

## 안테나 포인팅 에러를 고려한 ESIM이 FS 시스템에 미치는 간섭 영향 분석

# Analysis of Interference Effect of ESIM on FS System Considering the Antenna Pointing Error

강영흥<sup>1</sup> · 오대섭<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>군산대학교 컴퓨터정보통신공학부

<sup>2</sup>한국전자통신연구원 위성항공ICT연구부

Young-Houng Kang<sup>1</sup> · Dae-Sub Oh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Computer, Information and Communication Engineering, Kunsan University, Jeollabuk-do 54150, Korea

<sup>2</sup>Aerospace ICT Research Department, ETRI, Daejeon 34129, Korea

### [요 약]

최근 이동형 글로벌 광대역 통신 및 위성기반의 양방향 인터넷 서비스에 대한 수요가 증가함에 따라 ESIM (earth station in motion)이라는 새로운 형태의 위성 터미널이 개발되고 있다. 이 서비스는 ITU-R Resolution 158(WRC-15)에서 FSS 업링크에 27.5-29.5 GHz 대역사용을 고려하고 있어 동일대역에서 1순위 업무로 분배된 FS와의 간섭분석에 대한 연구가 요구되고 있다. 이에 본 논문에서는 ESIM이 기존의 FS(fixed service)에 미치는 간섭영향을 안테나의 포인팅 에러와 방위각을 고려하여 4 가지 시나리오에 대해 분석하였다. 그 결과 에러 초과확률 5% 및 10% 기준에서 양각이 20°~40°에 따라 두 시스템간의 분리거리는 32~52 km 정도 요구되고 있다. 이에 분리거리를 최소화하면서 동일대역의 FS를 보호하기 위해서는 안테나 포인팅 에러뿐만 아니라 이동 터미널의 방위각을 제어할 수 있어야 한다.

### [Abstract]

In recent years, owing to the growing user demand for the two-way internet service based on the move global broadband communications, a new type of satellite terminal has developed, known as earth station in motion (ESIM). This service was required by Resolution 158 (WRC-15) to study on the coexistence with the co-primary fixed service (FS) in 27.5-29.5 GHz as a FSS uplink. In this paper, four scenarios was introduced to account for the antenna pointing error and the azimuth for an analysis on the sharing between ESIM and FS. From analysis results, the required separation distance between two systems should be about 32~52 km according to the elevation angles of 20°~40° using thresholds of 5% and 10% outage probability. Therefore, it is necessary to control the azimuth angle due to a moving terminal as well as the pointing error of ESIM to minimize the required separation distance and to protect the co-primary FS.

**Key word** : Earth station on motion, Fixed service, Fixed satellite service, Pointing error, Interference.

<https://doi.org/10.12673/jant.2016.20.6.503>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 25 November 2016 Revised 29 November 2016

Accepted (Publication) 28 December 2016 (30 December 2016)

\*Corresponding Author; Young-Heung Kang

Tel: +82-63-469-4693

E-mail: yhkang@kunsan.ac.kr

## I. 서론

최근 이동형 글로벌 광대역 통신 및 위성기반의 양방향 인터넷 서비스에 대한 수요가 증가함에 따라 ESOMP (earth stations on moving platform) 또는 ESIM (earth station in motion, 이하 ESIM으로 약칭)이라는 새로운 형태의 위성 터미널이 개발되고 있으며, 홈(home) 또는 소규모 비즈니스 유저(user)들에게 소형의 안테나 터미널로 제공되고 있다 [1],[2]. 전형적으로 단일의 위성망은 넓은 지역에 전개되는 다수의 소형 터미널로 구성되며, 위성 커버리지 내의 위치, 변하는 기상조건, 유저의 데이터 속도에 따라 터미널들은 다양한 크기의 안테나로 운용되어 다양한 송신 전력레벨을 요구하고 있다. ESIM은 소형 안테나 터미널의 특징으로 인해 넓은 안테나 빔폭(beam width)을 가지게 되어 송신 전력레벨을 적절히 조정하지 못하면 인접 위성뿐만 아니라 기존의 지상 고정서비스(FS; fixed service)에 업링크(uplink) 간섭을 야기하게 된다. 또한, 고정 터미널뿐만 아니라 항공기, 선박, 기차, 육상 이동체에 장착된 소형 터미널들은 안테나 포인팅 에러를 가지고 있어 이로 인한 잠재적 간섭을 발생하므로 이를 해결해야 하는 문제점을 갖고 있다. 이러한 복합적인 영향은 터미널 네트워크로부터 타 무선망 수신기에 미치는 시변(time-varying) 간섭패턴으로 영향을 주게 된다[2].

WRC-15에서는 Resolution 158을 통해 FSS (fixed-satellite service) 정지궤도 위성과 통신하는 지구국에 17.7-19.7 GHz (space-earth) 및 27.5-29.5 GHz (earth-space) 대역의 주파수 사용을 고려하여 이 대역에서 운영하거나 계획하고 있는 여러 형태의 ESIM에 관한 기술적 운용적 특성 및 유저 요구조건을 연구하고, 여러 형태의 ESIM에 계획된 서비스를 제공하기 위한 스펙트럼 이용 및 확인된 타서비스와의 주파수 공동사용에 대한 연구를 WRC-19 의제 1.5로 채택하였다. 또한, ITU-R은 ESIM과 관련하여 Rep. ITU-R S.2223[3] 및 Rep. ITU-R S.2357[4]을 개발하였는데, S.2223은 17.3-30.0 GHz 대역의 GSO FSS ESIM을 위한 기술적 운영 요구조건을 다루고 있으며, S.2357은 19.7-20.2 GHz 및 29.5-30.0 GHz FSS 대역에서 정지궤도 위성과 통신하는 ESIM을 위한 기술적 운영 가이드라인을 다루고 있다.

