

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(9), 757-765(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.9.757

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

사용자 위치해 정확도 향상을 위한 가상위성 및 가상거리측정값 생성

송충원*, 안종선***, 최문석*, 장진혁*, 허문범***, 이영재**

Virtual Satellite and Virtual Range Measurement Generation
for the GNSS Position Accuracy ImprovementChoongwon Song*, Jongsun Ahn***, Moonseok Choi*, JinHyeok Jang*,
MoonBeom Heo*** and Young Jae Lee**

Konkuk University*’**, KARI(Korea Aerospace Research Institute)***

ABSTRACT

GNSS (Global Navigation Satellite System) Position Accuracy depends on pseudo-range measurement and DOP (Dilution Of Precision) which indicates about navigation satellite geometry. Pseudo-Range has many error sources such as satellite clock, orbit, ionosphere, troposphere, multipath and so on. For the improvement of the accuracy, user can use corrected pseudo-range in DGPS (Differential Global Positioning System), which is one of the relative positioning methods. But, stationary station is needed in relative positioning. In case of DOP, Signal reception environment is important. If receiver sets in the center of city, it could be interrupted reception by buildings. This environment leads to decrease the number of visible satellites and to increase DOP. This paper proposes the concept of GNSS positioning with virtual satellites which have usable VRM (Virtual Range Measurement). Via virtual satellites and VRM, users could get an accurate position. Especially referred virtual satellites constellation has an effect on vertical error.

초 록

위성항법시스템 (GNSS: Global Navigation Satellite System)으로 계산되는 위치 정확도는 위성 의사거리 (Pseudo-Range) 측정값 정확도와 DOP (Dilution of Precision) 으로 표현되는 위성의 배치관계를 통해 결정된다. 위성의 의사거리 측정값은 위성 시계, 궤도, 전리층, 대류층, 다중경로 등 여러 요인에 의해 오차가 발생하게 되며, 사용자 의사거리정확도를 향상을 위해서는 정확한 의사거리 측정값이 필요하다. 반면, 위성의 배치의 경우, 사용자의 수신환경에 따라 위치 정확도가 달라진다. 예를 들어, 고층 빌딩이 많은 도심의 경우에는 위성전파 차단 위험이 많아 가상위성의 수가 감소하고 개활지에 비해 상대적으로 양호한 DOP를 가지기 어렵다. 본 논문은 가상위성 (Virtual Satellite)을 통해 DOP 성능 개선과 의미있는 가상거리측정값 (VRM: Virtual Range Measurement) 정확도를 확보하여, 위치 정확도 향상 시키는 방법에 대해 연구하였다. 그 결과 적절한 가상위성배치와 정확한 가상거리측정값을 이용하면 수직위치 정확도의 개선 효과를 얻을 수 있었다.

Key Words : GNSS(위성항법시스템), Pseudo-Range(의사거리), DOP, Virtual Satellite(가상위성), Virtual Range Measurement(가상거리측정값)

† Received : December 7, 2016 Revised : August 2, 2017 Accepted : August 3, 2017

** Corresponding author, E-mail : younglee@konkuk.ac.kr

I. 서론

위성항법시스템(GNSS)은 위성을 이용하여 사용자가 원하는 위치, 방향 등 항법에 대한 정보를 제공해주는 시스템으로 최근 급속도로 발달한 IT기술의 보급으로 인해 누구나 실생활에서 그 혜택을 받고 있다. 또한, 미국의 GPS에만 의존하던 과거와 달리, 현재 세계 각국의 노력을 통해 러시아, 중국, EU등에서 위성항법시스템을 운용 및 구축 중에 있다. 이러한 위성항법시스템은 최소 4개의 가시위성이 존재할 때 사용자의 3차원 위치해를 얻을 수 있는데 그 정확도는 위성의 의사거리 측정값 정확도와 배치관계를 통해 결정된다. 의사거리는 위성 신호를 수신기에서 수신하여 측정된 위성과의 수신기간의 거리로 그 오차요인으로는 위성 시계, 궤도, 전리층, 대류층, 다중경로 등이 있다[5]. 위성의 배치와 위치해의 관계는 사용자 수신기를 기준으로 가시위성의 기하학적 분포에 따라 위치해에 미치는 영향을 수치화한 값인 DOP을 통해 나타낸다[9]. DOP은 가시위성의 분포 정도와 가시위성수에 따라 값이 변한다. 일반적으로 개활지에서는 물리적 장애물로 인한 신호 차폐가 발생하지 않아 좋은 DOP을 갖는 가시위성군을 확보할 수 있지만, 고층건물이 많은 도심지역에서는 건물의 외벽 등 여러 요소로 인해 위성의 신호가 감쇄, 차단되는 경우가 발생하여 가시위성의 수가 감소하게 된다[6]. 가시위성의 감소로 인한 DOP의 저하는 사용자 위치해 정확도의 감소를 유발하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방책으로 의사위성(Pseudolite), 가상위성(Virtual Satellite)을 이용하는 위치추정 방법들이 연구되어 왔다. 의사위성이란, 가상의 인공위성이란 의미로 지상에 설치되어 GNSS와 같은 형식의 신호를 생성하는 기기를 말하는 것으로 사용자가 위성과 동일시하여 위치해를 구할 수 있어, 4개미만의 가시위성이 존재할 때에도 사용자 위치추정이 가능하다[1, 2]. 가상위성(M. Femminella, 2015)은 실제 위성이 아닌 무선 AP(Access Point) 중계기가 위성의 역할을 하여 도심이나 실내 환경에서의 측위를 수행하고 응급상황에 대처하는 방법을 제안하였다[3]. 이같은 방법들은 가시성 저하로 인한 GNSS의 한계를 극복하는 대안으로 사용가능하나 위성의 역할을 대체하는 별도의 설비를 구축해야 사용할 수 있다는 단점이 있다. 이와는 다른 개념의 가상위성(I. Kim, 1998)도 있는데 실제로 존재하지 않는 위성을 임의의 공간상에 존재한다 가정하여 측위에 이용하는 방법이다. 이

때 가상위성이 갖는 가상의사거리(Virtual Pseudo-range)는 이전 시간에 추정된 위치와 가상위성간 거리의 값을 가진다. 이 방식은 별도의 장비를 이용하지 않으므로 적용이 간단하며 추가적인 비용이 들지 않는다는 이점이 있다. 하지만, 동적환경 사용자의 속도가 큰 경우 가상의사거리 오차가 증가하여 사용하기 적합하지 않다는 단점이 있다[4].

