

고해상도 위성 탑재 영상 레이다(SAR)의 지상 레이다에 미치는 간섭 영향 분석

Interference Impact Analysis of Ground Based Radar from Spaceborne High Resolution Synthetic Aperture Radar

송 우 진 · 우 성 철 · 곽 영 길

Woo-Jin Song · Sung-Chul Woo · Young-Kil Kwag

요 약

최근 WRC-07에서 지구 탐사 업무용 위성 영상 레이다(SAR)의 해상도를 향상하기 위하여 국제 허용 주파수 대역폭을 500 MHz의 초광대역으로 확장하였다. 따라서 현재 동일한 주파수 대역에서 사용하거나 사용 예정인 지상 레이다에 직접적인 전파 간섭을 야기할 수 있을 것으로 우려하고 있다. 본 논문에서는 위성 영상 레이다로부터 지상 레이다가 받을 수 있는 간섭 영향을 예측하기 위하여, 레이다 특성 파라미터 분석을 통한 레이다 전파 간섭 모델을 활용하고, 위성 SAR의 운용 특성을 고려한 간섭 모델을 이용하여 시간, 공간, 주파수 영역에서 지상 레이다의 간섭 영향을 분석하였다. 최근 발사되어 운용 중인 위성 영상 레이다인 TerraSAR-X 모델과 ITU-R에서 권고하는 지상의 기상 레이다 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 한반도 내에서 운용하는 지상 레이다가 받을 수 있는 간섭 영향을 분석하고 예측하였다.

Abstract

Recently, World Radio Conference(WRC)-2007 approved the ultrawide bandwidth of 500 MHz for the use of spaceborne synthetic aperture radar in X-band for the EESS(Earth Exploration Satellite Service) in order to improve the SAR imaging resolution. It is concerned about the interference impact from the spaceborne SAR that may cause to most of ground radars due to the extended ultra wideband. In this paper, in order to predict the interference impact of the ground-based radar from the spaceborne radar, radar interference model is presented using radar characteristic parameters by taking into account the operating environments of the spaceborne and ground based radar in the time, space, and spectrum domains. Using the spaceborne SAR model of TerraSAR-X and ground radar model of meteorological radar recommended by ITU-R, the interference impact was assessed through the computer simulation to see the possible interference impact of the ground based radar operating in the Korean peninsula.

Key words : Spaceborne SAR, Ground Radar, Interference Impact, EESS, WRC-07, ITU-R

I. 서 론

레이다의 전자파 스펙트럼은 단파 대역에서부터 초고주파 및 밀리미터파 대역에 이르기까지 광범위

한 대역을 점유하고 있으며, 국제적으로 ITU에서 할당된 동일한 주파수 대역에서 사용되고 있다. 최근 발사된 TerraSAR-X는 1 m 정도의 해상도를 얻기 위하여 X 대역의 레이다 순시 대역폭을 300 MHz로 운

「본 연구는 한국전자통신연구원 '합성개구레이다(SAR)와 해상/항공관제 레이다간 간섭분석 연구'의 위탁연구과제의 일부로 지원되었음.

한국항공대학교 항공전자공학과(Department of Avionics Engineering, Korea Aerospace University)

· 논문 번호 : 20080331-043

· 수정완료일자 : 2008년 5월 13일

용하고 있으며, 2007년 WRC 회의에서는 고해상도의 지구 탐사 위성 업무를 위하여 추가로 200 MHz 대역폭 확장을 승인함으로써, 합법적으로 500 MHz의 순시 대역폭을 점유하여 사용할 수 있게 되어 동일 대역에서 운용 중인 기존 레이더와의 주파수 간섭 영향이 우려되고 있다. 그러나 이러한 SAR 간섭 신호로부터 국내 운용 중인 레이더 보호를 위한 간섭 신호 분석이나 그에 따른 보호 방안이 미비한 실정이다. 현재 ITU-R에서는 간섭 허용 레벨을 INR(Interference to Noise Ratio) -6 dB로 권고하고 있지만, 이는 CW(Continuous Wave)나 시스템 잠음 형태의 간섭에 대한 기준이며, 레이더의 다양한 신호 파형을 고려한 간섭 기준이나 레이더 시스템에 의한 간섭 기준은 현재 정의되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 논문에서는 II장에서 위성 SAR 간섭 모델을 제시하고 III장에서 간섭 신호의 수학적 모델을 제시하여, 이를 통한 간섭 분석의 시뮬레이션 결과를 IV장에 제시한다. 최종적으로 V장에서 결과에 대한 분석을 요약, 정리하여 지상에서 운용 중인 레이더의 보호를 위한 기준 설정 및 간섭 예측 방안을 마련한다.

II. 위성 SAR 간섭 모델

간섭 분석을 위한 위성 SAR 간섭의 기하학적 모델을 그림 1과 같이 설정하였다. SAR 기하학적 모델의 파라미터 값들은 표 1에 제시되었으며, 이는 TerraSAR-X의 운용 파라미터를 고려한 값이다^[1].

