



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 50(9), 657-662(2022)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.9.657>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

원격자료수신장비 소형반사판 안테나 G/T 예측 및 측정

김춘원¹, 안나균², 김동현³, 조병록⁴

The calculation and Measurement Methods for G/T of the Telemetry Small Aperture Antenna

Chun-Won Kim¹, Na-Gyun An², Dong-Hyun Kim³ and Byung-Lok Cho⁴

Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Republic of Korea¹⁻³

Sunchon National University, Suncheon, Republic of Korea^{1,4}

ABSTRACT

In this paper, the calculation using simulation and two measurement methods for G/T of the telemetry are analyzed. Antenna gain and noise temperature are calculated by using ICARA and Antenna Noise Temperature Calculator. System G/T were calculated by using Antenna gain/noise temperature, LNA gain/noise temperature, cable loss. The first G/T measurement method is Y-factor measurement method, which is to calculate G/T by comparing LNA noise temperature and a signal level difference when an antenna and a 50ohm termination are respectively connected to an LNA input terminal. Second method is Solar calibration measurement method that is to calculate G/T by comparing noise level difference when looking at the sun and lowest level point. Finally, the accuracy was reviewed by comparing the G/T calculation results with the two measurement methods, and the optimal measurement method according to antenna performance and operating environment was presented.

초 록

본 논문에서는 나로우주센터에서 운용 중인 원격자료수신장비의 G/T에 대한 시뮬레이션 활용 계산 결과와 측정 방법 2개에 대하여 분석하였다. 안테나 이득과 잡음 온도는 ICARA와 Antenna Noise Temperature Calculator를 이용하여 계산하였다. 시스템 G/T는 안테나 이득/잡음온도와 LNA 이득/잡음온도, 케이블 손실을 반영하여 산출하였다. 첫 번째 G/T 측정 방법은 Y팩터 측정법으로 LNA 입력단에 안테나와 50ohm 터미네이션을 각각 연결했을 때의 신호 레벨 차이값을 LNA 열잡음 온도와 비교하여 G/T를 산출하는 방법이다. 두 번째 방법은 태양과 최저 레벨 지점을 바라보았을 때의 잡음 레벨 값 차이를 비교하여 G/T를 구하는 Solar Calibration 측정법이다. 마지막으로 G/T 계산결과와 두 측정법 비교를 통해 정확성을 검토하고 이로부터 안테나 성능, 운용환경에 따른 최적 측정법을 제시하였다.

Key Words : Receiver G/T(수신기 G/T), Antenna Noise Temperature(안테나 잡음온도), Y Factor Method(Y팩터 방법), Solar Calibration Method(태양 보정 방법)

1. 서 론

대부분의 RF시스템에서 통신 품질을 평가할 때 송수신

전력레벨과 잡음레벨을 중요한 변수로 채택한다. 송신기의 전력증폭기에서 신호가 송신되어 수신기로 입력될 때 신호 레벨이 너무 높으면 포화가 걸리고, 잡음레벨 수준

