

송신기 위치에 따른 GBAS 시스템의 DOP 분석

임중수*, 채규수* 정회원

DOP Analysis of Ground Based Augmentation System by the Position of Transmitter

Joong-Soo Lim*, Gyoo-Soo Chae* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 지상용 GPS(Global Positioning System)와 유사한 GBAS(Ground Based Augmentation Systems)의 위치측정오차에 대해서 연구하였다. GBAS의 위치측정오차에 영향을 주는 요소는 많이 있으며 측위오차(DOP: Dilution Of Precision)도 그 중의 하나이다. 측위오차는 송신기와 수신기의 수와 기하학적 배치위치에 따라서 결정된다. 본 연구에서는 한반도 지형에 2-열로 송신기를 배치하고 수신기의 위치에 따른 고도별 DOP를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 본 논문은 송신기와 수신기가 배치된 3차원 공간의 DOP를 정확하게 예측할 수 있어서 항법시스템에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words : dilution of precision(DOP); GNSS; GPS; satellite; navigation; transmitter; antenna; receiver.

ABSTRACT

In this paper, we describe on the position error of GBAS. In reality, there are many sources which make errors into the calculation of receiver position. It is well known that the DOP of GBAS is an important position error source and is dependent on the numbers and positions of the transmitters. Here, we develop an algorithm to calculate the DOP of the GNSS with 2-line transmitters into Korean area. The result is useful to predict the DOP of the positions where transmitters and receivers are located.

I. 서론

21세기에는 위성을 이용하는 위성항법장치(GNSS: Global Navigation Satellite System)가 매우 다양하게 활용되고 있으며 대표적으로 미국의 GPS(Global Positioning System), 유럽의 GALILEO, 러시아의 GLONASS(GLObal'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), 중국의 베이더우(北斗)와 같은 시스템이 있다[1]. 우리나라에서 많이 사용하는 GPS 위성항법시스템은 지상으로부터 약 20,000 km 높이에 있는 위성으로부터 송출 되는 신호를 사용하기 때문에 신호세기가 매우 약해서 기상상태나 전파 간섭, 특히 전파방해에 매우 취약하다.

이러한 위성항법시스템이 지니고 있는 문제점을 보완하기 위해서 세계 각국은 패치형태로 된 수신기용 배열안테나를 사용하여 전파방해를 줄이거나[2], 지상에 GPS오차를 보

완하는 기준국을 설치하거나 또는 GBAS(Ground Based Navigation System)와 같은 일종의 지상 GPS 시스템을 구축하여 사용한다. GBAS는 GPS와 구성이나 운용개념이 유사하며 지상에 4 개 이상의 송신기(또는 신호원)를 위성대신에 설치하여 GPS위성에서 송신하는 신호와 같거나 유사한 신호를 송신하는 시스템이다[3].

GPS와 GBAS를 이용하여 위치측정 시 정확성을 감소시키는 요인으로 송신신호원 시간오차, 위치오차, 전리층과 대류층의 굴절, 신호잡음, 다중경로, 신호원의 기하학적 배치 등이 있다.

본 연구에서는 GBAS의 전파항법 신호원과 수신기의 3차원 공간에서 기하학적 배치에 따른 측위오차(DOP: Dilution Of Precision)를 중점적으로 분석하였다. 또한 이것을 한반도 지형에 대입하여 각 지형에서 신호원의 위치가 결정되면 고도별로 DOP를 예측할 수 있는 도구를 개발하였다.

본 논문은 중소기업청의 산학연공동기술개발사업으로 수행하였음

*백석대학교(Baekseok University)

* 주저자 이메일: jslim@bu.ac.kr

접수일자 : 2013년 2월 15일, 수정완료일자 : 2013년 2월 25일, 최종 게재확정일자 : 2013년 3월 4일

II. GPS와 GNSS의 DOP 계산

그림 1은 GPS 위성을 이용한 측위에 사용되는 좌표계를 보여주고 있다. 일반적으로 수신기를 기준으로 4개 이상의 위성들이 공간에 고르게 분포되어 있는 경우에 측위오차가 작게 된다. 그림 1에서 (x, y, z) 는 수신기 위치이며 (x_i, y_i, z_i) 는 각 위성의 위치이다. 또한 수신기에서 i 번째 위성까지의 거리는 R_i 이다.

