

## 地面站 Ka 频段 G/T 值测量方法研究

盛保印

(西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

**摘要:** 航天测控地面站的系统品质因数(G/T 值)测量一般采用对塔测量、对射电星测量及对同步卫星测量等方法。目前国内大部分用于接收低轨卫星 Ka 频段宽带数据的 12 m 口径地面站均无法采用常规方法进行 G/T 值测量,同时传统的计算公式在 Ka 频段也无法满足 G/T 值测量精度的要求。针对该问题,提出了利用无人机在满足远场和仰角条件下的测试方法,给出了待误差修正的计算公式,对该方法下的大气损耗、无人机定位精度、信标功率修正及指向精度等影响因素进行了分析和计算,在试验场进行了对比试验,证明利用该方法测量 Ka 频段的 G/T 值可行且精度满足要求,解决了目前大部分地面站 Ka 频段 G/T 值无法准确测量的问题。

**关键词:** G/T 值; Ka 频段; 大气损耗

**中图分类号:** V556.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16157/j.issn.0258-7998.222680

**中文引用格式:** 盛保印. 地面站 Ka 频段 G/T 值测量方法研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(8): 140-144.

**英文引用格式:** Sheng Baoyin. The research of Ka-band G/T measurement method for TT&C system[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(8): 140-144.

## The research of Ka-band G/T measurement method for TT&amp;C system

Sheng Baoyin

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** The TT&C system usually use calibration tower, radio star or geostationary satellite for G/T measurement. Now our country build a group of TT&C systems for the data reception of low earth orbit Ka-band satellites. The size of these antennas is 12 meter in diameter. Most of these TT&C systems can not use conventional methods for G/T measurement. At the same time, general formula can not meet the accuracy requirement for Ka-band G/T calculation. To solve the problem, this paper gave a formula and solution with drone for Ka-band G/T calculation. Under the method, this paper analyzed and calculated the effects of atmospheric attenuation, positioning accuracy of drone, radio beacon's signal amplitude variation and antenna's pointing accuracy. The effectiveness of this method was verified in a proving ground. The method solves the problem that most TT&C systems can not measure G/T at Ka-band.

**Key words:** G/T measurement; Ka-band; atmospheric attenuation

## 0 引言

航天测控地面站的品质因数(Gain/noise Temperature, G/T)是地面站的一个重要系统指标, G/T 值越大则接收天线增益 G 越高, 系统等效噪声温度 T 越低, 表示系统的接收灵敏度越高<sup>[1]</sup>。G/T 值的测量方法一般有对标校塔法、对射电星法和同步星验证法。近年来国内新建了一批 12 m 口径地面站用于低轨卫星 Ka 频段高速数据接收, 工作频率范围为 25 GHz~27.5 GHz, 大部分站点均不具备 G/T 值测量条件。用对标校塔法测量, 在满足远场条件且仰角大于 3°的条件下, 架标的距离要大于 26.4 km 且高度大于 1 381 m, 大部分的站点均无法找到合适的架标地点。利用射电星作为射频噪声源, 采用 Y 因子法测量可用于系统 G/T 值的测量, 但在北半球无法找到既可观测到且在 Ka 频段的流量又能满足 12 m 口径天线 G/T 值测量要求的射电星。采用同步卫星法可

对 G/T 值进行验证, 但 Ka 频段低轨卫星的频率与高轨同步卫星的频率不一致, 该方法同样无法采用。因此用于低轨卫星 Ka 频段数据接收的地面站均存在 G/T 值无法进行有效测量的问题。

目前国内工业用无人机在悬停精度、载荷重量及飞行时间等方面均有较大的提升, 因此可考虑利用无人机搭载信标源和宽波束标准增益天线悬停至满足远场条件的空域进行 Ka 频段 G/T 值的测量。

