

적응형 전송방식을 사용하는 위성시스템의 성능목표 평가 연구

이혜인*, 김수영°, 오대섭*

Study on the Evaluation of Performance Objectives of Satellite Systems Using Adaptive Transmissions

Hyein Lee*, Sooyoung Kim°, Daesub Oh*

요 약

국제전기통신연합-전파통신부문(International Telecommunication Union - Radiocommunication; ITU-R)에서 개발한 권고서 S.2131에서는 적응형 전송 방식을 이용한 최신 디지털 위성 통신 시스템에서의 성능목표를 제시하고 있다. 권고서 S.2131에서 제시하는 성능목표 중 신호 대 잡음비에 따른 스펙트럼 효율 값은 적응형 전송방식을 사용하는 시스템을 위하여 새로이 도입된 값이다. 권고서에서는 연평균 강우감쇠 예측모델을 이용하여 연평균 스펙트럼 효율 저하도를 계산하는 예제를 제시하고 있다. 연평균 스펙트럼 효율 저하도 값은 권고서 P.618에서 제시하고 있는 연 시간을 5%미만의 강우감쇠 예측모델을 연 시간을 5%이상의 범위에도 적용할 수 있다는 가정 하에 추정된 것이다. 본 논문에서는 이러한 사실을 바탕으로 하여, 강우감쇠 예측 모델에 대한 다양한 가정을 적용하여 계산된 스펙트럼 효율 저하도를 비교, 분석한다. 본 논문에서 제시한 결과들은 권고서 S.2131에서 제시하고 있는 스펙트럼 효율 값을 최신 위성시스템의 성능 목표 정의에 어떻게 사용할지에 대한 직관적 도움을 줄 수 있을 것이며, 또한 위성간의 간섭 분석과 같은 연계권고서 개발에도 도움이 될 수 있을 것이라고 판단된다.

Key Words : satellite communications, ITU-R, Recommendation, standardization, performance objectives, spectral efficiency, rain attenuation

ABSTRACT

Recommendation S.2131, developed by the International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU-R), presents performance objective for the latest digital satellite communication systems using adaptive transmission techniques. One of the performance objectives specified in Recommendation ITU-R S.2131 is spectral efficiency as a function of signal to noise ratio. The Recommendation presents an example of estimating average spectral efficiency degradation by using a rain attenuation prediction model. The average value was estimated by assuming that the rain attenuation prediction model specified in Recommendation ITU-R P.618 is applicable to all time percentage of the year, even though it is defined for 5% or less time percentage of year. In the light of this, this paper presents the estimation results of degraded spectral

* 이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2018-0-01470, 위성 망과 5G 이동통신시스템 간 주파수 간섭분석기술 기반 주파수 자원 확보 및 보호 국제 표준화 연구)

• First Author : Jeonbuk National University, leehyein96@jbnu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Jeonbuk National University, sookim@jbnu.ac.kr, 종신회원

* Electronics and Telecommunication Research Institute, trap@etri.re.kr, 정회원

논문번호 : 202008-209-B-RE, Received August 26, 2020; Revised September 4, 2020; Accepted September 4, 2020

efficiency of the year by using various assumptions of rain attenuation model. The estimation results presented in this paper can provide an insight to utilize the performance objectives specified in Recommendation ITU-R S.2131, and it also can be utilized to develop a new Recommendation on interference analysis between satellite networks.

1. 서 론

국제전기통신연합-전파통신부문(International Telecommunication Union - Radiocommunication; ITU-R)에서는 다양한 무선 시스템에 대한 표준을 권고서(Recommendation) 형태로 개발하고 있다. 2019년도에는 최신 개발 및 서비스되고 있는 디지털 위성 시스템에서 서비스가 안정적으로 제공될 수 있도록 성능목표를 정의하는 권고서 S.2131이 개발된 바 있다^[1]. 이에 따라 선행 연구에서는 신규로 개발된 권고서에서 정의하는 성능목표의 의미와 그 해석, 사용방법 등에 대해 소개하고, 특히 스펙트럼 효율 저하도에 따른 성능목표 계산 예제를 제시한 바 있다^[2,3]. 스펙트럼 효율 저하도에 따른 성능목표 계산 결과는 추후, ITU-R에서 진행되고 있는 다른 권고서 개발에도 활용될 수 있기 때문에 여러 가지 상황 및 요소들을 고려하여 분석할 필요가 있다^[4]. 본 논문에서는 스펙트럼 효율 저하도의 계산에서 고려해야 할 다양한 요소들을 분석하고 그 결과를 제시하고자 한다.

