

## IMT-2000 위성부문 무선 전송 기술 평가를 위한 전파 모델링 기법 분석

임채현, 유문희  
한국전자통신연구원 위성통신시스템연구부  
전화 : 042-860-6625 / 핸드폰 : 016-299-5562

### Analysis on the Propagation Modeling Methods for the Evaluation of the IMT-2000 Satellite RTT

Chae-Hun Im, Moon-Hee You  
Dept. of Satellite Comm. System, ETRI  
E-mail : imch@etri.re.kr

#### Abstract

In this paper, we analyze the propagation modeling methods to evaluate the IMT-2000 satellite RTT (Radio Transmission Technology). To generate Rayleigh random numbers having Jake's Doppler power density spectrum, the Rice's sum of sinusoids methods are used and their statistical characteristics are compared with each other.

#### I. 서론

ITU-R의 권고서에서는 IMT-2000 위성 부문의 전파 모델을 협대역 모델과 광대역 모델로 구분하고 있는데, 수신 신호의 진폭은 직접 경로 성분의 여부에 따라 Rician 분포나 Rayleigh 분포를 가정하고 있다[1].

Rician이나 Rayleigh 랜덤 과정을 발생시키기 위해서는 실수 값을 가지는 두 개의 정규 랜덤 과정이 필요하다. Rayleigh 페이딩 신호는 두 개의 협대역 정규 랜덤 과정을 이용하여 다음의 식과 같은 관계로 발생시킬 수 있다.

$$\mu(t) = \mu_1(t) + j\mu_2(t) \quad (1)$$

위의 식에서  $\mu_1(t)$ 과  $\mu_2(t)$ 가 서로 무상관이고 평균이 0인 실수 정규 랜덤 과정이면,  $\mu(t)$ 의 포락선은 Rayleigh 분포를 가진다. 그리고 위의 식에서 정규 랜덤 과정의 평균이 0이 아니면 포락선은 Rician 분포를 가진다. 실제 무선 페이딩 채널의 신호는 불규칙한 랜덤 과

정어지만, 완벽하게 불규칙한 신호를 발생시키는 것은 어렵다. 시뮬레이션 모델에서는 관련된 매개 변수를 특정한 규칙에 따라 미리 결정하고, 이 매개 변수는 시뮬레이션 과정 동안에는 바뀌지 않는다. 따라서 시뮬레이션 모델에 의한 신호는 결정적인 신호라 할 수 있지만 그 통계적인 특성이 원하는 랜덤 과정의 통계적인 특성에 가깝도록 하는 것이다.

본 논문에서는 Rice's sum of sinusoids 방법을 통하여 ITU-R의 권고서에서 IMT-2000 위성 부문의 전파 모델로 제시하고 있는 Jake 전력 스펙트럼 밀도를 가지는 Rayleigh 랜덤 과정을 발생시키는 모델링 기법을 설명한다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 랜덤 과정을 발생시키고 이들의 통계적인 특성을 비교한다.

Jake 도플러 전력 스펙트럼 밀도는 아래의 식과 같다 [2].

$$S_{u_i}(f) = \frac{\sigma_{\mu_0}^2}{\pi f_{\max} \sqrt{1 - (f/f_{\max})^2}}, \quad |f| < f_{\max} \quad (2)$$

ITU-R의 권고서에는 위 식의 분자 항을 1로 가정하고 있으며 위성의 이동에 의한 반송파 주파수의 천이도 포함하고 있다[1].

