

공중 중계 기반 측위시스템의 성능개선을 위한 중계노드 운용 모델

이진석*, 백호기*, 임재성°, 박찬이**

A Relay Node Operation Model for Performance Improvement of Airborne Relay-Based Positioning System

Jinseok Lee*, Hoki Baek*, Jaesung Lim°, Chanyi Park**

요약

최근 공중 중계 노드를 활용한 의사위성(pseudolite) 기반 위치 시스템인 ARPS(Airborne Relay-based Positioning System)가 기존 지상 또는 공중 의사위성 시스템의 한계를 극복하기 위한 방안으로 제안되었다. 그러나 ARPS는 공중 중계기를 기반으로 사용자의 위치정보를 계산하기 때문에 공중 중계기의 위치 분포가 지상사용자의 위치 정확도에 미치는 영향이 크며 특히 큰 수직 오차를 갖는다. 본 논문에서는 ARPS의 성능을 향상시키기 위해 공중 중계기 운용 모델을 제안한다. 공중 중계기 운용 모델은 공중 중계기의 고도를 계층적으로 운용함으로써 사용자의 수직 오차를 감소시켜 보다 정확한 위치 정확도를 제공한다. 이 운용모델은 기존 ARPS의 공중 중계기와 달리 궤도 중앙에 있는 공중 중계기의 고도를 낮추어 기하학적 특징으로 발생하는 수직 오차를 줄인다.

Key Words : ARPS, Relay, PNT, Airborne Network

ABSTRACT

Recently, the airborne relay-based positioning system (ARPS), which employs the relaying of navigation signals, was proposed as an alternate positioning system. However, the ARPS has limitations, such as relatively large vertical error, because the user estimates the position based on airborne relays that are located in one direction. In this paper, we propose an airborne relay position model to improve the performance of the ARPS. The main idea of the airborne relay position model is to reduce the user's vertical error by using hierarchical airborne relay height. Unlike the existing ARPS relay model, the relay's height in the center of the airborne track is the lower than other relays. This geometric feature decreases the vertical error.

1. 서론

군용으로 개발되었던 GPS(Global Positioning

System)가 민간에게 보급됨에 따라 위치 기반 서비스 산업의 확대에 위치 정보와 시간 정보가 중요한 자원으로 부각되고 있다. GPS를 포함한 세계 위성 항법

* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다. (UD160070BD)

• First Author : (ORCID:0000-0002-2279-8100)Ajou University Department of Computer Engineering, yangachy@ajou.ac.kr, 정희원
° Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-0080-9398)Ajou University Department of Computer Engineering, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원

* (ORCID:0000-0001-9213-7845)Ajou University Department of Military Digital Convergence, neloyou@ajou.ac.kr, 정희원

** (ORCID:0000-0001-6772-911X)국방과학연구소 책임연구원, chyipark@add.re.kr, 정희원

논문번호 : KICS2017-10-310, Received October 13, 2017; Revised January 22, 2018; Accepted January 23, 2018

시스템(GNSS: Global Navigation Satellite System)은 지구 주변 궤도를 따라 움직이는 수십 개의 위성을 이용하여 전 세계의 모든 지역에서 위치와 시각서비스를 제공 할 수 있는 시스템이다. GNSS를 통해 측정된 PNT(Position, Navigation and Timing)정보는 개인 휴대폰 및 자동차로부터 항법, 운송 차량관리 선박 운항, 항공 안전, 측지/측량, 수색 및 구조, 개인레저, 환경/과학 응용까지 다양한 분야에서 사용되고 있다^{11,12}. 최근 개인 스마트폰을 통한 증강현실뿐만 아니라 지능형 전력망 시스템인 스마트그리드, 금융 및 전자상거래에도 GNSS의 활용도와 의존도가 날로 증대되고 있다.

국방 분야에서도 현재 운용중인 무기 체계와 개발 중인 무기체계에도 대부분 GNSS 수신기가 탑재되고 있으며, 전장의 정보 우위가 전투의 승패를 좌우하는 NCW(Network Centric Warfare)작전을 수행함에 있어 정확한 우군의 위치정보 확보와 각종 무인전투체계에 정밀한 위치와 시각정보를 제공하는 GNSS의 중요도는 더욱 가중되고 있다¹³⁻¹⁵.

하지만 GNSS는 신호세기가 약하기 때문에 실내 및 지하 환경에서는 신호를 직접 수신하기 어려우며, 수신기 주변 지역의 신호 간섭에 매우 취약하다. 따라서 지난 수십 년 동안 위성 기반의 GNSS를 대체 할 의사위성 기반의 시스템을 개발하기 위한 몇 가지 연구가 수행되었다^{9,10}.