현재 17-30 GHz 대역은 공동업무(co-primary) 기반으로 FS, 셀룰러 망 백홀(back-haul) 및 FSS에 분배되어 있다. FSS는 정지궤도 통신위성에 대한 공식적인 분류로 예를 들어 TV국, 무

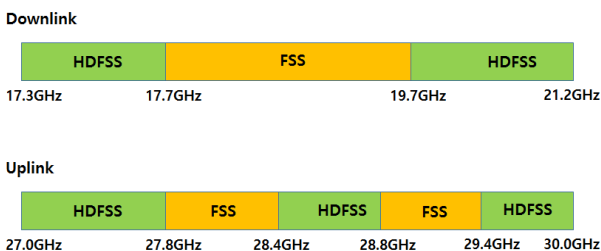


그림 1. FSS 및 HDFSS 스펙트럼 분배  
Fig. 1. Assigned spectrum for FSS and HDFSS.

선국 및 방송망에 방송서비스 제공을 목적으로 업링크는 27.5-30 GHz 대역, 다운링크(downlink)는 17.3-21 GHz 대역에 할당되었다. 그림 1은 ITU (International Telecommunication Union)에서 FSS와 HDFSS (high density FSS)에 분배된 스펙트럼을 보인다[5].

그림 1의 27-30 GHz 업링크 FSS 대역은 기존 방송 중계용 및 향후 셀룰러 망 백홀 서비스를 제공하기 위해 공동업무 기반의 FS와 FSS간의 주파수 공유가 매우 중요하다. 이전부터 위성 시스템은 지상망과의 주파수 공동사용을 통한 주파수 이용효율을 추구해 오고 있으며, 이를 위한 FSS와 FS간의 간섭영향 분석 및 호환성 연구가 활발히 진행되어 왔다[6],[7]. 이전의 연 FSS는 정지궤도 통신위성에 대한 공식적인 분류로 예를 들어 TV국, 무선국 및 방송망에 방송 서비스 제공을 목적으로 업링크는 27.5-30 GHz 대역, 다운링크(downlink)는 17.3-21 GHz 대역에 할당되었다. 그림 1은 ITU에서 FSS와 HDFSS (high density FSS)에 분배된 스펙트럼을 보인다[5]. 구들은 FS 및 FSS 지구국 안테나 특성과 전파모델, 간섭 기준치 설정 등을 다루고 있으며, 안테나의 포인팅 에러 (pointing error)를 고려하여 확률통계에 기반한 간섭영향 연구는 미흡한 실정이다.

안테나 포인팅 에러는 실제 구현에 있어 양각(elevation) 에러와 방위각(azimuth) 에러로 측정되는데, 이들 에러 성분들은 상호 독립 랜덤 변수로 이들의 PDF는 잘 알려진 통계적 분포로 표현하는 것이 간섭 해석에 유용하다. 이동에 기반한 (motion-induced) 안테나 포인팅 에러의 실험실 측정에서는 롱테일드 (long-tailed) 특성, 즉 PDF (probability density function)가 안테나 포인팅 에러가 큰 값에서도 급격히 감소하지 않는 특성을 갖는다고 입증되어 있다. 이에 대칭  $\alpha$ -stable( $S\alpha S$ ) 분포는 이러한 특성을 갖는 분포의 하나의 예이며, 양각 및 방위각 안테나 포인팅 에러의 PDF를 표현하는데 이용될 수 있다[2].

따라서 본 논문에서는 기존의 FSS 지구국이 FS에 미치는 간섭영향 분석 기법에 기반하면서 ESIM 안테나 포인팅 에러의  $S\alpha S$  분포 확률적 통계에 의한 간섭영향을 분석하여 향후 27-30 GHz 업링크 FSS 대역에서의 ESIM과 FS간의 호환성을 확보하고자 한다. 이를 위해 2장에서는 간섭 시나리오를 설정하고, 3장에서는 이동 기반의 안테나 포인팅 에러의 확률적 특성을 분석한다. 또한, 4장에서는 ESIM의 e.i.r.p.(equivalent isotropically radiated power) 특성을 분석하고 5장에서는 간섭분석에 사용된 전파모델의 파라미터를 설정한 후 6장에서 여러 파라미터들의 값에 따른 간섭영향을 분석하여 7장에서 결론을 내린다.

## II. 간섭 시나리오

본 연구에서는 향후 ESIM 서비스를 위해 고려하고 있는 27.5-29.5 GHz 대역의 FSS 업링크 주파수 대역을 고려한다. 그림 2에 보이는 간섭 시나리오는 ESIM에서 위성 업링크 FSS 서비스와 공동 업무로 제공되는 FS 서비스와의 간섭을 나타내고

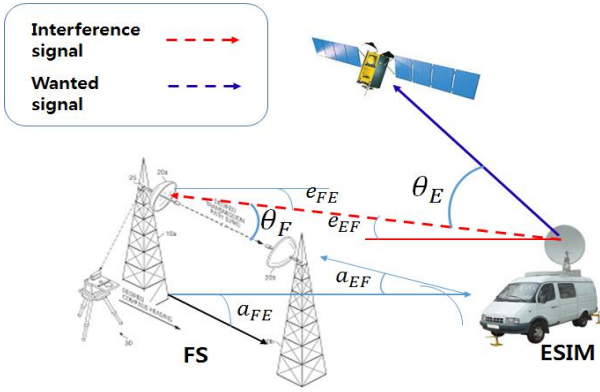


그림 2. ESIM - FS 간섭 시나리오  
 Fig. 2. Interference scenario between ESIM and FS.