#### II. Rice's sum of sinusoids 방법

이 방법은 가중치를 가지며 적절히 설계된 사인이나

코사인 함수를 여러 개 합하여 유색 정규 랜덤 과정을 근사화 시키는 것이다[3]. 평균이 0인 유색 정규 랜덤 과정  $\mu_i(t)$ 의 근사화 된 신호를  $\tilde{\mu}_i(t)$ 라 하면 다음 식과 같이 유한 개의 코사인 함수의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\mu}_i(t) = \sum_{n=1}^{N_i} c_{i,n} \cos(2\pi f_{i,n}t + \theta_{i,n}), \quad i=1,2 \quad (3)$$

여기서  $c_{i,n}$ ,  $f_{i,n}$ 은 각각 도플러 계수, 이산 도플러 주파수라 하며,  $N_i$ 는 사인이나 코사인 함수의 수를 나타낸다. 그리고  $\theta_{i,n}$  도플러 위상이라고 하며  $[0, 2\pi)$  구간에 균일하게 분포하는 랜덤 변수이다. 이와 관련하여 각 매개 변수 ( $c_{i,n}$ ,  $f_{i,n}$ )을 유도하는 다양한 방법이 연구되어 왔는데, 이 장에서는 이러한 방법에 대하여 설명하고 비교한다.

### 3.1 Method of Equal Distances (MED)

이 방법은 이웃한 두 개의 이산 도플러 주파수 차이가 등 간격이 되도록  $f_{i,n}$ 을 결정하는 방법이다[4].

Jake 전력 스펙트럼 밀도는 주파수 영역에서  $|f| < f_{\max}$  구간에 한정되어 있으므로 이웃한 두 이산 도플러 주파수의 차이는  $\Delta f_i = f_{\max} / N_i$  이다. 따라서 이산 도플러 주파수는 다음과 같다.

$$f_{i,n} = f_{\max} (2n-1) / 2N_i, \quad n=1,2,3,\dots,N_i \quad (4)$$

도플러 계수는 다음과 같은 주파수 구간을 고려하여 계산할 수 있다.

$$I_{i,n} := [f_{i,n} - \Delta f_i / 2, f_{i,n} + \Delta f_i / 2], \quad n=1,2,3,\dots,N_i \quad (5)$$

즉 이 구간에서 시뮬레이션 모델의 전력 스펙트럼 밀도로부터 계산한 평균 전력과 원하는 전력 스펙트럼 밀도로부터 계산한 평균 전력이 같도록 해야 한다. Jake 전력 스펙트럼 밀도에 대하여 이 조건을 만족시키는 도플러 계수를 계산하면 다음 식과 같다.

$$c_{i,n} = \left\{ \frac{4\sigma_{\mu_0}^2}{\pi} \left[ \arcsin\left(\frac{n}{N_i}\right) - \arcsin\left(\frac{n-1}{N_i}\right) \right] \right\}^{1/2}, \quad n=1,2,3,\dots,N_i \quad (6)$$

이 방법에는 한가지 문제점이 존재한다. 이 방법으로 얻어진 근사 랜덤 과정의 자기 상관 함수는 주기  $T_{p_i} = 1/\Delta f_i$ 인 주기 함수라는 것이다. 따라서 근사 랜덤

과정  $\tilde{\mu}_i(t)$  그 자체도 주기함수 이므로, 시뮬레이션 시간이 주기  $T_{p_i}$ 의 반을 초과하지 않도록 해야 한다.

### 3.2 Method of Equal Areas (MEA)

이 방법은  $f_{i,n-1} \leq f < f_{i,n}$ 의 범위에서 전력 스펙트럼 밀도의 면적  $A_{\mu_i}$ 가  $\sigma_{\mu_i}^2 / (2N_i)$  이 되도록 관련 매개 변수를 결정하는 방법이다.

$$A_{\mu_i} = \int_{f_{i,n-1}}^{f_{i,n}} S_{\mu_i}(f) df = \sigma_{\mu_i}^2 / 2N_i, \quad n=1,2,3,\dots,N_i \quad (7)$$

여기서  $f_{i,0} = 0$  이다[4]. Jake 전력 스펙트럼 밀도에 대하여 이 방법을 적용하면 관련 매개 변수는 다음과 같이 계산된다.

