

회절을 고려한 수도권 서북부 지역에서 GPS L1 C/A 신호의 재밍영향분석

유 승 수*, 김 선 용^o

Jamming Effects of GPS L1 C/A Signal by Knife-Edge Diffraction Loss at Seoul Metropolitan Northwestern Region

Seungsoo Yoo*, Sun Yong Kim^o

요 약

본 논문에서는 수도권 서북부 지역의 3차원 지리정보를 바탕으로 다중예봉모형을 (multiple knife-edge model) 적용해 전파교란기와 수신기의 지리적 위치에 따른 회절손실을 (diffraction loss) 계산하고, 이를 바탕으로 광대역 잡음재밍 (wideband Gaussian null-to-null noise jamming), 스펙트럼일치형재밍 (matched spectrum jamming), 연속파재밍에 (continuous wave jamming) 의한 GPS (global positioning system) L1 C/A (coarse/acquisition) 신호의 여유재밍전력을 (marginal jamming power) 보인다.

Key Words : GPS, multiple knife-edge model, diffraction loss, jamming

ABSTRACT

This study discusses the multiple knife-edge diffraction loss with the receiver and jammer located in the Seoul metropolitan northwestern region. The considered positioning and jamming signals are the GPS L1 C/A signal and several jamming signals such as the wideband Gaussian noise, matched spectrum, and continuous wave signals. To calculate the accurate diffraction effects, the 3-dimensional topography data at the Seoul metropolitan northwestern region was used.

I. 서 론

2012년 5월 10일, 북한은 인천국제공항과 김포 국제공항이 위치한 수도권 서북부 지역에 GPS (global positioning system) 재밍을 (jamming) 열흘째 지속하고 있으며, 이로 인해 우리 국적기 609대, 외국 국적기 48대, 미국 군용기 1대 등 해당 공항을 이용하는 항공기 운항 안전이 심각하게 위협받고 있다¹⁾. 북한은 2010년 이후부터

꾸준히 GPS 도발을 감행해오고 있으며, 최근에는 그 능력과 정도를 점차 확대하고 있다²⁻⁴⁾.

이처럼 GPS 신호가 재밍에 취약한 이유는 크게 2가지이다. 첫째, 지상에 위치한 GPS 수신기의 GPS 신호 수신전력이 상당히 미약하기 때문이다. GPS 위성은 지상 약 2만 Km 상공을 선회하며, 이 위성에서 송신한 측위신호는 두터운 대기권을 거쳐 지상에 위치한 수신기로 수신된다. GPS는 이를 극복하기 위해 처리이득이 (processing gain) 있

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 위성항법 특화연구센터 사업 및 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2012R1A1A2012004944)의 지원을 받아 수행되었습니다.

♦ 주저자 : 건국대학교 전자공학부, kelvin@konkuk.ac.kr, 정희원

° 교신저자 : 건국대학교 전자공학부, kimsy@konkuk.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2012-05-259, 접수일자 : 2012년 5월 21일, 최종논문접수일자 : 2013년 8월 23일

는 직접수열확산대역 (direct sequence/spread spectrum) 시스템을 통신 물리계층으로 사용하고 있다. 그러나 상용 수신기에서 주로 사용하는 GPS L1 C/A (coarse/acquisition) 신호는 처리이득이 30 dB 밖에 되지 않아 의도적인 재밍이 없을 때에도 여유재밍전력이 (marginal jamming power) 약 14.5 dB 정도밖에 되지 않는다. 즉, 특별한 수신전력 증강을 위한 기법을 사용하지 않는 경우 약 14.5 dB 이상의 의도적 재밍에 의해 GPS가 심각하게 교란된다⁵⁾. 이를 해결하기 위해 미국을 비롯한 많은 국가들이 차세대 범역항법위성 체계를 개발하고 있으나 최근 미국 및 유럽의 경제 위기 등으로 인해 개발일정이 상당히 지연되어 2020년 이후부터 실제 사용이 가능할 것으로 예상된다⁶⁾.