표 1에서 보는 바와 같이 TerraSAR-X의 빔 풋프린트(footprint)는 30×3.6 km의 범위로 한반도 지표면

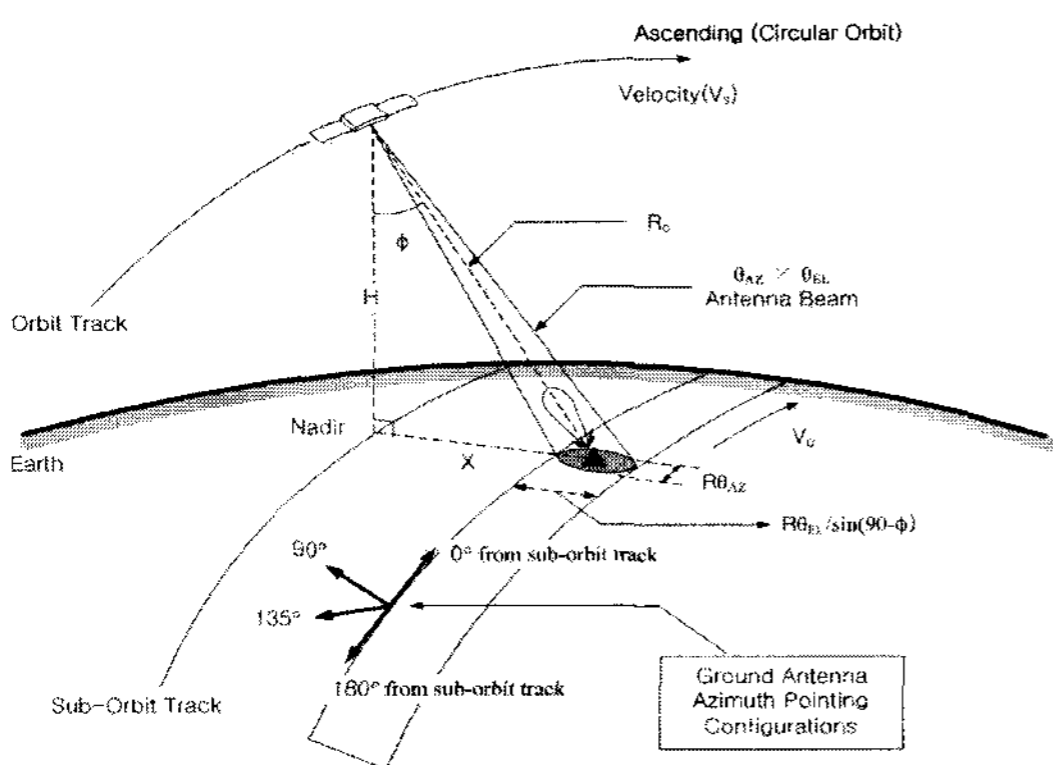


그림 1. 위성 SAR 간섭 기하학적 모델
Fig. 1. Geometric model of SAR Interference.

표 1. TerraSAR-X 기하학적 모델 파라미터 값
Table 1. TerraSAR-X geometry parameter value.

Parameter	Geometry value
고도(H)	514 km
거리(R_0)	615.68 km
지상 표적 거리(X)	338.91 km
고도각(ϕ)	33.8°
안테나 빔 폭(θ_{AZ}, θ_{EL})	0.33°, 2.3°
$R_0 \theta_{AZ}$	3.6 km
$R_0 \theta_{EL}/\sin(90 - \phi)$	30 km
위성 플랫폼 속도(V_s)	7.6 km/s
빔 풋프린트 속도(V_g)	7.0 km/s
위성 공전 주기	95 min
궤도 경사각	97.44°
반복 주기	11 days=167 orbits
1일 회전수	15+2/11

을 7 km/s의 속도로 지나게 된다. 따라서 약 3분 동안 한반도의 지상 레이더는 TerraSAR-X 주 빔의 간섭 영향 범위에 들어오게 되는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션에 사용한 TerraSAR-X의 시스템 파라미터 값을 표 2에 제시하였으며, 방위각에 따른 안테나 이득을 그림 2에 도식하였다. TerraSAR-X 안테나 이득은 ITU-R 보고서에 제시된 위성 SAR 안테나 패턴 이득으로서, TerraSAR-X와 동일한 빔 폭과 운용 주파수를 사용하며 Nadir로부터의 조향각 또한 동일한 값을 사용하였다^[2]. 따라서 본 논문을 위한 TerraSAR-X 안테나 빔 패턴을 그림 2와 같이 가정하여 간섭 영향을 분석한다.

표 3에서는 시뮬레이션을 위한 지상 레이더 시스

표 2. TerraSAR-X 시스템 파라미터
Table 2. TerraSAR-X system parameters.