$$f_{i,n} = f_{\max} \sin(\pi n / 2N_i) \quad (8)$$

$$c_{i,n} = \sigma_{\mu_0} \sqrt{2 / N_i}, \quad n=1,2,3,\dots,N_i \quad (9)$$

### 3.3 Monte Carlo Method (MCM)

이 방법은 필터링 된 정규 랜덤 과정  $\mu(t)$ 의 도플러 주파수  $f$ 에 대한 주어진 확률 밀도 함수  $p_{\mu}(f)$ 에 따라 이산 도플러 주파수  $f_n$ 을 발생시키는 방법이다[5]. 여기서 확률 밀도 함수  $p_{\mu}(f)$ 는 랜덤 과정  $\mu(t)$ 의 전력 밀도 함수  $S_{\mu}(f)$ 에 비례하는 것을 보일 수 있다.

$$p_{\mu}(f) = c_{\mu} S_{\mu}(f) \quad (10)$$

위의 식에서  $c_{\mu}$ 는 확률 밀도 함수  $p_{\mu}(f)$ 의 면적이 1이 되도록 정규화 하는 적절한 상수이다. 이 방법을 Jake의 전력 스펙트럼 밀도 모델에 적용하면 관련 매개 변수가 다음 식과 같이 얻어진다.

$$f_{i,n} = f_{\max} \sin(\pi u_n / 2) \quad (11)$$

$$c_{i,n} = \sigma_{\mu_0} \sqrt{2 / N_i}, \quad n=1,2,3,\dots,N_i \quad (12)$$

여기서  $u_n$ 은 0과 1 사이에 균일하게 분포하는 랜덤 수이고, 도플러 계수  $c_{i,n}$ 은  $\tilde{\mu}_i(t)$ 의 분산이  $\sigma_{\mu_0}$ 가 되도록 정의되었다.

### 3.4 Mean Square Error Method (MSEM)

이 방법은 아래의 식처럼 정의 되는 평균 제곱근 오차가 최소가 되도록 관련 매개 변수를 결정하는 방법이다[4].

$$e_{\mu} := (1/T_{\mu}) \int_0^{T_{\mu}} (r_{\mu}(t) - \tilde{r}_{\mu}(t))^2 dt \quad (13)$$

여기서  $T_{\mu}$ 는 적절한 시간 간격이고,  $r_{\mu}(t)$ 는 특정 자기 상관 함수를 나타내며,  $\tilde{r}_{\mu}(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\tilde{r}_{\mu}(t) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n^2}{2} \cos(2\pi f_n t) \quad (14)$$

이 경우 이산 도플러 주파수  $f_n$ 이 등 간격이라 가정하면 간단한 해가 존재한다.

$$c_n = \sqrt{(4/T_{\mu}) \int_0^{T_{\mu}} r_{\mu}(t) \cos(2\pi f_n t) dt} \quad (15)$$

여기서 시간 간격  $T_{\mu}$ 는 주기  $T_p = 1/\Delta f$ 의 반으로 주어진다. 이 방법을 Jake 전력 스펙트럼 밀도 모델에 적용할 경우 이산 도플러 주파수는 MED 방법과 동일한 값을 가지지만, 도플러 계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$c_{i,n} = \sqrt{(4\sigma_{\mu_0}^2 / T_{\mu_i}) \int_0^{T_{\mu_i}} J_0(2\pi f_{\max} t) \cos(2\pi f_{i,n} t) dt} \quad (16)$$

### 3.5 Jake's method

이 방법에서는 수신 신호가  $N$ 개의 경로를 통해서 수신 되고, 다중 경로 성분들이 모든 방향  $[0, 2\pi)$ 에 균일하게 존재한다고 가정하였다. 그리고 각 다중 경로 성분들의 세기가 동일하며, 채널은 정제성을 만족한다고 가정하였다. 이 경우 수신 신호의 지역 통과 복소 포락선은 다음과 같다[2].