의사위성(Pseudolite) 기반의 위치 시스템은 의사위성의 위치에 따라 두 가지로 구분된다. 첫 번째로 산봉우리 또는 높은 건물의 옥상에 의사위성을 설치하는 지상기반의 의사위성 시스템은 GNSS보다 높은 신호 세기가 제공가능하며, 시스템 구축 및 유지보수가 간단하고 저렴한 장점이 있다. 그러나 모든 의사위성이 지면에 있기 때문에 사용자와 의사위성 사이의 LOS(Line of Sight)가 보장되기 어렵고 이로 인해 서비스 제공 범위가 제한적이며, 수직 정확도가 낮은 단점이 있다¹¹⁻¹⁴. 두 번째는 무인 항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicles) 및 성층권 비행선과 같은 공중 플랫폼에 의사위성을 설치하는 공중기반 의사위성 시스템이다. 지상기반 의사위성 시스템보다 넓은 영역에 서비스 제공이 가능하지만, 위치정보의 정확도를 높이기 위해서 공중의 의사위성의 위치를 실시간으로 모니터링 해야 함으로 실시간성이 위치정보의 정확도에 영향을 미친다^{15,16}.

최근 ARPS(Airborne Relay-based Positioning System)는 기존의 지상기반, 공중기반 의사위성 시스템의 한계를 극복하기 위해 제안되었다¹². ARPS에서

지상 기준국은 공중 중계기에 항법 신호를 전송하고, 공중 중계기는 사용자에게 신호를 즉시 중계한다. 사용자는 수신된 신호를 사용하여 공중 중계기의 위치와 자신의 위치정보를 순차적으로 계산한다. 사용자가 중계기의 위치를 직접 계산 가능한 장점으로 인해 ARPS는 위치정보 생성의 기준이 되는 공중 중계기의 위치를 지속적으로 추적 할 필요가 없이 공중기반의 사위성 시스템과 지상기반 의사위성 시스템의 장점을 모두 활용 가능하다.

그러나 논문[17]에서 ARPS 최소 공중 중계기를 운용하는 모델을 제시하였는데, 공중 중계기의 위치에 따른 DOP(Dilution of Precision)변화로 인해 GNSS보다 기하학적 원인의 위치오차가 크다. 기하학적 원인의 위치오차는 수평오차와 수직오차로 구분될 수 있으며, ARPS의 위치오차는 수평오차보다 상대적으로 수직오차가 크다¹⁷.

본 논문에서는 ARPS의 공중 중계기의 위치에 따라 발생하는 기하학적인 오차인 DOP에 영향을 주는 요인을 수평오차와 수직오차로 나누어 정규방정식을 통해 분석한다. 분석한 결과를 바탕으로 DOP에 의한 위치오차를 감소하기 위한 공중 중계기 운용 모델로 1기의 공중 중계기를 선회 궤도 중앙에 두고 고도를 달리하는 사면체 모델을 제안한다. 제안한 공중 중계기 운용 모델을 이용하여 DOP에 영향을 주는 요인을 최소화 하여, 위치오차를 줄여 ARPS의 위치정확도를 개선한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 공중 중계 모델과 기존 ARPS의 DOP와 위치오차를 비교분석하여 제안한 모델의 성능을 평가한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II.절에서는 ARPS에 대해 간략히 설명하고, III.절에서는 공중 중계기 위치에 따라 기하학적인 요인으로 인해 위치정확도에 영향을 미치는 DOP에 대하여 분석한다. IV. 절에서는 제안한 공중 중계기 운용모델을 설명하고, V.절에서는 시뮬레이션 구성과 결과를 제시한다. 마지막으로 VI.절에서 결론을 맺는다.

II. 공중 중계기 기반 측위 시스템(ARPS)

ARPS는 지상기반과 공중기반의 의사위성 시스템의 한계를 극복하며, GNSS의 대안으로 지역기반의 측위 시스템으로 제안되었다. ARPS는 그림 1과 같이 시간동기 제어국(Master Station)과 4개 이상의 기준국(RS: Reference Station), 공중 중계기(AR: Airborne Relay)로 구성된다¹². 시간동기 제어국은 시스템의 절대 시간 기준을 제공하며 기준국은 공중

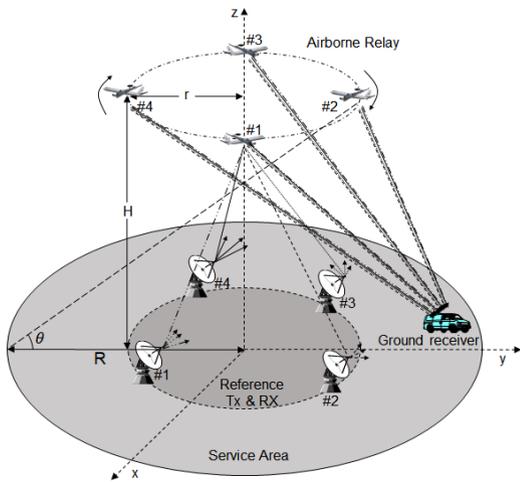


그림 1. ARPS 구성도
Fig. 1. ARPS configuration diagram

중계기에 기준국의 위치와 전송 시간을 담은 신호를 전송한다. 이때 기준국들의 시간 동기화는 모두 제어국의 절대 시간을 이용하여 동기화 한다. 공중 중계기는 기준국으로부터 받은 신호를 가공하거나 재생산 하지 않고 즉시 사용자에게 중계 역할만 한다. 사용자는 중계된 신호를 사용하여 공중 중계기들의 위치를 계산하고, 계산된 공중 중계기들의 위치를 기준으로 다시 자신의 위치를 계산한다. 공중 중계기의 위치를 계산하는 단계에서는 TDOA(Time Difference of Arrival)를 사용하여 4개의 기준국의 신호를 공중 중계기가 중계하여 사용자에게 도착한 신호의 시간차를 기반으로 공중 중계기의 위치정보를 각각 계산한다. 그 후, 사용자의 위치는 각 공중 중계기로부터 사용자 까지의 의사거리를 TOA(Time of Arrival)방식을 사용하여 계산한다.