위성의 공간적인 분포에 의한 측위오차의 종류는 수평방향 지형오차를 표시하는 Horizontal DOP(HDOP), 수직방향 지형오차를 표시하는 Vertical DOP(VDOP), 3차원 공간 오차를 표시하는 Geometric DOP(GDOP), 시간과 공간오차를 동시에 나타내는 PDOP(Positional DOP) 등이 있다.

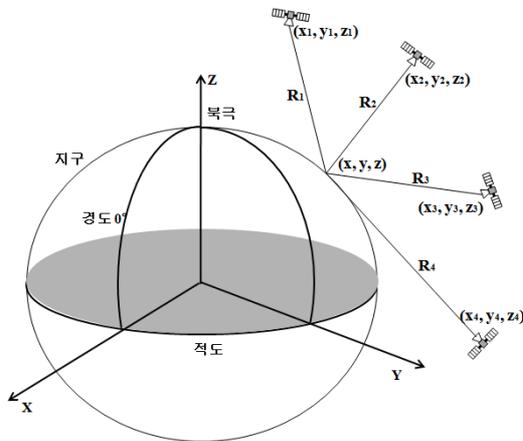


그림 1. GPS에 적용한 ECEF 좌표체계

그림 2는 GNSS 에서 4 개의 신호원과 수신기의 상호 관계를 보여주고 있다. 그림에서 수신기의 실제위치를 (x, y, z) , 수신기의 가상위치(pseudo range)를 (x_o, y_o, z_o) , 실제위치와 가상위치의 거리오차를 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 라고 하면 수신기의 실제위치는 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$[x, y, z] = [x_o + \Delta x, y_o + \Delta y, z_o + \Delta z] \quad (1)$$

그리고 i 번째 신호원에서 수신기의 실제위치까지의 거리 R_i 는 식 (2), 신호원에서 가상위치까지의 거리 D_i 는 식 (3)과 같다. 또한 수신기의 수신시간 오차 δ_t 를 고려한 신호원에서 수신기까지의 거리 ρ_o^i 는 식 (4)와 같다[4-5].

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}. \quad (2)$$

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 + (z_i - z_o)^2}. \quad (3)$$

$$\rho_o^i = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 + (z_i - z_o)^2} + c \delta_t. \quad (4)$$

i 번째 신호원에서 수신기 실제위치까지의 거리 $R_i(t)$ 는 식 (2)에 식(1), (4)를 대입하여 Taylor series를 적용하여 계산하면 식(5)와 같다.

$$R_i(t) = \rho_o^i(t) - \frac{x_i(t) - x_o}{\rho_o^i(t)} \Delta x - \frac{y_i(t) - y_o}{\rho_o^i(t)} \Delta y - \frac{z_i(t) - z_o}{\rho_o^i(t)} \Delta z + c\delta_t(t) - c\delta(t) \quad (5)$$

식 (5)를 n 개의 신호원에 대하여 정리하여 행렬식으로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$\begin{pmatrix} R_1(t) - \rho_o^1(t) - c\delta_1(t) \\ R_2(t) - \rho_o^2(t) - c\delta_2(t) \\ \vdots \\ R_n(t) - \rho_o^n(t) - c\delta_n(t) \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ -c\delta(t) \end{pmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서 4개의 신호원을 사용하는 경우에 대한 H 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$H = \begin{pmatrix} \frac{(x_1 - x_o)}{\rho_o^1(t)} & \frac{(y_1 - y_o)}{\rho_o^1(t)} & \frac{(z_1 - z_o)}{\rho_o^1(t)} & 1 \\ \frac{(x_2 - x_o)}{\rho_o^2(t)} & \frac{(y_2 - y_o)}{\rho_o^2(t)} & \frac{(z_2 - z_o)}{\rho_o^2(t)} & 1 \\ \frac{(x_3 - x_o)}{\rho_o^3(t)} & \frac{(y_3 - y_o)}{\rho_o^3(t)} & \frac{(z_3 - z_o)}{\rho_o^3(t)} & 1 \\ \frac{(x_4 - x_o)}{\rho_o^4(t)} & \frac{(y_4 - y_o)}{\rho_o^4(t)} & \frac{(z_4 - z_o)}{\rho_o^4(t)} & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