Parameter	Value
RF 중심 주파수(f)	9.65 GHz
최대 방사 출력(P_t)	2,260 W
첩 대역폭(B_t)	300 MHz
펄스폭(τ)	30.7 μ s
PRF	6,500 Hz
안테나 최대 이득(G_t)	46 dBi
펄스 변조	Linear FM Chirp

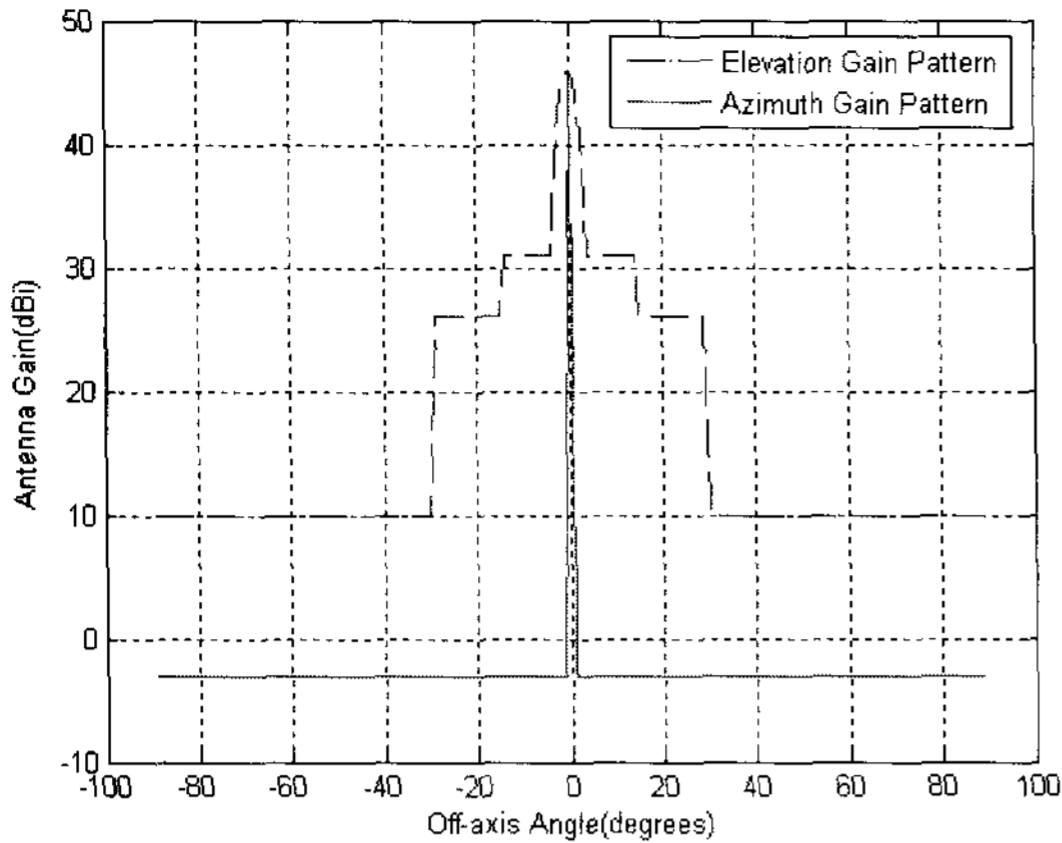


그림 2. 방위각에 따른 TerraSAR-X 안테나 이득
Fig. 2. TerraSAR-X antenna gain along with Azimuth angle.

표 3. 지상 레이다 시스템 파라미터
Table 3. Ground radar system parameters.

Parameter	Value
최대 출력(P_r)	50 kW
펄스폭(τ)	1.0 μ s
PRF	2,000 Hz
안테나 주 빔 이득(G_r)	46 dBi
안테나 부엽 레벨	26 dBi
안테나 빔 폭	0.9°
수신기 IF 3 dB 대역폭(B_r)	10 MHz
수신기 잡음 지수(N_F)	34 dB
신호 파형	Pulse

템 파라미터 값을 나타내었으며, 이는 ITU-R 보고서에 제시되어 있는 지상 기반 기상 레이다의 파라미터 값이다^[2].

간섭 분석 시뮬레이션을 위한 TerraSAR-X의 궤도를 Table 1의 사양을 이용하여 그림 3과 같이 설정하였다. TerraSAR-X의 궤도 경사각은 97.44도이며, 상승 궤도로서 11일을 반복 주기로 선회함을 고려하였다. 또한 운용 모드는 스트립맵(StripMap) 모드를 가정하였다. 이 경우, TerraSAR-X는 한반도 상공 부근의 총 2,079 km를 11일을 주기로 선회하게 되며, 각 궤도의 간격은 89 km이다.