있다. ESIM으로부터 FS에 수신되는 간섭전력은 식(1)과 같이 표현된다.

$$I_{EF} = P_E + G_E(\theta_E) - PL(r) + G_F(\theta_F) \quad [\text{dBW}] \quad (1)$$

여기서,  $P_E$ 는 ESIM의 송신전력,  $G_E(\theta_E)$ 는 ESIM이 FS를 향하는 송신 안테나 이득,  $G_F(\theta_F)$ 는 FS가 ESIM을 바라보는 수신 안테나 이득,  $PL(r)$ 은 ESIM과 FS간의 거리  $r$ 에 따른 경로손실이다. 또한,  $\theta_E$ 는 ESIM이 FS를 바라보는 오프 보어사이트(off-boresight) 각이며,  $\theta_F$ 는 FS가 ESIM을 바라보는 오프 보어사이트 각이다.

위성통신이나 P-P (point-to-point) FS 시스템은 고방향성 안테나를 사용하므로 정확한  $I_{EF}$ 와  $P_E$ 를 평가하기 위해서는 이와 같은 안테나의 포인팅 방향을 고려해야 한다. 이러한 안테나의 이득은 Rec. ITU-R P.452[8]에서 평가되는 오프 보어사이트 각에 의존한다. ESIM의 방위각 및 양각에 대한 안테나 포인팅 에러를 각각  $\phi_e$  및  $\phi_a$  라 하면, 권고안 P.452로부터 ESIM과 FS의 오프 보어사이트 각을 각각 식(2) 및 식(3)과 같이 유도할 수 있다. 한편, FS의 양각은  $0^\circ$ 로 가정한다.

$$\theta_E = \arccos(\cos(e_E)\cos(e_{EF})\cos(a_{EF}) + \sin(e_E)\sin(e_{EF})) \quad (2)$$

$$\theta_F = \arccos(\cos(e_{FE})\cos(a_{FE})) \quad (3)$$

여기서,  $e_E$ 는 ESIM이 위성을 바라보는 양각,  $a_{EF}$ 는 FS에 대한 ESIM의 방위각이며,  $a_{FE}$ 는 ESIM에 대한 FS의 방위각이다. 즉,  $a_{EF} = -a_{FE}$ 이다. 한편,  $e_{EF}$ 는 ESIM으로부터 FS에 이르는 전파경로의 양각으로 식(4)와 같다.

$$e_{EF} = -e_{FE} = \frac{h_E - h_F}{r} - \frac{r}{2r_e} \quad (4)$$

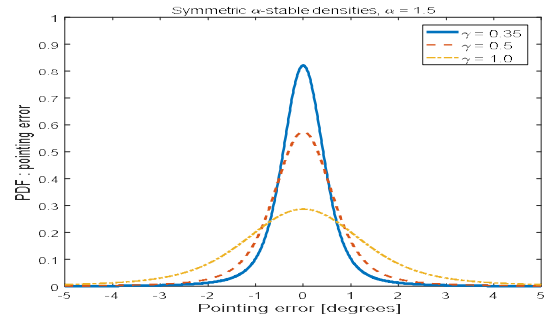
여기서,  $h_E$  (m)와  $h_F$  (m)는 각각 ESIM과 FS의 안테나 높이이며,  $r_e$ 는 유효 지구 반경( $\approx 8.5 \times 10^6$  m)이다. 더구나 ESIM과 FS의 방위각이 동일하다면 식(4)의 FS 오프 보어사이트 각  $\theta_F = e_{FE}$ 로 간략화 된다.

### III. 안테나 포인팅 에러

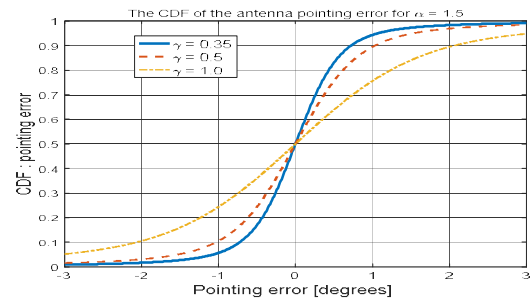
실제 구현에 있어 안테나 포인팅 에러는 양각 에러  $\phi_e$ 와 방위각 에러  $\phi_a$ 에 의해 측정된다. 이들 에러 성분들은 상호 독립 랜덤 변수로  $\phi_x$ 의 확률밀도 함수(PDF)는  $f_{\phi_x}(x = e, a)$ 로 표현된다. 이동 기반의 안테나 포인팅 에러의 실험실 측정에서 이러한 포인팅 에러는 롱테일드(long-tailed) 특성, 즉 PDF가 안테나 포인팅 에러가 큰 값에서도 급격히 감소하지 않는 특성을 갖는다고 입증되어 있다. 대칭  $\alpha$ -stable(S $\alpha$ S) 분포[2]는 롱테일드 특성을 갖는 분포의 하나의 예이며, 양각 및 방위각 안테나 포인팅 에러의 PDF를 표현하는데 이용될 수 있다. S $\alpha$ S 분포의 특성함수(characteristic function)는 0의 위치 파라미터를 가질 때, 식(5)와 같이 주어진다.

$$\Psi(x) = e^{-|\gamma x|^\alpha} \quad (5)$$

여기서,  $\gamma > 0$ 는 스케일(scale) 파라미터 또는 분산,  $\alpha$



(a) PDF



(b) CDF

그림 3. 포인팅 에러의 PDF 및 CDF 특성 예  
 Fig. 3. PDF and CDF for the pointing error.

( $0 < \alpha \leq 2$ )는 특성지수이다. 분포의 테일(tail)은  $\alpha$ 에 의해 결정되어 작은  $\alpha$ 에 대해 긴 테일을 가지는 반면,  $\gamma$ 는 PDF 폭에 비례한다.  $\alpha = 2$ 일 때, 평균 0 및 분산  $2\gamma^2$ 을 갖는 가우시안(Gaussian) 분포의 특수한 경우를 나타낸다. 그림 3에  $S\alpha S$  분포의 예로  $\alpha = 1.5$ 일 때  $\gamma$  값에 대한 PDF 및 CDF (cumulative distribution function)를 보인다.