상용 GPS 신호가 취약한 단점을 갖고 있는 반면, 이를 교란하기 위한 장치는 인터넷 쇼핑몰을 통해서도 쉽게 구입할 수 있다⁷⁾. 판매되는 대부분의 전파교란기는 광대역잡음재밍 (wideband Gaussian null-to-null noise jamming, WB), 스펙트럼일치형재밍 (matched spectrum jamming, MS), 연속파재밍 (continuous wave jamming, CW) 신호 등을 발생시킨다. 본 논문에서도 WB, MS, CW 재밍신호를 고려한다.

대부분의 전파교란기와 GPS 수신기는 지상에 위치한다. 따라서 전파의 자유공간 전파에 의한 감쇠 외에 지형에 의한 감쇠가 일어나며 지형에 의한 주요 감쇠 요인 가운데 하나는 회절에 의한 감쇠이다. 회절은 직진하는 전자기파가 장애물을 만났을 때 그 경로가 굴절되는 현상으로 관심 있는 영역의 규모에 따라 많은 회절모형이 있다^{8,9)}. 본 논문에서는 많은 회절 모형 가운데 수도권 서북부 영역에 적용할 수 있는 다중예봉모형에 (multiple knife-edge model, MKE 모형) 따른 회절감쇠를 다룬다. MKE 모형은 Fresnel 영역과 지형의 관계를 고려한 회절모형으로 산정의 예봉에 의한 전파감쇠를 고려한 모형이다⁸⁾.

본 논문은 서론을 포함해 총 4개 장으로 구성된다. 2장에서는 [8]에서 제안한 MKE 모형을 간단히 정리하고, 이를 바탕으로 회절감쇠를 요약한다. 3장에서는 수도권 서북부 지역에 대한 3차원 지형분석에 따른 대표적인 지형을 보이고, 여기에 MKE 모형을 적용한다. 그리고 이에 대한 각 지형 모형에서 송신재밍전력에 따른 수신재밍전력을 보이고, WB, MS, CW 재밍신호에 따른 GPS (global

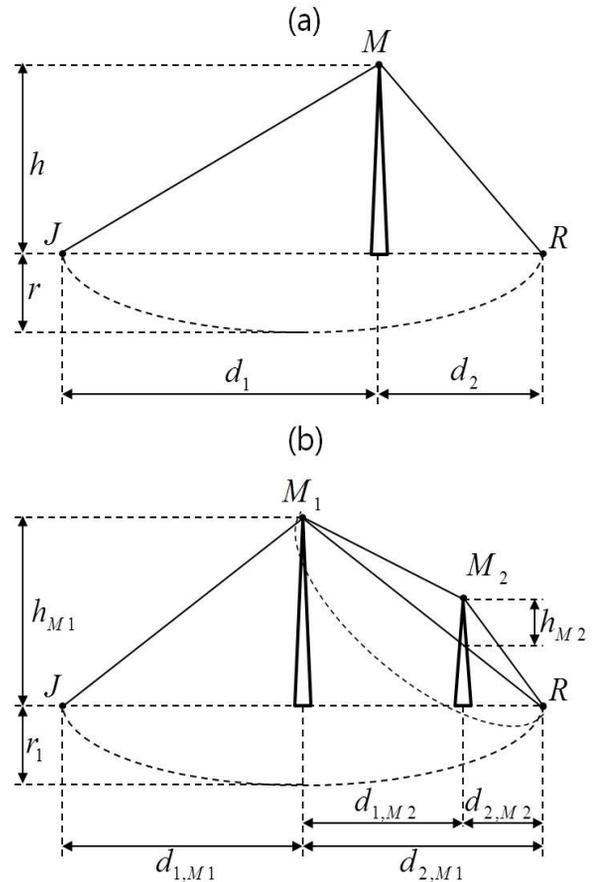


그림 1. MKE 모형: (a) KE의 수가 1인 경우, (b) KE의 수가 2인 경우
 Fig. 1. The multiple knife-edge model: (a) single knife-edge and (b) double knife-edge cases

positioning system) L1 C/A (coarse/acquisition) 신호의 여유재밍전력을 (marginal jamming power) 보인다.