$$\mu(t) = \sum_{n=1}^N e^{-j(\hat{\phi}_n + 2\pi f_m t \cos \theta_n)} \quad (17)$$

여기서  $\hat{\phi}_n = 2\pi(f_c + f_m)\tau_n$  이고,  $\theta_n$ 은 입사각을 나타내는데, 모든 방향에 균일하게 존재한다고 가정하였으므로  $\theta_n = 2\pi n / N$ 이 된다. 만약  $N/2$ 이 홀수라면 수신 신호  $\mu(t) = \mu_1(t) + j\mu_2(t)$ 의 직교 성분  $\mu_1(t), \mu_2(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_1(t) = 2 \sum_{n=1}^M \cos \beta_n \cos 2\pi f_n t + \sqrt{2} \cos \alpha \cos 2\pi f_m t \quad (18)$$

$$\mu_2(t) = 2 \sum_{n=1}^M \sin \beta_n \cos 2\pi f_n t + \sqrt{2} \sin \alpha \cos 2\pi f_m t \quad (19)$$

$$M = (N/2 - 1)/2 \quad (20)$$

$$f_n = f_m \cos(2\pi n / N), \quad n = 1, 2, \dots, M \quad (21)$$

수신 신호  $\mu(t) = \mu_1(t) + j\mu_2(t)$ 의 위상이 균일하게 분포

하는 것이 바람직하므로 이 조건이 만족하도록  $\alpha$ 와  $\beta_n$ 을 결정하면 다음과 같이 정해진다.

$$\alpha = 0, \quad \beta_n = \pi n / M \quad (22)$$

### III. 모의 실험 결과 및 논의

아래의 그래프 들은 Rice's sum of sinusoids 방법에서 관련 매개 변수를 결정하는 다섯 가지의 모델링 기법을 실제 프로그래밍 하여 그 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 모든 방법에서 공통적으로 반송파 주파수는 2 GHz, 사용자의 이동 속도는 70 km/h로 가정하였는데, 이는 최대 도플러 천이  $f_m$ 이 약 129.6 Hz 정도에 해당하는 것이다. MED, MEA, MCM 그리고 MSEM 방법에서  $N$ 의 값은 각각 25를 사용하였고, Jake 방법에서  $M$ 의 값은 8을 사용하였다.

(그림 1)의 누적 분포 함수로부터 알 수 있듯이 각각의 방법으로 발생시킨 랜덤 신호의 진폭 분포는 거의 차이를 보이지 않는다. MED 방법과 MSEM 방법으로 발생시킨 랜덤 신호의 도플러 전력 스펙트럼 밀도는 ITU-R의 권고서에서 권고하고 있는 고전적인 Jake 도플러 전력 스펙트럼 밀도를 잘 근사화 하고 있으며, MEA 방법의 전력 스펙트럼 밀도는 Jake의 도플러 전력 스펙트럼 밀도와 차이를 나타내는 것 같으나, 이산 도플러 주파수가 커질수록 더 조밀하게 분포하므로 균준화 할 경우 원하는 전력 스펙트럼 밀도 형태를 가지는 것을 알 수 있다. MCM 방법의 전력 스펙트럼 밀도는 원하는 모양과 차이가 있음을 알 수 있다. Jake 방법으로 발생시킨 랜덤 신호의 전력 스펙트럼 밀도는 원하는 전력 스펙트럼 밀도와 대체적으로 비슷한 것을 알 수 있다.