따라서 측위 정확도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q = (H^T H)^{-1} = \begin{bmatrix} d_{xx}^2 & d_{xy}^2 & d_{xz}^2 & d_{xt}^2 \\ d_{xy}^2 & d_{yy}^2 & d_{yz}^2 & d_{yt}^2 \\ d_{xz}^2 & d_{yz}^2 & d_{zz}^2 & d_{zt}^2 \\ d_{xt}^2 & d_{yt}^2 & d_{zt}^2 & d_t^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

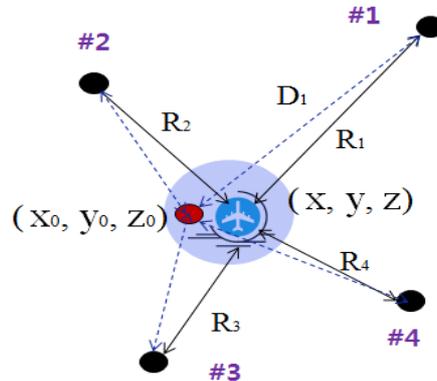


그림 2. GNSS에서 신호원과 수신기의 위치

$$HDOP = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (9)$$

$$VDOP = \sqrt{d_z^2} \quad (10)$$

$$PDOP = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad (11)$$

$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2} \quad (12)$$

대부분의 수신기는 PDOP가 낮은 위성 조합을 선택하여 측위계산을 하고 이를 표시하도록 설계되어 있다. 본 논문에서는 Matlab을 이용하여 식 (9)~(12)의 DOP를 실제지형에서 정확하게 계산하는 알고리즘을 개발하였다.

III. 안테나 위치에 따른 DOP 분석

그림 3은 지상에 배치된 항법신호원의 배치 모양을 보여 주고 있다. 그림 3(a)의 경우는 신호원이 일직선 형태로 배열된 경우로써 신호원 위의 일정고도에서는 DOP가 낮은 값을 가지지만 신호원 전방지역으로는 DOP가 매우 높은 값을 가지게 된다. 그림 3(b)는 신호원이 곡면으로 배치된 경우로써 신호원 전방 좁은 범위에서는 아주 낮은 DOP를 가지는 영역이 있으나 대부분의 지역에서 DOP가 높다. 그림 3(c)의 경우는 사각형 모양 배치로써 신호원 주위 넓은 지역에서 낮은 DOP를 가지는 것으로 알려져 있다.

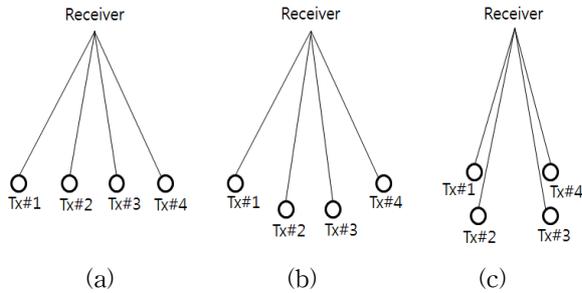


그림 3. GNSS의 신호원 배치 종류

본 논문에서는 넓은 지역에서 낮은 DOP를 확보할 수 있고, 신호원 배치위치를 정확하게 수식화하기 위해서 그림 3(c)와 같은 사각형 구조를 확장하여 12개의 신호원을 2-열로 배치한 그림 5와 같은 신호원배치를 사용하였다.

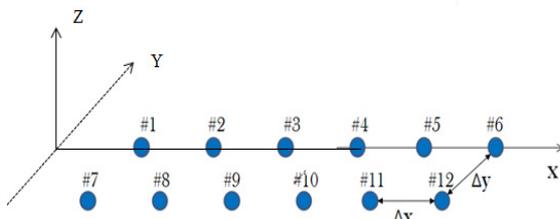


그림 4. 2-열로 배치된 신호원 좌표계

또한 실제적인 지형좌표를 적용하기 위해서 북위 35-37도, 동경 126-128의 지도데이터를 사용하여 북위 36도 5분, 동경 127도 15분을 중심점으로 $\Delta x = 40 \text{ km}$, $\Delta y = 40 \text{ km}$ 로 안테나를 2-열로 배치하였다.