II. MKE 모형과 회절감쇠⁸⁾

MKE 모형은 그림 1과 같다. 그림 1(a)는 예봉이 (knife-edge, KE) 하나인 경우, 그림 1(b)는 KE가 2인 경우이다. 그림 1(a)에서 J와 R은 전파교란기와 수신기의 위치, M은 J와 R 사이에 있는 KE, h는 선분 JR을 기준으로 한 M의 수직거리, r은 식 (1)과 같은 1차 Fresnel 영역의 반경, d₁과 d₂는 각각 J와 M, M과 R의 수평거리이다. 그림 1(b)에서 M₁과 M₂는 각각 J와 R, J와 R, 가상 재머 M₁과 R 사이에 위치한 KE, h₁과 h₂는 각각 선분 JR과 선분 M₁R을 기준으로 한 M₁과 M₂의 수직거리, r₁은 M₁과 JR에 따른 1차 Fresnel 반경,

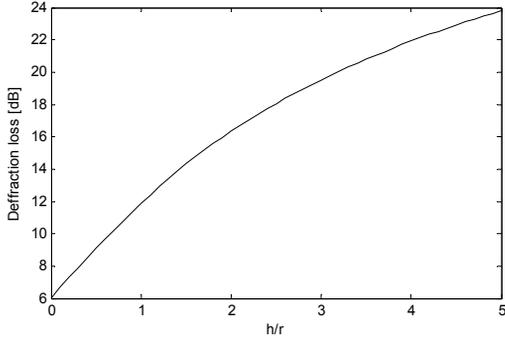


그림 2. 고도와 Fresnel 영역 반경의 비에 따른 회절 감쇠
Fig. 2. The diffraction loss according to the ratio of the relative altitude and the radius of Fresnel zone

$d_{1,M1}$ 과 $d_{2,M1}$ 은 각각 J 와 M_1 , M_1 과 S 의 수평거리, $d_{1,M2}$ 와 $d_{2,M2}$ 는 각각 M_2 에 영향을 미치는 가상재머 M_1 과 M_2 , M_2 와 S 의 수평거리이다. 단순한 표현을 위해 본 논문에서는 수직거리의 단위는 m, 수평거리의 단위는 Km, 주파수의 단위는 MHz를 사용한다.

$$r = \sqrt{\frac{cd_1d_2}{f(d_1+d_2)}}, \quad (1)$$

여기서, c 는 전파의 전파속도, f 는 주파수를 의미한다. [8]처럼 MKE 모형이 성립하기 위해서는 식 (2)의 조건이 성립해야 한다.

$$\lambda \ll h < \frac{d_1}{10} \text{ or } \frac{d_2}{10}, \quad (2)$$

여기서, λ 는 전파의 주파수에 따른 파장이다. GPS L1 대역중심주파수를 고려할 때 파장은 약 0.19 m이다. 식 (2)는 전형적인 1차 Fresnel 영역이 성립하기 위한 조건으로부터 파생된 조건이다 [9].

[8]처럼 전파교란기와 수신기가 전방향 안테나를 사용하고 가시선이 (line-of-sight) 보장될 때, 자유공간 전파에 의한 감쇠는 식 (3)과 같다.

$$L_{free}(d_1, d_2) = 32.5 + 20\log_{10}f + 20\log_{10}(d_1 + d_2), \quad (3)$$

그리고 회절감쇠는 식 (4)와 같다.

$$L_{diff}(d_1, d_2, h) = 6.9 + 20\log_{10} \left(\sqrt{\left(\sqrt{\frac{h^2 f (d_1 + d_2)}{2cd_1d_2}} - 0.1 \right)^2 + 1} + \sqrt{\frac{h^2 f (d_1 + d_2)}{2cd_1d_2}} - 0.1 \right) = 6.9 + 20\log_{10}(\sqrt{(v-0.1)^2 + v} - 0.1) \quad (4)$$

여기서, $v = h/(r\sqrt{2})$ 로 Fresnel 매개변수이다. 식 (4)를 h/r 에 따라 도시하면 그림 2와 같다. [8]처럼 $h=0$ 일 때 6 dB의 감쇠는 Grazing 경로감쇠이다. 식 (3)과 식 (4)로부터 경로감쇠를 식 (5)처럼 구할 수 있다.

$$L = L_{free}(d_1, d_2) + L_{diff}(d_1, d_2, h), \quad (5)$$

여기서, 우항의 $L_{diff}(d_1, d_2, h)$ 는 식 (4)를 그림 1(a)에서 사용한 매개변수에 맞게 다시 기술한 것이다.