利用无人机测量 Ka 频段 G/T 值需要考虑无人机悬停精度和信标源受高低空温差导致的输出信号功率变化的影响。同时传统的 G/T 值计算公式没有考虑大气衰减的影响, 只适用于工作频段低于 10 GHz 且对塔距离较近的系统, 但是频率范围在 25 GHz~27.5 GHz 的 Ka 频段大气吸收损耗在第一峰值附近, 且信标源离地面站距离远, 因此大气吸收损耗不可忽略。本文给出了利用无人

机测量对上述各种影响因素进行了分析计算,给出无人机测量 Ka 频段 G/T 值法的一种带误差修正的计算公式,对上述各种影响因素进行了分析计算,在天线试验场进行了对比测试,验证了该方法的可行性。

## 1 测量方法

图 1 为利用无人机平台测量地面站 Ka 频段 G/T 值的框图。

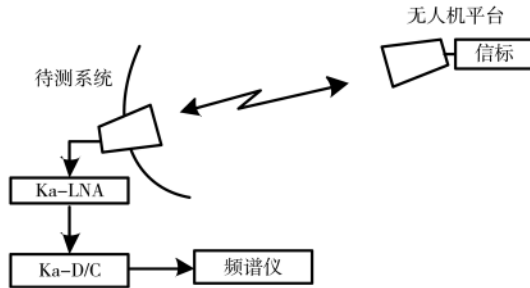


图 1 无人机平台测量地面站 Ka 频段 G/T 值框图

无人机悬停在满足远场条件和仰角的预定位置,经过指向修正后的地面站接收天线根据计算出的目标角度并指向无人机,若地面站天线指向精度不够,可在平台上安装一个 S 频段信标源当做引导信号。信标源发出一个 Ka 频段单载波信号,频谱仪接至 Ka 和路中频输出,通过频谱仪测量接收到的中频信号。通过画方向图的方式在方位、俯仰方向微动地面站接收天线找到中频信号最大值  $S$ ,然后接收天线指向仰角  $\geq 5^\circ$  的冷空,测量此时的接收通道噪声谱密度  $\phi$ ,其中:

$$S = (P_i G_i G_r) / (L_i L_s) \quad (1)$$

$$\phi = k T G_r \quad (2)$$

$$G/T = (S L_i L_s k) / (\phi G_i) \quad (3)$$

用对数表示:

$$G/T = S + L_i + L_s + k - P_i - \phi - G_i \quad (4)$$

式中  $P_i$  为信标源的输出功率(dBW); $G_i$ 、 $G$  分别为信标喇叭的标准增益(dB)、地面站天线在低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)入口的增益(dB); $G_r$  为地面站接收链路的增益(dB); $T$  为系统的等效噪声温度(dBK); $L_i$  为信标源输出至信标喇叭间的电缆损耗(dB); $L_s$  为电磁波自由空间损耗(dB), $L_s = (4\pi d/\lambda)^2$ ;  $k$  为波尔兹曼常数。

式(4)是通过测量  $S/\phi$  值来计算系统 G/T 值的基本公式,可以用于 S、X 频段 G/T 值的测量。Ka 频段的大气损耗严重,测量中需要进行修正,同时本方法测量时还考虑无人机悬停精度及信标源输出功率的温度特性对 G/T 值测量的影响,因此提出一个修正因子的计算公式用于 Ka 频段 G/T 值的测量。

$$G/T = S + L_i + L_s + k - \phi - G_i + L_{ai} + L_p + A_b \quad (5)$$

式中  $L_{ai}$  为大气损耗; $L_p$  为天线指不准引起的测量损失,包括天线指向误差、无人机悬停误差等; $A_b$  为信标源功率修正值。以下对  $L_{ai}$ 、 $L_p$  和  $A_b$  这三个修正因子进行具体分析。