† Received : April 7, 2022 Revised : June 16, 2022 Accepted : June 20, 2022

¹ Senior Researcher, ² Engineer, ³ Principal Researcher, ⁴ Professor

¹ Corresponding author, E-mail : chunwon@kari.re.kr, ORCID 0000-0001-6746-836X

© 2022 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

의 낮은 신호는 잡음과 구별하기 어렵기 때문이다. 이러한 성능 지표는 아날로그 및 디지털 통신 모두를 표현할 수 있는 반송파 전력대잡음전력(C/N, Carrier to Noise ratio)를 사용하여 나타낼 수 있고, 이는 송신기의 출력 전력 특성을 나타내는 유효등방성방사전력(EIRP, Effective Isotropic Radiated Power)와 수신안테나의 수신 특성을 나타내는 G/T(Gain/Temperature)를 통하여 계산될 수 있으며 이를 통해 수신기의 예상 수신 세기, 통신 가용 거리, 통신 품질 등 통신시스템의 주요 성능을 예측할 수 있다. 이에 본 논문 2장에서는 원격자료수신장비 중계기 소형반사판 안테나의 G/T 예측 및 측정을 위하여 2.1절에서는 시뮬레이션 결과를 기반으로 이론적 G/T를 계산하고 2.2절에서는 국제통신위성기구와 RCC 텔레메트리그룹에서 많이 사용되는 두 가지 측정법에 대하여 살펴보고, 2.3절에서 실측 결과를 비교하여 그 정확성을 검토 후, 3장 결론에서 시스템 성능 및 안테나 성능 사양에 따른 최적 측정법을 제시하고자 한다.

II. 본 론

2.1 G/T의 이론적 계산

2.1.1 안테나 이득 및 잡음온도

G/T는 수신기의 수신 특성을 나타내는 가장 중요한 변수로 G (antenna gain)는 수신 안테나의 이득이고, T (system noise temperature)는 수신기의 시스템 잡음온도이다. 일반적으로 지상국 수신기 안테나는 고지향성을 갖는 반사판 안테나를 사용하며, 안테나 이득(G)은 직경(D_m)과 파장(λ), 효율(ϵ) 간 관계에 의해 식 (1)과 같이 계산될 수 있다[1].

$$G = \epsilon \frac{\pi^2 (D_m)^2}{\lambda^2} \quad (1)$$

안테나의 직경이 파장 대비 커지게 되면 안테나의 이득은 직경의 제곱배로 증가하게 된다. 따라서 수신기의 G/T 특성을 올리는 가장 손쉬운 방법은 안테나 직경의 증가이다. 하지만 이에 따른 구조물 무게 증가와 풍압 압력이 증가하게 되어 모터, 브레이크의 성능 역시 같이 증가하게 되므로 상호 연관성을 다각도로 검토하여야 한다.

안테나의 잡음온도는 일반적으로 안테나의 직경, 사용 주파수, 운용각 및 안테나 사용 지형, 기후 등에 따라 변한다. 이는 안테나의 잡음온도 T_a 가 식 (2)와 같이 안테나의 방사패턴 $G(\theta, \phi)$ 와 주변 환경온도 $T_b(\theta, \phi)$ 에 의하여 결정되기 때문이다[2]. 참고문헌 [2]에 삽입된 Fig. 1은 안테나 지향각과 주파수별 대기 환경에 의한 잡음온도를 나타낸다. 그래프로부터 잡음 온도는 지면을 바라볼수록 증가하며 80GHz 대역에서 가장 높은 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

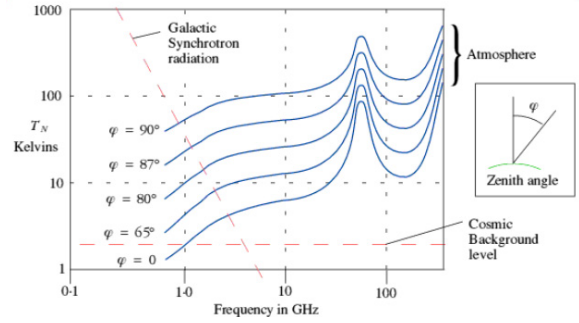


Fig. 1. Atmospheric noise temperature[2]

$$T_a = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} G(\theta, \phi) T_b(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} G(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi} \quad (2)$$

본 논문에서 사용된 안테나 방사패턴은 ICARA프로그램(Fig. 2)을 이용하여 효율 60%를 갖는 반사판 안테나의 방사패턴을 Fig. 3과 같이 계산하였다. 안테나의 구조는 원격자료수신장비 중계기 안테나에 사용된 이득 17.5dBi, 반전력 빔폭 17°의 미국 mWAVE 제조 RPDC2-20-S 2 ft. 제품 성능을 갖도록 시뮬레이션을 이용하여 60cm 싱글반사판 파라볼라 구조를 사용하여 이득 17.8dBi, 3dB 빔폭 17°를 갖도록 하였다.

