
전파항법 신호원의 배치에 따른 측위 정확도 분석

임중수^{1*}, 채규수¹, 김민년¹, 김영호¹

¹백석대학교 정보통신학부

Analysis of DOP using Radio-navigation Transmitter

Joong-Soo Lim^{1*}, Gyoo-Soo Chae¹, Min-Nyun Kim¹, Young-Ho Kim¹

¹Division of Information & Communication Eng., Baekseok University

요약 본 논문은 지상에 배치된 전파항법신호원의 배치에 따른 측위 정확도 분석에 대한 연구결과이다. 의사위성의 배치 간격에 따라 수신기에서의 측위 정확도(DOP, Dilution of Precision)가 결정된다. 본 논문에서는 다양한 배치에 따른 측위 정확도를 이론적인 연구결과를 이용하여 분석한 결과를 제시하였다. 특히 의사위성의 배치 시 디지털 지형 지도를 이용하여 정확한 위치에서 계산 될 수 있도록 하였고 측위정확도를 계산하기위한 프로그램을 구현하였다.

• **주제어** : 전파항법, 신호원, 다중경로, 디타이디, 디오판

Abstract In this study, we investigate on location optimization algorithm of radio-navigation transmitter. The DOP for an each receiver is decided by the location of a transmitter. We provide various results that give an optimum DOP according to propagation characteristics. We use the DTED(Digital Terrain Elevation Data) to improve the accuracy.

• **Key Words** : Propagation path, Radio-navigation, Multi-path, DTED, DOP

1. 서론

최근에 위성항법장치들이 일상생활에 널리 사용되고 있고 다양한 수신기가 판매되고 있다. 특히, 군사용으로 는 유도무기에서 다양하게 활용되고 있다. 특히 미래의 전장은 네트워크중심전(NCW: Network Center Warfare)이 될 것으로 예상되며 이러한 전장 환경에서 GPS를 이용한 위치기반 항법장치에 대한 중요성과 의존도가 증가 될 것으로 예상된다. 그러나 GPS 신호체계는 공개되어 있기 때문에 전파방해에 취약하여 안정적인 전장 환경을 구축 할 필요성이 제기되고 있다. GPS와 같이 전파를 이용한 전파항법 시스템의 위치정확도는 전파항법 신호원과 수신기의 기하학적 배치에 따라 결정되므로 최적의

항법정확도를 확보하기 위해서는 기하학적 배치의 척도인 DOP가 최소화 되도록 전파항법 신호원의 위치를 선정하여야 한다. 또한 전파항법 신호원 서비스지역의 지형지물 등 전달경로를 분석하여 신호원간의 데이터링크, 신호의 가시성 등이 확보되도록 전파항법 신호원의 위치를 선정하여야 한다. 이를 위해 신호원 서비스지역의 지형지물 등 전달경로를 분석하여 신호원으로부터 방사되는 전파의 분포를 계산하는 프로그램의 개발이 요구된다. 그래서 전파항법 신호원의 서비스지역을 실시간으로 변경 또는 확대 시에 전파항법 시스템의 활용도를 극대화 하고 항법성능을 최대로 보장할 수 있도록 서비스지역의 지형지물 등 전달경로에 따른 전파특성과 측위 정확도를 고려한 최적의 전파항법 신호원 위치 선정 알고리즘에

*교신저자 : 채규수(gschaeb@bu.ac.kr)

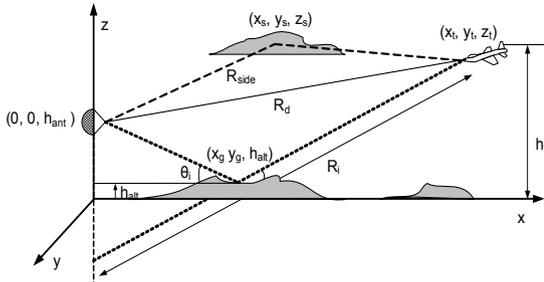
대한 연구가 필요하다.

의사위성(Pseudolite) 시스템은 공중과 지상에서 구축이 가능하나 본 연구에서는 지상에 구축되는 의사위성 송신기의 전파가 지형지물에 의한 영향을 최소화 하는 최적의 위치를 찾는 방법에 관한 연구가 진행 될 것이다.

