 크기가 더 커지기 때문에, 코드 기반의 전리층 추정치가 미지정수 결정

에 영향을 끼칠 경우 정확한 결정이 어려울 것으로 판단된다. 반면 phase의 경우 multi-path가 0.001~0.03m 수준으로 code에 비해 그 영향이 매우 작으므로 코드 정보를 배제한 반송파만을 이용하여 산출할 수 있는 방안을 모색할 필요가 있다.

IV. L1/L2 측정치 조합을 이용한 Network RTK 기준국간 이중차분 미지정수 결정 방법

4-1 기준국간 이중차분 미지정수결정 알고리즘

한 파장의 길이가 각각 19cm, 24.4cm인 L1, L2 반송파의 다양한 선형 조합을 이용하면 새로운 측정치를 생성할 수 있고, 대표적인 예는 두 반송파의 차인 wide-lane과 합인 narrow-lane이다.

L1/L2 반송파 측정치의 (n,m) 조합을 일반적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\lambda_1 \lambda_2}{n \lambda_2 + m \lambda_1} \phi_{n,m} = d + \delta R + T + B - b - \frac{n \lambda_2 I_1 + m \lambda_1 I_2}{n \lambda_2 + m \lambda_1} + \frac{n \lambda_2 \epsilon_{\phi,1} + m \lambda_1 \epsilon_{\phi,2}}{n \lambda_2 + m \lambda_1} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{n \lambda_2 + m \lambda_1} (n N_1 + m N_2) \quad (5)$$

이를 아래와 같이 새롭게 정의하자.

$$\frac{\lambda_1 \lambda_2}{n \lambda_2 + m \lambda_1} \phi_{n,m} \equiv \lambda_{n,m} \cdot \phi_{n,m} = \Phi_{n,m} \quad (6)$$

여기서 새로운 측정치인 $\Phi_{n,m}$ 는 $\frac{n \lambda_2 \phi_1 + m \lambda_1 \phi_2}{n \lambda_2 + m \lambda_1}$ 이고, 파장의 길이 $\lambda_{n,m}$ 는 $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{n \lambda_2 + m \lambda_1}$ 이 된다.

이를 다시 GPS 측정치의 일반식으로 표현하여 기술하면 아래 식과 같고,

$$\Phi_{n,m} = d + \delta R + T - I_{n,m} + B - b + \lambda_{n,m} \cdot N_{n,m} + \epsilon_{\Phi,n,m} \quad (7)$$

새로운 미지정수는 $n N_1 + m N_2$, 전리층 오차($I_{n,m}$)는 $\frac{n \lambda_2 I_1 + m \lambda_1 I_2}{n \lambda_2 + m \lambda_1}$, 잡음 수준($N_{n,m}$)은 $\frac{n \lambda_2 \epsilon_{\phi,1} + m \lambda_1 \epsilon_{\phi,2}}{n \lambda_2 + m \lambda_1}$ 으로 변경된다. 선형 조합에 의한 전리층 오차와 잡음 수준은 아래 두 식으로 재정의가 되고 각각 ISF(Ionospheric Scale Factor)와 NSF(Noise Scale Factor)로 간략하게 표현할 수 있다.

$$I_{n,m} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left(\frac{n\lambda_1 + m\lambda_2}{n\lambda_2 + m\lambda_1} \right) I_1 = ISF \cdot I_1 \quad (8)$$

$$N_{n,m} = \frac{\lambda_2 \sqrt{n^2 + m^2}}{n\lambda_2 + m\lambda_1} \varepsilon_{\phi,1} = NSF \cdot \varepsilon_{\phi,1} \quad (9)$$

이러한 선형 조합 측정치는 wide-lane과 narrow-lane이 가장 널리 활용되고 있지만, 용도에 따라 다양하게 조합이 가능하고 대표적인 조합과 각각의 특성은 아래 표에 기술되어 있다.