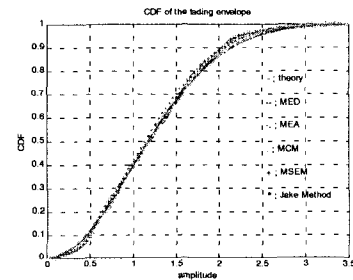


그림 1. 페이딩 신호의 누적 분포 함수

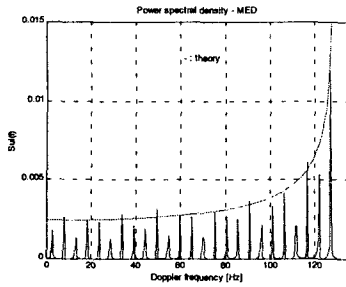


그림 2. MED 방법에 의한 전력 스펙트럼 밀도

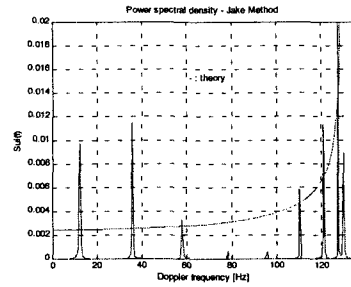


그림 6. Jake 방법에 의한 전력 스펙트럼 밀도

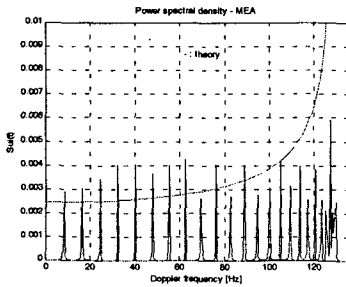


그림 3. MEA 방법에 의한 전력 스펙트럼 밀도

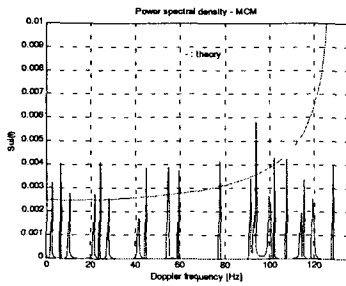


그림 4. MCM 방법에 의한 전력 스펙트럼 밀도

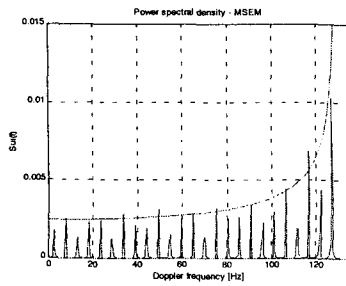


그림 5. MSEM 방법에 의한 전력 스펙트럼 밀도

#### IV. 결론

본 논문에서는 ITU-R의 권고서에서 IMT-2000 위성 부문 RTT 성능 평가를 위하여 권고하고 있는 고전적인 Jake 도플러 전력 스펙트럼 밀도를 가지는 Rayleigh 랜덤 신호를 생성하는 모델링 기법을 분석하고, 시뮬레이션을 통하여 각 방법의 결과를 비교하고 분석하였다.

Rice's sum of sinusoids 방법에 해당하는 각각의 방법은 모델링과 관련된 계수들에 대한 표현식이 간단하며 시뮬레이션 매개 변수가 원하는 랜덤 과정의 전력 스펙트럼 밀도의 매개 변수와 직접적인 연관을 가지므로 원하는 랜덤 과정을 효과적으로 근사화 시킬 수 있다.

시뮬레이션 결과에 따르면 MED, MSEM, 그리고 Jake 방법이 IMT-2000 위성 부문 RTT 성능 평가를 위한 전파 모델링 기법으로 적절하리라 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] IUT-R Recommendation M.1225, "Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000," 1997.
- [2] W. C. Jakes, Jr., *Microwave Mobile Communications*, IEEE Press, New York, 1993.
- [3] S. O. Rice, "Mathematical analysis of random noise," *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 23, pp. 282-332, 1945.
- [4] M. Pätzold, U. Killat, and F. Laue, "A deterministic models for a shadowed Rayleigh land mobile radio channel," in *Proc. 5<sup>th</sup> IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun*, pp. 1202-1210, 1994.
- [5] P. Höher, "A statistical discrete-time model for the WSSUS multipath channel," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. VT-41, No. 4, pp. 461-468, 1992.