2. 본 론

2.1 다중경로 전파환경 분석

지상에 설치될 의사위성의 위치는 전파의 전달 경로에 따라 다양한 영향을 받게 된다. 일반적인 전파의 다중 경로에 대한 분석은 직접파와 지면 반사파에 제한적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 전파의 수직면 반사를 고려하여 보다 정확한 전파 모델을 제시하고자 한다. 전파 항법 신호원 환경의 특성상 수직 반사의 특성을 분석하고 정확한 모델을 만들 필요성이 제기되었다. 본 연구에서 제시하는 모델을 기본으로 여러 개의 수직반사를 고려한 모델을 쉽게 구현 할 수 있다[1-3].



[Fig. 1] Propagation model for horizontal and vertical reflection

송신 안테나에서 목표물까지의 직접파의 경로를 R_d , 지면 반사파의 경로를 R_i , 수직반사 경로를 R_{side} 라고 하면 각 경로의 길이는 다음과 같이 표현된다.

$$R_d = \sqrt{x_t^2 + y_t^2 + (z_t - h_t)^2} \quad (1)$$

$$R_i = \sqrt{x_t^2 + y_t^2 + (z_t + h_{ant} - h_t)^2} \quad (2)$$

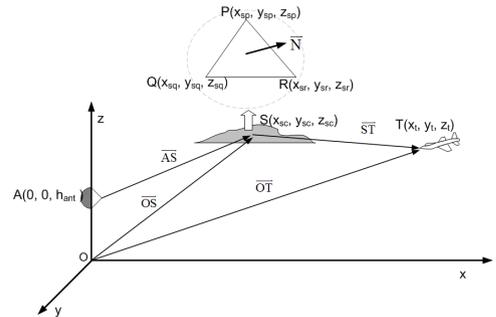
$$R_{side} = \sqrt{x_t^2 + (y_t - 2y_s)^2 + (z_t - h_{ant})^2} \quad (3)$$

지면 반사와는 달리 수직 반사의 경우에는 수직한 반사면이 각 목표물에 영향을 주는 지 확인하는 과정이 필

요하다. 지면 반사는 송신 안테나와 목표물 사이에 어느 한 지점에서는 영향을 주지만 수직면의 경우에는 수직면의 법선 벡터가 목표물과 송신 안테나 그리고 수직 반사면의 중심이 이루는 면 위에 있을 때 반사파가 영향을 준다. 물론 수직면의 중심에서 목표물의 이격 거리에 따라 반사파의 영향이 최종 결정된다. 그래서 송신 안테나와 목표물 사이에 존재하는 수직면의 법선 벡터를 구하고 목표물에 반사파의 도착 여부를 확인한다. 그림 2에서 수직 반사면의 법선 벡터를 선분 \overrightarrow{PR} 과 \overrightarrow{PQ} 의 외적으로 구할 수 있다.

$$\overrightarrow{PQ} = \overrightarrow{OQ} - \overrightarrow{OP} = (x_{sq} - x_{sp})\hat{x} + (y_{sq} - y_{sp})\hat{y} + (z_{sq} - z_{sp})\hat{z} \quad (4)$$

$$\overrightarrow{PR} = \overrightarrow{OR} - \overrightarrow{OP} = (x_{sr} - x_{sp})\hat{x} + (y_{sr} - y_{sp})\hat{y} + (z_{sr} - z_{sp})\hat{z} \quad (5)$$



[Fig. 2] Propagation model for vertical reflection 두 벡터의 외적을 구하면

$$\begin{aligned} \overrightarrow{N} &= \overrightarrow{PQ} \times \overrightarrow{PR} \\ &= \hat{x}\{(y_{sq} - y_{sp})(z_{sr} - z_{sp}) - (y_{sq} - y_{sp})(z_{sr} - z_{sp})\} \\ &\quad + \hat{y}\{(x_{sr} - x_{sp})(z_{sq} - z_{sp}) - (x_{sq} - x_{sp})(z_{sr} - z_{sp})\} \\ &\quad + \hat{z}\{(x_{sq} - x_{sp})(z_{sr} - z_{sp}) - (x_{sr} - x_{sp})(y_{sq} - y_{sp})\} \end{aligned} \quad (6)$$

이 되고 수직 반사면의 중심 좌표는

$$\overrightarrow{S_c} = \left(\frac{x_{sp} + x_{sq} + x_{sr}}{3} \right)\hat{x} + \left(\frac{y_{sp} + y_{sq} + y_{sr}}{3} \right)\hat{y} + \left(\frac{z_{sp} + z_{sq} + z_{sr}}{3} \right)\hat{z} \quad (7)$$