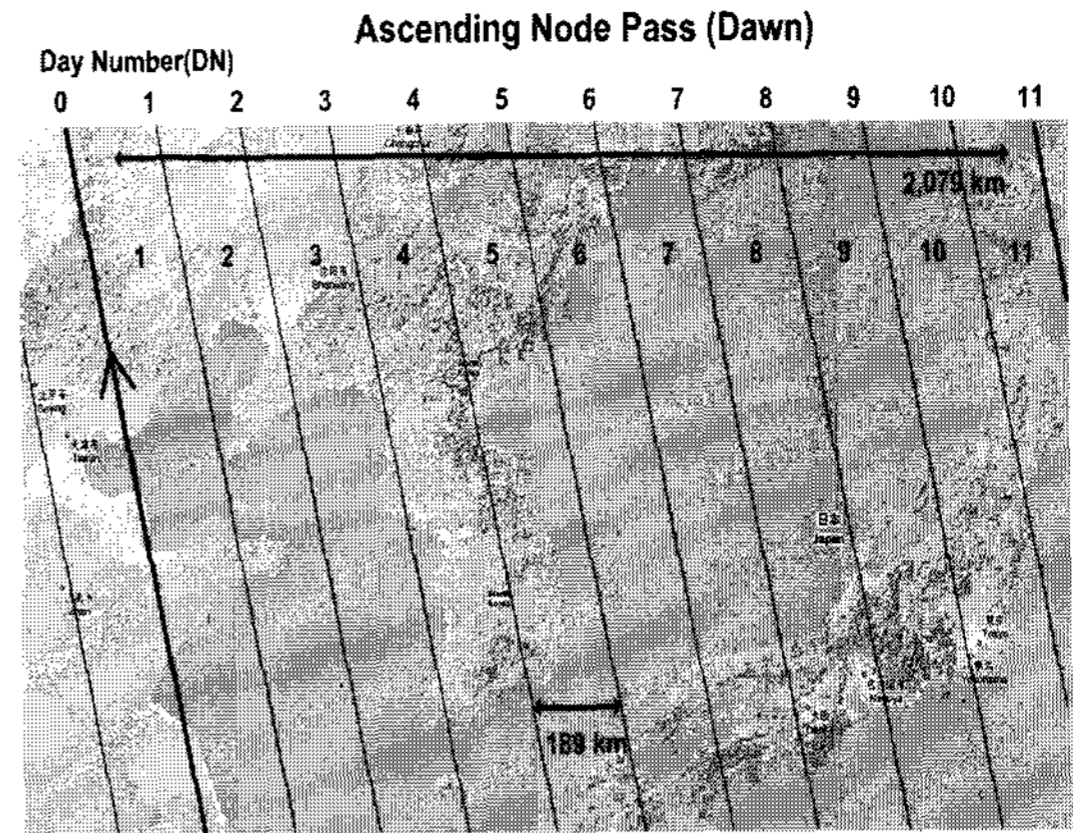


그림 3. 위성 SAR 상승 궤도
Fig. 3. Spaceborne SAR's ascending node pass.

위성 SAR로부터 지상 레이다로 수신되는 간섭 신호를 도출하기 위해 우선 공간상에서의 자유 공간 손실과 대기 감쇠를 다음 식 (1) 및 (2)와 같이 고려하였다^{[3],[4]}.

$$L_s = -(32.44 + 20 \log(fR(T))) \quad (1)$$

$$L_a = -\alpha R(T), \quad \alpha = 0.013 \quad (2)$$

여기에서 f 는 위성 SAR 운용 주파수, R 은 위성 SAR와 지상 레이다 간의 거리를 나타내며, α 는 대기 중 산소와 수분에 관한 감소 계수이다. SAR의 이동을 고려할 때 거리 R 은 시간에 관한 함수이며, 이는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다^[5].

$$R(T) = \frac{R_0}{\cos \theta_r} \quad (3)$$

식 (3)에서 R_0 은 스퀀트(Squint) 각이 0도일 때의 경사거리를 나타내며, θ_r 은 스퀀트 각을 나타낸다.

또한, 지상 레이다 대역폭에 수신되는 간섭 전력을 고려하기 위해 OTR(On-Tune Rejection)을 추가 고려하였으며, 평균/침투 전력 OTR은 식 (4)~(7)에 나타내었다. 여기에서 B_r 은 지상 레이다 대역폭, B_c 는 위성 SAR 칩신호 대역폭을 나타낸다^[3].

$$AOTR = 10 \log(B_r/B_c) \quad \text{for } \frac{B_r}{B_c} < 1 \quad (4)$$

$$AOTR = 0 \quad \text{for } \frac{B_r}{B_c} \geq 1 \quad (5)$$

III. 간섭 신호 수학적 모델

$$POTR = 10 \log(B_r^2 T / B_c) \text{ for } \frac{B_r^2 T}{B_c} < 1 \quad (6)$$

$$POTR = 0 \text{ for } \frac{B_r^2 T}{B_c} \geq 1 \quad (7)$$

따라서 최종적으로 평균 간섭 전력과 침투 간섭 전력은 다음과 같이 식 (8)과 (9)로 유도된다.