## 2 修正因子分析

### 2.1 大气损耗修正分析

由于气体分子对电磁波有吸收作用,电磁波在大气中传播时会发生衰减现象,经研究大气中的氧气和水蒸气在电磁波大气损耗中占据主导地位<sup>[2]</sup>。根据 ITU-R P.676 的建议在任何压力、温度和湿度下,采用累加氧气和水汽各自谐振线的方法,可以准确计算电磁波在大气中的损耗<sup>[3]</sup>。对于天线仰角大于  $5^\circ$  大气损耗的公式:

$$L_{ai} = (\gamma_o h_o + \gamma_w h_w) / \sin \theta \quad (6)$$

对微小倾斜的地面路径,大气损耗为:

$$L_{ai} = (\gamma_o + \gamma_w) r_D \quad (7)$$

式中  $L_{ai}$  为大气总衰减量(dB); $\gamma_o$ 、 $h_o$  分别为氧气的衰减系数和等效高度(km); $\gamma_w$ 、 $h_w$  分别为水蒸气的衰减系数和等效高度(km); $\theta$  为天线的仰角; $r_D$  为路径长度(km)。

本方法中在远场的条件下时,地面站与无人机平台距离为 26.4 km,仰角为  $3^\circ$  时平台高度为 1 381 m,近于地面路径,因此采用式(7)计算大气损耗。

$$\gamma_o = \left[ \frac{7.2 r_i^{2.8}}{f^2 + 0.34 r_p^2 r_i^{1.6}} + \frac{0.62 \xi_3}{(54-f)^{1.16 \xi_1} + 0.83 \xi_2} \right] \times f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (8)$$

式中  $f$  为工作频率(GHz); $r_p = p/1013$ ,  $p$  为压强(hPa); $r_i = 288/(273+t)$ ,  $t$  为温度( $^\circ\text{C}$ ); $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 、 $\xi_3$  均为与  $r_p$ 、 $r_i$  相关的中间量。

$$\begin{aligned} \gamma_w = & \left\{ \frac{3.98 \eta_1 e^{2.23(1-r_i)}}{(f-22.235)^2 + 9.42 \eta_1^2} g(f, 22) \right. \\ & + \frac{11.96 \eta_1 e^{0.7(1-r_i)}}{(f-183.31)^2 + 11.14 \eta_1^2} + \frac{0.081 \eta_1 e^{6.44(1-r_i)}}{(f-321.226)^2 + 6.29 \eta_1^2} \\ & + \frac{3.661 \eta_1 e^{1.6(1-r_i)}}{(f-325.153)^2 + 9.22 \eta_1^2} + \frac{25.37 \eta_1 e^{1.09(1-r_i)}}{(f-380)^2} \\ & + \frac{17.4 \eta_1 e^{1.46(1-r_i)}}{(f-448)^2} + \frac{844.6 \eta_1 e^{0.17(1-r_i)}}{(f-557)^2} g(f, 557) \\ & + \frac{290 \eta_1 e^{0.41(1-r_i)}}{(f-752)^2} g(f, 752) \\ & \left. + \frac{8.3328 \times 10^4 \eta_2 e^{0.99(1-r_i)}}{(f-1780)^2} g(f, 1780) \right\} \times f^2 r_i^{2.5} \rho \times 10^{-4} \quad (9) \end{aligned}$$

式中  $\rho$  为水汽密度( $\text{g}/\text{m}^3$ ); $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为分别与  $r_i$ 、 $r_p$  和  $\rho$  相关的中间量; $g(f, f_i)$  为与工作频率相关的中间量。

天线试验场某晴空条件下查到的压强为 896 hPa,温度为  $16^\circ\text{C}$ ,水汽密度为  $6 \text{ g}/\text{m}^3$ ,由式(8)和式(9)计算出的大气衰减系数随频率的变化曲线见图 2。

从图 2 可以看出,氧气衰减系数从 S 频段、X 频段到 Ka 频段缓慢增加,衰减系数均在 0.01 dB/km 左右,考虑到 S、X 频段的远场距离均  $< 10 \text{ km}$ ,故在 G/T 值测量时可忽略氧气损耗,Ka 频段远场距离较远,不可忽略氧气损耗