이다. 그리고 수직 반사면의 중심에서 송신 안테나사이의 벡터를 \overrightarrow{SA} 라고 하면

$$\vec{SA} = -\left(\frac{x_{sp} + x_{sq} + x_{sr}}{3}\right)\hat{x} - \left(\frac{y_{sp} + y_{sq} + y_{sr}}{3}\right)\hat{y} - \left(\frac{z_{sp} + z_{sq} + z_{sr} - h_{ant}}{3}\right)\hat{z} \quad (8)$$

이 되고 \vec{SA} 와 \vec{N} 벡터가 이루는 각을 구하면

$$\theta_{SAN} = \cos^{-1}\left(\frac{\vec{SA} \cdot \vec{N}}{|\vec{SA}| |\vec{N}|}\right) \quad (9)$$

이 된다. 그리고 수직 반사면의 중심에서 목표물 사이의 벡터는 \vec{ST} 라고 하면

$$\vec{ST} = \left(x_t - \frac{x_{sp} + x_{sq} + x_{sr}}{3}\right)\hat{x} + \left(y_t - \frac{y_{sp} + y_{sq} + y_{sr}}{3}\right)\hat{y} + \left(z_t - \frac{z_{sp} + z_{sq} + z_{sr}}{3}\right)\hat{z} \quad (10)$$

이다. \vec{ST} 와 \vec{N} 벡터가 이루는 각을 구하면

$$\theta_{STN} = \cos^{-1}\left(\frac{\vec{ST} \cdot \vec{N}}{|\vec{ST}| |\vec{N}|}\right) \quad (11)$$

이 된다. 여기서, 수직 반사면이 목표물에 영향을 주기 위해서는 θ_{SAN} 과 θ_{STN} 이 같아야 한다. 물론 반사면의 확산 특성에 따라 일정한 편차이내의 각도가 되면 반사파가 목표물에 영향을 주게 된다.

앞에서 다룬 직접파와 지면 반사파 그리고 수직 반사파가 고려된 목표물에서의 전계의 세기 E_{side} 는

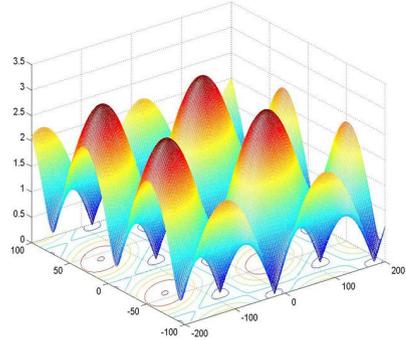
$$E_{side} = A(e^{2j\pi R_d/\lambda} + \Gamma_s e^{2j\pi R_i/\lambda} + \Gamma_{side} e^{2j\pi R_{side}/\lambda}) \quad (12)$$

로 표현된다. 여기서, Γ_s 는 지표면 반사계수(≈ -1)이고 Γ_{side} 는 수직면 반사계수($-0.5 \sim -0.9$)이다. 그림 3에서 식 (12)를 이용한 다중경로 상황에서 전계의 세기를 구하는 프로그램의 테스트를 위해 목표물 주위의 특정 단면적에서 전계의 분포를 보여주고 있다.

2.2 측위 정확도(DOP) 계산

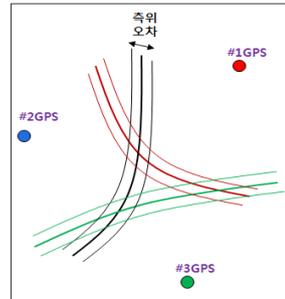
측위 시 이용되는 위성들의 배치상황에 따라 오차가 증가하게 되는데, 이는 육상에서 육안으로(독도법) 위치를 낼 때 적당한 간격의 물표를 선택하여 독도법을 실시하면 오차삼각형이 적어위치가 정확해지고, 물려있는 물표를 이용하는 경우 오차삼각형이 커져서 위치가 부정확해지는 것과 마찬가지로 수신기 주위로 위성이 적당히 고르게 배치되어 있는 경우에 위치의 오차가 작아진다.

보이는 위성의 배치의 고른 정도를 측위정확도(DOP)라고 한다[1-3].