동일한  $\alpha$  값에서  $\gamma$  값이 0.5에서 1.0으로 증가함에 따라 90% CDF에서 포인팅 에러 값이 2배로 증가하고 있다. 이러한 두 개의 파라미터 값을 변화시켜 실제로 접하는 다양한 형태의 포인팅 에러를 표현할 수가 있다.

#### IV. ESIM e.i.r.p.

ESIM의 오프축(off-axis) e.i.r.p. 레벨을 정하기 위해서 파라볼라 안테나(parabolic antenna)에 대한 정규화 이득 패턴을 고려하여, 안테나 포인팅 에러가 없을 때의  $\varphi$  방향에서 식(6)과 같이 표현된다[1].

$$E_{\phi}(\varphi) = E_{\max} \left( \frac{2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(\pi d/\lambda \times \sin\varphi)}{(\pi d/\lambda \times \sin\varphi)^{n+1}} \right)^2 \quad (6)$$

여기서,  $E_{\max}$ 는 보어사이트 e.i.r.p.,  $\varphi$ 는 오프축 각,  $J_{n+1}$ 는  $(n+1)$ 차 베셀함수,  $d$ 는 안테나 직경,  $\lambda$ 는 파장이다. 또한,  $n$ 은 개구면 일루미네이션(aperture illumination) 파라미터( $n = 0$ : ideal uniform,  $n = 1$ : parabolic,  $n = 2$ : parabolic squared)이다.

그림 4는 식 (6)을 근거로  $E_{\max}$ 는 0 dB, 안테나 직경 0.3 m, 주파수 28.5 GHz에서의  $n$ 에 따른 안테나 패턴을 나타내었다. 대부분의 안테나 시스템은 메인로브(main lobe)가  $n = 1$ 과  $n = 2$  사이의 정규화 이득 패턴에 속한다. 실제 안테나의 사이드로브(side lobe)는 식(6)으로 정확히 나타낼 수 없지만, 여기서는 초소형 개구면 터미널에 국한되므로 그 성능은 사이드로브보다는 메인로브에 의해 제한된다.

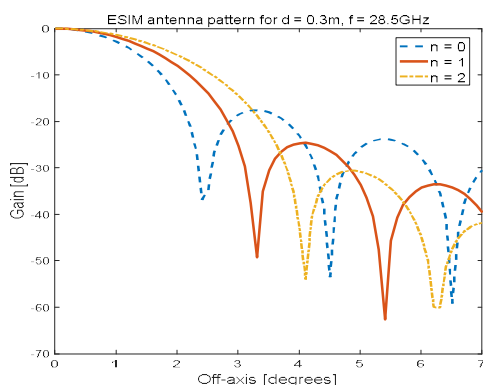


그림 4. ESIM 안테나 패턴 예  
Fig. 4. Antenna pattern for ESIM.

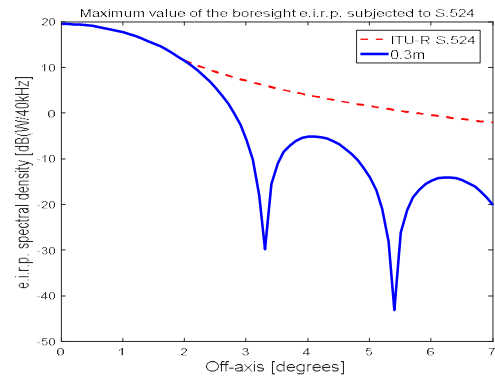


그림 5. ITU-R S.524와 0.3 m 안테나 특성과의 비교  
Fig. 5. Comparison of ITU-R S.524 and 0.3 m antenna.

Rec. ITU-R S.524[9]에 규정된 오프축 e.i.r.p. 마스크는 27.5-30 GHz 대역의 FSS 송신용 지구국에 대해  $2^\circ$  이상의 각에서 정의되어 있어, 보어사이트 e.i.r.p.,  $E_{\max}$ 는 ESIM의 성능을 결정하는 중요한 역할을 한다. ESIM에서 적절한 데이터 속도로 송신하는데 필요한  $E_{\max}$ 의 값은 고정된 지구국 터미널의 해당 값과 비교하여 정할 수 있다. ESIM 안테나에 대한 오프축 e.i.r.p. 레벨은 그림 4의 안테나 패턴을 ITU-R S.524 마스크 바로 밑에 이를 때까지  $E_{\max}$ 를 점차적으로 증가시켜 얻는다. 즉, ESIM e.i.r.p. 마스크를 만족시키는  $E_{\max}$ 의 값은 안테나 개구면 직경에 따라 증가하며, 주파수 28.5 GHz에서  $d = 0.3$  m인 경우  $E_{\max} = 19.5$  dB (W/40 kHz)을 얻었다. 그림 5에 보이는 결과는 ITU-R S.524에서 주어지는 e.i.r.p. 스펙트럼 밀도와 식(6)의 ESIM 안테나의 최대  $E_{\max}$ 가 19.5 dB (W/40 kHz)인 경우를 비교하였다. 안테나의 사이드로브는 S.524에 주어지는 e.i.r.p. 마스크이하의 값을 보인다. 이는 보어사이트 안테나 포인팅 에러가 없는 경우를 나타내고 있지만, 안테나 포인팅 에러가 있으면 오프축 e.i.r.p. 패턴의 변동으로 인해 보어사이트 e.i.r.p.는 감소한다.