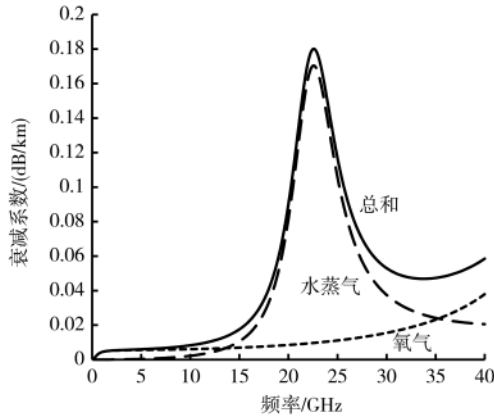


图2 大气损耗随频率变化的曲线

的影响。水蒸气衰减系数在10 GHz 以下 $<0.0018$  dB/km, 在 Ka 频段的水蒸气衰减系数非常大, 22.3 GHz 出现一个峰值, 在 25 GHz~27.5 GHz 频带内, 水蒸气衰减系数为 0.048 dB/km~0.09 dB/km。以 12 m 口径天线为例, 按照图 2 的衰减系数统计出的各频段在远场边界条件下的大气损耗数据见表 1。

表 1 近地远场条件下各频段大气损耗统计表

频段	频率/GHz	$\gamma_o/(dB/km)$	$\gamma_w/(dB/km)$	远场距离 $r_D/km$	$L_{at}/dB$
S	2.20	$5.28 \times 10^{-3}$	$5.93 \times 10^{-5}$	2.11	0.01
	8.40	$5.90 \times 10^{-3}$	$1.15 \times 10^{-3}$	8.06	0.06
X	25.00	$1.11 \times 10^{-2}$	$9.06 \times 10^{-2}$	24.00	2.44
	26.25	$1.20 \times 10^{-2}$	$6.48 \times 10^{-2}$	25.20	1.94
Ka	27.50	$1.30 \times 10^{-2}$	$4.87 \times 10^{-2}$	26.40	1.63

从表 1 中可以看出, 在远场边界条件下, S 频段、X 频段的大气损耗分别为 0.01 dB 和 0.06 dB, 对 G/T 值的影响基本可忽略, Ka 频段的大气损耗在 1.63 dB~2.44 dB 之间, 可见在测量 Ka 频段 G/T 值时必须计算大气损耗并进行修正, 若仍采用式(4)计算 Ka 频段 G/T 值则会出现较大偏差。

本方法大气损耗采用微小倾斜路径模型计算, 实际上无人机悬停处的大气压强和水汽密度与地面有一定偏差, 该偏差会引起大气损耗修正误差, 估算修正误差 $\leq 0.1L_{at}$ , 精度可满足目前地面站对 G/T 值测量精度的要求。

针对少数具备远场架标条件的地面站, 在传统测量方法的基础上再对大气损耗进行修正可得到较准确的 Ka 频段 G/T 值测量结果, 但大部分不具备远场架标条件的地面站仍需采用无人机平台进行 G/T 值测量。

## 2.2 波束对不准修正分析

G/T 值测量过程中, 信标源和地面接收天线的波束无法完全对准, 存在波束对不准损耗, 需要对各种波束对不准因素进行分析计算。地面接收天线的半功率波束宽度按照下式计算<sup>[5]</sup>:

$$\theta_{1/2} \approx 59.4\lambda/D \quad (10)$$

式中  $\theta_{1/2}$  为天线的半功率波束宽( $^\circ$ );  $D$  为天线直径(m);  $\lambda$  为电磁波波长(m)。

