

강우 감쇠에 따른 Ku 대역 위성 비콘 수신기 C/N 변화 해석

Analysis of C/N Variation of Ku Band Satellite Beacon Receiver According to Rain Attenuation

박대길¹ · 이경순^{1,2} · 구경현¹

¹인천대학교 전자공학과

²에이엔피테크놀로지

Dae-Kil Park¹ · Kyung-Soon Lee^{1,2} · Kyung Heon Koo¹

¹Department of Electronics Engineering, Incheon National University, Incheon, 22012, Korea

²A&P Technology, 19-2, Jorimi-ro, Gimpo-si, Gyeonggi-do, 10110, Korea

[요 약]

본 논문은 정지궤도위성인 KorSat 5A(113°E)에서 송신하는 비콘 신호를 김포에 위치한 지상국에서 수신할 때의 C/N (carrier to noise ratio)을 예측하고 측정하였다. 지상국을 기준으로, ITU-R의 zone K 강우 감쇠와 국내 기상정보를 분석한 강우 감쇠를 비교하였다. ITU-R에서는 우리나라 강우 특성을 zone K로 일괄 분류하였으나, 2013년부터 2017년까지의 분당 누적 강우 데이터를 바탕으로 지상국 인접 3개 도시의 강우 강도 및 감쇠를 예측하였다. 강우 경로와 감쇠 대한 계산은 ITU-R 권고를 참고하였다. 2주 간의 위성비콘 신호 C/N 측정을 통해 강우량에 따른 C/N의 변화를 확인하였으며, $A_{0.3}$ 일 때 예측된 임계 C/N은 12 dB, 실험기간 동안 집중된 강우에 따라 최대 8 dB까지 감소하는 것을 확인하였다.

[Abstract]

This paper predicts and measures the C/N ratio of a beacon signal transmitted from geostationary orbit satellite KorSat 5A (113°E) at a ground station located in Kimpo. Based on the ground stations, we compared the rain attenuation of the zone K of ITU-R and the rain attenuation which analyzed the domestic weather information. In ITU-R, the Korean rainfall characteristics are classified into zone K, but forecasting the rainfall intensity and attenuation of three adjacent cities based on the cumulative rainfall data per minute from 2013 to 2017. The calculation of rainfall path and attenuation is based on ITU-R recommendations. The change of the C/N according to the rainfall amount was confirmed through the 2 week satellite beacon signal C/N measurement. The predicted critical C/N was decreased to 12 dB at $A_{0.3}$. During the experiment, it was confirmed that it decreased up to 8 dB according to the concentrated rainfall.

Key word : Satellite beacon, Rain attenuation, Link budget, G/T, C/N ratio.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.5.415>



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 16 August 2018; Revised 1 October 2018

Accepted (Publication) 23 October 2018 (30 October 2018)

*Corresponding Author : Kyung Heon Koo

Tel: +82-32-835-8446

E-mail: khkoo@inu.ac.kr

I. 서론

위성통신 시스템에서는 음성, 영상, 데이터 등 지상 송신 신호를 위성을 중계국으로 활용하여 지상 수신국으로 전달한다. 지상 수신국은 고정용 또는 이동용으로 구분할 수 있으며, 이동용 기지국에서는 기지국 안테나의 방위각과 양각을 위성을 향하여 실시간 추적하여야 한다[1].

양각에 따라 감쇠 요소가 상이하게 발생하여 수신시스템의 G/T(gain to noise temperature)가 변화한다. G/T는 위성통신 시스템 성능을 판단하는 중요 변수로 시스템의 목적과 특성에 적합한 G/T 설정을 위해 시스템 잡음온도를 포함한 제반 요인에 따른 감쇠 분석이 필요하다[2].

본 논문에서는 세계를 몇 개 권역으로 나눈 ITU-R 권고에 따른 강우감쇠 및 국내 측정 지역별 강우량에 따른 강우감쇠를 비교하였다. 사용 안테나를 바탕으로 시스템 G/T와 강우감쇠를 포함한 C/N_0 를 얻고 목표 위성의 비콘 C/N을 예측하였다. 위성은 지구정지궤도의 KorSat 5A(113°E), 수신 지역은 김포로 C/N의 2주간 측정을 통해 강우와 C/N의 관계 및 변화를 확인하였다.