안테나 잡음온도는 Antenna Noise Temperature Calculator를 사용하여 Fig. 4와 같이 안테나 잡음온도를 계산하였다. 해석프로그램은 저장되어 있는 주파수, 안테나 고각별 주변 환경 온도를 로딩 후 ICARA로부터 계산된 안테나 방사패턴을 입력하여 안테나 지향 각도에 따라 안테나 잡음온도를 계산하였다. 지면을 바라볼 때(고각 0도) 지면의 높은 온도로 인해 가장 높은 값을 가지며 하늘 방향을 바라볼수록 그 값이 낮아짐을 예측할 수 있었다. 고각 5도 지향 시 잡음온도는 73.9K이다.

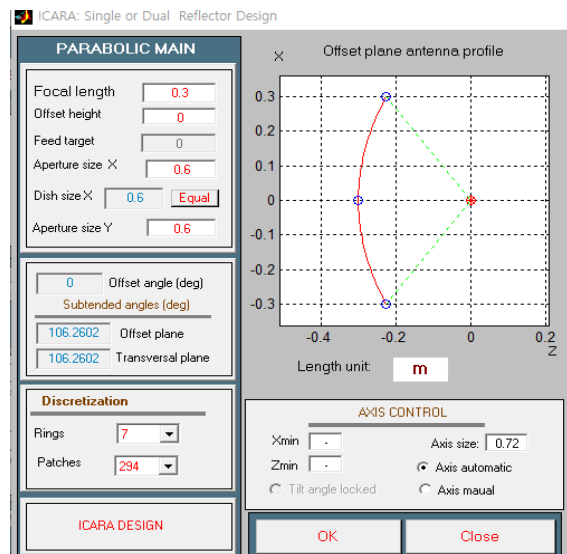


Fig. 2. ICARA[3]

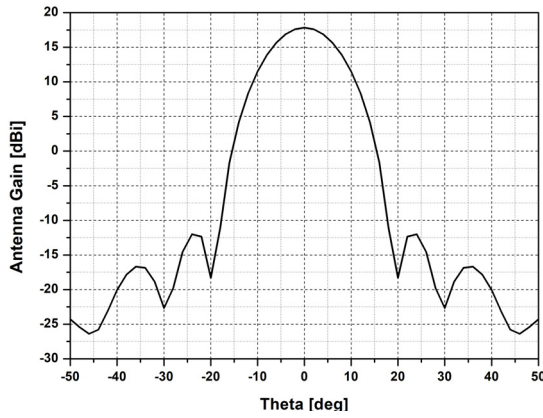


Fig. 3. Antenna radiation pattern

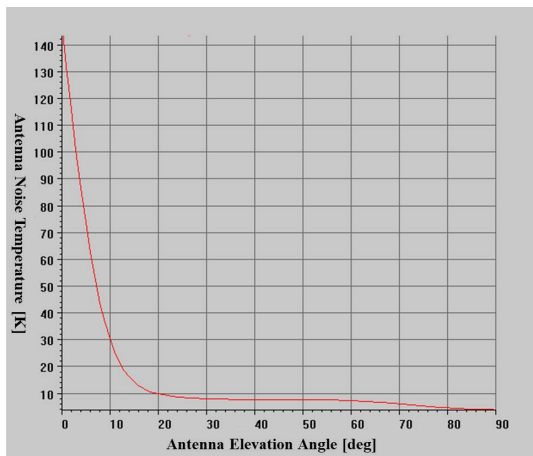


Fig. 4. Noise temperature of telemetry antenna[4]