본 논문에서는 (I. Kim, 1994)에서 사용한 가상위성(Virtual Satellite: 이하 VS) 개념을 이용하여 위치해를 개선하는데 가상위성을 사용하는 연구를 수행하였다. 가상위성은 실제위성과 달리 우주상 어느 지점에라도 자유롭게 배치할 수 있다는 장점이 있어 위성의 DOP을 개선할 수 있다. 특히, 실제 위성의 경우 물리적 한계로 양각이 0° 이하인 위성의 정보를 사용할 수 없지만 가상위성은 그와 달리 실제 관측이 불가능한 위치에도 배치시킬 수 있는 이점이 있다. 또한 가상의사거리 대신 사용자 속도에 따른 영향이 없는 가상거리측정값(Virtual Range Measurement: 이하 VRM)을 생성하여 위치해를 추정하였으며, 만약 실제 의사거리에 준하는 가상거리측정값을 생성할 수 있으면 위치해 정확도의 향상을 기대할 수 있다.

따라서 본문에서는 위치해 정확도 향상을 위한 가상위성의 배치 및 가상거리측정값 생성방법을 제시하였다. 또한 가상위성 적용시 계산되는 위치해의 특성에 대해 분석하였으며, 제안한 가상위성 배치를 통해 수직위치 정확도가 개선되는 결과를 확인하였다.

본문은 2.1절에서 먼저 가상위성 및 가상거리측정값에 대해 설명과 가상위성의 배치방법에 대해 설명하였다. 2.2절에서는 가상거리측정값오차를 줄이기 위한 공칭점(Nominal Point)의 결정방법에 대해 논하였으며 2.3절에서는 제안하는 가상위성 배치 및 가상거리측정값을 이용하여 실제 위치해의 개선 효과에 대해 확인하였다.

II. 본론

2.1 가상위성 배치 및 가상거리측정값 생성

본 논문에서 말하는 가상위성이란 실제로 존재하지 않는 위성으로, 위치좌표와 가상거리측정값을 지니는 가상의 위성을 의미한다. 가상위성은 사용자 위치해 추정에 있어서 실제 위성과 동일한 역할을 하게 되며, 이를 통해 가시성이 향상된 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 따라서, 가

상위성의 배치를 통해 DOP을 향상시킬 수 있으며, 만약 실제 위성의 의사거리측정값과 유사한 수준의 정확도를 갖는 가상거리측정값을 생성할 수 있다면 위치해 향상에 기여할 수 있다. 가상거리측정값은 가상위성과 대략적인 사용자 위치간의 기하거리 값을 의미한다. 대략적인 사용자 위치를 본 논문에서는 공칭점 (Nominal Point: 이하 NP)이라 정의하였다. 따라서, 가상거리측정값의 정확도는 NP의 위치에 따라 결정된다. 수신기를 통해 계산되는 실제 위성의 의사거리와 달리 가상거리 측정값은 두 지점의 기하거리로 결정되므로 일반적으로 알려진 의사거리 오차모델링을 사용할 수 없다. 즉, 가상거리측정값은 수신기의 시계오차를 포함하지 않는다.

위성항법시스템에서 사용자의 위치오차 (ΔX)는 가상위성 위치와 사용자 위치간의 단위 시선각 벡터 행렬(H)과 의사거리측정값 오차 (Δy)를 이용하여 식(1)과 같이 최소자승법을 이용하여 계산할 수 있다. 만약, 정확도가 높은 가상거리측정값을 확보할 수 있다면 DOP의 개선효과와 결합되어 위치 정확도도 향상될 수 있는 것이다.

$$\begin{aligned} \Delta X &= (H^T H)^{-1} \Delta y & (1) \\ \Delta X &= [\Delta x, \Delta y, \Delta z, dt]^T \\ H &= \begin{bmatrix} h_x^j, h_y^j, h_z^j, 1 \\ h_x^v, h_y^v, h_z^v, 0 \end{bmatrix} \\ \Delta y &= \begin{bmatrix} \rho_r^j \\ \rho_r^v \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$: 측별 사용자 위치오차, dt : 수신기 시계오차
 $h_{x,y,z}^j$: 실제 위성 시선각 벡터, $h_{x,y,z}^v$: 가상 위성 시선각 벡터
 ρ_r^j : 실제 위성 의사거리, ρ_r^v : 가상거리측정값 (VRM)

2.1.1 가상거리 측정값 오차 ($\Delta \rho^v$)

정확도가 높은 가상거리측정값 확보를 위해 실제 수신기 위치 (Actual Position: 이하 AP), VS, NP를 Fig. 1과 같이 배치한 후 가상거리측정값

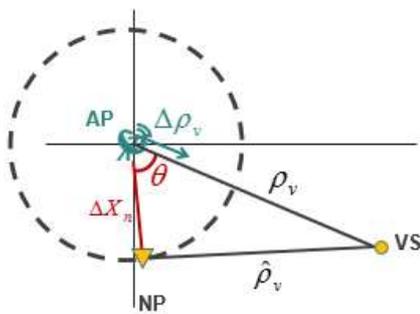


Fig. 1. Geometry of the virtual range measurement

오차 ($\Delta \rho^v$)에 대해 수식으로 나타내었다.