표 1. L1/L2 측정치 조합
Table 1. L1/L2 Combination

| n | m | $\lambda_{n,m}$ (cm) | ISF | NSF |
|-----|----|----------------------|-------|-------|
| -14 | 18 | 732.6 | 350.4 | 877.9 |
| -7 | 9 | 1465.3 | 350.4 | 877.9 |
| -3 | 4 | 162.8 | 18.2 | 42.8 |
| -2 | 3 | 56.4 | 5.5 | 10.7 |
| -1 | 2 | 34.1 | 2.8 | 4.0 |
| 0 | 1 | 24.4 | 1.6 | 1.3 |
| 1 | -1 | 86.2 | -1.3 | 6.4 |
| 1 | 0 | 19.0 | 1.0 | 1.0 |
| 1 | 1 | 10.7 | 1.3 | 0.8 |
| 2 | -2 | 43.1 | -1.3 | 6.4 |
| 4 | -3 | 11.4 | 0.09 | 3.0 |
| 5 | -4 | 10.1 | -0.07 | 3.4 |

wide-lane(n=1, m=-1)의 경우 noise 수준이 약 6.4배 증가가 되지만, 파장의 길이가 늘어나 공간 비상관 오차에도 미지정수의 결정이 용이하다. narrow-lane (n=1,m=1)의 경우 noise 수준이 줄어든다는 점은 미지정수 결정에 유리하지만, 파장의 길이가 L1의 반파장 수준으로 줄어 비상관 오차에 의해 잘못된 미지정수가 결정될 확률이 높다. 대표적인 iono-free 조합인 n=4, m= -3과 n=5, m= -4 조합의 경우 noise 수준은 L1의 약 3배 수준으로 증가하기는 하지만, 전리층의 영향이 약 1/10 수준으로 떨어지므로 비상관 오차의 영향을 줄일 수 있어 기준국간 미지정수 결정에 활용하기 용이하다.

따라서 wide-lane 조합과 iono-free 조합이 비상관 오차에도 미지정수 결정이 용이한 조합으로 판단되며, 이를 수식으로 정리하면 아래 식과 같다.

$$\Delta \nabla N_{1,-1} = \Delta \nabla \left(\frac{\Phi_{1,-1} - d - \delta R - T + I_{1,-1}}{\lambda_{1,-1}} \right) \quad (10)$$

$$\Delta \nabla N_{4,-3} = \Delta \nabla \left(\frac{\Phi_{4,-3} - d - \delta R - T + I_{4,-3}}{\lambda_{4,-3}} \right) \quad (11)$$

이후 (10)과 (11)을 재조합하면 L1/L2 이중차분 미지정수인 $\Delta \nabla N_1$ 과 $\Delta \nabla N_2$ 결정이 최종적으로 가능하다. 특히 상기 방법에는 코드 측정치가 포함되지 않으므로 multi-path의 영향이 Hatch filter를 이용한 방법보다 적다.

4-2 시뮬레이션을 이용한 성능 평가

알고리즘 검증을 위하여 4개의 기준국에 대하여 반송파 측정치를 생성하고, 임의로 생성된 미지정수를 각 측정치에 포함시켰다. 11번 위성을 기준으로 이중차분된 참(true) 미지정수를 정리한 표는 아래와 같다.

표 2. 기준국별 이중차분 참(true) 미지정수
Table 2. True Ambiguity of Double-difference Measurement between RSs