ITU-R에서는 1994년 디지털 위성통신시스템에 대한 안정적인 서비스 제공을 위한 성능목표를 규정하는 권고서 S.1062를 개발하였다^[5]. 권고서 S.1062에서 정의하고 있는 성능목표는 비트오류율에 따른 값으로, 15 GHz 이하의 주파수 대역에서 최대 155 Mbps 이하의 전송률로 서비스되는 디지털 위성 통신 시스템에 대하여 시스템에서 제공되는 전송률에 따라서 다른 값을 정의하고 있기 때문에 기본적으로 고정 비트율(fixed bit rate; FBR) 서비스를 가정하고 있다.

현재는 고주파수 대역을 활용한 고속 서비스 제공을 목표로 하는 시스템이 사용되기 때문에, 강우감쇠의 심각성에 상관없이 오류성능목표를 유지할 수 있도록 적응형 부호 및 변조 기법(adaptive coding and modulation; ACM)을 사용하는 것을 기본 전제로 하고 있다^[6]. ACM 기술은 요구되는 오류성능을 유지하기 위해 전력효율을 제어함으로써 전력효율과 trade-off 관계인 스펙트럼 효율을 변화시킨다. 따라서 ACM을 사용하는 시스템에서는 서비스가 가변 비트율(variable bit rate; VBR)로 제공될 수밖에 없다. 2019년 개발된 권고서 S.2131은 이러한 개념을 기본

바탕으로 한 것으로, 오류성능목표는 ACM을 사용하여 기본적으로 가능한 시간 내에 항상 만족한다는 조건 하에서 스펙트럼 효율 저하도 측면에서 성능목표를 제시할 수 있다는 것이다^[1].

기존 연구에서는 권고서 S.2131에서 제시한 성능목표의 의미와 제정 배경들에 대해 분석하고, 한국에서의 서로 다른 세 가지 위성 주파수 대역에 따른 스펙트럼 효율 저하도 계산 결과를 제시하였으며^[2], 권고서에 제시된 계산 결과를 바탕으로 전력 마진을 활용할 경우 저하도 계산 결과가 어떻게 달라지는지에 대한 연구 결과도 제시된 바 있다^[3]. 권고서 S.2131에 제시된 스펙트럼 효율 저하도 계산 결과 및 기존 연구에서 분석된 계산 결과들은 모두 시간율에 따른 강우감쇠 예측 모델을 사용함으로써 시간율에 따른 스펙트럼 효율저하도 및 기댓값을 계산하는 것이다. 따라서, 권고서 S.2131에서 제시하는 스펙트럼 효율저하도 계산을 위해서는 시간율에 따른 강우감쇠 예측 모델이 필요하다.

ITU-R 권고서 P.618에서는 시간율에 따른 강우감쇠 예측 모델을 제시하고 있으며, 지리적 위치에 따른 측정 결과를 기반으로 한 데이터베이스를 이용하여 주파수 대역별 예측 결과를 계산할 수 있다^[7]. 권고서 S.2131에서 계산한 스펙트럼 효율 저하도는 P.618의 강우감쇠 예측모델을 적용한 결과인 것이다. ITU-R 권고서 P.618에서 제시된 강우감쇠 예측 모델은 강우로 인한 감쇠의 영향이 신호의 전송에 비교적 큰 영향을 미치게 되는 연 시간율 0.001%에서 5%의 범위에 대해 정의하고 있다^[7]. 그러나 권고서 S.2131 및 기존 선행 연구 [2] 및 [3]에서 제시된 결과는 권고서 P.618에서의 강우감쇠 예측 모델이 연 시간율 5%이상의 범위에서도 동일하게 적용될 수 있다는 가정 하에 계산된 결과이다.

본 논문에서는 이와 같이 선행 연구에서 적용된 강정이 스펙트럼 효율 저하도 계산에 어떤 영향을 미치게 되는지에 대하여 다양한 가정을 적용하여 계산 결과를 분석해 보고자 한다. 이는 추후 권고서 S.2131에서 제시한 스펙트럼 효율 저하도 계산 결과를 활용하여 시스템의 성능목표를 정의하고, 안정적인 서비스 제공이 가능하도록 하는데 적용할 수 있도록 하는데

그 목적이 있다. 또한, 간섭 분석과 같은 연계 권고서를 개발할 경우 감쇠 모델을 적용하고 기본 가정을 어떻게 적용하는지에 따라 계산 결과가 어떻게 변화하는지를 분석하여 목표치에 적절한 값을 적용할 수 있을 것이다.

본 서론에 이어 II장에서는 권고서 S.2131에서 제시하고 있는 스펙트럼 효율저하도 계산의 기본 개념에 대해서 기술한다. III장에서는 여러 가지 가정을 적용하고 한국에서의 여러 가지 주파수 대역을 적용한 성능 계산 결과를 제시하고, 그 의미를 분석한다. 마지막으로, IV장에서는 결론을 맺는다.