θ 는 (VS-AP-NP 사이 각), ΔX_n 은 AP-NP 거리, ρ^v 는 AP-VS 거리이다. $\hat{\rho}^v$ 는 NP-VS 거리 즉 가상거리측정값의 크기이다. 각 좌표는 AP (x_a, y_a, z_a) = (0, 0, 0), VS(x^v, y^v, z^v), NP (x_n, y_n, z_n)로 설정하였다. 이때 $\Delta \rho^v$ 는 식(2)와 같이 표현 가능하다.

$$\Delta \rho^v = \rho^v - \hat{\rho}^v \quad (2)$$

식(3)은 각 좌표를 이용해 거리 계산식으로 나타낸 것이다. 식(4)는 두 거리 값에 대해 각각 제곱을 한 식을 전개하여 정리한 것이다.

$$\rho^v - \hat{\rho}^v = \sqrt{x^{v^2} + y^{v^2} + z^{v^2}} - \quad (3)$$

$$\sqrt{(x_n - x^v)^2 + (y_n - y^v)^2 + (z_n - z^v)^2}$$

$$\rho^{v^2} - \hat{\rho}^{v^2} = x^{v^2} + y^{v^2} + z^{v^2} - (x_n - x^v)^2 - (y_n - y^v)^2 - (z_n - z^v)^2 \quad (4)$$

$$(\rho^v + \hat{\rho}^v)(\rho^v - \hat{\rho}^v) = -(x_n^2 + y_n^2 + z_n^2) - 2(x_n x^v + y_n y^v + z_n z^v)$$

식(4)의 좌변을 식(2)와 같이 정리하면 식 (5)와 같다. 이때 $\Delta \vec{X}_n$ 은 AP에서 NP까지의 벡터, $\vec{\rho}^v$ 는 AP에서 VS까지의 벡터이다. 식(5)를 통해 가상거리측정값의 정확도 향상을 위한 조건에 대해 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \rho^v = \rho^v - \hat{\rho}^v &= \frac{-(x_n^2 + y_n^2 + z_n^2) + 2(x_n x^v + y_n y^v + z_n z^v)}{\rho^v + \hat{\rho}^v} \\ &= \frac{-\Delta X_n^2 + 2(\Delta \vec{X}_n \cdot \vec{\rho}^v)}{\rho^v + \hat{\rho}^v} \quad (5) \end{aligned}$$

첫째, $\rho^v \approx \hat{\rho}^v$ 인 경우, $\Delta \rho^v \approx 0$ 이다. 둘째, $(\Delta \vec{X}_n \cdot \vec{\rho}^v) = |\Delta X_n| |\hat{\rho}^v| \cos \theta \approx 0$ 경우, $\theta \approx 90^\circ$ 이면 $\cos \theta \approx 0$ 이므로 $\Delta \rho^v$ 이 감소한다. 특히 $\theta = 90^\circ$ 의 경우 식(5)는 식(6)과 같이 간략화 할 수 있다. 식(6)의 경우 $\Delta X_n^2 \ll \rho^v + \hat{\rho}^v$ 일 때, $\Delta \rho^v \approx 0$ 라는 것을 알 수 있다.

$$\Delta \rho^v = \frac{-\Delta X_n^2}{\rho^v + \hat{\rho}^v} \quad (6)$$

가상위성의 경우 사용자가 임의로 배치 할 수 있어 ρ^v 의 크기는 제한이 없다. 가상위성을 AP,

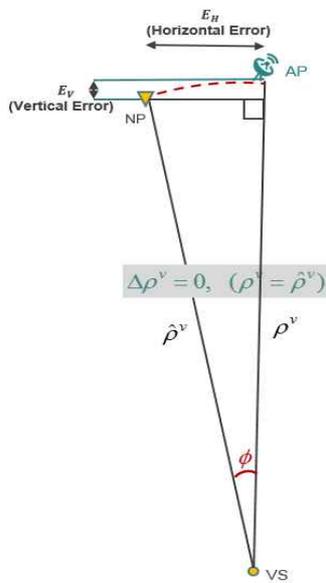


Fig. 2. Geometry of the error-free virtual range measurement

NP로부터 먼 거리에 배치하여 $\cos\theta \approx 0$, $\Delta X_n^2 \ll \rho^v + \hat{\rho}^v$ 조건을 쉽게 만족시킬 수 있다. 따라서, 이를 통해 정확한 가상거리측정값을 생성할 수 있다. NP의 오차 방향에 따른 $\Delta\rho^v$ 와의 관계를 살펴보면, NP의 위치오차는 AP를 기준으로 수평오차 (E_H)와 수직오차 (E_V)로 나눌 수 있다. Fig. 2는 $\Delta\rho^v = 0$ 일때 NP 위치오차에 대해 표현하였다. ϕ 는 AP-VS-NP가 이루는 각도이다. Fig. 2에서 볼 수 있는 것처럼, 가상거리측정값오차가 없는 경우에도 NP의 위치오차는 발생할 수 있다. 식 (7)은 NP의 위치오차와 가상거리측정값과의 관계식이다. 이 식을 통하여 $E_H \ll \hat{\rho}^v$ 인 경우 $\phi \approx 0$ 이 되고 $E_V \approx \rho^v - \hat{\rho}^v$ 로 표현 된다. 즉, 가상거리측정값이 클수록 가상거리측정값오차는 수직오차로 변환 가능하게 되어, NP의 수직오차가 없는 경우 가상거리측정값오차 역시 없다고 판단 가능하다.

$$\phi = \arcsin\left(\frac{E_H}{\hat{\rho}^v}\right) \tag{7}$$

$$E_H = \hat{\rho}^v(\sin\phi), E_V = \rho^v - \hat{\rho}^v \cos\phi$$

2.1.2 가상위성 배치

앞서 살펴본 바에 따르면 가상거리측정값은 NP의 수직오차가 작을수록 정확한 값을 지닌다는 것을 알 수 있다. 따라서, 수직오차가 작은 NP를 찾는 것이 위치해 개선에 있어 중요하다. 본 논문