ARPS는 공중 중계기를 활용한 지역항법 시스템으로 지상기반 및 공중기반의 의사위성 시스템의 한계를 극복하고 각 방식의 이점을 모두 가져올 수 있었다. 따라서 ARPS는 LOS보장이 가능하여 신호 음영 지역 극복과 위치 서비스 반경을 확대하여 넓은 지역에 위치정보를 제공 가능하다. 또한, 공중 중계기는 단지 수신한 신호를 중계하는 중계역할만 수행하고 중계된 신호를 사용하여 사용자가 공중 중계기 위치와 자신의 위치를 순차적으로 계산하기 때문에 공중 중계기의 부하가 적으며, 사용자가 공중 중계기의 위치를 파악하기 위한 지속적인 모니터링 또는 추가적인 측정 과정이 필요 없는 장점을 가진다.

하지만 GNSS와 동일하게 위치결정의 기준이 되는

공중 중계기의 기하학적 배치에 따라 수직 정확도와 수평 정확도가 차이가 발생한다. 특히, ARPS는 지상의 기준국으로부터 공중 중계기를 통해 중계된 신호를 사용자가 수신하여 공중 중계기의 위치를 계산하고, 계산된 공중 중계기의 위치를 기반으로 사용자의 계산을 한다. 따라서 1차적으로 지상의 기준국과 공중 중계기 간의 기하학적 배치에 따른 영향이 발생하며, 공중 중계기와 사용자 간의 기하학적 배치도 위치 정확도에 영향을 미친다. 또한, GNSS와 달리 공중 중계기의 고도가 지표면에서 비교적 가까워 공중 중계기와 사용자의 위치가 조금만 변화하여도 기하학적 변화가 크다.

III. 공중 중계기 위치분포의 기하학적 영향 분석

항법시스템을 통해 직교좌표계에서 위치를 계산할 때 위치오차는 측정을 통해 얻은 의사거리의 오차와 기준국의 기하학적 배치에 따른 오차에 의하여 결정된다. 기하학적 오차를 수치적으로 표현한 것을 DOP라고 하며, DOP의 값이 작을수록 위치정확도는 높아진다. 모두 일정한 의사거리 측정오차를 갖는다고 할 때, 그림 1에서와 같이 공중 중계기의 위치가 사용자를 기준으로 한쪽으로 치우칠 경우 DOP로 인한 의사거리 측정오차가 커지게 되며, 사용자가 중앙의 점선으로 표시한 구역 안쪽에 위치하게 되면 공중 중계기가 사방으로 고르게 퍼져있어 DOP로 인한 의사거리 측정오차는 작아지게 된다.

DOP를 표현하는 방법으로는 정규방정식의 역행렬을 이용하여 계산하는 방법과 단위벡터를 이용한 사면체의 부피를 통해 표현하는 방법이 있다^{18,19}. 정규방정식의 역행렬을 이용하는 방법으로 여인자(cofactor) 행렬 H 는 다음과 같이 구해진다.

$$H = (G^T G)^{-1} \tag{1}$$

위 식에서 행렬 G 는 4×4 의 행렬이며 각 공중 중계기에서 수신기로의 $\vec{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]$, $\vec{y} = [y_1, y_2, y_3, y_4]$, $\vec{z} = [z_1, z_2, z_3, z_4]$ 벡터와 수신기의 시간오차 t 로 이루어진다.

$$G = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & t \\ x_2 & y_2 & z_2 & t \\ x_3 & y_3 & z_3 & t \\ x_4 & y_4 & z_4 & t \end{bmatrix} \tag{2}$$

여인자 행렬 H 는 4×4 행렬로 행렬의 요소는 다음과 같이 표현된다.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix} \quad (3)$$

수식 (3) 행렬의 대각요소는 다음과 같이 DOP를 정의하는데 사용된다.

$$\begin{aligned} HDOP &= \sqrt{h_{11} + h_{22}} \\ VDOP &= \sqrt{h_{33}} \\ PDOP &= \sqrt{h_{11} + h_{22} + h_{33}} \\ TDOP &= \sqrt{h_{44}} \\ GDOP &= \sqrt{h_{11} + h_{22} + h_{33} + h_{44}} \end{aligned} \quad (4)$$