II. 스펙트럼 효율저하에 따른 위성시스템의 성능목표

ITU-R 권고서 S.2131에서는 ACM을 이용한 디지털 통신시스템에서의 성능파라미터로써 패킷오류율(packet error rate: PER)과 스펙트럼 효율을 제시하고 있다. PER은 S.1062에서 제시하고 있는 오류성능목표와 호환이 가능한 파라미터이다. 반면에 스펙트럼 효율은 가용한 시간동안 ACM을 사용하여 오류성능 목표를 항상 만족시킨다는 가정 하에, 신호 대 잡음비에 따라 스펙트럼 효율을 만족시키도록 하는 것이다.

샤논 바운드에 따라, 주어진 신호 대 잡음비, ρ (dB)로부터 얻을 수 있는 최대 스펙트럼 효율 S (bit/s/Hz)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(\rho) = \log_2(10^{\rho/10} + 1). \quad (1)$$

그림 1에는 식 (1)과 함께 비선형 위성채널에서 DVB-S2X 규격에서 정의된 모든 변조 및 부호 방식(modulation and coding; MODCOD)의 스펙트럼 효율을 S_{S2X} 로 나타내고 있다⁸⁾. 또, 식 (2)는 S_{S2X} 에 대해 최소 평균 자승(least mean squared; LMS)방식으로 피팅 된 다항식으로, S_m 은 권고서 S.2131에서 스펙트럼 효율의 성능목표로써 예제로 사용된 식이다.

$$S_m(\rho) = \begin{cases} 0.5933 + 0.1415\rho + 0.0096\rho^2, & -5 \leq \rho < 0, \\ 0.5933 + 0.1388\rho + 0.003\rho^2, & 0 \leq \rho. \end{cases} \quad (2)$$

권고서 S.2131에서는 시스템에서 운용되는 수신 ρ 에 따라서 위 수식과 같은 스펙트럼 효율을 유지하도록 하는 방법을 성능목표로 사용할 수 있도록 권고하

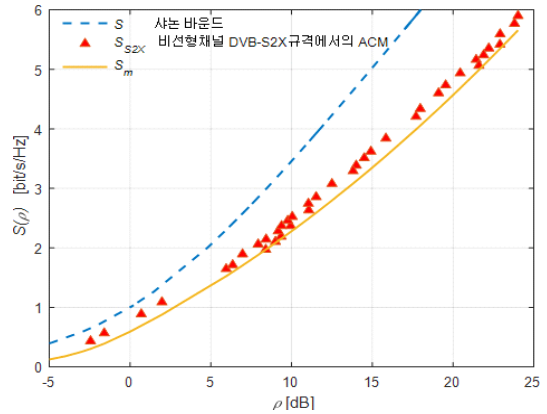


그림 1. 신호 대 잡음비에 따른 여러 가지 스펙트럼 효율 비교
Fig. 1. Various spectral efficiency comparison according to signal to noise ratio

고 있다. 또, 이 경우 연 시간율에 따른 강우감쇠 값 분포에 따라, 전체적으로 평균 스펙트럼 효율 저하도의 시간 평균값을 계산한 예제를 제시하고 있다. 예를 들어, DVB-S2X 규격에 정의된 모든 MODCOD를 활용하여 ACM 방식을 운용한다고 가정하면, 가용 ρ 의 범위는 약 27 dB이다. ACM 방식의 적절한 활용을 위한 방식 간 절체 및 신호 대 잡음비 예측 오류 보상을 위하여 1 dB의 마진을 사용한다고 고려하면, 강우감쇠가 26 dB의 범위 안에 있을 때 시스템이 가용(available)상태이며 강우감쇠가 26 dB보다 크면 비가용(unavailable)상태라고 할 수 있다.

강우감쇠가 전혀 없는 경우, 최고 스펙트럼 효율을 가지는 전송 방식을 사용하게 될 것이므로 스펙트럼 효율의 저하는 강우감쇠의 정도에 따라 달라지게 될 것이다. 강우감쇠는 신호 대 잡음비 ρ 에 의해 일대일 대응되므로, 최대 스펙트럼 효율에 대한 상대적인 스펙트럼 효율의 저하 값 δ 는 ρ 의 함수로 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\delta(\rho) = \frac{S_{\max} - S(\rho)}{S_{\max}}, \quad (3)$$

여기서 $S(\rho)$ 는 성능목표로 활용되는 스펙트럼 효율 계산식이고, S_{\max} 는 시스템에서 사용할 수 있는 최대 스펙트럼 효율 값, 즉 최대 ρ 값에서 얻을 수 있는 $S(\rho)$ 이다. 다음 장에서는 이와 같은 방법론을 이용하여 다양한 경우에 대한 시간율에 따른 δ 의 누적 확률 분포와 기대 값, $E[\delta]$ 를 계산한 예제를 살펴보고 그 의미를 분석해 보기로 한다.