| RS 조합 | | 주-부1 | 주-부2 | 주-부3 |
|----------------|-------|---------|---------|---------|
| L1 위성 조합 | 3-11 | -328482 | -207883 | -404441 |
| | 7-11 | -278642 | -27906 | -215450 |
| | 8-11 | -128178 | 224817 | -76190 |
| | 17-11 | -248622 | -85739 | -213978 |
| | 19-11 | -45452 | -57532 | -245627 |
| | 20-11 | -23363 | 270202 | 103876 |
| | 25-11 | -20413 | 221029 | -77713 |
| | 27-11 | 20114 | 334376 | -107377 |
| | 28-11 | -179422 | 117214 | -136902 |
| | 32-11 | -318974 | -124101 | -307436 |
| L2 위성 조합 | 3-11 | 374446 | 277839 | 8279 |
| | 7-11 | 326246 | 114261 | -64844 |
| | 8-11 | 100962 | -78422 | -161865 |
| | 17-11 | 490035 | 366632 | 61272 |
| | 19-11 | 338693 | 213295 | 145472 |
| | 20-11 | 566890 | 281842 | 317710 |
| | 25-11 | 353849 | 184007 | 213465 |
| | 27-11 | 268092 | 262420 | 67075 |
| | 28-11 | 124664 | 49100 | 130243 |
| | 32-11 | 340857 | 60930 | 170579 |

식(10)과 (11)을 이용하여 wide-lane과 iono-free 측정치 조합의 이중차분된 미지정수를 결정한 후, 잔차를 도시하면 각각 그림 5. 6.과 같다. 아래 그림에서 확인할 수 있듯이 wide-lane 측정치는 전리층 비상관 오차가 완벽히 제거되지 않더라도 기본 파장의 길이가 매우 크므로 0.1 파장 이내로 값이 제한적이고, iono-free 측정치는 전리층 비상관 오차의 영향이 최소화되어 크기가 0.1 파장 수준인 잡음과 유사한 형태로 잔차가 형성됨을 확인할 수 있다.

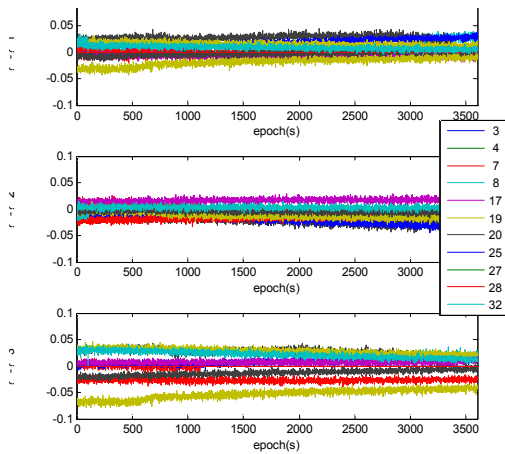


그림 5. wide-lane을 이용한 미지정수 추정후 residual
Fig. 5. Residual after Ambiguity Determination of Wide-lane Observables

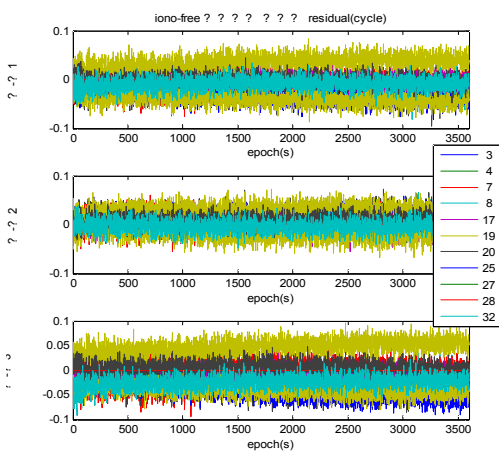


그림 6. Iono-free을 이용한 미지정수 추정후 residual
Fig. 6. Residual after Ambiguity Determination of Iono-free Observables

이상의 결과를 이용하여 매 epoch에서 산출한 미지정수와 참 미지정수의 차이를 산출하였고, 아래 그림의 결과와 같이 모든 예폭에서 이중차분 미지정수를 참값과 동일하게 산출하였다.