본 연구에서는 ESIM의 e.i.r.p. 특성을 구하기 위해 그림 5와 Rec. ITU-R S.524에서 주어진 e.i.r.p. 스펙트럼 밀도를  $48^\circ < \varphi \leq 180^\circ$  구간서 -20 dB(W/40kHz)로 수정하여 식(7)과 같이 제안한다.

$$E_{Ref}(\varphi) = \begin{cases} E_{\phi}(\varphi) & 0^\circ \leq \varphi < 2^\circ \\ 19 - 25 \log \varphi & 2^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ \\ -2 & 7^\circ < \varphi \leq 9.2^\circ \\ 22 - 25 \log \varphi & 9.2^\circ < \varphi \leq 48^\circ \\ -20 & 48^\circ < \varphi \leq 180^\circ \end{cases} \quad (7)$$

#### V. 전파모델

지상의 전파경로손실 메커니즘(mechanism)은 BLOS

(beyond line-of-sight)와 해상경로에 적용 가능한 메커니즘을 포함하여 회절손실 (diffraction loss)  $L_d$ , 클러터 손실 (clutter loss)  $A_h$ , 가스 감쇠 (gaseous attenuation)  $A_g$ 와 같이 Rec. ITU-R P.452[8]에서 다루어지고 있다. P.452에 따라 ESIM 송신신호 주파수  $f$  (GHz), 두 시스템간의 거리  $r$  (km)일 때 전파경로 손실모형을 식(8)과 같이 고려할 수 있다[7].

$$PL(r) = 92.5 + 20\log(f) + 20\log(r) + L_d + A_g + A_h \quad (8)$$

회절손실은 BLOS 조건에서는 두드러진 손실성분이라 할 수 있으며, P.452에서 정의된 전체 전파모형은 매우 복잡하므로 여기서는 전파경로손실 계산을 쉽게 하면서 충분한 정확도를 가지는 근사모형을 고려한다. ESIM과 FS 중간거리 지점에 단일 나이프 에지드(knife-edged) 장애물을 가정하면  $L_d$ 는 식(9)와 같이 평가된다[8],[10].

$$L_d = 6.9 + 20\log(\sqrt{(v-0.1)^2 + 1} + v - 0.1) \quad (9)$$

위의  $L_d$ 는  $v \leq -0.78$ 에서는 0으로 근사시킬 수 있다. 여기서  $v$ 는 입력 파라미터에 따라 여러 형태를 갖는 차원이 없는 변수이며, 중간 지점의 장애물 가정에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v = \theta \sqrt{\frac{r \times 10^3}{2\lambda}} \quad (10)$$

여기서,  $\theta$  (radian)는 회절 각이다. 한편, 가스 감쇠는 드라이 에어(dry air) 감쇠와 수증기 감쇠로 구성되며, Rec. ITU-R P.676[11]은 이 감쇠를 평가하기 위한 직접적인 모델을 제공한다. 일반적인 수증기 밀도  $7.5 \text{ g/m}^3$ ,  $28.5 \text{ GHz}$  주파수 및 FS 수신기 높이  $20 \text{ m}$ 에서  $A_g \approx 0.107 \times r$ , 여기서  $r$  (km)은 거리이다. 감쇠  $A_h$ 는 로컬 클러터로부터 보호에 기인하는 손실 또는 소위 클러터 손실이며 식(11)과 같이 표현된다[7].

$$A_h = 10.25e^{-d_k} \left[ 1 - \tanh \left\{ 6 \left( \frac{h}{h_a} - 0.625 \right) \right\} \right] - 0.33 \quad (11)$$

여기서,  $d_k$  (km)는 안테나에 대한 공칭 클러터 점(nominal clutter point)으로부터의 거리,  $h$  (m)는 지상으로부터 안테나 높이,  $h_a$  (m)는 지상으로부터 공칭 클러터 높이이다. P.452는 클러터 손실은 다른 범주들, 나무(trees), 시골(rural), 교외(suburban), 도시(urban), 밀집도시 (dense urban)에 따른 모델 적용을 권고하고 있으며, 여기서는 시골환경을 고려하였다.

## VI. 간섭평가

식(1)의 간섭전력을 식(7)의 ESIM의 e.i.r.p. 스펙트럼 밀도에 의해 표현하면 식(12)와 같다.

$$I_{EF} = e.i.r.p. - PL(r) + G_F(\theta_F) \text{dB(W/40kHz)} \quad (12)$$

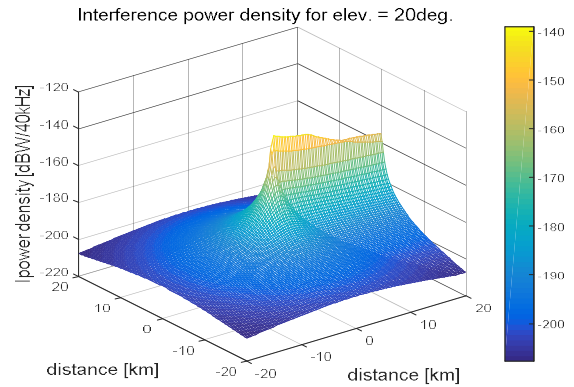
여기서,  $PL(r)$ 은 식(8)로 주어지며,  $G_F(\theta_F)$ 는 FS 수신 안테나 이득으로 Rec. ITU-R F.699[12]에서 주어지는 안테나 패턴을 이용하였으며, 최대이득은  $40 \text{ dBi}$ , 안테나 직경은  $1.2 \text{ m}$ 로 가정하였다.

본 연구에서는 FS를 보호하기 위한 간섭기준치로 잡음전력은  $-158 \text{ (dBW/40 kHz)}$ 을 고려하여  $I/N = -10 \text{ dB}$ 로 설정하여, 그 기준치  $I_{thr} = -168 \text{ (dBW/40 kHz)}$ 을 사용하였다.