III. 성능목표 평가 결과 분석

3.1 강우 감쇠 예측 모델을 이용한 스펙트럼 효율 저하도 계산

ITU-R 권고서 P.618에서 제시하는 강우감쇠 예측 모델에서는 연 시간율 0.001%- 5%범위에서 각 시간율별 최대 감쇠량의 값을 추정할 수 있는 수식을 제시하고 있다. 이는 강우로 인하여 신호의 전송 경로가 심각한 감쇠를 겪는 시간율이 대부분 연 5%미만이기 때문이라고 판단된다. 그림 2에는 우리나라 무궁화 7호 위성의 상향링크 주파수 대역인 27.0 - 31.0 GHz 범위에 있는 27.5 GHz를 포함하여, Ku 및 Ka 대역 위성 주파수 대역에 포함되는 16.2 GHz 및 38.0 GHz 주파수 대역에 대하여 권고서 P.618 강우 감쇠 예측 모델을 적용하여 추정한 연 시간율에 따른 감쇠 값, 즉 누적확률분포(cumulative probability distribution function; CDF)을 나타낸 것이다. 이상 3가지 모든 주파수 대역에 대하여 연 시간율 5%에서의 감쇠량은 약 3 dB이하로서 전력 제어로도 극복이 가능한 범위의 값이다.

ITU-R 권고서 S.2131에서는 5%초과 시간율에 대해서도 동일한 방법으로 감쇠 값을 예측할 수 있다는 가정 하에 연 시간율에 따른 δ 의 분포와 기댓값, $E[\delta]$ 를 계산한 예시가 제시되어 있다¹¹. 또한 동일한 방법을 적용하여 여러 가지 다른 주파수 대역에서 계산 결과 및 전력 마진을 적용할 경우에 대한 예제들이 선행 연구에 제시되었다^{2,31}. 즉, 5%에서 100%시간율에 대해서도 동일한 감쇠 곡선과 같이 감쇠 특성이 발생한다고 가정하고, 100%시간율 시점의 스펙트럼 효율값 S_{max} 을 사용하여, 시간율에 따른 감쇠량에 따라 저하된 S 값을 사용한다고 가정한 것이다.

본 논문에서는 기존의 연구에서 사용되었던 가정을 여러 가지 방법으로 변환하여 평균 스펙트럼 효율 저하도, $E[\delta]$ 의 값이 어느 정도 달라지는지를 분석해 보기로 한다. 먼저 그림 2의 3가지 주파수 대역에 대한 감쇠 분포도를 이용하고, DVB-S2X 규격에 정의된 모든 MODCOD를 활용하는 ACM 방식을 운용하고, 1 dB의 마진을 둔다고 가정하여, 시스템 운용이 가능한 감쇠의 범위는 약 26 dB로 한다.

그림 2에 나타나 있는 바와 같이 1 dB 마진을 가진 DVB-S2X ACM 방식을 적용하면 총 26 dB까지의 강우감쇠는 보상이 가능하다. 따라서, 16.2 GHz 주파수 대역에서는 0.002%의 시간율 동안 26 dB이상의 강우감쇠가 발생하게 되므로 비가용 상태가 되며,

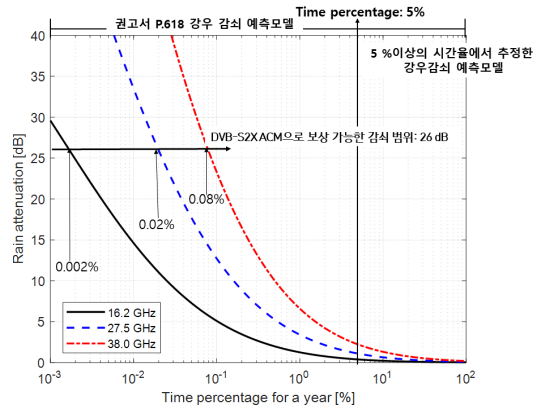


그림 2. ITU-R P.618 예측 모델을 적용한 강우감쇠에 대한 CDF
Fig. 2. CDF for rainfall attenuation using ITU-R P.618 prediction model

27.5 GHz에서는 0.02%, 38.0 GHz에서는 0.08%의 시간율 동안 비가용 상태가 된다. 그림 2의 강우 감쇠 모델을 살펴보면, 고주파수 대역에서 더 큰 강우감쇠가 발생함에 따라 비가용상태의 시간율이 증가함을 확인할 수 있다. 또, 그림 2에서 5%이상의 시간율에 대해서는 5%미만의 시간율에서와 동일한 방법을 적용할 수 있다고 가정하여 감쇠량을 예측하였다.