考虑到电磁波对抛物面的照射并不是均匀的, 因此半功率波束宽度要展宽, 因此应按照下式计算:

$$\theta_{1/2} \approx 70\lambda/D \quad (11)$$

在主波束内, 因为波束对不准导致的接收天线增益损耗可由下式计算:

$$L_p = 12(\Delta\theta/\theta_{1/2})^2 \approx 0.00245(D\Delta\theta/\lambda)^2 \quad (12)$$

式中  $L_p$  为波束偏差导致的增益损耗 (dB);  $\Delta\theta$  为波束对不准导致的指向偏差。

利用无人机平台测量 G/T 值时, 波束对不准的主要因素有: 天线指向误差、平台悬停精度引起的误差以及平台上信标天线的指向误差。前两项误差的分析见图 3,  $O$  点为地面站接收天线的位置,  $O_1$  为平台的指定位置,  $x$  轴和  $y$  轴所在的平面与直线  $OO_1$  垂直。  $\Delta\theta_1$  为天线的指向误差角, 经指向修正后天线指向  $\Delta\theta_1 \leq 0.02^\circ$ ,  $\Delta\theta_2$  为受平台悬停精度引起的误差角。  $\Delta\theta_1$  引起的误差角可采用画方向图的方式通过找最大值消除。  $\Delta\theta_2$  在不停变化, 无法采用上述方法消除, 需要分析计算由  $\Delta\theta_2$  可能引起的最大测量损耗。

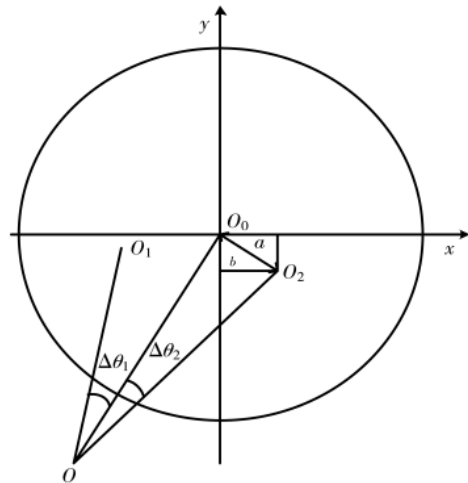


图3 波束对不准示意图

图 3 中天线在找到最大值后的实际指向为  $OO_0$ , 此时:

$$\theta_2 \approx \arctan(\sqrt{a^2 + b^2}/OO_0) \quad (13)$$

式中  $a$  为平台在水平方向的悬停精度(m);  $b$  为平台在垂直方向的悬停精度(m)。

在天线口径为 12 m, 工作频率为 27.5 GHz 时接收天线增益测量损耗与平台悬停精度导致的最大偏离距离  $O_0O_2$  的对应关系见图 4。

从图 4 可以看出, 平台在 1/2 远场边界条件下由同样的偏移距离引起的天线增益测量损耗是远场边界条件下的 4 倍, 为提高无人机平台测量 G/T 值的精度, 需选择满足远场的条件。选择的无人机平台在 GSP 正常工