[Fig. 3] Electric field intensity for horizontal and vertical reflection environment

그림 4에서와 같이 일반적으로 위성들 간의 공간이 더 많으면 많을수록 수신기에서 결정하는 위치정밀도는 높다고 할 수 있는데, DOP의 종류는 여러 가지가 있지만 가장 많이 사용되는 것은 PDOP(Positional DOP)이다. PDOP에 실효 UERE(User Equivalent Range Error)를 곱하면 실효 위치오차가 된다.



[Fig. 4] Position error due to the GPS location

그 이외의 종류에는 Geometric DOP (GDOP), Horizontal DOP (HDOP), 그리고 Vertical DOP (VDOP) 등이 있다

GPS수신기는 관측된 데이터를 이용하여 PDOP를 계산하고, 이를 거리오차에 곱하면 측위 오차가 된다. 즉, (거리오차; Range Error) * (PDOP) = (측위오차)가 된다 [4].

$$R_1 = \sqrt{(x_t^i - x_i)^2 + (y_t^i - y_i)^2 + (h_t - (h_a + dted(x_i, y_i)))^2} \quad (13)$$

$$R_2 = \sqrt{(x_1^i - MV1_x)^2 + (y_1^i - MV1_y)^2 + (h_i - (h_u + dted(MV1_x, MV1_y)))^2} \quad (14)$$

$$R_3 = \sqrt{(x_1^i - MV2_x)^2 + (y_1^i - MV2_y)^2 + (h_i - (h_u + dted(MV2_x, MV2_y)))^2} \quad (15)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(x_1-x)}{R_1} & \frac{(y_1-y)}{R_1} & \frac{(z_1-z)}{R_1} & c \\ \frac{(x_2-x)}{R_2} & \frac{(y_2-y)}{R_2} & \frac{(z_2-z)}{R_2} & c \\ \frac{(x_3-x)}{R_3} & \frac{(y_3-y)}{R_3} & \frac{(z_3-z)}{R_3} & c \\ \frac{(x_4-x)}{R_4} & \frac{(y_4-y)}{R_4} & \frac{(z_4-z)}{R_4} & c \end{bmatrix} \quad Q = (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} d_x^2 & d_{xy}^2 & d_{xz}^2 & d_{xt}^2 \\ d_{xy}^2 & d_y^2 & d_{yz}^2 & d_{yt}^2 \\ d_{xz}^2 & d_{yz}^2 & d_z^2 & d_{zt}^2 \\ d_{xt}^2 & d_{yt}^2 & d_{zt}^2 & d_t^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$PDOP = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad (17)$$

$$TDOP = \sqrt{d_t^2} \quad (18)$$

$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2} \quad (19)$$

따라서 대부분의 수신기는 PDOP의 작은 위성 조합을 선택하여 측위계산을 하고 이를 표시하도록 설계되어 있다. 최근 수신기의 성능이 좋아져서 PDOP가 3인 경우 위치오차는 대략 15m CEP (Circular Error Probability), 즉, 50%오차 확률의 범위에서 평면으로 약 15m정도이다.

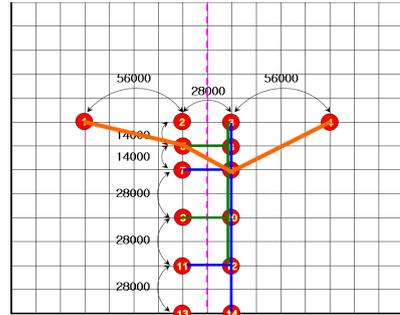
2.3 측위정확도 분석결과

그림 5는 신호원의 배치 상황을 보여주고 있다. 각 신호원의 배치위치가 번호로 나타나 있고 4개의 신호원이 선택되는 경우를 시나리오 별로 구분하여 그 경우에 대한 측위 정확도를 계산하였다. 그림 6에서는 신호원 중에서 **SC01-1**: ①-⑤-⑧-④번만 선택된 경우 신호원 전방 고도 1km상공에서 측위 정확도(DOP 2.5이하)를 표시하였다. 그림 7에서는 각 신호원의 배치 위치가 나타나 있다.