3.2 5%이상의 시간율에서 다양한 강우 감쇠 예측 값을 적용한 스펙트럼 효율 저하도 계산

이제 그림 2의 강우 감쇠 모델을 이용하고, 그림 2에 표기된 5%이상의 시간율에 대해서 다양한 방법을 적용하여 식 (3)의 스펙트럼 효율 저하도, δ 와 그 평균 값 $E[\delta]$ 를 시간율에 따라 계산해 보고 그 결과를 비교하기로 한다. 아래에서 계산되는 값들은 모두 그림 1에 표기된 DVB-S2X 규격의 ACM을 사용하고 1 dB의 전력마진을 적용하여 최대 26 dB 이하의 강우감쇠를 보상할 수 있다는 가정을 적용하였다. 따라서, 16.2, 27.5, 및 38.0 GHz 주파수 대역에서 각각 99.998, 99.98, 및 99.92%에 해당하는 가용 시간율에 대하여 δ 를 계산한다.

먼저, 첫 번째 방법으로 그림 2에서와 같이 5%이상의 시간대에서도 5%미만의 시간대와 동일한 방법으로 감쇠 값이 예측된다고 가정하여 식 (3)의 스펙트럼 효율 저하도, δ 를 시간율에 따라 계산하여 해당되는 누적 확률 분포 CDF를 그림 3에 나타내었다. 이하 본 논문에서는 이를 방법 A (method A)로 표기한다. 그림 3의 결과를 보면 높은 주파수 대역일수록 스펙트럼 효율 저하가 큰 것을 확인할 수 있으며, 이는 그림

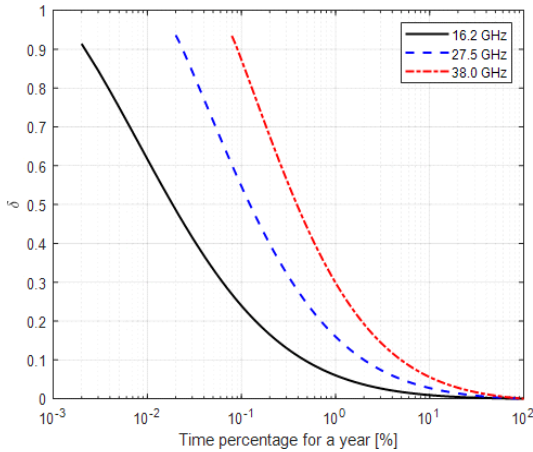


그림 3. 방법 A를 사용한 스펙트럼 효율 저하도 CDF
Fig. 3. CDF of degraded spectrum efficiency using method A

2에서 살펴보았듯이 고주파수 대역일수록 큰 강우감쇠가 발생하기 때문이다.

두 번째 방법으로, 권고서 P.618에서 시간을 5% 이상의 범위에 해당하는 정확한 감쇠량 예측 방법이 제시되지 않았다는 점을 고려하여 5%이상의 시간을 동안 최대의 스펙트럼 효율 유지가 가능하다고 가정한다. 즉, 전력 마진 등을 사용하여, 감쇠를 보상함으로써 인하여 최대의 스펙트럼 효율을 가지는 방식으로 신호가 전송된다고 가정하는 것이다. 따라서, 스펙트럼 효율 측면에서 가장 낙관적인 가정을 하는 것이다. 이하 본 논문에서는 이를 방법 B (method B)라고 한다. 단, 방법 B를 가정할 경우 수 dB의 감쇠가 강설 및 수증기 등의 영향으로 적지 않게 발생할 경우 전력 마진을 사용하여야 하기 때문에 전력적인 비효율성을 초래할 수 있다.

이처럼 가장 낙관적인 방법 B로 시간에 따른 스펙트럼 효율 저하도에 대한 CDF를 나타낸 것이 그림 4에 표기되어 있다. 모든 주파수 대역에 대해 시간을 5%이상에서는 전력을 사용하여 감쇠를 보상하기 때문에 항상 최고의 스펙트럼 효율을 가지는 방식으로 전송이 가능하여 스펙트럼 효율 저하도가 0임을 확인할 수 있다. 즉, 5%이상의 시간에서 스펙트럼 최대 효율, S_{max} 을 유지한다는 의미이다.

세 번째 방법으로, 시간을 5%이상에서 강우감쇠 값이 시간을 5%에서와 동일하게 유지된다는 가장 비관적인 가정을 적용하여 스펙트럼 효율 저하도를 구하고자 한다. 본 논문에서는 이 방법을 방법 C (method C)라고 하며, 이 경우 시간을 5%이상에서 강우감쇠 값이 동일하게 유지된다고 가정하였으므로,