II. 위성 통신 링크 계산 및 강우 감쇠

그림 1에 위성통신 시 신호 감쇠 요인들을 나타내었다. 위성 수신시스템의 G/T는 특성을 나타내는 주요 지표이며, 수신 안테나의 이득, 경로손실, 비지향 손실, 안테나와 수신기 간 급전선 손실, 편파 손실과 같은 기계적, 물리적 손실 외에 우주 잡음, 대기 잡음과 같은 환경적 손실을 포함한다[3].

그림 2에 위성통신에서 고려되는 강우 감쇠 경로를 나타내었다. 강우 감쇠는 10 GHz 이상의 전파에 크게 발생하는 손실로 사용 주파수, 위·경도, 강수량에 따라 변하며, 연간 평균 강우강도 $x\%$ 경우의 강우감쇠 $A_{x\%}$ 는 식 (1)과 같다[4].

$$A_{x\%} = \gamma_R L_E \tag{1}$$

식 (1)의 γ_R 은 해당 지역 연간 평균 $x\%$ 에 해당하는 강우감쇠 계수이다. L_E 는 실효 강우 경사경로 길이로 강우고도 h_R

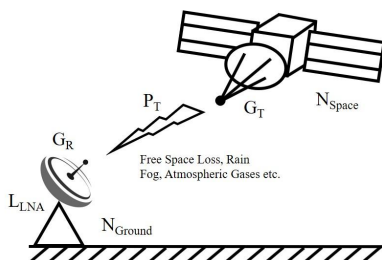


그림 1. 위성통신 시스템 구성 및 발생 손실 경로도
Fig. 1. Satellite communication system configuration and loss path diagram.

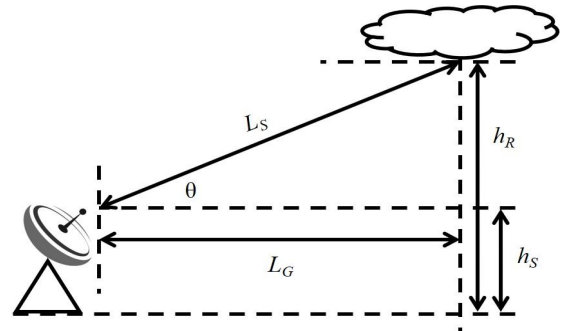


그림 2. 강우 감쇠 계산을 위한 변수를 포함한 지상-우주 경로도
Fig. 2. Schematic of an earth-space path giving the parameters for rain attenuation.

까지 경사경로 길이 L_S 및 수직조정계수 $v_{x\%}$ 로 유도된다.

연간 평균 $x\%$ 가 5를 초과할 경우, $x\%=0.01$ 를 기준으로 식 (2)와 (3)에 의해 계산할 수 있다.

$$A_{x\%} = A_{0.01} \left(\frac{x}{0.01} \right)^{- (0.655 + 0.033 \ln(x) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-x) \sin \theta)} \tag{2}$$

if $x > 5\%$

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{if } x \geq 1\% \text{ or } |\varphi| \geq 36^\circ \\ -0.005(|\varphi| - 36) & \text{if } x < 1\% \text{ and } |\varphi| < 36^\circ \text{ and } \theta \geq 25^\circ \\ -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta & \text{else} \end{cases} \tag{3}$$

식 (3)에서 φ 는 지구국의 위도이다.

경사경로길이 L_S 와 수평투영길이 L_G 는 식 (4)와 (5)에 의해 계산할 수 있다. 경사 경로길이 L_S 는 양각 θ 가 5° 일 때를 기준으로 각각 다른 식을 사용한다[4],[5].

$$L_S = \begin{cases} \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} & \text{for } \theta \geq 5^\circ \\ \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e}} + \sin \theta & \text{for } \theta < 5^\circ \end{cases} \tag{4}$$

$$L_G = L_S \cos \theta \tag{5}$$

$$h_R = h_0 + 0.36 \tag{6}$$

식 (4)에서 R_e 는 유효 지구 반지름이다.

비와 얼음의 천이 상태인 해발 상층 대기 고도인 연평균 등운 선고도 h_0 는 안테나가 위치한 위도 ζ 에 따라 근사치를 구할 수 있다[6].

$$h_0 = \begin{cases} 5 - 0.075(\zeta - 23) & \text{for } \zeta > 23^\circ N \\ 5 & \text{for } 0 \leq \zeta \leq 23^\circ N \\ 5 & \text{for } 0 \geq \zeta \geq -21^\circ S \\ 5 + 0.1(\zeta - 21) & \text{for } -71 \leq \zeta < -21^\circ S \\ 0 & \text{for } \zeta < -71^\circ S \end{cases} \tag{7}$$

표 1. 경사경로길이 \$L_S\$ 및 수평투영길이 \$L_G\$ 계산

Table 1. Calculation of \$L_S\$ and \$L_G\$.