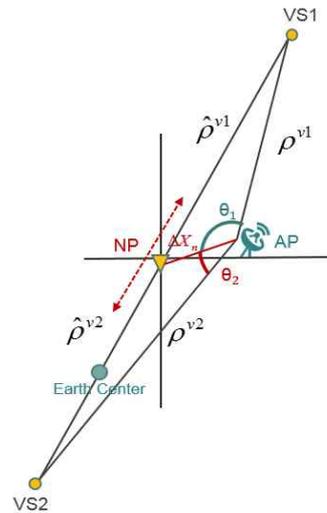


Fig. 3. The proposed virtual satellites geometry

에서는 Fig. 3과 같이 VDOP을 개선시킬 수 있는 가상위성 배치 방법을 제안하였다. 가상거리측정값 초기 NP (이하 $NP_{initial}$)는 실제 위성들을 통해 추정된 위치해를 그 초기 지점으로 선정 하였다. 그 다음 $NP_{initial}$ 와 지구중심을 지나는 직선을 중심선이라고 할 때, 중심선상에서 $NP_{initial}$ 와 같은 거리에 존재하는 두 지점에 가상 위성을 배치 한 구조이다. 이와 같은 배치는 가상위성이 사용자의 천정 방향, 그 반대방향에 위치하게 되므로 VDOP의 향상을 얻을 수 있다. 또한, 식(7)의 관계를 통해, $E_H \ll \hat{\rho}^v$ 일때, $E_V \approx \rho^v - \hat{\rho}^v$ 를 적용하기 위하여 본 논문에서는 $\hat{\rho}_{n_{initial}}^v = 2 \cdot 10^8 m$ 를 가지도록 가상 위성의 좌표를 결정 하였다. 제안하는 배치 방법의 경우 $NP_{initial}$ 를 기준으로 중심선상에 위치하는 가상위성들의 시선각 벡터는 모두 동일하므로 관측행렬을 구성하여도 같은 정보를 나타내게 된다. 따라서, 중심선 양 끝 단에 하나씩 가상위성을 배치하는 구조를 적용하였다. 이러한 구조로 가상 위성을 배치한 뒤 정확한 가상거리측정값의 생성을 위해 중심선상에서 NP를 이동해가며 가상거리측정값오차를 감소시키는 특정 조건을 만족하는 좌표를 갖는 최종 NP (NP_{end})를 결정하였다. 다음절에서는 가상거리측정값 생성을 위한 NP 결정 방법에 대해서 다루었다

2.2 가상거리측정값 정확도 향상

2.2.1 NP 분류

가상거리측정값의 정확도는 식(7)을 통해 NP의 수직 위치 정확도에 크게 영향을 받는다는 것

Table 1. Classification of nominal point

NP	Condition	$\Delta\rho_v$
NP1	$\rho^v = \hat{\rho}^v$	$\Delta\rho_{n1}^v = 0$
NP2	$\theta = 90^\circ$	$\Delta\rho_{n2}^v \approx 0$
NP3	$\rho_e^v = \hat{\rho}^v$	Variable
NP4	Standalone-GPS Position	Variable

을 알 수 있다. 즉, NP의 수직위치가 부정확한 경우 그 오차가 가상거리측정값에 투영된다. 따라서, 수직오차가 작은 NP를 찾아내는 것이 중요한데, 본 논문에서는 NP의 후보군에 대해 다음 네 가지로 분류하였다.

여기서 θ : VS-AP-NP 사이 각, ΔX_n : AP-NP 거리를 말한다. EP (Estimated Position)는 NP로 생성한 가상위성과 VRM으로 식 (1)을 적용하여 계산된 위치, ρ_e^v 는 VS-EP 거리를 의미한다. 위 네 가지 분류 중 NP1과 NP2의 경우 가장 정확한 가상거리측정값을 생성할 수 있지만 실제 사용자 위치를 알아야만 찾아 낼 수 있는 지점이므로 일반적 환경에서 적용 불가능 하다. 따라서 AP를 모른다 상정하고 적용 가능한 NP는 NP3와 NP4 두 종류가 된다. NP4는 2.1.2절에서 설명한 $NP_{initial}$ 를 의미하며, NP3은 특정 조건 ($\rho_e^v = \hat{\rho}^v$)을 만족하는 NP_{end} 를 의미한다. 가상거리측정값오차에 대한 분석은 실제 적용 가능한 NP3, NP4에 대해서 다루었다.

2.2.2 두 가상거리측정값오차($\Delta\rho_v$) 추정 및 비교

NP3, NP4를 이용해 생성된 가상거리측정값오차 ($\Delta\rho_{n3}^v, \Delta\rho_{n4}^v$)는 계산 시점의 가상위성과 측정값에 따라 값이 변한다. 때문에 두 NP로 인해 생성되는 가상거리측정값의 비교를 통해 위치해 계산에 사용될 NP를 선정해야 한다. 두 가상거리측정값 오차는 식 (8), (9) 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\rho_{n3}^v = \rho_{n1}^v - \rho_{n3}^v \tag{8}$$

$$\rho_{n3}^v = \sqrt{(x^v - x_{n3})^2 + (y^v - y_{n3})^2 + (z^v - z_{n3})^2}$$

$$\Delta\rho_{n4}^v = \rho_{n1}^v - \rho_{n4}^v \tag{9}$$

$$\rho_{n4}^v = \sqrt{(x^v - x_{n4})^2 + (y^v - y_{n4})^2 + (z^v - z_{n4})^2}$$

ρ_{n1}^v 의 경우 $\Delta\rho_{n1}^v = 0$ 이므로 실제 사용자 위치를 안다면 식(10)와 같이 계산 할 수 있다.