MKE 모형은 회절이 일어나는 위치를 가상의 신호 발생원으로 가정하고, 이에 대한 추가적인 회절 모형을 선형적으로 고려한다. 그림 1(b)에서 전파교란기와 수신기 사이의 경로 선분 JR 에 두 개의 KE인 M_1 과 M_2 가 있다. 여기서, 먼저 가장 높은 M_1 을 고려한 Fresnel 영역과 그 반경 r_1 을 구하고, 이로부터 JR 과 M_1 을 고려한 회절손실을 구한다. 그리고 M_1 과 R 사이에 선분 M_1R 을 넘는 KE인 M_2 가 있으므로, 여기에 새로운 Fresnel 영역의 반경 r_2 를 구하고, 이로부터 M_1R 과 수정된 수직높이 h_{M2} 를 적용한 M_2 를 고려한 회절손실을 구한다. 만약 KE가 3개 이상일 경우 위 과정을 반복한다. 그림 1(b)처럼 KE가 2개일 때 경로감쇠는 식 (5) 우항의 표현을 활용해 식 (6)처럼 표현할 수 있다. 식 (6)처럼 회절 영역을 가상 신호 발생원으로 고려한 선형적 회절 KE가 3개 이상일 때의 경로감쇠도 얻을 수 있다.

$$L = L_{free}(d_{1,M1}, d_{2,M2}) + L_{diff}(d_1 = d_{1,M1}, d_2 = d_{2,M1}, h = h_{M1}) + L_{diff}(d_1 = d_{1,M2}, d_2 = d_{2,M2}, h = h_{M2}) \quad (6)$$

이후 간결한 표현을 위해 식 (6)의 우항에 표현한 M_1 에 대한 회절손실은 L_1 , M_2 에 의한 회절손실

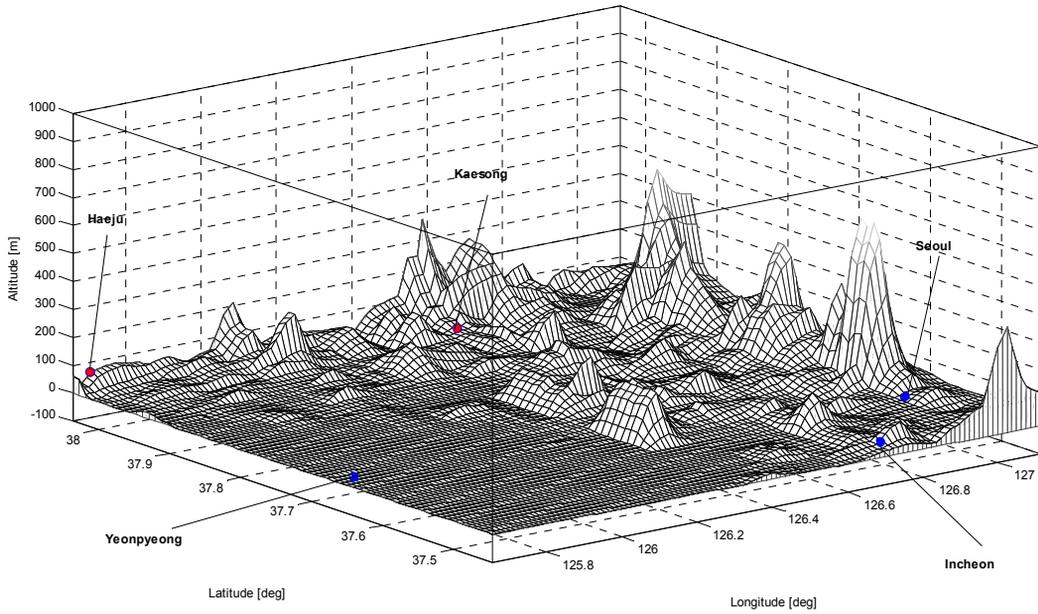


그림 3. 수도권 서북부 지역의 3차원 지형도
 Fig. 3. The 3-dimension map on Seoul metropolitan western-north area

은 L_2 등으로 표현한다.