Slant path length \$L_S\$ [km]	Horizontal projection length \$L_G\$ [km]
6.06	4.34

실험을 위한 지상국 위치는 경기도 김포(위도 37.5°N, 경도 126.7°E)이며, \$h_0\$는 3.91 km, \$h_R\$은 4.27 km로 계산되었다. 안테나 높이 \$h_S=0.05\$ km일 때 KorSat 5A(113°E)를 바라보는 양각은 삼각법에 의해 구할 수 있으며, 양각 \$\theta=44.2^\circ\$에 의한 경사경로길이 \$L_S\$ 및 수평투영길이 \$L_G\$는 표 1과 같다.

강우 감쇠계수 \$\gamma_R\$은 해당 지역 연간 평균 \$x\%\$에 해당하는 연중 평균 시간 강우량 \$R_{(x\%)}\$와 주파수에 의한 보정상수 \$k\$와 \$\alpha\$에 의해 결정된다. 보정상수 \$k\$와 \$\alpha\$는 편파와 양각에 의해 결정된다. KorSat 5A의 위성비콘 신호는 12.7 GHz에 수직편파로 알려져 있으며 ITU-R P.838-4에서는 주파수에 따른 수직 및 수평 편파에 따른 상수 테이블을 참고하여 계산할 수 있다 [6, 7].

$$\gamma_R = k(R_{x\%})^\alpha \tag{8}$$

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta \cos 2\tau] / 2 \tag{9}$$

$$\alpha = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta \cos 2\tau] / 2k \tag{10}$$

식 (9)과 (10)에서 \$\tau\$는 편파각을 나타낸다. 참고 문헌 [5]에서 12 GHz에 대한 \$k_H=0.02386\$, \$k_V=0.02455\$, \$\alpha_H=1.1825\$, \$\alpha_V=1.1216\$를 적용하였으며 \$k\$는 0.02438, \$\alpha\$는 1.13608를 얻었다.

지상국 위치에 따른 연중 평균 \$x\%\$에 해당하는 강우량 \$R_{(x\%)}\$는 ITU-R에서 제공하고 있다. 우리나라는 zone K로 해당 수평 감쇠계수 \$r_{x\%}\$ 및 \$R_{(x\%)}\$는 다음과 같다.

$$r_{x\%} = \frac{1}{1 + 0.78\sqrt{\frac{L_G \cdot \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{2L_G})} \tag{11}$$

$$R_{(x\%)} = 4.17x\%^{-0.418} + 1.6[\log(\frac{x\%}{0.001})\log^3(\frac{0.3}{x\%})] \tag{12}$$

식 (11)에서 \$f\$는 주파수이며 단위는 GHz 이다.

위의 계산에서 얻은 결과를 통해 실효 강우 경사경로 길이 \$L_E\$는 수직조정계수 \$v_{x\%}\$를 구하여 식 (13)에서 (16)까지의 과정을 통해 구할 수 있으며 9.94 km로 계산되었다[4].

표 2. ITU-R 연평균 강우량 \$R_{(x\%)}\$ 계산 결과

Table 2. Results of rainfall for average year \$R_{(x\%)}\$ for ITU-R.

Region	\$R_{(x\%=0.5)}\$ [mm/h]	\$R_{(x\%=0.3)}\$ [mm/h]	\$R_{(x\%=0.1)}\$ [mm/h]	\$R_{(x\%=0.01)}\$ [mm/h]
zone K	0.95	6.9	18.29	39.99

표 3. ITU-R 강우 감쇠 계산 결과

Table 3. Results of rain attenuation for ITU-R.

Region	\$A_{0.5}\$ [dB]	\$A_{0.3}\$ [dB]	\$A_{0.1}\$ [dB]	\$A_{0.01}\$ [dB]
zone K (Kimpo, 37.5°N)	0.23	1.80	4.61	9.28

표 4. 3개 도시 연평균 강우량 \$R_{(x\%)}\$ 계산 결과

Table 4. Results of rainfall for average year \$R_{(x\%)}\$ in 3 cities.