$$I_{avg} = P_t + \tau PRF + G_t + G_r - L_s - L_a + AOTR - PG \quad (8)$$

$$I_{peak} = P_t + G_t + G_r - L_s - L_a + POTR - PG \quad (9)$$

여기서 PG(Processing Gain)는 레이다 수신기의 신호 처리 과정에서 원하지 않는 신호 제거로 인한 이득을 나타내며, 본 연구의 시뮬레이션에서는 위에서 유도된 식 (8), (9)를 사용하여 레이다 간섭 영향을 분석하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

앞에서 정립된 위성 SAR와 기상 레이다의 기하학적 모델 및 수식을 바탕으로 현재 X 대역에서 대역폭 300 MHz로 운용 중인 TerraSAR-X와 지상에서 운용하는 기상 레이다의 파라미터를 사용하여 동일한 대역 내에서의 위성 SAR의 운용으로 인한 기상 레이다의 간섭 영향을 시뮬레이션을 통하여 분석한다. TerraSAR-X는 상승 궤도로 11일을 주기로 한반도 부근을 선회하며, 스트립맵 모드(stripmap mode)로 운용되는 것으로 가정한다. 기상 레이다는 한반도 동해안 부근의 위도 37.5도, 경도 129.2도에 위치하며, 안테나는 방위각 방향으로 90도, 고각 방향으로 56.2도를 향한 고정 빔으로 가정하였다.

4-1 SAR와 지상 레이다 간의 간섭 분석

위성 SAR 궤도로 인해 지상 레이다를 향한 SAR 빔의 축 이탈각은 날짜 지수별로 다를 것이며, 이에 따라 위성 SAR 안테나 이득의 변화량을 표 4에 나타내었다. 날짜 지수 9부터는 축 이탈각이 -90도를 넘게 되어 SAR 빔의 조향 범위에서 벗어나게 되므로 간섭의 영향을 받지 않게 된다.

그림 4와 5는 SAR의 이동에 따른 지상 레이다가 받는 간섭 신호를 보여주고 있다. 현재 ITU-R 권고

표 4. 날짜 지수별 SAR 안테나 이득
Table 4. SAR antenna gain along with day number.

날짜 지수	-4	-3	-2	-1	0
SAR 빔 축 이탈각(°)	38.4	36.2	33.2	29.8	25
안테나 이득(dBi)	10	10	10	10	26
날짜 지수	1	2	3	4	5
SAR 빔 축 이탈각(°)	18.2	8.66	-5.1	-23.6	-44.4
안테나 이득(dBi)	26	31	31	26	10
날짜 지수	6	7	8	9	10
SAR 빔 축 이탈각(°)	-62.8	-76.5	-86	-	-
안테나 이득(dBi)	10	10	10	-	-

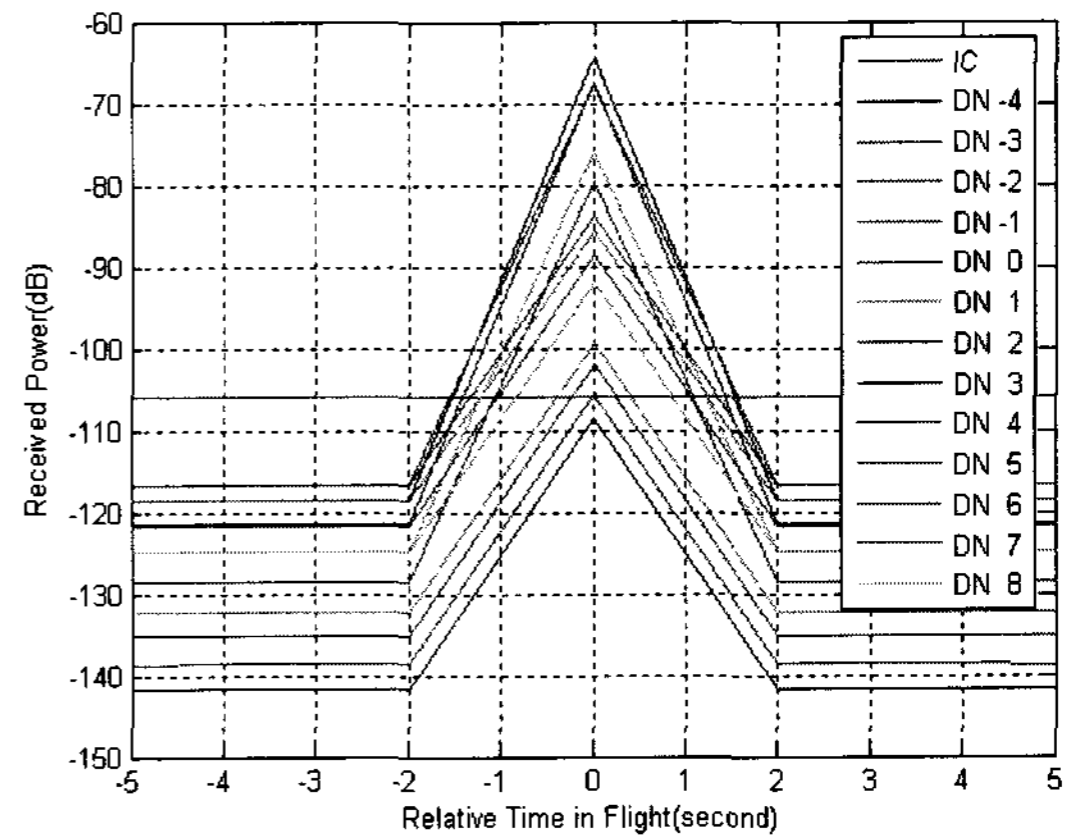


그림 4. 위성 궤도에 따른 날짜별 침투 간섭 신호 (IC: 간섭 기준, DN: 날짜 지수)
Fig. 4. Peak interference power along with day number (IC: interference criteria, DN: day number).