HDOP(Horizontal DOP)는 x, y성분의 수평 DOP를 나타내고 VDOP(Vertical DOP)는 z성분의 수직 DOP를 나타낸다. PDOP(Position DOP)는 사용자의 위치 DOP를 나타내며, TDOP(Time DOP)는 사용자의 시각 DOP를, GDOP(Geometric DOP)는 위치와 시각의 종합적인 DOP를 나타낸다. 측정된 DOP를 바탕으로 사용자의 위치오차는 의사거리 측정오차 (σ_{user}^2)에 PDOP가 곱해진 형태로 표현된다.

$$Position Error = \sigma_{user}^2 \times PDOP \quad (5)$$

수식 (1)과 같이 행렬 H 는 $G^T G$ 의 역행렬이며 $G^T G$ 의 요소는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$G^T G = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} & g_{xt} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} & g_{yt} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} & g_{zt} \\ g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} & g_{tt} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$(G^T G)^{-1} = \frac{1}{\det(G^T G)} \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \quad (7)$$

수식 (4)의 VDOP인 h_{33} 의 값을 수식 (7)을 통해 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{33} = \frac{1}{\det(G^T G)} \times k_{33} \quad (8)$$

수식 (8)은 $\det(G^T G) \neq 0$ 일 경우에만 식이 성립하며, h_{33} 의 값을 g 를 통해 나타내면 다음과 같다.^[20]

$$k_{33} = g_{xx}g_{yy}g_{tt} + g_{xy}g_{yt}g_{tx} + g_{xt}g_{yx}g_{ty} - g_{xx}g_{yt}g_{ty} + g_{xy}g_{yx}g_{tt} - g_{xt}g_{yy}g_{tx} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \det(G^T G) &= g_{xx}g_{yy}g_{zz}g_{tt} + g_{xx}g_{yz}g_{zt}g_{ty} \\ &+ g_{xx}g_{yt}g_{zy}g_{tz} + g_{xy}g_{yx}g_{zt}g_{tz} \\ &+ g_{xy}g_{yz}g_{zx}g_{tt} + g_{xy}g_{yt}g_{zz}g_{tx} \\ &+ g_{xy}g_{yx}g_{zy}g_{tt} + g_{xz}g_{yy}g_{zt}g_{tx} \\ &+ g_{xz}g_{yt}g_{zx}g_{ty} + g_{xt}g_{yx}g_{zz}g_{ty} \\ &+ g_{xt}g_{yy}g_{zx}g_{tz} + g_{xt}g_{yz}g_{zy}g_{tx} \\ &- g_{xx}g_{yy}g_{zt}g_{tz} - g_{xx}g_{yz}g_{zy}g_{tt} \\ &- g_{xx}g_{yt}g_{zz}g_{ty} - g_{xy}g_{yx}g_{zz}g_{tt} \\ &- g_{xy}g_{yz}g_{zt}g_{tx} - g_{xy}g_{yt}g_{zx}g_{tz} \\ &- g_{xz}g_{yx}g_{zt}g_{ty} - g_{xz}g_{yy}g_{zx}g_{tt} \\ &- g_{xz}g_{yt}g_{zy}g_{tx} - g_{xt}g_{yx}g_{zy}g_{tz} \\ &- g_{xt}g_{yy}g_{zz}g_{tx} - g_{xt}g_{yz}g_{zx}g_{ty} \end{aligned} \quad (10)$$

수식 (9)와 (10)을 요소인 g_{ij} 는 각 공중 중계기에서 수신기로의 x, y, z 벡터 성분과 t의 상관관계로 나타낼 수 있다. i와 j는 각각의 벡터 성분 및 t와의 관계를 의미한다. 예를 들면, g_{xy} 는 x벡터와 y벡터간의 상관관계를 의미한다. x, y, z, t는 서로에게 영향을 주지 않는 무상관 관계라고 가정하면 $g_{xx}, g_{yy}, g_{zz}, g_{tt}$ 를 제외한 나머지는 모두 0으로 표현 가능하여 수식 (8)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H_{33} &= \frac{g_{xx}g_{yy}g_{tt}}{g_{xx}g_{yy}g_{zz}g_{tt} - g_{zz}} \\ &= \frac{1}{z_1 z_1 + z_2 z_2 + z_3 z_3 + z_4 z_4} \end{aligned} \quad (11)$$

수식 (11)에 의하여 VDOP값인 $\sqrt{h_{33}}$ 은 수신기를 기준으로 각각의 공중 중계기 고도(z벡터)들의 표준편차의 역수를 의미한다고 볼 수 있다. 즉, 공중 중계기들의 고도 표준편차가 클수록 VDOP값은 작아져 수직 오차가 작아지는 상관관계를 가진다. 따라서 ARPS운용할 때 공중 중계기들의 고도(z벡터)로 인한 수직오차를 줄이기 위해서는 공중 중계기간의 고도를 다르게 운용해야 한다.