III. 재밍영향분석

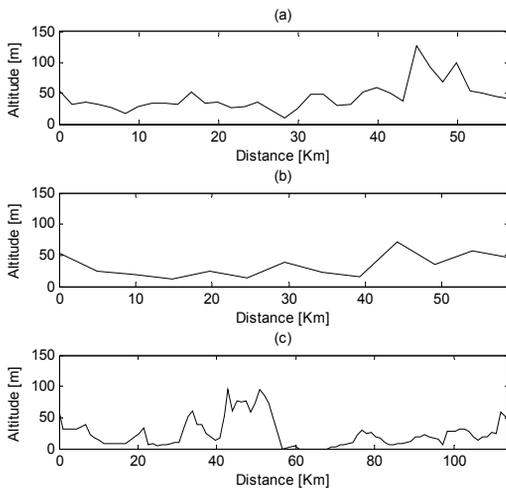


그림 4. 전파교란기와 GPS 수신기 사이의 지형: (a) 개성→서울(KS), (b) 개성→인천(KI), (c) 해주→서울(HS)
 Fig. 4. Altitudes between a jammer and GPS receiver (a) from Kaesong to Seoul, (b) Kaesong to Incheon, and (c) Haeju to Seoul, respectively

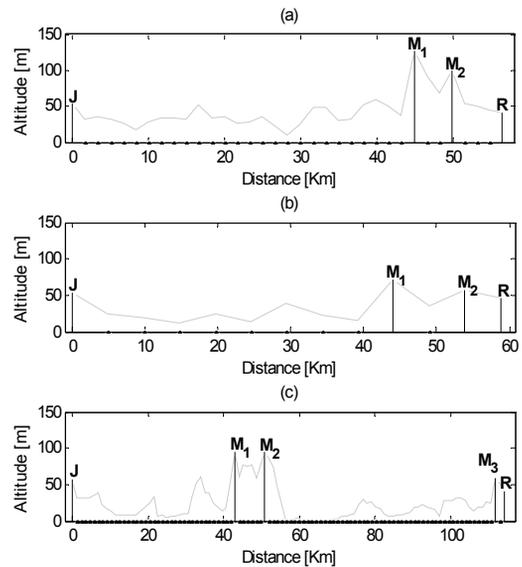


그림 5. MKE 모형으로 근사화한 전파교란기와 GPS 수신기 사이의 지형: (a) 개성→서울(KS), (b) 개성→인천(KI), (c) 해주→서울(HS)
 Fig. 5. The approximated topography between jammer and GPS receiver using the multiple knife-edge model: (a) from Kaesong to Seoul, (b) from Kaesong to Incheon, and (c) from Haeju to Seoul, respectively

[1]-[4]처럼 최근 우리나라에서 재밍이 가장 많이 일어나는 지역은 수도권 서북부 지역이다. 위도 37.5도부터 38.5도까지, 경도 125.8도부터 127.8

도까지 수도권 서북부 지역의 3차원 지형도는 그림 3과 같다. 그림 3처럼 해당 지역은 북한 지역인 해주와 개성을 포함하고 있으며, 남한 지역에서는 서울과 인천, 그리고 연평도를 포함하고 있다. 해당 지역의 3차원 지형도는 구글어스의 위성사진에 따른 공간정보를 위도와 경도 100m 간격으로 읽어 표현하였다. 그리고 그림 3에서 해주, 개성, 서울, 인천, 연평도의 위치는 측량원점을 의미한다.

그림 3의 3차원 지형도에서 전파교란기가 각각 개성과 해주에 위치하고 GPS 수신기가 서울과 인천에 위치하는 경우에 따라 그림 4처럼 대표적인 3가지 지형모형을 도출하였다. 그림 4(a)는 개성을 기점으로 서울까지, 그림 4(b)는 개성을 기점으로 인천까지, 그림 4(c)는 해주를 기점으로 서울에 이르는 고도를 각각 그림 3의 지형도로부터 얻은 것이다.