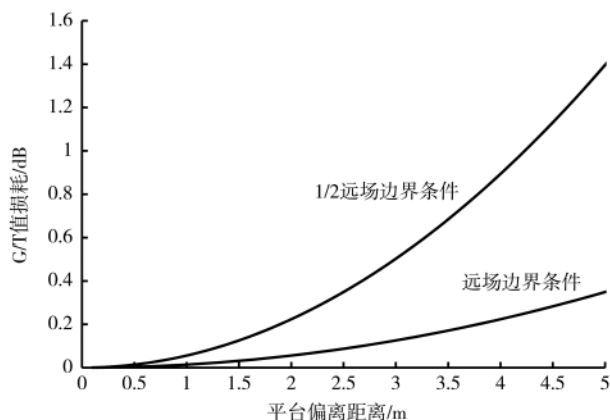


图4 平台偏离距离与天线增益测量损耗对应图

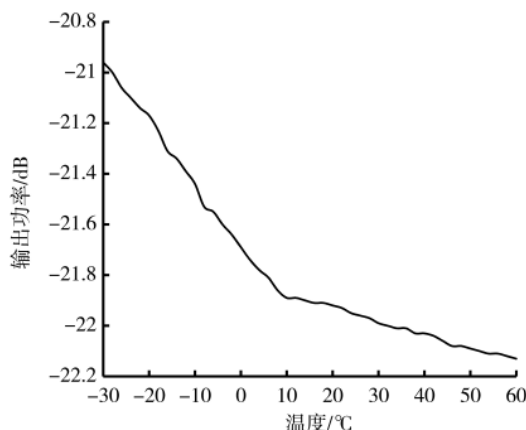


图5 信标输出功率与温度的对应图

作时,水平方向悬停精度 $a \leq 2.5$  m,垂直方向悬停精度 $b \leq 1$  m,在远场条件下对应的天线增益测量损耗最大约为0.101 dB。

针对信标天线波束的指向误差,选用的标准增益天线为喇叭天线,半功率波束宽度约为 $17^\circ$ 。在测试过程中地面天线指向不动的情况下,通过调整无人机的指向和云台的俯仰利用找最大值的方式可以准确地将信标天线指向地面天线,由该因素造成的G/T值测量损耗基本可忽略。

除了上述因素外,无人机平台在图3中 $OO_1$ 方向上的悬停精度会造成信标源与地面天线之间的径向距离变化,从而影响空间损耗。经计算在远场边界条件下平台在径向悬停精度为 $\pm 2.5$  m时,造成的空间损耗差值为 $\pm 0.0017$  dB,对G/T值的测量影响可忽略。

### 2.3 信标功率修正分析

G/T值测量前,先将平台上Ka信标的输出接至频谱仪进行输出功率标定作为G/T值测量过程中的一个已知数据。由于测量中平台与地面的高度差有1381 m,按照每100 m温度降低 $0.6^\circ\text{C}$ 计算,温差达 $8.4^\circ\text{C}$ 。信标经两个锁相环路后经过一级放大和滤波输出,放大器的增益易受温度影响<sup>[6]</sup>,需要对信标在不同温度下的输出功率变化进行测量,在G/T值计算时进行修正。对Ka信标的输出功率进行了温度试验,输出功率随温度的变化曲线见图5。

从图5中可见,温度在 $-30^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 时,增益随温度变化较明显,约为 $0.23\text{ dB}/10^\circ\text{C}$ ,温度在 $10^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 时,增益变化相对较小,约为 $0.05\text{ dB}/10^\circ\text{C}$ 。试验中不同频率下功率随温度变化趋势基本一致。可见采用本方法测量Ka频段G/T值时,尤其是环境温度在 $10^\circ\text{C}$ 以下时需要对信标源的输出功率进行修正量 $A_b$ 约为0.19 dB。不同的信标源的功率-温度特性不同,需要通过温度试验实际标定再进行修正。

### 2.4 测量误差分析

采用本方法测量地面站Ka频段G/T值的误差主要

来源有:大气损耗修正误差 $\Delta L_{at}$ 、信标源功率修正误差 $\Delta A_b$ 及切面内悬停精度修正误差 $\Delta L_p$ 。

除了以上修正因子的误差,本方法在G/T值测量时还存在无人机定位误差的影响。无人机定位误差相对稳定,在图3中 $OO_1$ 切面上的定位误差,可以通过找最大值的方法消除,在 $OO_1$ 径向的定位误差会引起空间距离的变化而影响G/T值的测量精度。无人机的定位误差 $\leq 15$  m,远场条件时,造成的测量误差在 $\pm 0.0049$  dB以内,对G/T值的测量影响可忽略。

针对12 m口径天线在满足远场边界距离和 $3^\circ$ 仰角条件测量G/T值时,各误差估值如下: $\Delta L_{at}$ 为 $\pm 0.1L_{at}$ , $\Delta A_b$ 约为 $\pm 0.1A_b$ , $\Delta L_p$ 约为 $\pm 0.2L_p$ 。则计算出的Ka频段测量精度结果见表2。