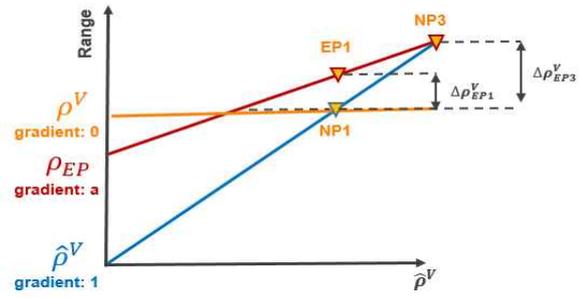


Fig. 4. The variation of virtual range measurements by NP & EP

$$\rho_a^v (= \rho_{n1}^v) = \sqrt{(x^v - x_a)^2 + (y^v - y_a)^2 + (z^v - z_a)^2} \tag{10}$$

$$\rho_a \rho_{n3}^v = \sqrt{(x^v - x_{n3})^2 + (y^v - y_{n3})^2 + (z^v - z_{n3})^2}$$

ρ_e^v 를 계산 하는데 가상거리측정값($\hat{\rho}^v$)가 요구되므로 가상거리측정값의 변화에 따라 그 값 역시 변하게 된다. Fig. 4는 가상거리측정값($\hat{\rho}^v$)의 변화에 따른 ρ_e^v 의 변화를 나타낸 그래프 이다. 그림에서 $\rho^v = \hat{\rho}^v$ 인 지점은 NP1, $\rho_e^v = \hat{\rho}^v$ 인 지점은 NP3이다. 그림에서 ρ_e^v 의 기울기는 a 이며 식 (11)로 표현 될 수 있다.

$$a = \frac{\Delta\rho_e^v}{\Delta\rho_n^v} \tag{11}$$

Figure 4를 통해 $\Delta\rho_{e3}^v$ 를 식(12)과 같이 나타낼 수 있다. EP는 NP에 의해 생성되는 위치이므로 이 식은 NP3와 NP1의 연관성을 말해준다. 즉, $\Delta\rho_{EP1}^v$ 을 알면 $\Delta\rho_{e3}^v$ 즉, $\Delta\rho_{n3}^v$ 를 알 수 있다.

$$\Delta\rho_{e3}^v = \Delta\rho_{e1}^v + a\Delta\rho_{n3}^v \tag{12}$$

$$\Delta\rho_{e3}^v = \frac{\rho_{n1}^v - \rho_{e1}^v}{1 - a} = \frac{\Delta\rho_{e1}^v}{1 - a}$$

(x_e, y_e, z_e) : EP 좌표

식(12)을 통해 NP3를 사용할 수 없는 발산조건은 $a \approx 1$ 일 때이다. 식(8)~(12)에서 ρ_{NP1}^v 의 크기는 ρ^v , 즉 AP와의 거리와 같다. 따라서 $\Delta\rho_{n3}^v, \Delta\rho_{n4}^v$ 의 크기는 각각 ρ_{e1}^v, ρ_{n4}^v 의 오차를 통해 결정이 된다. 이 두 값을 Taylor series를 이용하여 식 (13), (14)와 같이 표현 하였다. 여기서 $(\Delta x_{n,e}, \Delta y_{n,e}, \Delta z_{n,e})$ 는 각 지점 (NP 또는 EP)의 위치 오차이다. 식(1)에서 ΔX 는 위치오차를 의

미하므로 식(15) 즉 위성의 거리오차를 알 수 있으면 $(\Delta x_{n,e}, \Delta y_{n,e}, \Delta z_{n,e})$ 를 계산하고 식(13), 식(14)에 적용하여 가상거리측정값오차를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{e1}^v &= \rho_{e1}^v - \rho_{n1}^v & (13) \\ &= -\frac{x^v - x_{e1}}{\rho_{e1}^v} \Delta x_{e1} - \frac{y^v - y_{e1}}{\rho_{e1}^v} \Delta y_{e1} \\ &\quad - \frac{z^v - z_{e1}}{\rho_{e1}^v} \Delta z_{e1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{n4}^v &= \rho_{n4}^v - \rho_{n1}^v & (14) \\ &= -\frac{x^v - x_{n4}}{\rho_{n4}^v} \Delta x_{n4} - \frac{y^v - y_{n4}}{\rho_{n4}^v} \Delta y_{n4} \\ &\quad - \frac{z^v - z_{n4}}{\rho_{n4}^v} \Delta z_{n4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta y_{e1} &= |e^1, e^2, \dots, e^j, e^{v1}, e^{v2}|^T & (15) \\ \Delta y_{n4} &= |e^1, e^2, \dots, e^j|^T \\ e^j &: \text{실제 위성의 측정값 오차} \\ e^{vj} &: \text{가상거리측정값오차} \end{aligned}$$

2.2.3 측정값오차모델을 생성

위 식(8)~(15)에서 확인 한 것처럼 $\Delta \rho_{n3}^v$, $\Delta \rho_{n4}^v$ 의 계산을 위해서는 실제 위성의 측정값 오차를 알아야 한다. 하지만, 측정값 오차는 매 순간, 수신 환경에 따라 달라지며 실제 수신기의 위치를 모른다면 이 역시 정확한 값을 알 수 없다. 때문에 본 논문에서는 일반적인 오차수준을 상정하기 위해 실제위성의 측정값오차모델을 생성, $\Delta \rho_{n3}^v$, $\Delta \rho_{n4}^v$ 를 계산하고, NP 선정의 근거로 삼았다. 위성의 측정값오차는 통상적으로 고양각에서 저양각으로 갈수록 증가한다고 알려져 있다. 이는 위성의 전파가 수신기까지 송신되면서 전리층, 대류층, 다중경로오차 등 여러 오차요인의 영향이 저양각일수록 크기 때문이다. 따라서 측정값오차모델 역시 이러한 오차의 경향을 반영하여야 한다. [8] (D. Won, 2012) 논문에서는 위성의 배치를 나타내는 척도인 DOP에 양각에 따른 weight를 적용한 WDOP (Weighted DOP)을 제시하였는데, 이때 weight값의 생성을 위해 위성의 의사거리 오차 수준인 σ_{URE} (URE: User Equivalent Range Error)를 양각에 따른 변화를 적용한 새로운 값인 σ_θ 를 제안 하였다. 본 논문에서도 이를 적용하여 양각에 따른 측정값 모델을 사용하였다. 식(16)는 σ_θ 과 σ_{URE} 의 관계를 나타내는데 $f(\theta)$ 는 양각에 따른 의사거리의 변화