그림 4의 대표적인 지형모형에 그림 1의 MKE 모형을 적용해 근사화하면 그림 5와 같다. 그림 5처럼 KE는 $h > 0$ 인 지점이다. 그림 5(a)-(c)처럼 대표적인 지형모형에서는 각각 2~3개의 KE가 존재

표 1. MKE 모형으로 근사화한 지형의 주요 제원
Table 1. Parameters of the Approximated Topography for the Multiple Knife-Edge Models

Kaesong→Seoul (KS)					
	J	M_1	M_2		R
d_1 [km]	0.00	46.52	4.98		58.15
d_2 [km]	-	11.63	6.65		-
h [m]	53.27	126.25	9.12		41.31
Kaesong→Incheon (KI)					
	J	M_1	M_2		R
d_1 [km]	-	44.07	9.79		58.77
d_2 [km]	-	14.69	4.90		-
h [m]	53.27	72.00	1.95		45.82
Haeju→Seoul (HS)					
	J	M_1	M_2	M_3	R
d_1 [km]	-	42.88	7.90	60.94	113.98
d_2 [km]	-	72.09	64.19	3.25	-
h [m]	57.46	94.50	5.33	14.02	41.31

함을 확인할 수 있다. 그림 4의 대표적인 지형모형으로부터 식 (6)을 도출하기 위해 지형의 주요제원을 산출하면 표 1과 같다. 표 1의 주요제원은 식 (2)의 조건을 모두 만족하기 때문에 식 (6)을 적용해 경로감쇠를 구할 수 있다. 그 전에 표 1의 주요

표 2. 주요 제원에 따른 Fresnel 영역의 반경과 회절 감쇠
Table 2. The Radius of the First Fresnel Zone and the Diffraction Loss According to Major Parameters

	r_1 [m]	L_1 [dB]	r_2 [m]	L_2 [dB]	r_3 [m]	L_3 [dB]
KS	42.11	19.52	23.30	8.43		
KI	45.83	14.62	24.95	6.51		
HS	71.59	13.49	36.62	6.93	24.25	9.54

제원을 바탕으로 Fresnel 영역의 반경과 회절감쇠를 도출하면 표 2와 같이 정리할 수 있다. 표 1과 표 2, 그리고 식 (6)을 바탕으로 각 지형모형에서 송신재밍전력에 따른 수신재밍전력을 그림 6처럼 도출할 수 있다. 그림 6에서 실선으로 표현한 세 가로는 각각 WB, MS, CW 재밍신호가 수신되었을 때 허용가능한 재밍전력수준을 나타낸다. 예를들어, 1 KW급 전파교란기로 개성에서 CW 재밍신호를 송신하는 경우 서울은 재밍의 영향권에 들지 않지만 인천은 재밍에 의해 GPS L1 C/A 수신이 어렵다는 것을 의미한다. 마찬가지로 100 KW급 전파교란기로 개성에서 CW 재밍신호를 송신하는 경우 서울과 인천 모두 재밍에 영향을 받아 GPS L1 C/A 신호가 교란된다.

IV. 결론

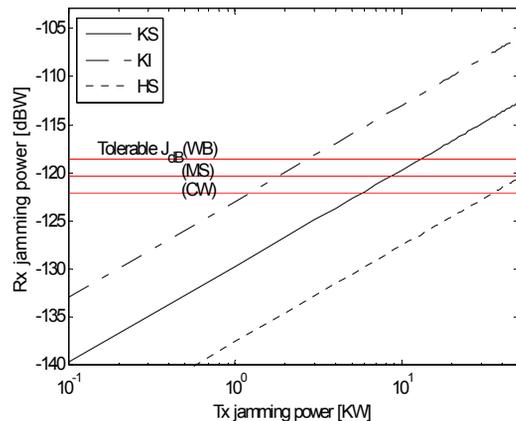


그림 6. 송신재밍전력에 따른 수신재밍전력과 재밍 형태에 따른 여유재밍전력
Fig. 6. The received jamming power according to the transmitted one on the approximated topographies and the marginal jamming power of several jamming type

본 논문에서는 다중예봉모형에 따른 경로손실을 정리하였으며, 이를 바탕으로 최근 북에 의한 재밍도발이 자주 발생하는 수도권 서북부 지역에서의 재밍영향을 분석하였다. 이를 위해 해주, 개성, 서울,