表2 测量精度统计表

频点/GHz	$\Delta L_{at}/\text{dB}$	$\Delta A_b/\text{dB}$	$\Delta L_p/\text{dB}$	$\Delta G/T/(\text{dB/K})$
25.00	$\pm 0.244$	$\pm 0.019$	$\pm 0.020$	$\pm 0.283$
26.25	$\pm 0.194$	$\pm 0.019$	$\pm 0.018$	$\pm 0.231$
27.50	$\pm 0.163$	$\pm 0.019$	$\pm 0.017$	$\pm 0.199$

从表2中可以看出,采用本方法测量地面站Ka频段G/T总的估算误差 $\leq 0.283$  dB,满足目前地面站对G/T值测量精度的要求。

## 3 试验验证

为了验证本方法的可行性和准确性,在天线试验场分别用两种方法测量系统Ka频段的G/T值进行对比验证。第一种方法为间接测量法,需分别测量出天线的增益 $G^{[7]}$ 和系统噪声 $T^{[8]}$ ,然后计算出系统G/T值,这种方法测量出来的G/T值较准确,但是大部分站点不具备测试条件。第二种方法采用无人机平台进行测量,并按照式(5)进行对各修正因子进行修正。在试验中以第一种方法的测量结果来验证第二种方法的可行性和测量准确性。

### 3.1 间接测量法

天线增益与天线的主波束的带宽存在一种固定的关系<sup>[9]</sup>,可由下式计算天线增益:



$$G=10\lg[(G_3+G_{10})/2]-n_g-n_f \quad (14)$$

$$G_3=31\,000/\theta_{A3}\times\theta_{E3} \quad (15)$$

$$G_{10}=91\,000/\theta_{A10}\times\theta_{E10} \quad (16)$$

式中  $G$  为天线在 LNA 输入口的增益(dB);  $\theta_{A3}$ 、 $\theta_{E3}$  分别为天线在 A、E 轴的 3 dB 波束宽度(°);  $\theta_{A10}$ 、 $\theta_{E10}$  分别为天线在 A、E 轴的 10 dB 波束宽度(°);  $n_g$  为反射面表面误差引起的增益恶化量(dB);  $n_f$  为馈源至 LNA 输入口的馈线损耗(dB)。

上述波束宽度通过在天线试验场满足远场条件的山上架设信标采用画方向图进行测量,  $n_g$  可以通过对天线反射面标定后测量计算<sup>[10]</sup>。

$$T=10\lg((273+T_0+T_{LNA})/10^{(P_1-P_2)/10}) \quad (17)$$

式中  $T$  为系统在 LNA 输入口的等效噪声(K);  $T_0$  为环境温度(°C);  $T_{LNA}$  为 LNA 的等效噪声(K);  $P_1$ 、 $P_2$  分别为 LNA 接天线和接常温负载时在频谱仪上读取的噪声谱密度(dBm/Hz)。

按照上述公式在环境温度  $T_0$  为 16 °C 时,在天线试验场对地面站 Ka 频段左旋通道三个频点的 G/T 值进行了测量,测试结果见表 3。

### 3.2 无人机平台测量法

在天线试验场利用无人机平台同样对地面站 Ka 频段左旋通道三个频点的 G/T 值进行了测量,无人机距天线为 26.4 km,高度差为 1 381 m,信标功率为 -20 dBm。外界天气条件为压强为 896 hPa,温度为 16 °C,水汽密度为 6 g/m<sup>3</sup>,测试结果见表 4。

从上述两项试验可以看出,采用无人机平台并利用式(5)测量地面站 Ka 频段三个频点的 G/T 值比间接测量法的结果分别高:0.26 dB、0.18 dB 和 0.15 dB,采用两种方法的测量结果基本一致,采用无人机平台测量地面站 Ka 频段 G/T 值并对影响因子进行修正后的测量精度在误差估算范围内。