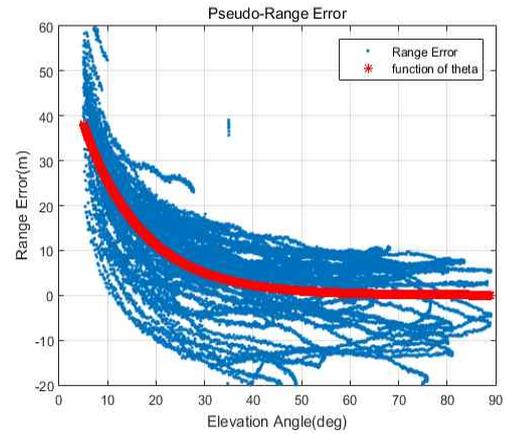


Fig. 5. The pseudo-range error by elevation angle

를 나타내는 함수로 항상 0보다 크거나 같으며, $f(90^\circ) = 0$ 인 값을 갖는다. 따라서 $\sigma_{\theta=90^\circ} = \sigma_{URE}$ 를 만족하며 $\sigma_{\theta=0^\circ}$ 에서 최대값을 지닌다.

$$\sigma_\theta^2 = \sigma_{URE}^2 + f(\theta) \quad (16)$$

본 논문에서는 $f(\theta)$ 를 계산하기 위해 앞서 사용된 2014년 7월 7일 국토지리정보원 수원기준국의 하루 데이터를 이용하여 실제 위성의 측정값오차를 계산하였다. Fig. 5와 같이 계산된 오차를 이용하여 MATLAB의 Curve Fitting Tool을 이용해 1차 exponential 함수를 생성, $f(\theta)$ 에 그 값을 적용 하였다. σ_{URE} 는 궤도력, 위성시계, 전리층, 대류층 다중경로 등 여러 오차요인들에 의해 추정되는 값으로 [7],[9]를 참고하여 5.1m를 적용하였다. 최종적으로 만들어진 σ_θ 는 식 (17)와 같다.

$$\sigma_\theta = 5.1 + 52.34e^{-\frac{\theta}{12.26}} \text{ (m)} \quad (17)$$

2.2.4 측정값오차모델을 이용한 가상거리 측정값오차 계산

측정값오차모델을 이용하여 계산되는 $\Delta \rho_{n3}^v$, $\Delta \rho_{n4}^v$ 를 $\tilde{\Delta \rho}_{n3}^v$, $\tilde{\Delta \rho}_{n4}^v$ 라고 할 때, 두 값의 비교를 통해 NP 선정이 타당한지 확인해 보았다. Fig. 6은, $\tilde{\Delta \rho}_{n4}^v - \tilde{\Delta \rho}_{n3}^v$ 의 결과를 나타낸 것이다. 측정값오차모델을 이용한 가상거리측정값으로 NP를 판단할 경우 모든 경우에서 NP3가 더 적합하다는 결과를 얻을 수 있었다. 다시 말해서, 위성의 거리오차가 양각에 따라 증가하는 거리오차 모델을 따르는 통상의 경우 NP3를 이용하여 가상거리측정값을 생성하는 것이 더 정확한 측정값을 만들 수 있다는 것을 알 수 있다.

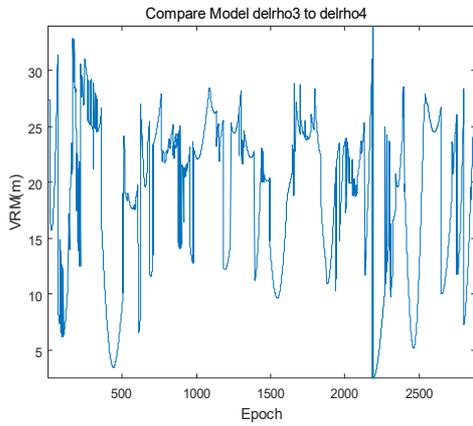


Fig. 6. Test result of $\Delta \tilde{\rho}_{n4}^v - \Delta \tilde{\rho}_{n3}^v$ using pseudo-range model

2.2.5 실제데이터를 이용한 가상거리측정값 오차 계산

측정값오차모델을 이용하여 판단한 결과 NP3를 이용한 가상거리측정값이 더 정확한 값을 지닌다는 결과를 얻었다. 실제 데이터를 통해 위 결과가 합당한지 확인해 보았다. 아래 Fig. 7은 국토지리정보원 수원 기준국의 하루 (2014년 7월 7일)동안의 데이터를 이용하여 각 NP를 이용해 생성된 가상거리측정값의 오차크기를 계산한 것이다. 전반적으로 NP3를 이용한 가상거리측정값이 더 정확한 거리정보를 생성하는 것을 알 수 있는데, 전체 Epoch 중 93.19%에서 NP3를 이용한 측정값이 더 정확한 것으로 확인 되었다.