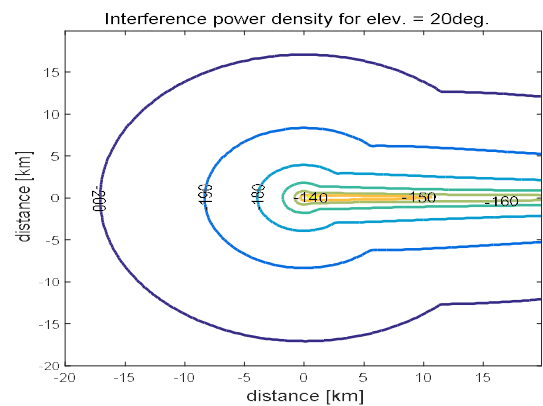
### 6-1 포인팅 에러를 고려하지 않은 경우

#### 1) 시나리오 1: ESIM 방위각이 $0^\circ$ 인 경우( $a_{EF} = 0^\circ$ )

안테나 포인팅 에러가 없을 때 ESIM 송신기(Tx)에서 FS 수신기(Rx)에 미치는 간섭영향은 ESIM 안테나의 보어사이트 각이 위성을 바라보는 양각과 각각의 방위각에 의존하므로 이에



(a) 3차원 특성



(b) 2차원 특성

그림 6. 양각이  $20^\circ$ 인 경우의 간섭전력 밀도

Fig. 6. Interference power density for  $20^\circ$  elevation angle.

따른 간섭영향 평가가 중요하다. 여기서 FS Rx 안테나 높이는 20 m, ESIM Tx 안테나 높이는 2 m로 가정하였다. 만일 ESIM Tx가 FS Rx에 대한 방위각을 0°로 가정하여 ESIM이 위성을 바라보는 양각이 20°일 때의 간섭을 평가하여 그림 6에 3차원 및 2차원 특성을 나타내었다.

그림 6으로부터 ESIM Tx에 의한 FS 수신 안테나의 방위각에 따른 간섭전력은 FS 보어사이트 방향에서 강하게 나타나며, 10 km 거리에서 백로브(back lobe) 방향보다 40 dBW 이상의 간섭전력이 크게 나타난다. 따라서 이하의 간섭평가에서는 최악의 간섭 시나리오를 고려하여 ESIM Tx 안테나가 FS Rx 수신 안테나의 보어사이트 방향에서 안테나 포인팅 에러영향에 따른 간섭영향을 평가한다.

**2) 시나리오 2 : ESIM 방위각이 일양분포인 경우**

ESIM의 이동성에 따른 FS 수신기에 대한 방위각의 변화의 영향을 랜덤특성으로 고려하여 FS 수신 안테나의 메인빔을 향하는 ESIM의 방위각을 일양분포(uniform distribution)로 가정한다. 단, ESIM 안테나의 양각 및 방위각의 포인팅 에러는 고려하지 않는다.

그림 7은 ESIM 안테나의 방위각을 일양분포로 가정하여 거리에 따른  $I_{thr} = -168$  dB (W/40kHz)을 초과할 확률(outage probability)을 보인다. 양각이 높을수록 초과확률을 낮아지며,  $10^{-2}$ 의 확률(1% 초과확률)을 얻기 위해서 양각이 20°에서 50 km 정도 분리되어야 하지만 양각이 40°로 높아지면 그 분리거리는 41 km로 감소한다.

**6-2 포인팅 에러를 고려한 경우**

**1) 시나리오 3 : ESIM 방위각이 0°인 경우( $a_{EF} = 0^\circ$ )**

여기서는 ESIM의 진행방향을 일정하다고 가정하여 FS의 메인 빔과 ESIM의 메인 빔이 서로 마주보는 형태로 가정하여 단지 ESIM Tx 안테나의 양각 및 방위각의 포인팅 에러만을 고려한 간섭영향을 평가한다. 이를 위해 ESIM 안테나의 양각 및 방

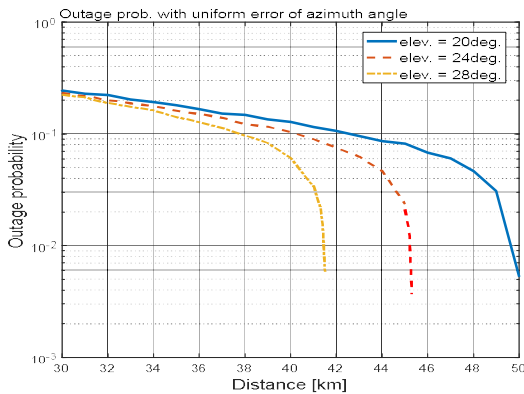


그림 7. 양각에 따른 초과확률  
Fig. 7. Outage probability due to the elevation.

위각의 포인팅 에러 특성을 대칭  $\alpha$ -stable(S $\alpha$ S) 분포로 가정하여 이의 랜덤 에러 특성으로부터 얻어지는 ESIM Tx 안테나의 보어사이트 각에 따른 식(7)의 e.i.r.p. 스펙트럼 밀도를 구한다.

ESIM Tx 및 FS Rx 방위각이 0°로 가정하여 두 시스템간의 분리거리, ESIM Tx 안테나의 위성을 향한 양각, 대칭  $\alpha$ -stable(S $\alpha$ S) 분포 파라미터  $\alpha$  및  $\gamma$ 에 따른 간섭전력 밀도의 누적분포함수 특성을 그림 8 및 그림 9에 나타내었다.

그림 8은 양각이 20°, 포인팅 에러특성이  $\alpha = 1.0, \gamma = 1.0$  일 때 거리 30 km, 40 km, 50 km에 대한 간섭전력 밀도의 누적분포 특성을 보인다. 분리거리가 30 km에서 50 km 증가함에 따라 간섭전력 밀도의 중심축이 약 9 dB 감소하고 있으며, 또한 간섭기준치,  $I_{thr} = -168$  dB(W/40 kHz)을 초과할 확률이 98 %에서 50 %로 극히 낮아지고 있다.