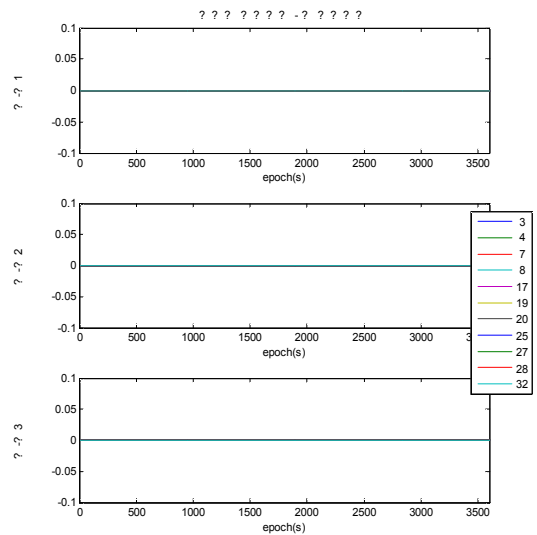


그림 7. 추정된 미지정수와 참 미지정수 차이
Fig. 7. Difference of Ambiguity between Estimated and True Values

4-3 측정치를 이용한 성능 평가

앞 절에서 시뮬레이션을 통해 검증한 알고리즘을 3장에서 사용한 실측 데이터에 적용한 결과는 아래와 같다.

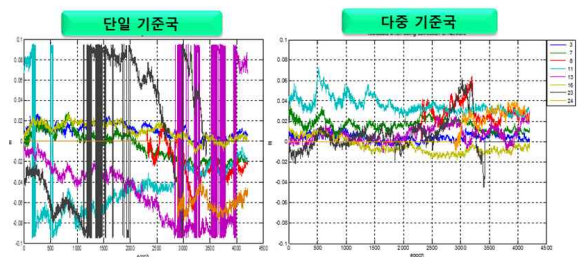


그림 8. L1/L2 측정치 조합에 의한 기준국간 미지정수 결정시 공간비상관 오차 감소(좌:Single RTK, 우: Network RTK)
Fig. 8. Decrease of Spatial Decorrelation Error due to the Ambiguity Determination of RS Network by L1/L2 Observable Combination (Left: Single RTK, Right: Network RTK)

코드 측정치가 포함된 Hatch filter 방식에 비해 사용자에 발생하는 오차의 크기가 훨씬 감소함을 확인할 수 있고 잔차의 크기도 반파장 이내로 사용자의 미지정수를 변화시키지 않는 수준임도 확인할 수 있다. 또한 잔차의 경향성도 이전 결과에 비해 훨씬 줄어들어 미지정수의 결정 성능도 향상될 것으로 보인다.

이상의 잔차 결과를 위치영역으로 투영한 결과는 아래 그림과 같다. 단일 기준국 보정정보 수신시 약 18cm까지 오차가 커졌던 사용자 수평 위치가 L1/L2 측정치 조합에 의해 결정된 미지정수를 바탕으로 생성된 network RTK 보정정보 수신으로 인해 5cm 이하로 감소함을 확인할 수 있다.

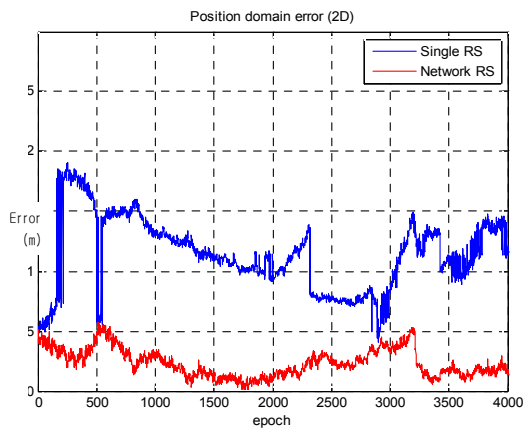


그림 9. 사용자 위치영역 잔여오차 (2D)
Fig. 9. Position Domain (2D) Error of Rover

V. 결 론

본 논문은 Network RTK 보정정보 생성에 필수적인 기준국간 측정치 이중차분 미지정수 결정에 활용 가능한 기법에 대해 분석하였다. 활용 가능한 기법으로 Hatch Filtering된 코드에 의한 전리층 추정치를 이용하는 방법과 L1/L2 반송파 조합을 이용하는 방법을 고려하였다.