문에서 제안하고 있는 간섭 보호 기준 INR이 -6 dB 일 때 본 연구에서 제안된 기상 레이다가 허용할 수 있는 간섭 기준은 잡음 레벨을 고려하여 -106 dBW로 계산된다. 이를 기준으로 기상 레이다에 수신되는 간섭 전력을 궤도별로 시뮬레이션 하였다.

그림 4에서 날짜 지수 3일 때 간섭 전력이 -64.5 dBW로서 가장 큰 것을 알 수 있으며, 또한 약 3초 동안 간섭 기준을 초과하는 것을 알 수 있다.

그림 5에서는 날짜 지수 3일 때 간섭 전력이 -86.2 dBW로서 가장 큰 것을 알 수 있다. 또한, 약 1.6초 동안 간섭 기준을 초과하는 것을 알 수 있다.

그림 6은 날짜별 간섭 신호의 최대값을 도식한 것이다. 날짜 지수 8일을 지난 후부터는 SAR 안테나

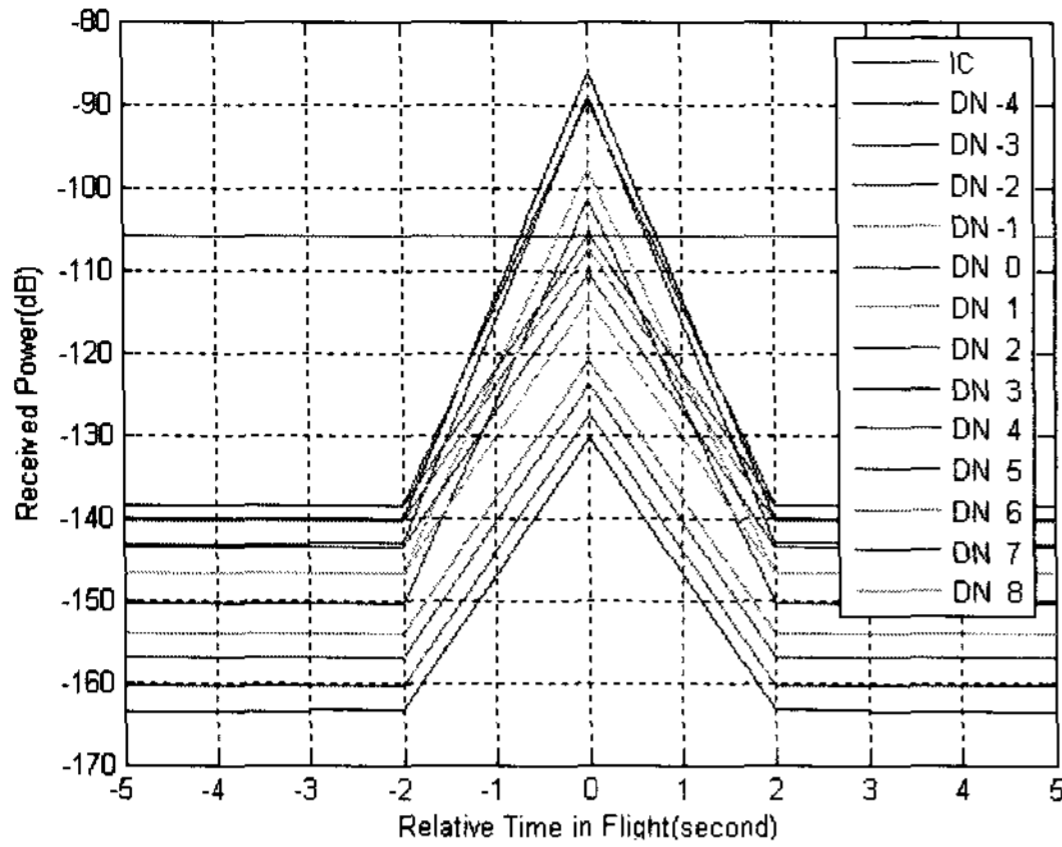


그림 5. 위성 궤도에 따른 날짜별 평균 간섭 신호 (IC: 간섭 기준, DN: 날짜 지수)
 Fig. 5. Average interference power along with day number(IC: interference criteria, DN: day number).