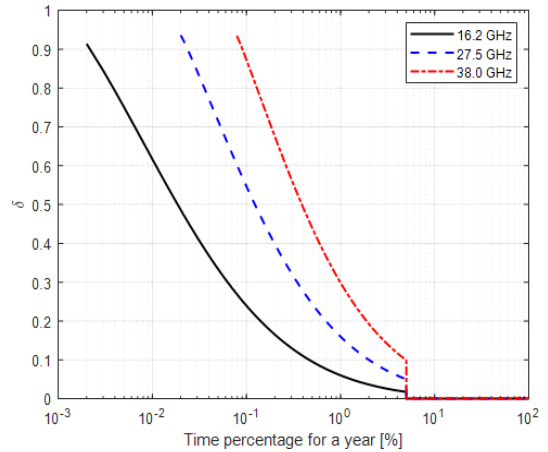


그림 4. 방법 B를 사용한 스펙트럼 효율 저하도 CDF
Fig. 4. CDF of degraded spectrum efficiency using method B

같은 범위에서의 스펙트럼 효율 저하도도 일정하게 유지되는 것을 그림 5에서 확인 할 수 있다. 즉, 방법 A 및 B에 비해서 가장 심각한 스펙트럼 효율저하를 가짐을 의미한다.

실제로 연중 3 dB이상의 보상이 필요한 심각한 강우 감쇠가 발생하는 시간율은 5%미만이기 때문에, 5%미만의 시간율에 대해서 조건부 스펙트럼 효율 저하도 확률 분포를 분석해보고자 한다. 그림 2의 강우 감쇠 CDF를 이용하여 5%미만의 시간에 대한 조건부 CDF를 유도함으로써, 스펙트럼 효율 저하도에 대한 조건부 CDF를 구할 수 있다. 이 구간에서 S_{max} 는 시간을 5%에서의 스펙트럼 효율이고, 이를 바탕으로 계산한 스펙트럼 효율 저하도에 대한 조건부 CDF 그래

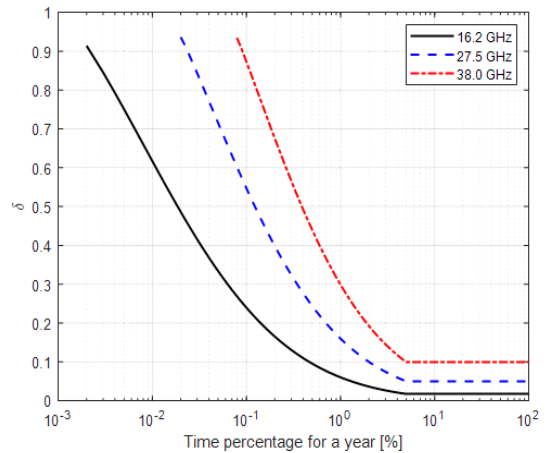


그림 5. 방법 C를 사용한 스펙트럼 효율 저하도 CDF
Fig. 5. CDF of degraded spectrum efficiency using method C

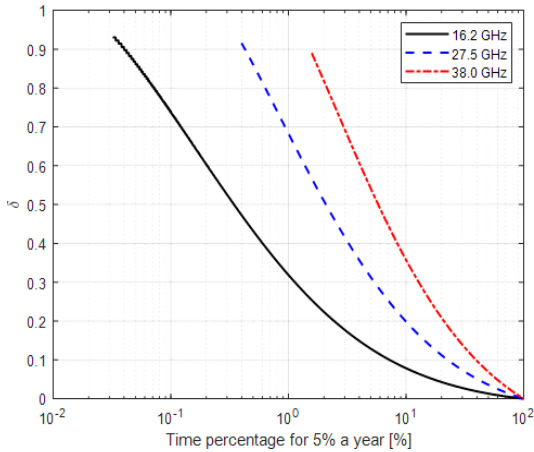


그림 6. 시간율 5%미만에 대한 스펙트럼효율 저하도 조건부 CDF
 Fig. 6. Conditional CDF of spectral efficiency degradation below time percentage of 5%

프는 그림 6과 같다.

그림 6은 상기의 방법 A, B, C와는 별도로, 강우감쇠가 심각하게 발생하는 연 시간율 5%미만에 대한 시간율에 대해서만 저하도 분포를 계산하여 조건부 스펙트럼 저하도 분포를 나타낸 그래프이다. 따라서 그림 3의 확률분포와 비교했을 때, 5%미만의 시간율 범위에서 차지하는 비가용 시간율의 범위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또, 감쇠량이 급격하게 증가하는 5%미만의 시간율 범위에서는 전력효율을 유지하기 위한 방식전환으로 인한 스펙트럼 효율의 저하도 더 급격하게 발생하기 때문에 저하도 분포 그래프의 기울기도 더 급격하게 변화하는 것을 확인할 수 있다.

이제 상기에서 살펴본 다양한 방법을 이용한 스펙트럼 효율 저하 확률분포를 이용하여 계산한 평균 스펙트럼 효율 저하도를 표 1과 같이 정리하여 나타내었다. 또, 5%미만의 시간율에 대한 스펙트럼효율저하도가 전체 시간율에 대한 저하도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 각 방식별 계산된 평균 값에 대한 비율도 함께 나타내었다. 표 1의 결과를 살펴보면 5%이상의 시간율에서 P.618에서 제시한 것과 동일한 강우감쇠 예측 값을 적용한 방법 A의 경우, 스펙트럼 효율저하 측면에서 가장 낙관적으로 설정한 방법 B의 경우보다 $E[\delta]$ 값이 약 2배정도 높은 것을 확인할 수 있다.