IV. ARPS의 위치오차 감소를 위한 중계노드 운용 모델

ARPS에서 공중에 비행하는 공중 중계기는 지상기

반 의사위성 보다 쉽게 위치와 고도를 변화 할 수 있다. 공중 중계기의 고도와 위치는 ARPS를 서비스를 제공하기 위한 서비스 지역 반경에 따라 변화한다. 그림 1에서 H는 공중 중계기의 고도를 나타내고 r은 공중 중계기의 회전 비행궤도 반경을 나타낸다. R은 ARPS의 서비스 지역 반경을 나타내고, θ 는 최대 서비스 지역 반경에서 공중 중계기의 상하각을 나타낸다. 상하각은 공중 중계기로부터 신호를 수신하기 위한 최소값을 가지며 상하각과 서비스 반경을 이용하여 공중 중계기의 최소 요구 고도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = (R+r) \times \tan\theta \quad (12)$$

앞 절에서 분석한 공중 중계기의 고도들의 표준편차가 위치오차에 미치는 영향을 최소화하기 위해 공중 중계기의 고도를 달리하여 운용하는 방안을 제안한다. 제안하는 운용 모델은 그림 2과 같이 3기의 공중 중계기는 기존 ARPS와 같이 선회 궤도를 따라 운용하고 1기의 공중 중계기는 중앙에서 고도를 달리하여 운용하는 사면체 모델이다. 중앙 공중 중계기의 고도가 높은 모델은 정방향 사면체 모델이라 정의하고, 중앙 공중 중계기의 고도가 낮은 모델을 역방향 사면체 모델이라 정의한다.

수식 (12)에서 알 수 있듯이 공중 중계기의 최소 고도는 서비스 지역 반경(R)과 공중 중계기의 선회궤도 반경(r)에 영향을 받는다. 서비스 지역 반경이 증가 할수록, 중계기의 선회궤도 반경이 클수록 최소 요구 고도가 높아야 한다. 따라서 기존 ARPS의 단일 공중 중계기 선회궤도에서 고도만 달리하게 되면 서비스 지역이 넓어질수록 최소 요구 고도가 높아지게 되며, 물리적으로 공중 중계기가 운행할 수 있는 최대 고도와 편차가 줄어들게 된다. 공중 중계기의 고도 편차를 최대화하기 위하여 중앙의 1기의 선회 궤도(r_c)를 작게 하여 운용한다. 수식 (12)에 의해 동일한 서비스 지역에서 중앙의 공중 중계기의 최소 요구 고도를 최소화 할 수 있어, 공중 중계기의 고도차를 최대화 할 수 있다.

그림 2 (a)는 중앙 공중 중계기의 고도가 높은 정방향 사면체 운용 모델에서 신호를 받은 모습이다. 정방향 사면체 모델은 3기의 공중 중계기의 고도가 낮아 서비스 가능한 반경은 작지만 공중 중계기가 넓게 퍼져있어 서비스 반경 중앙의 위치오차를 최소화 할 수 있는 모델이다. (b)는 중앙 공중 중계기의 고도(H_c)를

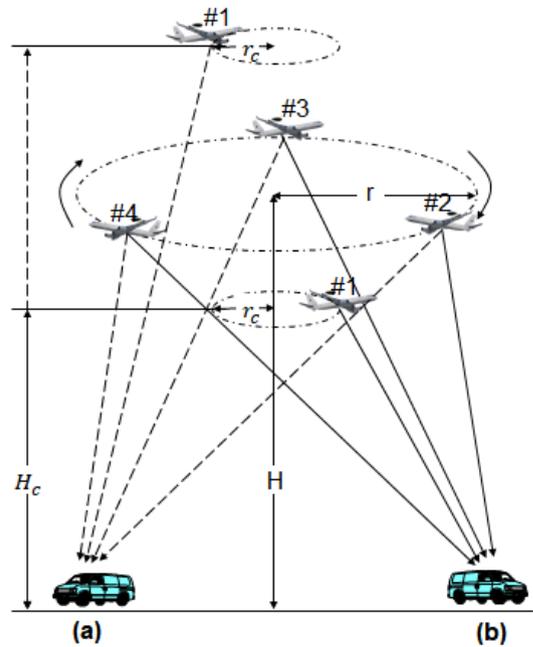


Fig. 2. Proposed operation model of airborne relays. 그림 2. 제안하는 공중 중계기 운용 모델

낮은 역방향 사면체 모델이다. 역방향 사면체 모델은 3기의 공중 중계기의 고도가 높아 서비스 반경을 최대화 할 수 있어 넓은 서비스 지역이 요구되는 환경에 적합한 모델이다. 따라서 요구사항의 우선순위에 따라 넓은 작전반경을 우선하면 역방향 사면체 모델로, 최소 위치오차를 우선하면 정방향 사면체 모델로 운영이 가능하다.

V. 시뮬레이션 및 성능평가

ARPS에서 사용자는 TDOA 방식을 이용하여 공중 중계기의 위치를 계산하며, TOA 방식을 이용하여 공중 중계기와 사용자간의 의사거리를 계산한다. 공중 중계기의 위치와 사용자의 3차원 위치를 계산하기 위해서 TDOA 방식과 TOA 방식을 사용할 때 최소 4개의 신호가 필요하기 때문에 사용자는 기준국으로부터 공중 중계기를 거쳐 최소 4개 이상의 신호를 수신한다. 또한 각 기준국들은 공중에 비행중인 모든 공중 중계기와 LOS가 보장되며, 사용자 역시 모든 공중 중계기와 LOS가 보장되어 신호 전달 간 오류는 없는 것으로 가정한다.