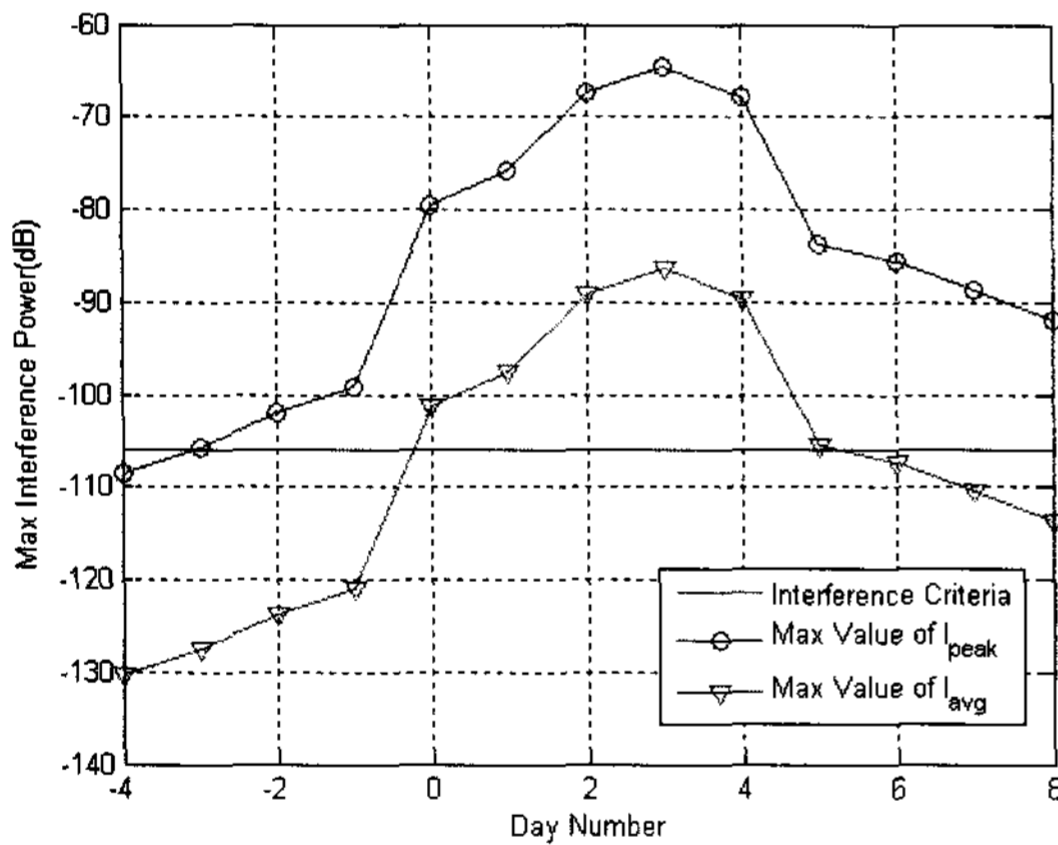


그림 6. 날짜별 간섭 신호 최대치
 Fig. 6. Max value of interference power along with day number.

패턴이 방위각 방향으로 90도 지점을 벗어나기 때문에 간섭 영향권에서 벗어나게 되며, 침투 파워를 고려한 경우 날짜 지수 -2에서부터 8까지 총 11일 동안 간섭 영향을 받게 되며, 평균 파워를 고려한 경우 날짜 지수 0에서부터 5까지 총 6일 동안 간섭 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한, 날짜 지수가 3일 때 가장 큰 간섭 신호가 수신됨을 알 수 있다.

4-2 SAR 대역폭 확장에 따른 간섭 분석

현재 순시 대역폭 300 MHz 대역을 사용하고 있는

표 5. SAR 펄스폭 변화에 따른 간섭 신호 전력
 Table 5. Interference power along with SAR pulse-width.

칩 비율 (MHz/ μ s)	대역폭 (MHz)	펄스폭 (μ s)	최대 평균 파워
16.3	500	30.7	-88.5 dBW
14.3	500	35	-87.8 dBW
12.5	500	40	-87.2 dBW
9.77	500	51.16	-86.2 dBW
8.33	500	60	-85.5 dBW

SAR의 해상도 향상을 위해 200 MHz 대역을 추가 확장했을 때 지상 레이다에 미치는 간섭 영향을 분석한다. 이를 위해 위성 SAR의 대역폭과 펄스폭을 표 5와 같이 변화시켜 평균 간섭 전력의 최대치를 측정해 보았다.