试验中利用无人机平台进行 G/T 值测量时,有时会因无人机平台受阵风扰动影响造成测量结果偏差较大。在天气良好的条件下,一般无人机起飞 3 次进行 3 组测量,剔除其中偏差较大的值,对有效数据求平均可得到稳定的测量结果,且与间接测量法结果一致。

## 4 结论

通过无人机平台测量地面站 Ka 频段 G/T 值并对影响因子进行修正的方法解决了大部分地面站 Ka 频段 G/T 值无法测量的问题。

采用本方法测量 Ka 频段的 G/T 值需要多人协作测量等,测量准备时间及工作量仍较大,后续计划利用本方法测量 G/T 值的同时,进行系统偏馈无线闭环测量此时接收链路的  $S/\phi$  值,建立本方法测量的 G/T 值与偏馈闭环测量接收通道  $S/\phi$  间的对应关系,通过测量  $S/\phi$  即可推算系统的 G/T 值,提高地面站 Ka 频段 G/T 值的测量效率。

### 参考文献

- [1] 袁惠仁. 天线参数的射电天文测量[M]. 北京: 电子工业出版社, 1986.
- [2] 朱智勇, 李海涛. 深空测控链路的大气衰减分析[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(2): 9-12.
- [3] 梁冀生. Ka 频段卫星通信地空链路的大气衰减[J]. 无线电通信技术, 2006, 32(1): 56-58.
- [4] ITU. (ITU-R P.676-6) Attenuation by atmospheric gases[S]. Geneva, Switzerland: International Telecommunications Union, 2005.
- [5] 毛乃宏, 俱新德. 天线测量手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987: 110-125.
- [6] 彭龙新, 杨乃彬, 林金庭. 宽带单片低噪声放大器的增益温度补偿[J]. 电子学报, 2006, 34(5): 934-937.
- [7] 李文, 马忠松. G/T 值测试三原则及 G/T 值测量方法[J]. 国外电子测量技术, 2019, 27(12): 39-41.
- [8] 秦顺友, 王小强. 载噪比直接法测量地球站 G/T 值的精度研究[J]. 通信学报, 2000, 21(3): 25-31.
- [9] 秦顺友, 许德森. 卫星通信地面站天线工程测量技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 67-70.
- [10] 李勇, 欧节, 徐平. 平面近场天线测量误差分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(11): 987-992.

(收稿日期: 2022-02-28)

### 作者简介:

盛保印(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 航天测控地面站工程研究。



扫码下载电子文档

表 3 间接测量法 G/T 值测量统计表

频点/GHz	$\theta_{A3}/(^{\circ})$	$\theta_{E3}/(^{\circ})$	$\theta_{A10}/(^{\circ})$	$\theta_{E10}/(^{\circ})$	$n_g$ /dB	$n_f$ /dB	$(P_1-P_2)$ /dBc	$T_{LNA}$ /K	$(G/T)/(dB/K)$
25.00	0.067	0.068	0.115	0.119	0.43	0.95	1.56	162	41.03
26.25	0.064	0.065	0.109	0.113	0.47	0.98	1.5	165	41.33
27.50	0.060	0.061	0.101	0.105	0.52	1.07	1.56	169	41.79

表 4 无人机平台法 G/T 值测量统计表

频点/GHz	$L_i$ /dB	$G_i$ /dB	$L_s$ /dB	$(S/\phi)$ /dB	$L_{sa}$ /dB	$L_p$ /dB	$A_b$ /dB	$(G/T)/(dB/K)$
25.00	4.82	20.77	148.83	84.54	2.44	0.095	0.19	41.29
26.25	4.26	21.14	149.25	85.68	1.94	0.105	0.19	41.51
27.50	4.57	21.30	149.66	85.85	1.63	0.115	0.19	41.94

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所