기준국간의 시간 동기는 유선 또는 무선방식으로 이루어지며 무선 시간동기화 또한 수 나노초 내에서

시간동기화가 가능하므로^[14] 각 기준국 간의 시간 오프셋은 0이라 가정하였다. 또한 각 기준국간의 시간동기가 20nsec 내에서 유지된다면 ARPS 알고리즘은 시간동기 오차에 대한 영향을 받지 않는다^[16]. 마지막으로 사용자의 시간 오프셋은 위치 계산 절차 중 사용자와 공중 중계기간의 의사거리를 계산하는 과정에서 제거 될 수 있기 때문에 무시한다.

제안한 공중 중계기 운용모형을 바탕으로 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 그림 1과 같이 4개의 지상의 기준국은 60km반경의 원형으로 위치하여 있다. 지상의 기준국의 위치는 시뮬레이션 동안 움직이지 않고 고정시켰다. 공중 중계기는 지상 기준국의 상공에 위치하여 일정한 원형 궤도를 따라 40m/s의 속도로 이동한다. 공중 중계기는 제안된 모델에 따라 중앙에 1기의 공중 중계기가 1km 반경의 궤도를 따라 비행하며, 외각에 3기의 공중 중계기가 원형 궤도를 따라 비행한다. 공중 중계기의 최대 고도는 성층권 비행선의 고도를 고려하여 20km로 설정하였다. 그 중 중앙에 위치한 공중 중계기의 고도(H)를 1km~20km 까지 5km단위로 변화시켜가며 시뮬레이션을 진행하였다. 지상 수신기의 위치는 지상 기준국 중심으로부터 거리로 최대 200km까지 증가시켜 시뮬레이션 하였다.

시간 제어국은 사용자의 위치계산에 영향을 주지 않기 때문에 시뮬레이션에서는 고려하지 않았으며 공중 중계기가 궤도를 따라 1바퀴 비행할 동안의 평균 위치오차와 DOP를 측정하였다. 시뮬레이션 파라미터 들은 표 1과 같다.

제안한 공중 중계기 운용 모델의 성능을 평가하기 위해 MATLAB을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째로 공중 중계기의 선회궤도 반경과 공중 중계기의 배치를 달리하면서 사용자의 DOP와 위치오차를 측정하였다.

첫 번째 시뮬레이션은 제안한 공중 중계기 운용 모델의 성능을 평가하기 위해 기존의 ARPS의 모델과

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. The simulation parameters

Parameters	Values
Airborne Relays Radius (R)	25km, 50km, 75km
Airborne Relay Height	20km
Center Airborne Relay Radius	1km
Center Airborne Relay Height (H)	5km, 10km, 15km, 20km
Airborne Relay Speed	40m/s
Maximum Receiver Distance	200km
Reference Radius	60km
Number of Repetition	10000

제안한 공중 중계기 운용 모델의 VDOP와 HDOP 및 위치오차를 비교하였다. 기존 ARPS의 공중 중계기의 고도(H)는 20km로 고정하였고 제안하는 공중 중계기 운용방안은 그림 2와 같이 정방향 사면체운용모델(a)의 중앙 공중 중계기의 고도(H_c)는 20km, 나머지 공중 중계기들의 고도는 5km로 하였다. 역방향 사면체 운용 모델(b)은 중앙 공중 중계기의 고도를 5km로, 나머지 공중 중계기들의 고도를 20km로 설정하였다. 그림 3은 시뮬레이션 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 지상 수신기의 거리가 중심으로 멀어질수록 DOP 및 위치 정확도가 나빠지는 것을 알 수 있다. 제안한 운용모델이 기존 ARPS보다 VDOP면에서 좋은 결과를 나타낸다. 또한 지상 수신기의 거리가 멀어질수록 역방향 사면체 모델의 VDOP가 더 좋은 것을 알 수 있다. 이는 앞 장에서 설명한 역방향 사면체 모델이 정방향 사면체 모델보다 공중 중계기를 통한 서비스 반경을 최대화할 수 있다는 것과 동일한 결과가 도출되었다.

두 번째 시뮬레이션은 제안한 사면체 모델에서 중

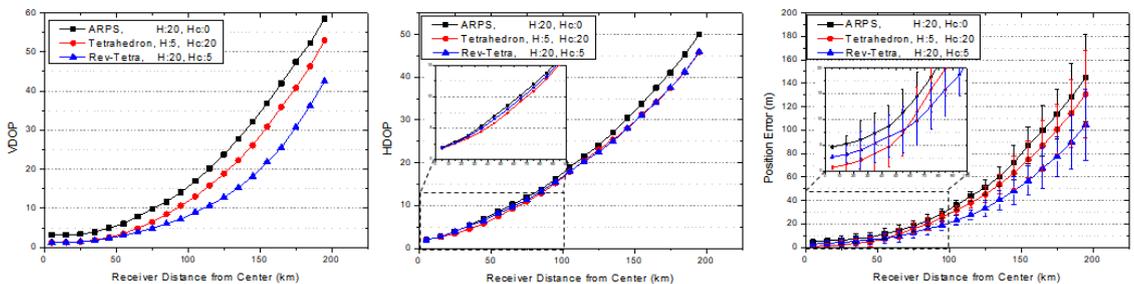


그림 3. ARPS와 제안한 공중 중계기 운용 모델의 DOP 및 위치오차 비교
Fig. 3. Comparison of Position error and DOP between ARPS and proposed model