2.1.2 시스템 잡음 온도

원격자료수신장비는 한국형발사체 위치 및 상태정보를 수신하는 장비로 Fig. 5와 같이 안테나로부터 받은 신호를 저잡음 증폭하여 수신기로 신호를 전달하는 통신시스템이다. 이득 17.8dBi의 60cm 파라볼라 안테나와 62dB 이득과 40K잡음온도를 갖는 저잡음증폭기(LNA, Low Noise Amplifier), 3dB의 손실(L₃)을 갖는 커플러, 8dB의 잡음지수를 갖는 수신기로 구성되어 진다. 각 장비 간 연결 케이블의 손실 L₁, L₂, L₄는 각각 1dB, 20dB, 2dB이다. 본 논문에서는 이와 같은 구조를 갖는 원격자료수신장비 중계기의 G/T를 이론적으로 계산하고 실 측정을 통해 그 정확성을 비교하고자 한다.

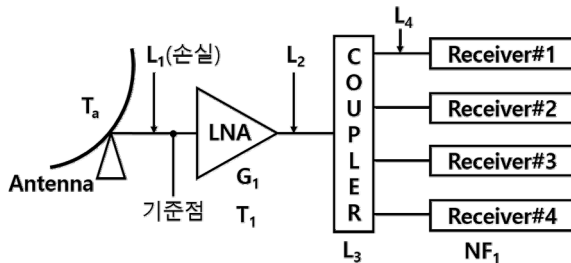


Fig. 5. Telemetry system architecture

Table 1. Performance for telemetry system

	Noise Temperature	Gain	Loss
Ant.	73.9K	17.8dBi	-
L ₁	-	-	1.5dB
LNA	40K	62dB	-
L ₂	-	-	20dB
L ₃	-	-	1dB
L ₄	-	-	1.5dB
RTR(T _R)	1,540K(NF=8)	-	-
L _T			24dB
G _T		38dB	

원격자료수신장비 중계기의 시스템 잡음온도(T_s)는 식 (3)과 같이 계산될 수 있다[5].

$$T_s = \frac{T_a}{L_1} + T_0 \left(\frac{L_1 - 1}{L_1} \right) + T_1 + \frac{T_0 \left(\frac{L_T - 1}{L_T} \right)}{G_T} + \frac{T_R}{G_T} \quad (3)$$

여기서 T_a는 안테나 출력부분에서의 안테나 잡음온도, L₁은 안테나와 LNA를 연결하는 전송매체의 손실, T₀는 전송매체의 물리적 온도 290K, T₁는 LNA의 잡음온도, L_T는 안테나에서 수신기까지의 총손실, G_T는 안테나에서 수신기 사이의 총이득, T_R은 수신기의 잡음온도를 나타낸다. 수신시스템 잡음온도는 안테나 연결부의 손실을 최소화하고 첫 연결 장치인 LNA의 이득은 높이고 잡음 온도를 낮추면 전체 잡음 온도를 낮출 수 있다. Table 1의 성능을 갖는 원격자료수신장비 시스템 잡음 온도를 식 (3)을 이용하여 계산하면 시스템 잡음온도는 177.3K (=21.49dB_K)이며, LNA까지의 성능만을 고려하여 계산한 시스템 잡음 온도는 177.0K(=22.48dB_K)이다. 두 값 큰 차이가 없는 이유는 LNA의 이득이 60dB로 매우 크고 잡음 온도가 40K로 매우 작기 때문이다. 따라서 본 논문에서 G/T 측정은 LNA 출력부 수신레벨을 기준으로 하여 측정 및 비교하고자 한다. 위 계산 결과로부터 중계기 G/T는 -4.7dB/K(17.8dBi-22.48dB_K)로 구해진다. 이는 나로우주센터에서 운용 중인 2.4m, 4.6, 7.3, 11m 안테나 시스템 G/T 값 9, 15, 19, 21dB/K와 비교하여 식 (1)의 안테나 이득 차이(12.1, 17.7, 21.7, 25.3dB)와 저잡음증폭기 이득, 잡음지수 성능, 시스템 선로 손실 등에 의한 손실을 고려하면 적합한 값이라 판단된다.