위 결과는 다음과 같이 해석될 수 있다. 5%미만의 시간율에서만 강우감쇠가 있다고 가정한 방법 B의 평균 스펙트럼 효율 저하도가 방법 A의 평균 스펙트럼 효율 저하의 약 0.5배 이므로, 스펙트럼 효율 저하의 약 50%가 5%미만의 시간율에서 발생한다는 것이다.

표 1. 여러가지 방법으로 계산된 연 평균 스펙트럼 효율 저하도, $E[\delta]$
 Table 1. Expected value of spectral efficiency degradation using various methods

Frequency band	16.2 GHz	27.5 GHz	38.0 GHz
Estimation method			
방법 A를 이용한 $E[\delta]$ ($E_A[\delta]$)	0.48%	1.32%	2.54%
방법 B를 이용한 $E[\delta]$ ($E_B[\delta]$)	0.25%	0.64%	1.16%
방법 C를 이용한 $E[\delta]$ ($E_C[\delta]$)	1.93%	5.40%	10.60%
5%미만의 시간율에 대한 조건부 값 $E[\delta]$ less than 5%	3.33%	8.04%	13.89%
$E_A[\delta]/E_B[\delta]$	1.9	2.1	2.2
$E_C[\delta]/E_A[\delta]$	4.0	4.1	4.2
$E[\delta]$ less than 5%/ $E_A[\delta]$	6.9	6.1	5.5

따라서, 5%미만의 시간율에 대한 분석이 ACM 방식을 사용하는 시스템에서 가장 중요하다. 그러나, 주파수 대역별 그 비율은 차이가 있고, 주파수가 높을수록 비율 값이 크다는 것을 알 수 있다. 방법 B의 경우 5% 이상 시간율에서 스펙트럼 효율저하가 전혀 없다고 가정했기 때문에, 이 결과는 주파수 대역이 높을수록 5% 이상의 시간율에 대한 저하도 값의 기여가 크다고 볼 수 있다.

또 다른 의미로 해석하면, 주파수 대역이 높을수록 가용도는 줄어들기 때문에 5%미만의 시간율에서 ACM이 동작하는 시간율은 줄어들고, 5%이상의 시간율에서 저 주파수 대역에서 동작하는 시스템보다 더 급격한 감쇠가 발생하기 때문이다. 비록 50%이상의 스펙트럼 효율 저하가 5%미만의 시간율에서 발생하지만, 주파수 대역이 높을수록 5%이상의 시간율에 대한 분석의 중요도가 더 커진다는 것을 유의할 필요가 있다. 반면에, 스펙트럼 효율 저하 정도를 가장 비판적으로 예측한 방법 C의 경우와 비교하면, 방법 A의 평균 값에 비해 약 4배가 된다는 것을 알 수 있다. 이 경우 역시 주파수 대역이 커질수록 그 값이 증가하여, 5%이상 시간율에 대한 스펙트럼 효율 저하도가 평균 값에 미치는 영향이 커진다는 것을 알 수 있다.

또한, 각각의 주파수 대역에 대한 조건부 평균값, $E[\delta]$ less than 5%은 5%이상의 시간율에서 가장 비판적으로 강우감쇠를 예측한 방법 C의 $E[\delta]$ 보다도 큰 평균 스펙트럼 저하도를 가짐을 확인할 수 있다. 이는 5%이상의 시간율에서의 강우감쇠보다 5%미만의 시

간율에서의 강우감쇠가 스펙트럼 효율저하에 더 큰 영향일 기친다는 것을 의미한다. 위에서 분석한 바와 같이 5%미만의 시간율에서 약 50%의 스펙트럼 효율 저하가 발생한다는 것과 일치하는 결과이다. 각각의 주파수 대역에서 $E[\delta] \leq 5\%$ 는 방법 A의 $E[\delta]$ 의 약 6.9배, 6.1배, 및 5.5배로, 주파수 대역이 높아질 수록 5%미만의 강우감쇠 예측이 평균 스펙트럼 효율 저하도에 끼치는 영향은 줄어들을 알 수 있고 이 역시 위에서 분석한 내용과 일치한다.