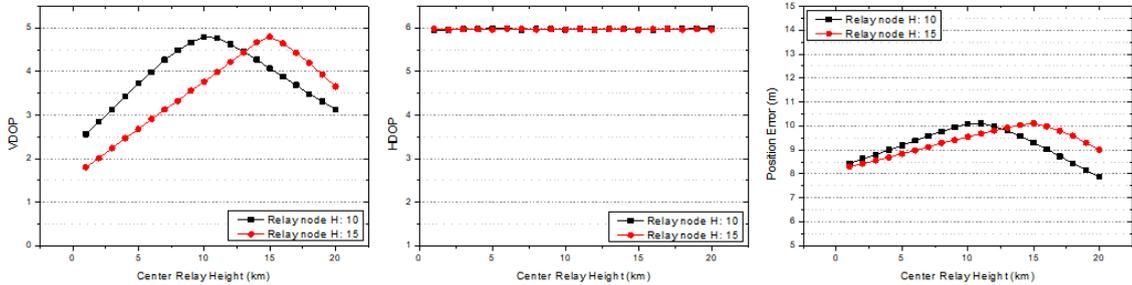


그림 4. 중앙 공중 중계기의 고도에 따른 VDOP, HDOP 및 위치오차 변화
 Fig. 4. Comparison of Position error and DOP about center airborne relay node height

양 공중 중계기의 고도와 위치오차와의 상관관계를 알아보기 위해, 중앙 공중 중계기의 고도를 변화시켜 시뮬레이션 하였다. 중앙 공중 중계기의 고도는 1~20km까지 변화 하였으며, 나머지 공중 중계기의 고도는 10km와 15km를 비교 하였다. 그림 4는 시뮬레이션의 결과를 나타내는 그래프이다. 중앙 공중 중계기의 고도를 1km에서 20km까지 변화하며 역방향 사면체 모델에서 정방향 사면체 모델로 변화시켜 위치오차 변화를 측정하였다. 중앙 공중 중계기의 고도가 변화하며 역방향 사면체 모델에서 정방향 사면체 모델로 변화함에 따라 VDOP는 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 이러한 이유는 중앙 공중 중계기의 고도가 증가함에 따라 역방향 사면체 모델에서 공중 중계기 고도 편차가 감소하였다가 정방향 사면체 모델로 변화하여 다시 편차가 증가하기 때문이다. 반면 HDOP는 큰 변화가 없었다. 두 번째 시뮬레이션의 결과로 그래프에서 공중 중계기 고도의 편차가 클수록 VDOP가 좋아져 더 적은 위치오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

기존 ARPS의 공중 중계기 운용 방식은 공중 중계기의 고도가 일정한 원형체도로 VDOP 값이 큰 단점이 있었다. 본 논문에서는 ARPS의 VDOP에 영향을 주는 요인을 분석하였고, 이를 바탕으로 공중 중계기 운용 모델을 제안하였다. 정방향 사면체 모델과 역방향 사면체 모델을 통해 위치오차를 개선하였다. 제안된 운용 모델을 검증하기 위해 MATLAB 시뮬레이션을 진행하였고, 시뮬레이션을 통해 제안된 운용 모델이 기존의 ARPS보다 VDOP로 인해 발생하는 위치오차를 개선하였다. 또한 서비스 지역 반경이 넓어질수록 제안한 모델의 위치오차가 적어 최대 통신 반경인 200km에서 10m~40m의 위치오차를 개선한 것을 확

인하였다. 위 결과를 통해 기 제안된 ARPS의 위치오차 개선을 위해 공중 중계기의 고도를 변화 시켜 운용하는 모델을 적용한다면 보다 넓은 서비스 반경과 낮은 위치오차를 갖는 방법을 제공할 수 있음을 검증하였다.

References

- [1] S. Wang, J. Min, and B. Yi, "Location based services for mobiles: Technologies and standards," in *Proc. IEEE ICC2008*, pp. 35-38, Beijing, China, May 2008.
- [2] X. Li, X. Zhang, X. Ren, M. Fritsche, J. Wickert, and H. Schuh, *Precise positioning with current multi- constellation global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou*, Scientific Reports, May 2015.
- [3] S. Lee and Ch. Park, "The current and future of GNSS," *J. KICS*, vol. 32, no. 8, pp. 11-15, Aug. 2015.
- [4] D. A. Grejner, et al., "Multisensor navigation systems: a remedy for GNSS vulnerabilities?," in *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 6, pp. 1339-1353, Jun. 2016.
- [5] K. Ko, "Circumstance change of GNSS & Application strategy of navigation technology for modern weapon system," *J. KIICE*, vol. 14, no. 1, Jan. 2010.
- [6] R. Sabatini, T. Moore, and C. J. Hill, "A new avionics-based GNSS integrity augmentation system: Part 1 - Fundamentals," *J. Navigation*, vol. 66, no. 3, pp. 363-384, May 2013,
- [7] T. Tsujii, C. Rizos, J. Wang, L. Dai, C.