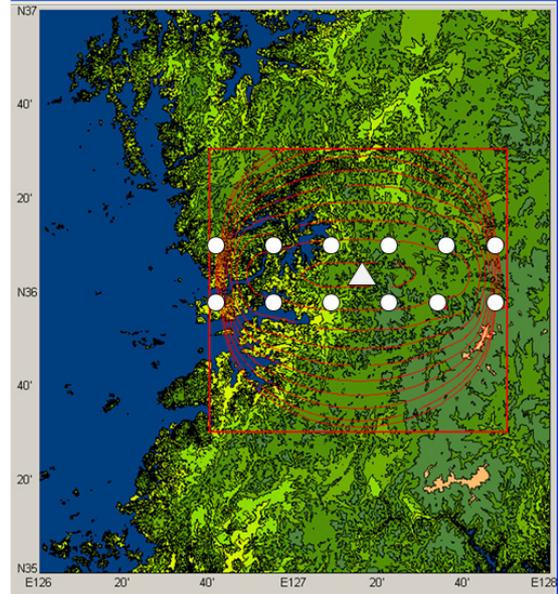


그림 5. 지도상에 2-열로 배치된 신호원 모양

동일한 지면 좌표에서도 HDOP은 고도에 따라 변한다. 본 논문에서는 항공기 등의 비행 고도가 10 km 이하인 것을 고려하여 고도 10 km에서의 HDOP 변화를 분석하였다. 그림 5와 같은 신호원 배치에서는 고도가 증가할수록 HDOP가 커진다.

그림 6은 그림 5의 신호원 배치에서 고도 10 km에서 HDOP를 계산하여 3차원으로 표시한 모양이다. 그림에서 HDOP는 북위 36도 5분, 동경 127도 15분을 기준으로 신호원 중심에서 멀어질수록 HDOP가 빠르게 증가하는 것을 볼 수 있다.

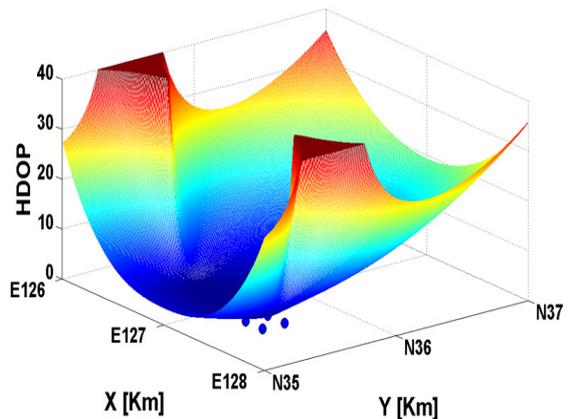


그림 6. 2-열 배열 신호원의 3차원 HDOP

IV. 2-열 배치 신호원의 HDOP 분석 결과

신호원 배치 간격에 대한 HDOP 변화를 분석하기 위해서 그림 5의 지형에서 $\Delta x = \Delta y = 20\text{ km}$, 40 km , 60 km 로 변화시키면서 고도 10 Km에서의 HDOP 변화를 2차원 그래프로 도시하여, 안테나 배치 간격에 따른 X축 방향의 HDOP 변화패턴과 Y축 방향의 HDOP 변화패턴을 분석하였다[6].

그림 7은 $\Delta x = \Delta y = 20\text{ km}$ 로 신호원이 배치된 경우이다. 신호원 배열 중심점에서 X축 방향으로 HDOP가 0.8로 유지되다가 좌우 최외각 신호원 부근(중심에서 49.6 km)에서는 2.5로 변하고, 신호원 외부에서는 2.5 이상이 된다. Y축 방향으로 0.8에서 시작하여 중심에서 멀어질수록 증가하여 신호원 배열 중심에서 HDOP가 2.5가 되는 거리(Y_s)는 49.7 km가 되는 것을 알 수 있다.

그림 8은 $\Delta x = \Delta y = 40\text{ km}$ 로 신호원이 배치된 경우이다. 신호원 배열 중심점에서 X축 방향으로 HDOP가 0.8로 유지되다가 좌우 최외각 안테나 부근(중심에서 98.4 km)에서는 2.5로 변한다. Y축 방향으로 HDOP가 2.5가 되는 거리(Y_s)는 신호원 배열 중심에서 95.48 km가 되는 것을 알 수 있다.