Region	\$R_{(x\%=0.5)}\$ [mm/h]	\$R_{(x\%=0.3)}\$ [mm/h]	\$R_{(x\%=0.1)}\$ [mm/h]	\$R_{(x\%=0.01)}\$ [mm/h]
Seoul, 37.5°N	0	24	30	60
Incheon, 37.4°N	6	7.2	18	58.8
Kanghwa, 37.7°N	0	12	30	66

표 5. 3개 도시 강우 감쇠 계산 결과

Table 5. Results of rain attenuation in 3 cities.

Region	\$A_{0.5}\$ [dB]	\$A_{0.3}\$ [dB]	\$A_{0.1}\$ [dB]	\$A_{0.01}\$ [dB]
Seoul, 37.5°N	0	5.1	5.99	9.51
Incheon, 37.4°N	1.66	1.94	4.11	9.39
Kanghwa, 37.7°N	0	2.98	5.98	10.08

$$\zeta = \tan^{-1}(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{x\%}}) \tag{13}$$

$$L_R = \begin{cases} \frac{L_G r_{x\%}}{\cos\theta} & \text{for } \zeta > \theta \\ \frac{h_R - h_S}{\sin\theta} & \text{for } \zeta \leq \theta \end{cases} \tag{14}$$

$$\chi = \begin{cases} 36 - |\varphi| & \text{for } |\varphi| < 36^\circ \\ 0 & \text{for } |\varphi| \geq 36^\circ \end{cases} \tag{15}$$

$$v_{x\%} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin\theta} (31(1 - e^{-(\theta/(1+\chi))}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45)} \tag{16}$$

$$L_E = L_R \cdot v_{x\%} \tag{17}$$

표 2는 ITU-R에서 제시한 계산을 통해 얻은 연평균 강우량이며, 표 3은 앞서 구한 연평균 강우량 및 실효 강우 경사경로 길이를 통해 얻은 강우 감쇠 계산 결과이다.

표 4는 링크 계산을 통해 시스템 설계 과정에서 차이를 비교하기 위해 김포와 인접하여 기상센터가 위치한 서울, 인천, 강화의 연평균 강우량을 계산한 결과이다. ITU-R은 기상 특징과 더불어 지리적 구분을 통해 강우 환경을 통합 분석한 경우로 특정 지역 강우 감쇠 특성은 반영되지 않는다. 따라서 지역별로 \$x\%\$가 0.5, 0.3, 0.1, 0.01 일 때의 강우 감쇠를 계산하였다. 계산에 필요한 강우량 데이터는 대한민국 기상자료개방포털에서 제공하는 2013년부터 2017년까지의 1분당 누적 강우량을 시간으로 환산하여 평균값을 계산하였다[8]. 표 5는 이를 통해 강우 감쇠를 계산한 결과이다.

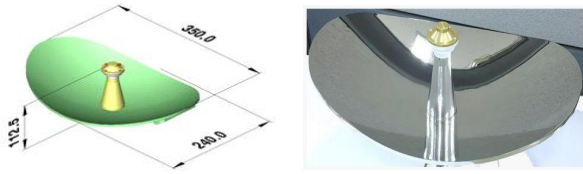


그림 3. 지상 수신국 안테나 구조
Fig. 3. Ground station antenna structure.

III. 비콘 C/N 예측 및 실험 결과 비교

그림 3는 실험에 사용된 안테나의 구조이며 상하를 절단한 카세그레인 안테나로 설계하였다. 안테나의 구성은 전면적 350*240 mm²의 타원형 주반사판, 원형 부 반사판, 내경 19mm의 원형 도파관으로 되어 후면에 LNA가 장착되는 구조이다. 3차원 전자계 시뮬레이션 툴인 CST를 이용하여 설계하였으며, 제작한 안테나는 12.75 GHz에서 28.1 dBi의 특성을 가졌다[9].

정지위성에서 송출된 신호는 안테나 포인팅 오차에 의한 손실, 자유 경로와 강우에 의한 손실이 크다. 일반적으로 수신기의 수신 전력은 Friis 자유공간 전력전달 공식으로 표현할 수 있다[10].