Hatch Filter에 의한 방식은 이론에 적합하고 직관적이나 코드의 multipath 특성상 실제 데이터에 적용하기는 어려울 것으로 판단된다. 반면 L1/L2 측정치 조합에 의한 방식의 경우 코드 값을 사용하지 않으므로 multipath의 영향이 적고, wide-lane과 iono-free 조

합 이용시 비상관 오차에 의한 부정확한 미지정수 결정도 방지할 수 있다.

분석결과 잔차의 크기가 반 파장 이내로 제한되어 있고, 위치 영역 투영시 기존 18cm의 수평오차를 5cm 이하로 줄일 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 위성항법기반 교통인프라 기술개발 연구개발사업의 연구비지원(06교통핵심 A03)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 박병운, “보정 정보의 국제표준을 고려한 위성항법 보강시스템의 시공간 오차 감소 방안 연구”, 서울대학교 공학박사 학위논문, 기계항공공학부, 2008.
- [2] Chen., X. (2009) “VRS Network The Magic Behind the Scene”, *Trimble Dimensions 2009*, Las Vegas
- [3] Blewitt, G., Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines up to 2000km, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, No. B8, pp.10,187-10,203, August 10, 1989.
- [4] Gao, Yang and Li, Zuofa(1999) “Cycle Slip Detection and Ambiguity Resolution Algorithms for Dual-Frequency GPS Data Processing”, *Marine Geodesy*, 22: 3, 169 . 181
- [5] Colombo, Oscar L., Hernandez-Pajares, Manuel, Juan, J. Miguel, Sanz, Jaume, Talaya, Julia, “Resolving Carrier-Phase Ambiguities On The Fly, At More Than 100 km From Nearest Reference Site, With The Help Of Ionospheric Tomography,” *Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999)*, Nashville, TN, September 1999, pp. 1635-1642.

- [6] Takasu, T., Yasuda, A., “Kalman-Filter-Based Integer Ambiguity Resolution Strategy for Long-Baseline RTK with Ionosphere and Troposphere Estimation,” *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010)*, Portland, OR, September 2010, pp. 161-171.
- [7] Yanase, T., Tanaka, H., Ohashi, M., Kubo, Y., Sugimoto, S., “Long Baseline Relative Positioning with Estimating Ionosphere and Troposphere Gradients,” *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010)*, Portland, OR, September 2010, pp. 196-206.
- [8] RTCA, 2001. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment. RTCA/DO-229C. Prepared by SC-159. November 28, 2001.
- [9] Lachapelle, G. (1997), Lecture notes of GPS Theory and applications, *The University of Calgary*, Fall 1997.

송 준 솔 (宋俊率)



2008년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
 2008년 9월~현재 : 서울대학교 기계항공공학부(박사과정)
 관심분야 : 위성항법, RTK, 측량

기 창 돈 (奇昌敦)



1984년 2월 : 서울대학교 항공공학(공학사)
 1986년 2월 : 서울대학교 항공공학(공학석사)
 1994년 1월 : 미국 Stanford University 항공우주공학(공학박사)
 1996년 9월~현재 : 서울대학교

기계항공공학부 교수
 관심분야 : 위성항법, WADGPS, RTK, 의사위성, 무인항공기, 수신기

박 병 운 (朴秉運)



2001년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
 2003년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(공학석사)
 2008년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(공학박사)
 2008년 2월~2010년 5월 : 서울대학교

차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단BK21 연수연구원

2010년 5월~현재 : 대한지적공사 지적연구원 선임연구원
 관심분야 : 위성항법, RTK, 측량