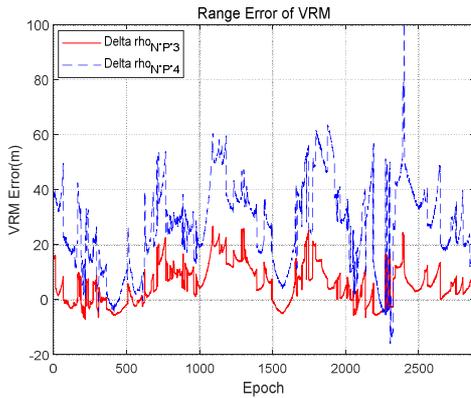


Fig. 7. The error of virtual range measurement ($\Delta \rho_n^v$) by NP3, NP4

Table 2. VRM Error ($\Delta \rho_n^v$) by NP3, NP4

Range Error	$\Delta \rho_{n3}^v$	$\Delta \rho_{n4}^v$
RMS(m)	8.9296	31.2061

Table 2는 NP3, NP4를 통해 생성된 가상거리측정값오차($\Delta \rho_{n3}^v, \Delta \rho_{n4}^v$)의 오차수준을 나타낸 것으로 통상적으로 ρ_{n3}^v 이 더 정확한 것을 확인 할 수 있다.

2.3 위치해 개선 결과

2.3.1 가상거리측정값을 사용한 위치해 개선

앞의 결과들을 토대로 실제위성을 이용한 위치해와 가상위성을 사용한 위치해의 결과를 서로 비교 하였다. NP는 NP3를 선택 하였으며 그로 인해 생성된 가상거리측정값을 사용하였다. Fig. 8, 9는 각각 수평, 수직오차의 결과를 나타내고

Table 3. Position Error by Combination of Satellites

Error	Combination of Satellites	RMS Error(m)	DOP
Horizontal	Real only	11.9183	1.645
	Real+Virtual	12.8524	0.932
Vertical	Real only	31.1887	1.050
	Real+Virtual	8.8624	0.692

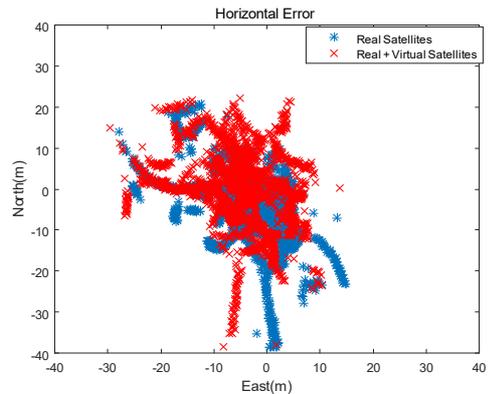


Fig. 8. Horizontal Error

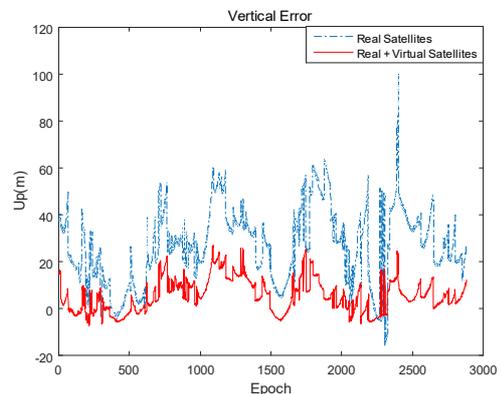


Fig. 9. Vertical Error

있다. 이를 통해 가상거리측정값으로 인한 위치해의 기여는 수평오차가 아닌 수직오차에서 그 효과가 두드러지는 것을 확인 할 수 가 있다. 이는 배치된 가상위성의 위치와도 관계가 있는데 위의 식(3)과 Fig. 2를 통해서 확인했던 것처럼 본 논문에서 제시하는 가상거리 측정값의 변화는 수직오차와 밀접한 관계이기 때문이다.

2.3.2 제한적 가시환경에서 가상거리측정값을 사용한 위치해 개선

추가적으로 제한적인 가시환경에서 효용성을 확인하기 위해 임의의 Epoch, 임의의 PRN을 선정하여 {Case A: Epoch (310~600), PRN (3, 16, 19, 23)} 그때의 위치해와 가상위성추가를 통한

Table 4. Position Error by Combination of Satellites (Case A)

Error	Combination of Satellites	RMS Error(m)	DOP
Horizontal	Real only	77.0147	9.595
	Real+Virtual	37.3250	2.852
Vertical	Real only	96.3428	4.186
	Real+Virtual	9.0299	1.791

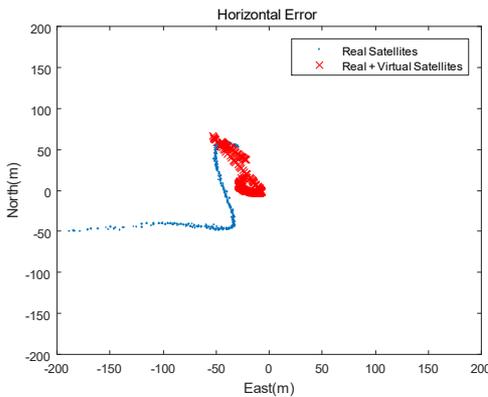


Fig. 10. Horizontal Error in Case A

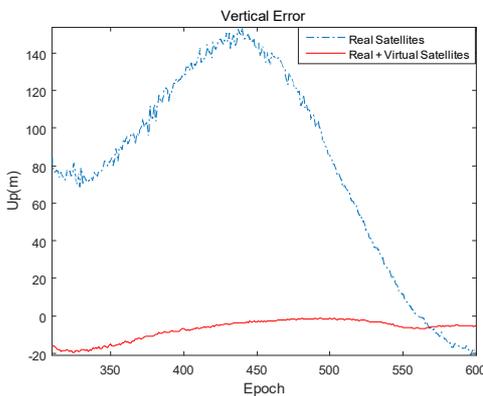


Fig. 11. Vertical Error in Case A

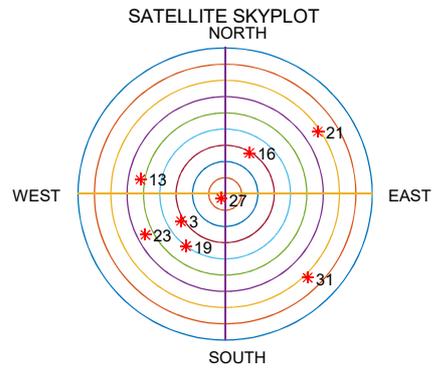


Fig. 12. Skyplot (Epoch 500)