2.2 G/T 측정 방법

시스템 잡음 온도는 식 (3)과 같이 수신기 입력단에서의 잡음 온도로서 안테나 잡음온도와 수신기 유효 입력 잡음온도에 의해 결정된다. 하지만 안테나 잡음온도는 직접적인 측정이 불가능하기 때문에 정확한 값을 산출하

는데 어려움이 있다. 따라서 시스템 잡음 온도는 일반적으로 Y팩터 측정법 혹은 Solar calibration 측정법을 사용하여 G/T를 측정할 수 있다.

2.2.1 Y팩터 측정법

Y팩터 측정법은 제품 구매, 개발 시 상세 측정을 통해 산출된 LNA 잡음온도를 상대적으로 비교하여 안테나를 포함한 수신시스템 잡음온도를 예측하는 측정방법이다. 본 측정법은 국제통신위성기구(International Telecommunication Satellite Organization)에서 위성통신용 지상, 해상 안테나 측정에 많이 사용되는 방법으로 참고 문헌 Earth Station Verification Test Overview[6]에 측정 방법 및 측정 결과에 대한 내용이 상세히 제시되어 있다. 측정 방법은 Fig. 6과 같이 LNA 입력단에 안테나를 연결했을 때의 수신 레벨과 50ohm 터미네이션을 달았을 때의 수신 레벨을 비교하여 Y값을 구한다. 측정된 Y값을 이용하면 식 (4)로부터 시스템 잡음 온도(T_s)를 예측할 수 있다. 이는 잡음 온도를 알고 있는 LNA에 50ohm termination을 연결했을 때와 수신시스템의 수신레벨을 비교하여 수신시스템 잡음 온도를 구하는 방법으로 $T_{50\Omega}$ 는 LNA 입력단에 50옴터미네이션을 연결하였을 때의 주변 온도, 즉 대기 온도 값이고 T_{LNA} 는 LNA 제품 성능 지표를 나타내는 LNA의 잡음온도 특성을 나타낸다.

$$T_s(dB) = 10\log [T_{50\Omega}(K) + T_{LNA}(K)] - Y(dB) \quad (4)$$

2.2.2 Solar calibration 측정법

Solar calibration 측정법은 Fig. 7과 같이 안테나 시스템이 태양과 같은 열 소스와 차가운 지점을 바라봤을 때

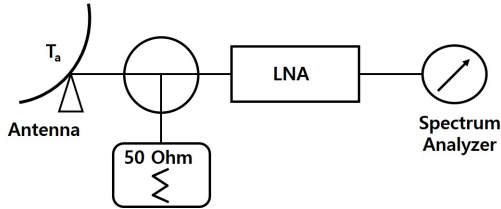


Fig. 6. Y factor method for G/T measurement

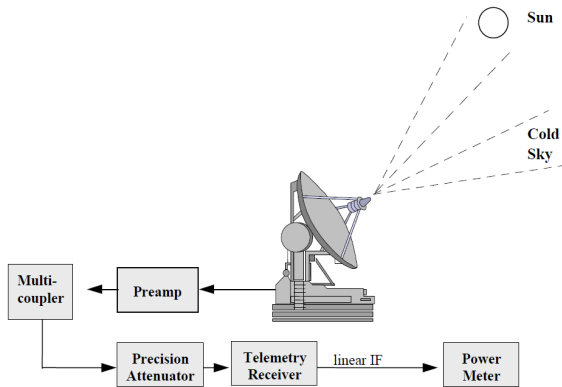


Fig. 7. Solar calibration method for G/T measurement[7]

의 수신 신호 레벨을 비교하여 G/T를 측정하는 방법으로 텔레메트리 지상국 대형 안테나에 많이 사용되는 방법으로, RCC(Range Commanders Council) 텔레메트리 그룹에서는 정의한 표준문서 IRIG118-02에 상세히 제시되어 있으며 계산식은 식 (5)와 같다[7].