그림 9는 동일한 조건에서 두 시스템간의 분리거리가 40 km 일 때 양각에 따른 간섭전력 밀도의 누적분포 특성을 보인다. 양각이 20°에서 40°로 증가함에 따라 약 8 dB 감소하며, 또한 간섭기준치,  $I_{thr} = -168$  dB (W/40kHz)을 초과할 확률이 92 %에서 2 %로 극히 낮아지고 있다. 양각이 60° 이상으로 높아지

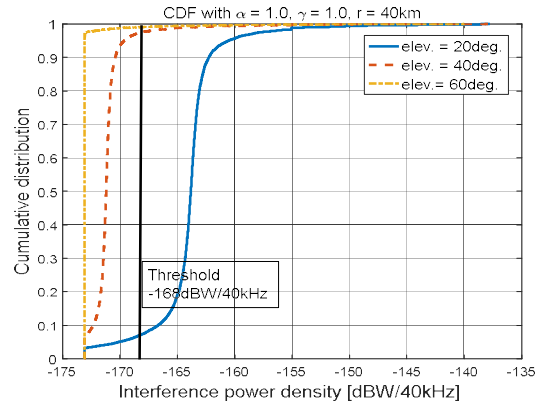


그림 8. 거리에 따른 간섭전력 CDF 특성  
Fig. 8. CDF vs the separation distance.

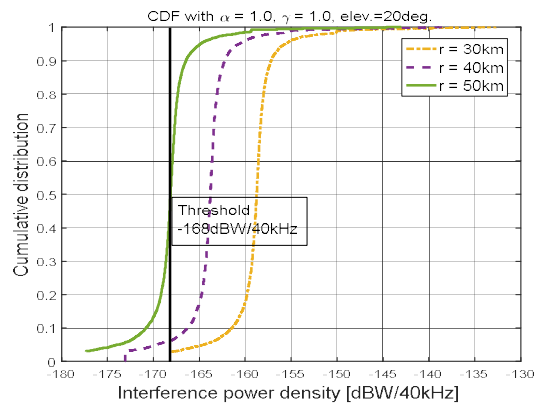


그림 9. 양각에 따른 간섭전력 CDF 특성  
Fig. 9. CDF vs the elevation.

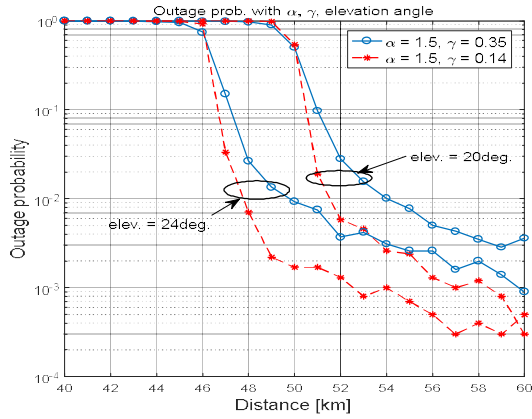


그림 10. 포인팅 에러에 따른 초과확률  
Fig. 10. Outage probability due to the pointing error.

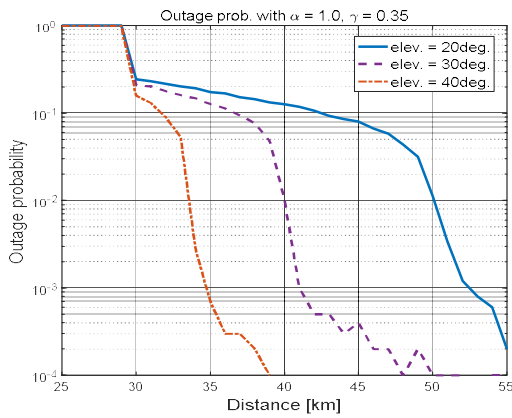


그림 11. 양각에 따른 초과확률  
Fig. 11. Outage probability due to the elevation angle.

면 초과확률이 1% 이내로 운영 가능하다.

그림 10은 ESIM의 포인팅 에러만을 고려할 때,  $I_{thr} = -168$  dB (W/40kHz)을 초과하는 확률을 나타낸다. 양각이 낮아지면 분리거리가 크게 되고 동일 양각에서 포인팅 에러의 통계조건에 따라 차이를 보이고 있다. 즉, 포인팅 에러의 편차  $\gamma$  값이 클수록 초과확률이 높아져 분리거리도 점점 늘어나게 된다.  $\alpha = 1.5$  일 때,  $\gamma = 0.14$ 에서 0.35로 에러 편차가 커지면 1% ( $10^{-2}$  초과 확률) 분리거리는 50 km에서 54 km로 증가하게 된다.

2) 시나리오 4 : ESIM 방위각이 일양분포인 경우

ESIM의 진행 방향을 랜덤특성으로 고려하여 FS 메인빔을 향

표 1. 분리거리 기준(km)

Table 1. Requirements for the separation distance.

Elevation angle (degree)	20	25	30	35	40	
Scenario 3	10 %	51	45	41	36.5	33.5
	5 %	52	46	42	37	34
Scenario 4	10 %	42	40	37	34	32
	5 %	47	43	39	35.5	33

하는 ESIM의 방위각은 일양분포로 가정하고 안테나의 양각 포인팅 에러를 고려한 간섭영향을 평가한다. 그림 11은  $\alpha = 1.0$ ,  $\gamma = 0.35$ 의 포인팅 에러를 가정하여 거리에 따른 양각에 대한  $I_{thr} = -168$  dB (W/40 kHz)을 초과할 확률을 보인다. 양각이 작을수록 간섭전력이 크게 작용하여 초과확률이 점점 높아진다. 확률  $10^{-3}$ 의 확률을 얻기 위해서 양각이 20°에서 거리 53 km 정도 분리되어야 하지만 양각이 40°로 높아지면 35 km 이상의 분리거리면 충분하다. 양각이 낮은 20°일 때에도 그림 7과 비교하면 1% ( $P_{out} = 10^{-2}$ ) 초과확률에서 분리거리가 1 km 이내 차이로 거의 동일한 결과를 얻었다. 이로부터 ESIM이 FS를 향하는 방위각이 랜덤특성을 가지면 안테나 포인팅에 의한 간섭의 영향은 거의 무시할 수 있다는 점을 알 수 있다.