인천, 연평도를 포함하는 수도권 서북부 지역의 3차원 지형도를 도시하였으며, 이로부터 대표적인 지형모형을 도출하고, 이를 다중예봉모형에 따라 근사화했다. 근사화한 모형을 바탕으로 송신재밍전력에 따른 수신재밍전력을 도시하였으며, 이를 허용재밍전력과 함께 비교분석하였다. 분석결과 특별한 재밍완화 및 제거 기법을 적용하지 않는 경우 개성 및 해주에서 100 KW급 이상의 재밍전력을 송출하는 경우 서울과 인천 등 수도권 서북부 지역이 심각한 재밍영향권에 포함됨을 확인하였다. 본 논문에서는 전방향 안테나와 자유전파손실, 회절손실만을 고려하였다. 추후에는 이와 함께 다양한 안테나 방사 형태와 지표 반사에 의한 영향을 고려한 재밍영향 분석을 진행할 예정이다.

References

[1] S. Kim, "South Korea, the United States, China, and Japan, 658 aircraft damages..the government in South Korea, urged North Korea to stop GPS jamming," *Joongangilbo*, Retrieved Mar., 10, 2012, from http://article.joinsmsn.com/news/article/article.asp?total_id=8136465&cloc=olink|article|default.

[2] Y. Oh, "Metropolitan GPS, electronic warfare book was attacked. From the last four days spread from Korea personality and let launch, artillery instruments, including failure," *Seoulshinmoon*, Retrieved Mar., 7, 2011, from <http://www.seoul.co.kr/news/newsView.php?id=20110307001016>.

[3] H. Kim, "Distance over 100km... North Korea GPS jamming, electronic war," *Hankookilbo*, Retrieved Sep., 9, 2011, from <http://news.hankooki.com/lpage/society/201109/h2011090617295721950.htm>.

[4] S. Yoo and K. Kim, "North Korea GPS jamming radio waves launched in the metropolitan area in South Korea," *Dongailbo*, Retrieved Mar., 7, 2011, from <http://news.donga.com/3/all/20110307/35356067/1>.

[5] E. Kaplan and C. J. Hegarty, *Understanding GPS Principles and Applications*, 2nd Ed.,

Artech House, Nov. 2005.

[6] S. Yoo, G. Jee, and S. Y. Kim, "Next generation GNSS technology trends," *J. Korea Inform. Commun. Soc. (KICS)*, vol. 28, no. 7, pp. 25-36, July 2011.

[7] S. Pullen and G. X. Gao, "GNSS jamming in the name of privacy: potential threat to GPS aviation," *Inside GNSS*, vol. 7, no. 2, pp. 34-43, Mar.-Apr. 2012, [Online], Available: <http://www.insidegnss.com/auto/marapr12-Pullen.pdf>.

[8] J. Deygout, "Multiple knife-edge diffraction of microwaves," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 14, no. 4, pp. 480-489, July 1966.

[9] J. Komijani, A. Mirkamali, and J. Nateghi, "Combining multiple knife-edge diffraction and ground reflections for terrain path loss calculation," in *Proc. Fourth European Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, pp. 1-3, Barcelona, Spain, Apr. 2010.

유 승 수 (Seungsoo Yoo)



2004년 2월 건국대학교 전자공학부 공학사

2005년 2월 건국대학교 전자정보통신공학부 공학석사

2010년 8월 건국대학교 전자정보통신공학부 공학박사

2010년 9월~2011년 8월 건국대학교 BK21 핵심사업단 박사후과정

2011년 9월~현재 건국대학교 전자공학부 강의교수, 조교수

<관심분야> 이동통신, 통신신호처리, 무선측위, GNSS.

김 선 용 (Sun Yong Kim)



1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 학사(최우등)

1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사

1995년 8월 한국과학기술원 전자전산학과 박사

1995년 4월~1996년 3월 동경대학교 생산기술연구소 박사연구원

1996년 9월~1998년 12월 한국전자통신연구원 초빙연구원

1996년 3월~2001년 8월 한림대학교 정보통신공학부 전임강사, 조교수

2001년 8월~현재 건국대학교 전자공학부 조교수, 부교수, 교수

1990년 IEEE Korea Section 학생논문대회 우수상 받음.

1992년~1993년 IEEE Communication Society 장학금 받음.

대한전자공학회, 한국통신학회 정회원, IEEE 선임회원

<관심분야> 통계학적 신호처리, 이동통신, 통신이론.