- Roberts, and M. Harigae, "A navigation/positioning service based on pseudolites installed on strato-spheric airships," in *5th Int. Symp. Satellite Navig. Technol. & Appl.*, pp. 24-27, 2001.
- [8] Ch. Kee and D. Kim, "The core infrastructure of future combat field : Satellite navigation system," *The Mag. IEEE*, vol. 37, no. 11, pp. 77-92, Nov. 2010.
- [9] J. Wang, "Pseudolite applications in positioning and navigation: Progress and problems," *J. Glob. Position Syst.*, pp. 48-56. Jan. 2002.
- [10] L. Eldredge, P. Enge, M. Harrison, R. Kenagy, R. Lilly, S. Lo, R. Loh, M. Narins, and R. Niles, "GNSS vulnerability and alternative PNT," *GPS World*, vol. 21, pp. 38-39, 2010.
- [11] L. Dai, J. Wang, T. Tsujii, and C. Rizos, "Pseudolite applications in positioning and navigation: modelling and geometric analysis," in *Int. Symp. on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics & Navigation (KIS2001)*, pp. 482-489, 2001.
- [12] T. Tsujii, C. Rizos, J. Wang, L. Dai, C. Roberts, and M. Harigae, "A navigation/positioning service based on pseudolites installed on stratospheric airships," in *Proc. 5th Int. Symp. Sat. Nav. Tech. & Appl.*, pp. 24-27, Canberra, Australia, Jul. 2001.
- [13] L. Dai, J. Wang, T. Tsujii, and C. Rizos, "Inverted pseudolite positioning and some applications," *Survey Rev.*, vol. 36, pp. 602-611, 2002.
- [14] J. Barnes, C. Rizos, J. Wang, D. Small, G. Voigt, and N. Gambale, "Locata: a new positioning technology for high precision indoor and outdoor positioning," in *Proc. 16th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the Inst. Navig.*, pp. 1119-1128, USA, Sept. 2003.
- [15] J. Noronha, A. Jovancevic, N. Bhatia, B. Sirpatil, M. Kirchner, and D. Saxena, "Field test results of a flexible pseudolite based navigation system," in *Proc. 19th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the Inst. Navig.*, pp. 102-113, USA, Sept. 2006.
- [16] J. Jang, W. Ahn, S. Seo, J. Lee, and J. Park, "Flight test result for the ground-based radio navigation system sensor with an unmanned air vehicle," *Sensors*, vol. 15, pp. 28472-28489, 2015.
- [17] K. Lee, H. Noh, and J. Lim, "Airborne relay-based regional positioning system," *Sensors*, vol. 15, pp. 12682-12699, 2015.
- [18] E. D. Kaplan, *Understanding GPS : Principles and Applications*, Artech House, MA, 1996.
- [19] R. B. Langley, "Dilution of precision," *GPS world*, vol. 10, no. 5, pp. 52-59, 1999.
- [20] G. Dennis, S. Warren, and R. Michael, *Advanced Engineering Mathematics*, 4th Ed., Jones & Bartlett Learning, 2011

이진석 (Jinseok Lee)



2013년 2월 : 아주대학교 정보
컴퓨터공학과 졸업
2015년 2월 : 아주대학교 소프
트웨어특성화학과 석사
2015년 3월~현재 : 아주대학교
컴퓨터공학과 박사과정
<관심분야> 무선네트워크, 항
법 및 측위 공학

백호기 (Hoki Baek)



2006년 2월 : 아주대학교 정보
및 컴퓨터공학 학사
2008년 2월 : 아주대학교 정보
통신공학 석사
2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨
터공학 박사
2014년 3월~2015년 2월 : 아주
대학교 장위국방연구소 선임연구원
2015년 3월~현재 : 아주대학교 국방다지털융합학과
특임교수
<관심분야> 전송데이터링크, 다중 접속, 시간동기,
위치인식, 무선네트워크

임재성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자공학 학사

1985년 2월 : KAIST 영상통신 석사

1994년 2월 : KAIST 디지털통신 박사

1998년 3월~현재 : 아주대학교 소프트웨어학과 정교수

2004년 3월~현재 : 아주대학교 국방전술네트워크 연구센터장

<관심분야> 위성통신, 무선네트워크, 국방전술통신

박찬이 (Chanyi Park)



1998년 2월 : 부산대학교 컴퓨터공학과 졸업

2000년 2월 : POSTECH 컴퓨터공학과 석사

2000년 1월~2002년 1월 : LG 전자 주임연구원

2002년 1월~현재 : 국방과학연구소 책임연구원

<관심 분야> 전술통신, 이동통신, 위성통신, 모델링 & 시뮬레이션