표 5에서와 같이, 현재 300 MHz 대역폭을 사용하고 있는 위성 SAR 대역폭을 500 MHz로 확장할 경우 300 MHz에서 운용할 때의 간섭 전력의 약 -2 dB 정도가 감소된 파워, 즉, -88.5 dBW의 간섭 신호가 500 MHz 대역 전체에 영향을 주게 되는 것을 알 수 있다. 이는 시뮬레이션에서 칩신호의 대역폭 확장만을 고려한 결과이며, 실제로 위성 SAR의 500 MHz 칩신호 송신시 SNR 및 NESZ(Noise Equivalent Sigma Zero)를 유지하기 위해서는 펄스 확장이 동시에 발생될 것이다. 따라서 대역폭을 500 MHz로 확장함과 동시에 펄스폭 또한 확장하여 FM 비율(chirp rate)이 300 MHz 사용할 때와 동일할 때, 즉 FM 비율이 9.77 MHz/ μ s일 때에 간섭 신호는 -86.2 dBW로서 동일한 간섭 신호가 수신됨을 알 수 있다. 따라서 500 MHz로 대역폭 확장 시 단위 MHz당 간섭 출력은 이전과 유사한 값을 갖게 될 것이며, 간섭 영향은 500 MHz 전 대역에 분포하게 되어 간섭 영향은 증가할 것으로 예상된다.

V. 결 론

최근 고해상도의 위성 영상 레이다의 순시 대역폭을 500 MHz로 확장함에 따라 동일 대역에서 운용 중인 지상 레이다의 간섭 영향의 예측이 필요하다. 본 논문에서는 위성 영상 레이다로부터 지상 레이다가 받을 수 있는 간섭 영향을 예측하기 위하여, 레이

다 특성 파라미터 분석을 통한 레이다 전파 간섭 모델을 활용하고, 위성 SAR의 운용 특성을 고려한 간섭 모델을 이용하여 시간, 공간, 주파수 영역에서 지상 레이다의 간섭 영향을 분석하였다. 시뮬레이션을 통하여 TerraSAR-X 위성 SAR 모델을 이용하여 지상 레이다가 받게 되는 간섭의 영향을 분석하고 예측하였다. 향후 국제적으로 고해상도의 다수의 위성 SAR를 성단으로 운용하는 지구 탐사 업무가 증가하고 있으므로 지상 레이다에 미치는 영향은 더욱 클 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서 제시한 간섭 분석 기법은 향후 국내에서 발사하게 될 SAR 위성이 미치는 영향이나 국제적인 지상 레이다 간섭보호를 위한 간섭 예측에 활용될 수 있을 것으로 본다.

참 고 문 헌

[1] Jorg Herrmann, Alejandra Gonzalez Bottero, "TerraSAR-X mission : the new generation in high resolution satellites", *Anais XIII Simposio Brasileiro-*

de Sensoriamento Remoto, Florianopolis, Brasil, pp. 7063-7070, Apr. 2007.

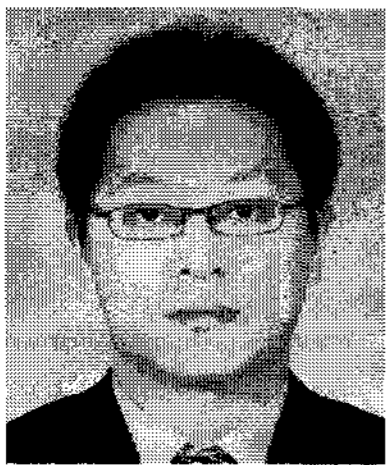
[2] Report ITU-R RS.2094, "Studies related to the compatibility between earth exploration-satellite service (active) and the radiodetermination service in the 9,300~9,500 MHz and 9,800~10,000 MHz bands and between earth exploration-satellite service(active) and the fixed service in the 9,800~10,000 MHz", 2007.

[3] Recommendations ITU-R RS.1280, "Selection of active space borne sensor emission characteristics to mitigate the potential radars operating in frequency bands 1~10 GHz", 1997.

[4] Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems 3rd*, McGraw-Hill, 2001.

[5] Ian G. Cumming, Frank H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Artech House, 2005.

송 우 진



2004년 2월: 한국항공대학교 항공 전자 및 정보통신공학부 (공학사)
 2008년 2월: 한국항공대학교 항공 전자공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] Radar Signal Processing, Multi-Site Radar System, Interference Analysis

곽 영 길



1976년 2월: 한국항공대학교 항공 통신공학과 (공학사)
 1981년 2월: 한국과학기술원 전기 전자공학과 (공학석사)
 1987년 6월: 미국오하이오대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 1976년 3월~2001년 3월: 국방과학 연구소 책임연구원, 레이다 및 SAR 연구실장
 1997년 2월~1999년 2월: 영국 Matra Marconi Space 위성 SAR 프로젝트 책임자
 2001년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신 공학부 교수 및 대학부설 항공전자연구소 소장 역임
 2002년 4월~현재: 한국전자과학회 레이다연구회 위원장
 2007년 9월~현재: 영국 옥스퍼드 대학교, Dept. of Engineering Science, Visiting Professor
 [주 관심분야] Radar System Design, Radar Signal Processing, Synthetic Aperture Radar Processing, UWB Antenna & UWB Radar Imaging

우 성 철



2007년 2월: 한국항공대학교 항공 전자 및 정보통신공학부 (공학사)
 2007년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] Radar & UWB Radar Signal Processing, Interference Analysis