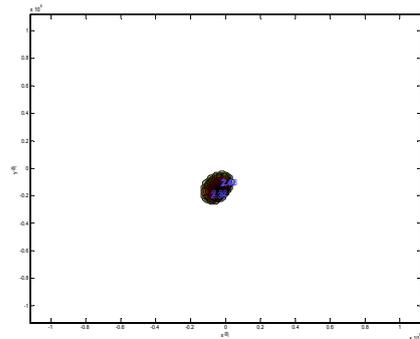
그림 8에서는 신호원 위치가 **SC01-2**: ①-⑤-⑧-④, ③-⑥-⑧-⑦, ③-⑧-⑩-⑦, ⑧-⑩-⑫-⑨, ⑩-⑫-⑭-⑪의 5개 조합을 사용하여 측위 정확도를 계산한 결과이다. 그림 9에서는 신호원 위치를 **SC01-3**: ①-⑤-⑧-④, ③-⑥-⑧-⑦, ③-⑧-⑩-⑦ ⑧-⑩-⑫-⑨, ⑩-⑫-⑭-⑪, ②-

⑤-⑦-⑥, ②-⑦-⑨-⑧, ⑦-⑨-⑪-⑩, ⑨-⑪-⑬-⑫ 사 용한 경우에 대한 결과이다.

그림 10에서는 신호원 중에서 **SC02-1**: ①-⑦-⑩-④ 번만 선택된 경우 신호원 전방 고도 1km상공에서 측위 정확도(DOP 2.5이하)를 표시하였다.



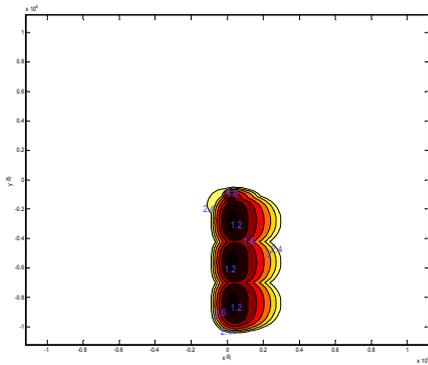
[Fig. 5] A scenario of radio-navigation arrangement



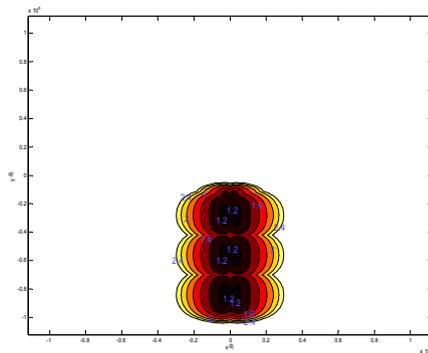
[Fig. 6] A scenario of radio-navigation arrangement (SC01-1)

배치	안테나						비행체						비행체 이동	
	X축			Y축			X축			Y축			ΔX	ΔY
1	-112000 ~ 112000			0 ~ -112000			-112000 ~ 112000			-112000 ~ 112000			1000	1000
위치	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
X	-7000	-1400	1400	7000	-1400	1400	-1400	1400	-1400	1400	-1400	1400	-1400	1400
Y	0	0	0	0	-14000	-14000	-28000	-28000	-56000	-56000	-84000	-84000	-112000	-112000
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

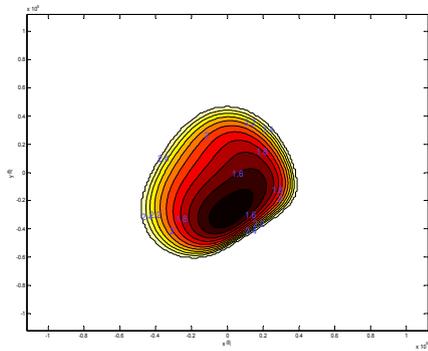
[Fig. 7] A scenario of radio-navigation arrangement



[Fig. 8] A scenario of radio-navigation arrangement (SC01-2)



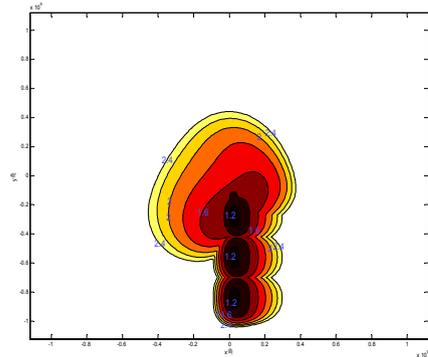
[Fig. 9] A scenario of radio-navigation arrangement (SC01-3)



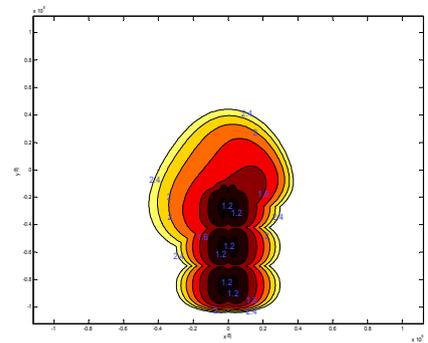
[Fig. 10] A scenario of radio-navigation arrangement (SC04-1)