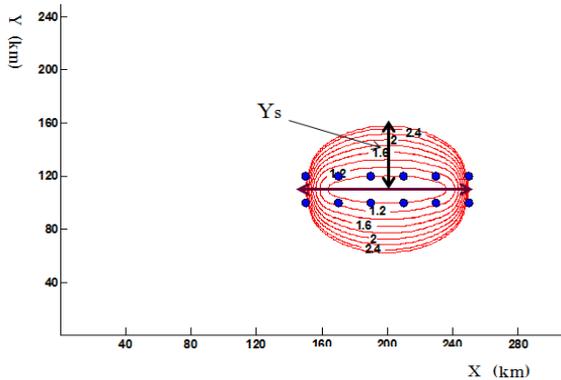


그림 7. HDOP 2.5 영역($\Delta x=20\text{ km}$, $\Delta y=20\text{ km}$)
 X축 방향 신호원폭 : 100 Km
 HDOP \leq 2.5 가로영역 : 99.2 km
 HDOP \leq 2.5 Y_s 영역 : 49.7 km

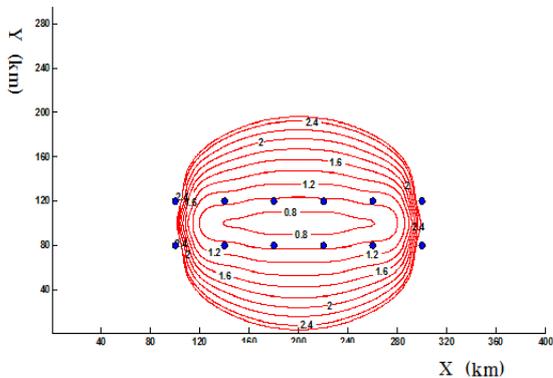


그림 8. HDOP 2.5 영역($\Delta x=40\text{ km}$, $\Delta y=40\text{ km}$)
 X축 방향 신호원폭 : 200 Km
 HDOP \leq 2.5 가로영역 : 196.8 km
 HDOP \leq 2.5 Y_s 영역 : 95.6 km

그림 9는 $\Delta x = \Delta y = 60\text{ km}$ 로 신호원이 배치된 구조이다. 신호원 배열 중심점에서 X축 방향으로 HDOP가 0.8로 유지되다가 좌우 최외각 안테나 부근에서는 2.5로 변한다. Y축 방향으로 HDOP가 2.5가 되는 거리(Y_s)는 신호원 배열 중심에서 143.6 km가 되는 것을 알 수 있다.

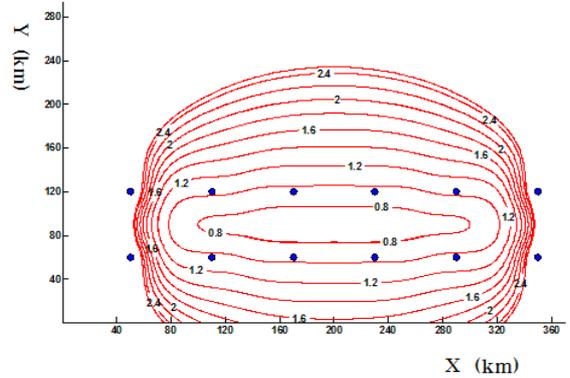


그림 9. HDOP 2.5 영역($\Delta x=60\text{ km}$, $\Delta y=60\text{ km}$)
 X축 방향 신호원폭 : 300 Km
 HDOP \leq 2.5 가로영역 : 294.4 km
 HDOP \leq 2.5 Y_s 영역 : 143.6 km

그림 7, 8, 9에서 $\Delta x = \Delta y = 20\text{ km}$, 40 km , 60 km 로 변화는 경우에 대해서 HDOP 2.5를 만족하는 X축 방향의 길이는 99.2 km, 196.8 km, 294.4 km가 되어서 X축 방향으로 배치된 안테나들의 배치 길이와 비슷한 것을 알 수 있다. 또한 HDOP 2.5를 만족하는 Y축 방향의 폭을 Y_s 로 표시하면 49.7 km, 95.6 km, 143.6 km가 되어서 Δx 의 약 2.4 배가 되는 것을 알 수 있다. 이러한 조건에서 $\Delta x (= \Delta y)$ 와 Y_s 의 변화에 대한 HDOP를 도시하면 그림 10과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이는 주어진 지형과 신호원 배치에서 HDOP를 예측할 수 있는 중요한 자료가 된다. 예를들면, 그림 10에서 신호원 배치간격 $\Delta x = \Delta y = 20\text{ km}$ 인 경우, Y_s 가 80 km이고 고도가 10 km 지점의 HDOP는 약 4.0이 되는 것을 알 수 있다.