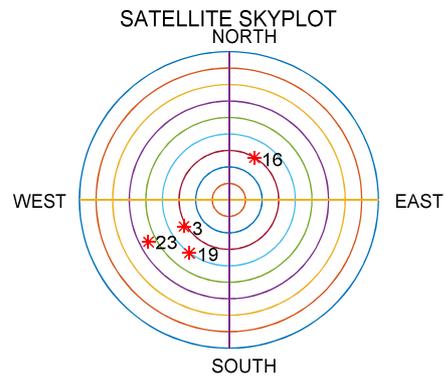


Fig. 13. Skyplot in Case A(Epoch 500)

위치해 기여를 확인 하였다. Fig. 10, 11은 수평, 수직오차를 그래프로 나타낸 것이다.

Table 4의 결과가 보여주듯 제한적 가시환경의 경우 가상거리 측정값을 통한 위치해 정확도 개선의 효과가 더 큰 것을 알 수 있었는데 특히, 가시위성수가 감소하더라도 수직위치 정확도 수준이 유지되는 것을 확인 하였다. 하지만 NP3를 생성하기 위한 기본 조건이 실제위성 측정값을 통해 추정된 사용자 위치 (NP4)이므로 가시위성 수 4개미만의 조건에서는 사용할 수 없다는 한계가 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 위성항법시스템의 기존 항법알고리즘의 위치 정확도 향상을 위해, 가상위성과 가상거리측정값을 이용하는 새로운 방식을 제안 하였다. 가상위성의 배치방법과 그에 따른 이점을 확인하고 가상거리측정값을 생성하는 법에 대해 제시하였다. 기존의 연구에서 가상위성은 측정값이 존재하지 않으므로 실제위성을 이용하여 생성된 이전 시점의 위치해를 기준으로 가상

의사거리를 만들게 된다. 따라서 수신기의 속도가 빠르거나 수신기 위치오차가 클수록 가상위성측정값의 정확도도 감소하게 되어 위치해 개선의 효과가 떨어지게 된다. 따라서 이를 보완하기 위한 새로운 가상거리측정값 생성방법을 제시하였다. 또한, 위성양각에 따른 거리오차모델을 이용하여 생성된 가상거리측정값의 오차를 추정, 비교하여 제안하는 가상거리측정값 사용이 합당함을 확인하였다. 마지막으로, 제안한 항법 알고리즘을 적용하여 실제 위치해의 개선효과를 확인하였다.

제시된 가상위성의 배치를 사용하게 되면, 수직 위치해 정확도의 향상을 도모할 수 있으며, 이러한 효과는 도심지역과 같이 수신기 위치오차가 증가하는 제한적 가시 환경에서 극대화된다는 것을 확인 하였다. 하지만 본 논문에서 제안한 기법은 실제위성을 통해 수신기 위치 추정이 불가능한 조건에서는 사용이 불가능하다는 한계가 있다. 본 기법은 일반적인 보행자 혹은 차량보다, 수직 위치해 성능이 중요한 항공기에 적용될 경우 더 큰 기여를 할 것이라 기대된다. 특히, 도심과 같은 제한적인 가시 환경에서 비행할 여지가 많은 드론의 경우 가상위성 추가를 통한 수직 위치해 향상은 비행 안전에 큰 기여를 할 것이라 기대할 수 있다. 반면 수평오차에 대한 위치해 보정효과를 기대하기 어렵다는 데에 그 문제가 있으므로 추후 수평 위치해를 개선할 수 있는 새로운 위성배치 및 가상거리측정값 생성 방법에 대한 연구를 진행할 예정이다. 또한, 시뮬레이션이 아니라 실제 도심에서의 제한된 가시 환경의 데이터를 이용하여 위치해 개선 효과 역시 확인 할 예정이다.

후 기

이 연구는 국토교통부 교통물류연구사업 차로 구분 정밀위치결정 교통인프라 기술 실용화 연구(17TLRP-C113269-02)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) J. Wang, "Pseudolite Applications in Positioning and Navigation: Progress and Problems", *Journal of Global Positioning Systems*, Vol. 1, No. 1, pp.48-56, 2002
- 2) J. Park and J. Suk, "A Study on Navigation Performance Analysis Technique of Pseudolite Navigation Systems", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences* Vol. 42, No. 11, pp. 947-957, 2014.
- 3) M. Femminella and G. Reali, "A Zero-Configuration Tracking System for First Responders Networks", *IEEE Systems Journal*, Vol. pp, No. 99, 2015
- 4) I. Kim, "GPS Positioning Using Virtual Pseudorange", *Control Engineering Practice*, Vol. 6, No. 1, pp. 25-35, Jan 1998
- 5) DOD, "Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard", 4st Edition, September 2008
- 6) S. Park, D. Cho, "A Performance improvement on navigation applying measurement estimation in urban weak signal environment", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 18, No. 11, pp. 2745-2752, Nov 2014
- 7) FAA, "Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Analysis Report", Jan 31 2006
- 8) D. Won, "Weighted DOP with Consideration on Elevation-Dependent Range Errors of GNSS Satellites", *IEE TIM (Transaction on Instrumentation and Measurement)*, Vol. 61, No. 12, Dec 2012
- 9) B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, *GNSS-global navigation satellite systems : GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Wien; New York: Springer, 2008.