그림 11에서는 신호원 위치가 **SC02-2** : ①-⑦-⑩-④, ③-⑥-⑧-⑦, ③-⑧-⑩-⑦, ⑧-⑩-⑫-⑨, ⑩-⑫-⑭-⑪의 5개 조합을 사용하여 측위 정확도를 계산한 결과이다. 그림 12에서는 신호원 위치를 **SC02-3** : ①-⑦-⑩-④,

③-⑥-⑧-⑦, ③-⑧-⑩-⑦, ⑧-⑩-⑫-⑨, ⑩-⑫-⑭-⑪, ②-⑤-⑦-⑥, ②-⑦-⑨-⑧, ⑦-⑨-⑪-⑩, ⑨-⑪-⑬-⑫ 사용한 경우에 대한 결과이다. 앞에서의 시나리오 보다 넓은 지역에서 $DOP \leq 2.5$ 인 지역이 나타남을 알 수 있다. 상대적으로 신호원의 분포가 넓을수록 정확도가 증가한다는 것을 알 수 있다.



[Fig. 11] A scenario of radio-navigation arrangement (SC04-2)



[Fig. 12] A scenario of radio-navigation arrangement (SC04-3)

3. 결론

본 연구에서는 다중경로 전파환경에서 신호원의 전달 경로를 고려한 전파항법 신호원의 배치 최적화 알고리즘 개발이다. 세부 연구 내용은 전달경로를 고려한 전파항법 신호원의 전파예측모델 연구, 전파항법 신호원 위치 최적화 M&S 소프트웨어 설계, 전파항법 신호원의 위치 최적화 알고리즘 연구, 전파항법 신호원 위치 최적화 M&S 소프트웨어 구현 및 성능분석으로 구성 된다. 레이 다파의 전파 특성은 레이더 방정식과 대기 중에서 전파

의 감쇄특성을 고려하여 레이더 신호를 단일 경로에서의 전개 강도 세기와 왕복 경로에서의 전개 강도 세기를 구간 별로 분석하여 계산하였다. 이를 바탕으로 신호원으로 부터 목표물까지의 전파가시선을 분석하였다. 그리고 신호원의 배치에 따른 DOP를 다양한 조건에서 분석하였다. 신호원이 넓고 균일하게 분포하는 경우에 거리측위 정확도가 증가 하는 것으로 나타났다. 이것은 인공위성을 이용하는 항법시스템의 경우와 유사한 결과이다. 지상에 배치된 전파항법신호원의 거리측위 정확도는 인공위성 시스템보다는 떨어지는 결과를 나타내고 있다.

REFERENCES

[1] David K. Barton, *Radar System Analysis and Modeling*, Artech House, Norwood, MA, 2005.
 [2] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab*, Chapman and Hall/ CRC, NY, 2000.
 [3] Richard Curry, *Radar System Performance Modeling*, Artech House, Boston, 2001.
 [4] R. O. Nielsen, "Relationship Between Dilution of Precision for Point Positioning and for Relative Positioning with GPS," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 33, No. 1, pp. 333-338, 1997.

저자소개

임 중 수(Joong-Soo Lim) [정회원]



- 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 - 1994년 3월 : Auburn University (공학박사)
 - 1980년 8월~2003년 2월 : 국방과학연구소
 - 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- <관심분야> : 전자파 이론, 레이더 및 전자전 장비 설계/분석

채 규 수(Gyoo-Soo Chae) [종신회원]



- 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 - 2000년 12월 : Virginia Tech (공학박사)
 - 2001년 1월~2003년 2월 : Amphenol Mobile (RF manager)
 - 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- <관심분야> : 안테나 설계, 초고주파, 전파전파

김 민 년(Min-Nyun Kim) [정회원]



- 1995년 2월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 - 1995년 대우전자 전략기술연구소
 - 2003년 6월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 - 2002년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- <관심분야> : 초고주파, 레이더, 전파산란, 광파

김 영 호(Young-Ho Kim) [정회원]

- 2006년 3월 ~ 현재 : 홍익대학교 대학원 전자공학과 박사과정
 - 2002년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 시간강사
- <관심분야> : 수치해석 전파산란