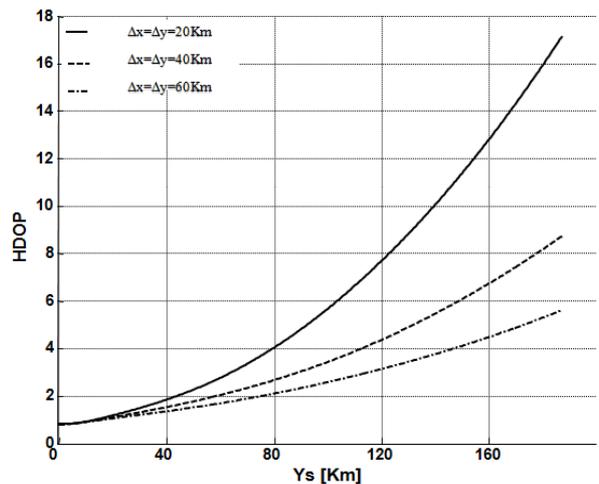


그림 10. 그림 5의 신호원 거리와 HDOP

V. 결론

본 논문에서는 GNSS에서 신호원을 2-열로 배치하는 경우에 Δx 와 Δy 의 변화에 대한 고도별 HDOP의 변화를 분석하였으며, 신호원을 실제지형 고도데이터(DTED: Digital Terrain Elevation Data)와 연계하여 지도상의 실제 위치에 신호원을 배치한 후 고도별로 HDOP를 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 그리고 한반도 지형에 2-열 구조로 신호원을 배치하여 고도 10 km에서 $\Delta x (= \Delta y)$ 와 HDOP을 분석한 결과를 제시하여 3차원 공간의 HDOP를 예측할 수 있게 되었다. 특히 본 연구에서 실제 지형을 반영한 HDOP 계산방법은 2차원 평면에 신호원을 배치하여 계산한 종래의 경우보다 더 정확한 HDOP 예측이 가능하여서 향후 다양한 항법시스템 설계에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] Shau-Shiun Jan, G. Demoz, and Per Enge, "Improving GPS-Based Landing System Performance using an Empirical Barometric Altimeter Confidence Bound," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. 44, no. 1, pp. 127-130, 2008.
- [2] Richard A. Poisel, Antenna Systems and Electronic Warfare Applications, Artech House, 2012, pp. 608-611.
- [3] D. Odijk and F. Kleijer, "Can GPS be used for Location Based Services at Schiphol Airport, the Netherland?," Proceeding of the 5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, pp. 143-150, 2008.
- [4] R. P. M. Ruggieri, Applied Satellite Navigation using GPS, Galileo, and Augmentation Systems, Artech House, 2005, pp. 30-34.
- [5] R. O. Nielsen, "Relationship between dilution of precision for point positioning and for relative positioning with GPS," IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, vol. 33, no. 1, pp. 333-338, Jan., 1997.
- [6] 임중수, 채규수, "항공기용 지상 GPS 시스템의 송신 안테나 최적 배치 방법", 통신위성우주산업연구회논문지, 제 7권 3호, pp. 105-109, 2012.

저자

임 중 수(Joong Soo Lim)



- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 - 1994년 3월 : 미국 Auburn 대학교 E.E 대학원졸업(공학박사)
 - 1994년 3월~03년 2월 : 국방과학연구소 책임연구원/실장
 - 2003년 3월~현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수/창업보육센터 소장
 - 2007년 1월~현재 : 한국군사과학기술학회 평의원
 - 2011년 1월~현재 : 통신위성우주산업연구회 이사
- <관심분야> : 위성통신, 전파전파, 전자파 이론, 전자전

정희원

채 규 수(Gyoo Soo Chae)



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 - 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과 대학원졸업(공학석사)
 - 2000년 12월 : Virginia Tech. E.E 대학원졸업(공학박사)
 - 2003년 3월~현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- <관심분야> : 위성통신, 전파전파, 안테나 설계.