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2} = EIRP \times G_R \times \frac{1}{FSL} \quad (18)$$

$$= 10[\log(EIRP) + \log(G_R) - \log(FSL)]$$

식 (18)에서 EIRP는 위성에서 송출되는 전력이며, FSL은 자유 경로 손실을 말한다. C/N₀를 유도하면 다음과 같다.

$$C/N_0 = EIRP \times \left(\frac{G_R}{FSL \times kT} \right) = \frac{G_R}{T} \frac{EIRP}{FSL \times k} \quad (19)$$

식 (19)에서 k는 볼츠만 상수, T는 LNA를 포함한 등가 잡음 온도이다. 이를 강우 감쇠를 포함한 dB 단위로 정리하면 다음과 같다.

$$C/N_0 = 10[\log(EIRP) + \log\left(\frac{G_R}{T}\right) - \log(FSL) - \log(A_R)] + 228.6 \quad (20)$$

안테나와 LNA를 포함한 등가 잡음온도를 통해 G/T를 예측하고 KorSat 5A의 사용 주파수 및 EIRP 제원을 통해 식 (20)과 같이 C/N₀을 계산하였다. 안테나의 G/T는 7.4 dBK⁻¹, 비콘의 EIRP는 15 dBW, 주파수에 따른 FSL은 205.99 dB, ITU-R에 따라 우리나라의 A_{0.3%}은 1.88 dB로 계산 되어 C/N₀은 43.2 dBHz로 예측 되었다. 김포와 지리적으로 가까운 인천의 강우

강도를 참고하여 계산한 C/N₀은 43.07 dBHz로 예측되었다.

수신 비콘 신호를 증폭 및 주파수 변화하고 이를 검출하기 위한 협대역의 선형 위상 필터를 Direct-Form FIR 구조에 500 탭으로 1.2 kHz 대역폭과 저지대역 50 dB를 갖도록 변수를 설정하여 Xilinx XC7A200T FPGA에 이식하여 설계하였다. 추정 한 C/N₀과 필터의 대역폭을 통해 식 (21)과 같이 임계 C/N을 구할 수 있으며 계산 결과 약 12.3 dB로 추정하였다.

$$C/N = C/N_0 - 10\log(BW) \quad (21)$$

그림 3과 표 6은 2018년 2월 26일부터 3월 12일까지 2주 동안 경기도 김포시 사우동(126.723°E, 37.615°N)에 설치한 수신 안테나 시스템을 통해 1분 간격으로 비콘 수신기에서 검출된 신호전력과 C/N 기록, 해당 기간 동안 기상자료 개방 포털에서 제공하는 시간당 강우량을 나타낸 결과이다. 실험 기간 중 강우가 발생한 일수가 7일 있었으며 김포/강화 시간당 강우량과 김포시 사우동의 강우량을 확인하였다. 김포/강화지역의 2013년부터 2017년까지 연평균 강우량은 887 mm로 2주간 강우량으로 환산하면 34 mm가 된다[8]. 실험기간 동안 내린 강우량은 51.5 mm로 예측한 강우량에 비해 가혹한 환경으로 보였다. 수신 안테나 시스템은 실험기간 동안 평균적으로 15 dB의 높은 C/N을 유지하였으며 강우량의 변화에 따라 신호 전력은 7 dBm, C/N은 8 dB 이상 차이를 보였다.

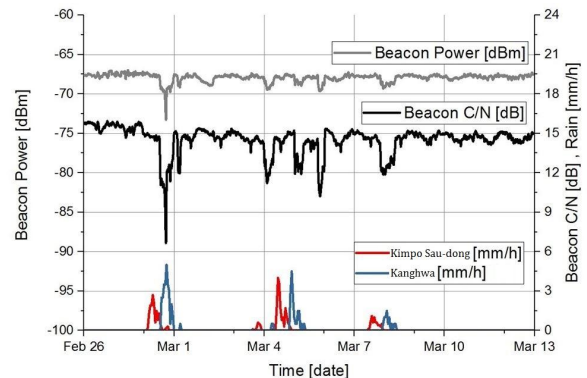


그림 4. 강우 환경을 포함한 비콘 C/N 측정 결과
Fig. 4. Measurement result of beacon C/N in rain weather condition

표 6. 김포/강화 기상청 자료에 따른 C/N 변화
Table 6. C/N change according to the weather data in Gimpo and Ganghwa.

		Feb 28	Mar 1	Mar 3	Mar 4	Mar 5	Mar 7	Mar 8
Max/Min Rainfall [mm/h]	Kimpo /Kanghwa	5 / 0.5	0.5 / 0	-	4.5 / 0.5	1.5 / 0.5	0.5 / 0	1 / 0.5
	Kimpo /Sau-dong	2.7 / 0.1	-	0.6 / 0.1	3.6 / 0.1	-	1.1 / 0.1	-
Max/Min C/N [dB]		15.01 / 6.66	15.39 / 12.00	15.11 / 14.23	15.19 / 11.22	14.45 / 10.21	15.13 / 12.10	15.19 / 11.88