$$G/T(dB/K) = 10\log \left(\frac{8\pi k L_{cor} k (Y-1)}{S_0 \sqrt{\text{test frequency}} / 2695 \lambda^2} \right) \quad (5)$$

여기서 k 는 볼츠만 상수 $1.38 \times 10^{-23}(\text{J/K})$ 이고 L_{cor} 은 개구 보정 값으로 식 (6)과 같으며, Φ_d 는 Hot 소스에 대한 상대 값으로 태양 기준 0.53이며 Φ_h 는 안테나의 3dB 빔폭을 나타낸다.

$$L_{cor} = 1 + 0.18 \left(\frac{\Phi_d}{\Phi_h} \right)^2 \quad (6)$$

k_1 은 대기 감쇄에 대한 보정 값으로 식 (7)과 같으며, A_g 는 주파수별 보정 상수로 S대역 기준 0.032dB이며 Φ 는 G/T 측정 시 안테나 HOT소스 지향각이다.

$$k_1 = \frac{A_g}{\sin \Phi} \quad (7)$$

S_0 는 Solar flux density로 한국과 유사 경도를 갖는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 호주 Learmonth에서 측정된 주파수 1,415, 2,695MHz에서의 결과를 활용하여 측정 주파수에서의 값을 식 (8), (9)를 이용하여 산출 가능하다.

$$S_0 = \left(\frac{F_{1415}}{F_{2695}} \right)^T \times F_{2695} \quad (8)$$

$$T = \left(\frac{\log \left(\frac{\text{test frequency}}{2695} \right)}{\log \left(\frac{1415}{2695} \right)} \right) \quad (9)$$

마지막으로 Y값은 hot소스(태양)와 cold소스(온도가 제일 낮은 지점) 간 수신 신호 레벨 차이를 나타낸다.

2.3 G/T 측정 결과

2.2절의 G/T 측정 방법을 이용하여 원격자료수신장비 소형반사판 안테나의 고각 5° 지향 시 G/T를 측정하였다. 먼저, Y팩터 측정방법은 Fig. 8과 같이 안테나를 고각 5°로 지향하도록 고정된 후 LNA를 기준으로 입력단에 안테나와 50ohm 터미네이션을 연결하여 각각 수신레벨을 측정 후 두 수신 레벨을 비교하여 Y값을 구하고 시스템 잡음 온도를 Table 2와 같이 계산하였다.

Solar calibration 측정법을 사용한 G/T를 측정방법은 Fig. 9과 같이 반사판 중앙에 급전흔의 그림자가 위치하도록 조정하여 태양을 지향 후 가장 높은 신호레벨을 갖도록 정밀 조정하였다. 이때 지향각은 방위각 240°, 고

각 50°이다. Cold 소스 측정을 위하여 안테나 지향방향을 바다를 향하도록 하고 수신 신호 레벨을 측정하였다. 두 측정 값을 비교하여 Y값을 산출 후 식 (5)~(9)를 활용하여 Table 3과 같이 G/T를 계산하였다. 이때 Solar flux density 값은 Fig. 10과 같이 Learmonth 관측소에서 측정된 값 $110 \times 10^{-22} \text{ W/m}^2/\text{Hz} (@2695\text{MHz})$ 값을 활용하였다[8].



Fig. 8. Y factor method



Fig. 9. Solar calibration method

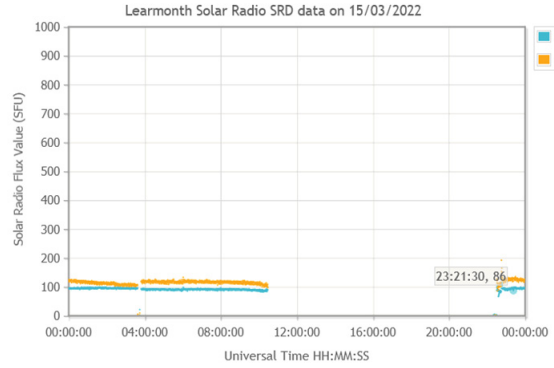


Fig. 10. Solar flux density[8]