한편, ESIM Tx 안테나가 FS Rx 안테나를 향하는 방위각을 랜덤 특성으로 고려한 시나리오 4를 방위각 변동이 없는 시나리오 3과 비교하기 위해 안테나 포인팅 에러에 의한 초과확률 기준 10% ( $P_{out} = 10^{-1}$ )와 5% ( $P_{out} = 5 \cdot 10^{-2}$ )에 필요한 분리거리 결과를 표 1에 나타내었다.

VII. 결 론

본 논문에서는 향후 27.5-29.5 GHz 대역에서 운영 예정인 ESIM이 기존의 FS에 미치는 간섭영향을 안테나의 포인팅 에러와 방위각을 고려하여 4 가지 시나리오에 대해 분석하였다. 시나리오 1은 포인팅 에러와 방위각 변동이 없을 때, 즉 ESIM 터미널이 고정형으로 FS의 보어사이트 방향에서의 ESIM 운영을 제한하여 그 간섭의 영향을 크게 줄여야 한다. 시나리오 2는 ESIM 터미널이 고정형이면서 안테나 포인팅 에러가 존재하는 경우로 그 에러에 의해 양각이 낮은 경우 간섭영향이 더욱 증가하므로 낮은 위도의 국가들은 더욱 정교한 아테나 트래킹 (tracking) 시스템을 갖추어야 한다. 시나리오 3에서는 두 기준에 필요한 분리거리가 양각에 따라 0.5 ~ 1.0 km 차이에 불과하나 시나리오 4에서는 1 ~ 5 km 차이를 나타내며 양각이 낮을수록 그 차이는 크게 된다. 양각이 높아지면 안테나 포인팅 에러에 의한 FS 수신기에 주는 간섭영향은 작아지고 그 영향은 단지 양각의 크기에만 의존하게 된다.

결론적으로 ESIM의 이동성에 의해 FS를 향하는 방위각의 변동이 랜덤 특성이면 안테나 포인팅에 의한 간섭의 영향은 무시할 수 있다. 따라서 동일대역 1 순위 업무로 운용중인 FS를 보호하기 위해서는 안테나 포인팅 에러뿐만 아니라 FS의 보어 사이트를 향하는 ESIM의 방위각을 제어할 수 있어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구 ( B0719 - 16 -

1006, 국가 위성통신 주파수 확보 및 이용을 위한 위성 스펙트럼 활용기술 개발)의 일환으로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] E. G. Cuevas and C. V. Weerackody, "Technical characteristics and regulatory challenges of communications satellite earth stations on moving platforms," *Johns Hopkins APL Technical Digest*, Vol. 33, No. 1, pp. 37 - 51, 2015.
- [2] International Telecommunication Union, Methodologies to estimate the off-axis e.i.r.p. density levels and to assess the interference towards adjacent satellites resulting from pointing errors of vehicle-mounted earth stations in the 14 GHz frequency band, Recommendation ITU-R S.1857, Jan. 2010.
- [3] International Telecommunication Union, Technical and operational requirements for GSO FSS earth stations on mobile platforms in bands from 17.3 to 30.0 GHz, Report ITU-R S.2223, Oct. 2011.
- [4] International Telecommunication Union, Technical and operational guidelines for earth stations on mobile platforms communicating with geostationary space stations in the fixed-satellite service in the frequency bands 19.7-20.2 GHz and 29.5-30 GHz, Report ITU-R S.2357-0, June 2015.
- [5] F. Guidolin, M. Nekovee, L. Badia, and M. Zorzi, "A study on the coexistence of fixed satellite service and cellular networks in a mmWave scenario," in *IEEE ICC 2015 Wireless Communication Symposium*, London: UK, pp. 2444-2449, June 2015.
- [6] International Telecommunication Union, Determination of the interference potential between earth stations of the fixed-satellite service and stations in the fixed service, Recommendation ITU-R SF.1006, 1993.
- [7] International Telecommunication Union, Methodology to evaluate the impact of space-to-Earth interference from the fixed-satellite service to the fixed service in frequency bands where precipitation is the predominant fade mechanism, Recommendation ITU-R SF.1572, May 2002.
- [8] International Telecommunication Union, Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz, Recommendation ITU-R P.452-16, July 2015.
- [9] International Telecommunication Union, Maximum permissible levels of off-axis e.i.r.p. density from earth stations in geostationary-satellite orbit networks operating in the fixed-satellite service transmitting in the 6 GHz, 13 GHz, and 30 GHz frequency bands, Recommendation ITU-R S.524-9, April 2006.
- [10] International Telecommunication Union, Propagation by diffraction, Recommendation ITU-R P.526-13, Nov. 2013.
- [11] International Telecommunication Union, Attenuation by atmospheric gases, Recommendation ITU-R P.676-11, Sep. 2016.
- [12] International Telecommunication Union, Reference radiation patterns for fixed wireless system antennas for use in coordination studies and interference assesment in the frequency range from 100 MHz to about 70 GHz, Recommendation ITU-R P.699-7, April 2006.



**강 영 흥 (Young-Heung Kang)**

1993년 2월 : 한국항공대학교 대학원 전자공학과 (공학박사), 1988년 3월~1990년 2월 : 한국항공대 통신공학과 조교  
1995년 8월~1996년 8월 : 일본 오사카대학 객원교수, 2003년 8월~2005년 2월 : 영국 York대학 방문교수  
1990년 4월~현재 : 군산대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수  
※ 관심분야 : 위성통신공학, 통신공학, 이동통신공학, 정보통신 표준화, USN



**오 대 섭 (Dae-Sup Oh)**

2014년 2월 : 전북대학교 전자공학과 (공학박사), 1998년 3월~2000년 7월 : LG 정보통신 주임연구원  
2000년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 전문위원 (책임연구원)  
※ 관심분야 : 위성통신, 전파통신, 전파 특성