이제까지의 분석내용을 정리하면, 5%미만의 시간 율에서의 강우감쇠가 스펙트럼 효율 저하에 가장 큰 영향을 끼치는 것은 사실이지만 주파수 대역이 높아 질수록 그 영향력이 줄어든다. 즉, 고주파수 대역으로 갈수록 5%이상의 시간율에서 더 큰 강우감쇠가 발생 하고, 5%미만 시간율에서의 가용도는 줄어들기 때문 에, 5%이상의 시간율에서 어떤 방식으로 강우감쇠를 예측하는지가 스펙트럼 효율 저하도 계산에 큰 영향 을 미칠 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 2019년 신규로 개발된 ITU-R 권고 서 S.2131에서 제시하고 있는 성능목표에 대한 다양 한 계산 및 분석 결과를 제시하였다. 기존 ITU-R 권 고서에서 제시하고 있는 강우감쇠 예측 모델을 확장 하여 낙관적, 비관적 상황을 가정하고 다양한 시간율 에 적용하고 분석한 결과를 제시하였다. 또한, 국내에 서 사용하는 세 개의 주요 주파수 대역의 스펙트럼 효 율 저하도에 대한 확률 분포함수를 제시하고, 강우 감 쇠에 대한 적극적인 적응적 보상이 필요한 5%미만의 시간율의 조건부 평균값을 제시하였다. 본 논문에서는 다양한 가정을 이용하여 그 결과를 분석하고, 구체적 인 예제를 제시함으로써, ITU-R에서 현재 개발 중인 고주파수 대역에서 비정지궤도 위성망이 정지궤도 위 성망으로 주는 간섭 허용치를 규정하는 권고서 개발 등 ACM을 이용하는 위성 시스템에 대한 다양한 성능 평가에 도움이 될 수 있을 것으로 예상된다. 특히 5% 미만의 시간율에서의 조건부 스펙트럼 효율 저하도는 향후 관련 권고서를 개발함에 있어 중요하게 고려되 어야 할 것으로 판단된다.

References

[1] Recommendation ITU-R S.2131 - *A method for the determination of performance*

objectives for satellite hypothetical reference digital paths using adaptive coding and modulation, Sep. 2019

[2] D. Oh, J. Park, and S. Kim, "Analysis on the standardization for performance objectives of digital satellite communication systems", *J. KICS*, vol. 44, no. 12, pp. 2209-2215, Dec. 2019.

[3] S. Kim, D. Oh, and J. Park, "Standardization on performance objectives of satellite systems using adaptive coding and modulation," *Int. J. Sat. Commun. Net.*, vol. 38, no. 2, pp. 200-208, Mar. 2020.

[4] Annex 1 to Document 4A/912, Annex 1 to Working Party 4A Chairman's Report, *Preliminary Draft New Recommendation ITU-R S.[50/40 GHz FSS Sharing methodology]* - Maximum permissible levels of interference in a satellite network in the fixed satellite service (GSO) in the broadcasting-satellite service (GSO) caused by other co-directional non-GSO FSS systems operating in the 50/40 GHz frequency bands, 11 Jul. 2019.

[5] Recommendation ITU-R S.1062-4. *Allowable error performance for a satellite hypothetical reference digital path operating below 15 GHz. Recommendation ITU-R S.1062-4*, 2007.

[6] S. Chan and S. Kim, "Efficient application of rateless codes for satellite communication systems," *J. KICS*, vol. 44, no. 3, pp. 484-489, Mar. 2019.

[7] Recommendation ITU-R P.618-13, *Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems*, Recommendation ITU-R P.618-12. 2017.

[8] DVB Document A83-2, *Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation Framing Structure, Channel Coding and Modulation Systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other Broadband Satellite Applications, Part II: S2-Extensions (DVB-S2X) - (Optional)*, Mar. 2014.

이 혜 인 (Hyein Lee)



2020년 2월 : 전북대학교 전자
공학과 졸업
2020년 3월~현재 : 전북대학교
전자공학과 석사 과정
<관심분야> 전자공학, 통신공
학, 이동/위성통신

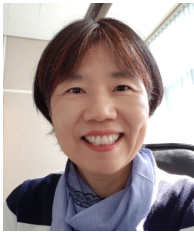
오 대 섭 (Daesub Oh)



1996년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 학사
1998년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 석사
2014년 2월 : 전북대학교 전자
공학과 박사
2000년 7월 : LG정보통신 주임
연구원

2000년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원
<관심분야> 전파통신, 위성통신

김 수 영 (Sooyoung Kim)



1990년 2월 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 학사
1990년 2월~1991년 9월 : ETRI
연구원
1992년 10월 : Univ. of Surrey,
U.K 공학석사
1995년 2월 : Univ. of Surrey,
U.K 공학박사

1994년 11월~1996년 6월 : Research Fellow, Univ. of
Surrey, U.K

1996년 8월~2004년 2월 : ETRI 광대역무선전송연구
팀장

2004년 3월~현재 : 전북대학교 전자공학부 교수
<관심분야> 오류정정부호화방식, coded MMO, 이동/
위성통신

[ORCID:0000-0003-0817-2790]