안테나 G/T 측정 결과 두 측정법 모두 신호 레벨이 안정되지 않고 1-3dB 정도 계속 등락을 반복하여 측정에 어려움이 있었다. 이에 신호분석기 측정 시 측정주파수 설정 후 SPAN 0Hz, Resolution/Video Bandwidth 30kHz, 30Hz, 평균값 100회 기능을 사용하여 측정 정확성을 높였다. 그 결과, Y팩터, Solar Calibration 측정 방법을 이용한 G/T 측정 결과는 2,300MHz 기준 각각 -4.82dB/K, 0.5dB/K였으며, 이는 이론 값과 0.12dB, 5.2dB의 오차를 가진다.

Solar calibration을 이용한 측정 방법이 큰 오차를 가지는 것은 hot, cold 지향 레벨 값 사이의 작은 차이에도 그 값이 너무 크게 변하기 때문이다. Fig. 11은 두 측정법에서 측정한 각각의 신호 레벨 차에 의한 G/T에 대한 변화를 나타내는 그래프이다. 두 측정법 비교 결과, Y팩터 측정법은 레벨 차이에 따라 선형적으로 G/T 값이 변하지만, Solar calibration 방법의 경우 5dB 이상의 값에서 선형적으로 변하며 그 이하의 값에서는 작은 레벨 변화에도 G/T가 매우 크게 변함을 알 수 있다. 이는 선형함수와 로그함수로 표현되는 식 (4), (5)로부터 기인함을 쉽게 예측할 수 있다. 따라서 넓은 빔폭을 갖는 안테나의 경우 주변 지형, 구조물, 기후 환경(solar flux

Table 2. G/T measurement result(Y factor method)

구분	Y팩터 측정법		
측정 주파수(MHz)	2200	2300	2400
① 안테나+LNA 수신레벨(dBm)	-72.9	-73.9	-72.7
② 50ohm termination+LNA 수신레벨(dBm)	-70.2	-71.4	-69.8
①-② 레벨차(dB)	2.7	2.5	2.9
LNA 잡음온도(K)	40K		
Test Load 잡음온도(K)	285.2K		
시스템 잡음온도(K)	177.3	185.7	169.4
G/T(dB/K)	-4.62	-4.82	-4.42
이론-실측 값 차이(dB)	-0.08	0.12	-0.28

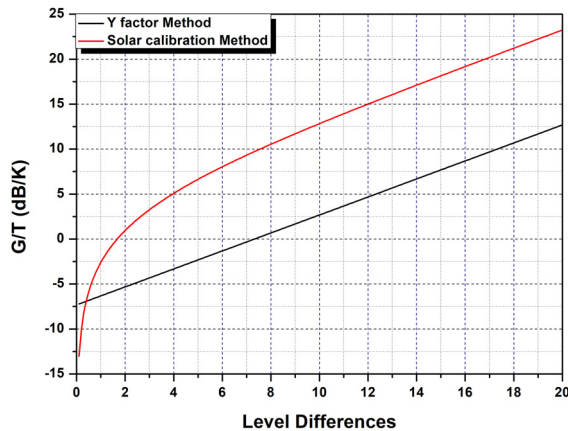


Fig. 11. G/T calculation result according to level differences

Table 3. G/T measurement Result(Solar calibration method)

구분	Y팩터 측정법		
	2200	2300	2400
측정 주파수(MHz)	2200	2300	2400
① HOT 지향(dBm)	-67.9	-69.7	-67.5
② COLD 지향(dBm)	-70.2	-71.4	-69.8
①-② 레벨차(dB)	2.3	1.7	2.3
Solar Flux	103	105	106
G/T(dB/K)	1.5	0.5	2.0
이론-실측 값 차이(dB)	-6.2	-5.2	-6.6

density, 날씨, 측정 시간 등)에 따라 측정값이 쉽게 영향받기 때문에 정확성이 떨어짐을 확인할 수 있었다. 반면, Y factor 측정법의 경우 장비를 분해, 조립해야 하는 번거로움이 있어 안테나 지향각을 상시 바꿔 운영하는 형태의 안테나, 높은 고도에서는 상시 측정이 어렵다는 것도 알 수 있었다. 하지만 Y factor 측정법이 안정되고 정확한 측정이 가능함을 예측할 수 있었다.

III. 결 론

본 논문에서는 원격자료수신장비의 가장 중요한 수신 특성을 나타내는 G/T에 대한 시뮬레이션 기반 이론적 계산 방법과 국제적으로 장비 용도 및 기관에 따라 혼용되어 사용되는 두 가지 측정 방법을 살펴보고 실측하여 결과에 대하여 상대 비교 후 그 정확성을 검토하였다.

안테나 G/T 성능을 예측하기 위하여 시뮬레이션 활용 안테나 이득 및 방사패턴을 계산하고 안테나 잡음온도 계산 프로그램을 이용하여 지향각도에 따른 안테나 잡음온도를 산출하였다. 계산된 안테나 이득과 잡음온도, 실

제 설치된 케이블, LNA 등 부품 특성, 멀티커플러 특성, 수신기 특성을 반영하여 원격자료수신장비 중계기의 이론적 G/T를 예측하였다.

안테나 G/T 측정은 국제통신위성기구와 RCC 텔레메트리그룹에서 많이 사용되는 Y팩터 측정법과 Solar calibration 측정법을 사용하여 실측 후 두 결과를 상대 비교하였다. Y팩터, Solar calibration 측정 방법을 이용한 G/T 측정 결과는 2300Mhz 기준 이론값과 0.12dB, 5.2dB의 오차를 가졌다. Solar Calibration 측정 방법이 큰 오차를 가지는 것은 중계기 안테나가 넓은 빔폭을 가져 주변 지형, 기후 환경에 따라 측정값이 영향받기 때문이다. 이는 Log함수로 표현된 계산식으로부터 적은 변화에도 G/T가 크게 변하기 때문임을 쉽게 예측할 수 있다. 따라서 크기가 작고 빔폭이 넓은 소형 반사판 안테나에서는 적은 오차를 가지는 Y팩터 측정법을 활용하여 측정하여야 한다. 하지만 Solar calibration 측정법은 실시간으로 장비 분해, 조립 없이 원하는 각도에서 G/T 측정이 가능한 장점을 가지므로 개발, 장비 설치 초기, 정밀 점검 시에는 Y팩터 측정법을 사용하여 정확한 G/T를 측정하고 운용 시에는 Solar calibration 측정법을 이용하여 장비 성능 열화, 상태 변화를 감시하는 형태로 운용한다면 장비 성능 감시 및 유지를 편리하게 할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- 1) Balanis, C. A., *Antenna Theory analysis and design*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 1997.
- 2) Stutzman, W. L. and Thiele, G. A., *Antenna Theory and Design*, 2nd Ed., KYOBOBOOK, 2006, pp. 482~485.
- 3) Lorenzo, J. A. M., Pino, A. G., Vega, I., Arias, M. and Rubinos, O., "ICARA: Induced-Current Analysis of Reflector Antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 47, No. 2, April 2005, pp. 92~100.
- 4) Rastislav, G., "Antenna Noise Temperature Calculator," *DUBUS*, Vol. 3, 2009.
- 5) Maral, G. and Bousquet, M., *Satellite Communication Handbook*, 5th Edition, John Wiley & Sons, 2009.
- 6) SES WORLD SKIES Payload Management and Operation Center, "EARTH STATION verification test overview," 2012.
- 7) RANGE Commanders Council Telemetry Group, *IRIG118-02 Test Methods for Telemetry RF Subsystems*, 2006.
- 8) Space Weather Service, Solar-Learmonth Observation-Radio Flux, "<https://www.sws.bom.gov.au/solar/>" 2021.