

用微波辐射计测量天线辐射效率

廖连常 林士杰

(华中理工大学电子与信息工程系, 武昌)

摘要 本文首先导出利用微波辐射计测量天线辐射效率时辐射效率的一般表示式, 然后介绍了测量方法和实验结果。

关键词 微波辐射计; 天线辐射效率; 天线测量

一、引言

辐射效率是天线的一个重要电特性参数。当天线用作发射时, 设供给它的总功率 P_t , 中的一部分 P_r 辐射进入空间, 剩余部分 P_i 以热的形式耗散在天线结构中, 则把天线辐射效率定义为 P_r 对 P_t 的比值:

$$\eta_t = \frac{P_r}{P_t} = \frac{G_0}{4\pi} \iint_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (1)$$

式中 G_0 为天线的最大功率增益, $F_n(\theta, \phi)$ 为归一化辐射方向图。由(1)式可知, 要计算天线的辐射效率, 必须测量出天线的最大功率增益及其归一化辐射方向图, 其测量方法在有关教科书中均有介绍^[1]。但要在 4π 立体角内测量出天线的归一化方向图, 并保证足够的准确度, 这是一件既费时又耗资的事情。为了克服这一缺点, 本文介绍了利用微波辐射计测量天线辐射效率的方法和实验结果。为此, 本文首先分析入射到天线口面的热辐射噪声温度通过有耗天线的作用后, 在有耗天线输出端所得到的输出噪声温度; 然后用 S 参量表示连接有耗天线和辐射计接收机之间的传输线, 推导出当传输线有损耗并且与天线阻抗不匹配时, 辐射计接收机输入噪声温度与有耗天线输出噪声温度之间的关系, 从而得出利用微波辐射计测量天线辐射效率时辐射效率的一般表示式。

二、测量原理

当天线用作接收并且没有损耗时, 天线输出端的功率可用天线温度 T_A 表示为

$$T_A = \frac{\iint_{4\pi} T_{AP}(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega} \quad (2)$$

式中 $T_{AP}(\theta, \phi)$ 为入射到天线有效口径面上的视在温度分布, 但实际上天线不是无损耗器件, 天线接收或发射的部分能量以热损耗的形式被天线吸收了. 为了说明天线欧姆损耗对天线输出端口接收功率的影响, 当从接收机“看”时, 定义 T'_A 为有耗天线的天线温度. 一个有耗器件也是一个热噪声发生器. 对于辐射效率(功率传输系数)为 η_l 的天线, 它所发射的热噪声功率由噪声温度 T_N 表征为

$$T_N = (1 - \eta_l)T_{0A} \triangleq (1 - 1/L)T_{0A} \quad (3)$$

式中 L 是天线的损耗因子(功率传输系数的倒数), T_{0A} 是天线的物理温度. 因此有: (天线输出端口所接收的辐射) = (通过天线传递的辐射) + (天线自发射的辐射), 或

$$T'_A = \eta_l T_A + (1 - \eta_l)T_{0A} \quad (4)$$

一般说来, 为了连接的方便, 在天线与辐射计接收机之间总会有一段长为 l 的传输线. 它可能具有一定程度的损耗, 也可能与天线不匹配. 实际辐射计系统及其等效参数如图 1 所示. 图中, T_{0A} 为天线的物理温度, T_0 为传输线的物理温度, Z_0 为传输线的特性阻抗, R_A 和 R_R 分别为由传输线两端向天线和接收机看去的反射系数, T'_A 为实际天线的天线温度, T_{IN} 为进入接收机的净噪声功率所对应的等效噪声温度. 由图 1 可知, 进入接收机的噪声温度由三部分组成: 天线温度 T'_A 的贡献, 有耗传输线网络热噪声的贡献和接收机本身所产生的 T_R 的贡献. 设天线输出有用功率 T'_A 经失配和传输因子作用后, 流入接收机的净功率为 $\alpha_m \gamma T'_A$; 有耗传输线网络热噪声功率在输出端的等效噪声温度与一个无源有耗器件所产生的热噪声温度相等效, 其值为 $(1 - \gamma)T_0$, 由于失配的影响, 进入接收机的净功率为 $\alpha_m(1 - \gamma)T_0$; 就 T_R 的贡献而言, 在一般情况下, 接收机输入端装有隔离器, 它的反向衰减很大, 所以向传输线端传输的噪声功率接近 T_0 (隔

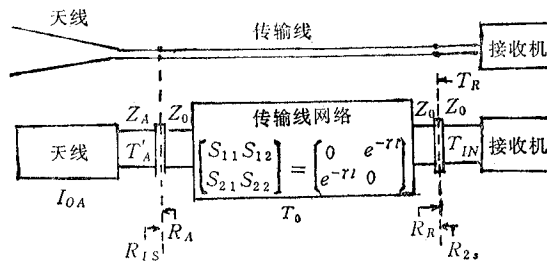


图 1 实际辐射计系统及其等效参数(图中的 I_{0A} 应为 T_{0A})

离器的物理温度). 实测表明, T_R 比 T_0 约高 30K. 由于失配的影响, 有一部分反射回到接收机, 其值为 $(1 - \alpha_m)T_R$. 最后得到进入接收机的总净功率, 用等效噪声温度表示为^[2,3]

$$T_{IN} = \alpha_m \gamma T'_A + \alpha_m(1 - \gamma)T_0 + (1 - \alpha_m)T_R \quad (5)$$

以上诸式中, α_m 为失配损失因子, γ 为传输因子, 其网络参数表示式分别为

$$\alpha_m = \frac{(1 - |R_{2S}|^2)(1 - |R_R|^2)}{|1 - R_{2S}R_R|^2} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{(1 - |R_A|^2)(1 - |S_{11}|^2)}{L_S(1 - |R_{2S}|^2)|1 - S_{11}R_A|^2} \quad (7)$$

其中

$$R_{2S} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}R_A}{1 - S_{11}R_A} \quad (8)$$

$$L_S = \frac{(1 - |S_{11}|^2)}{|S_{21}|^2} \quad (9)$$

将(4)式和(6)~(9)式代入(5)式, 可得

$$T_{IN} = \alpha_m \gamma [\eta_l T_A + (1 - \eta_l) T_{0A}] + \alpha_m (1 - \gamma) T_0 + (1 - \alpha_m) T_R \quad (10)$$

下面分两种情况来讨论:

(1) 当传输线与天线和接收机均处于匹配状态, 即 $R_A = R_{2S} = R_R = 0$ 时, 有 $S_{11} = S_{22} = 0$, $S_{12} = S_{21} = \exp[-(\alpha - j\beta)l]$, $\alpha_m = 1$, $\gamma = |S_{21}|^2 = \exp(-2\alpha l)$. 如果所用传输线很短, 或传输线损耗极小, 这时 $|S_{21}| \rightarrow 1$, 故有

$$\eta_l = (T_{0A} - T_{IN}) / (T_{0A} - T_A) \quad (11)$$

(2) 当传输线损耗不能忽略, 并与天线之间存在失配现象时, 求解(10)式可得天线辐射效率的一般表示式为

$$\eta_l = \frac{\alpha_m (1 - \gamma) T_0 + (1 - \alpha_m) T_R + \alpha_m \gamma T_{0A} - T_{IN}}{\alpha_m \gamma (T_{0A} - T_A)} \quad (12)$$

三、测量方法

1. 对辐射计接收机进行定标

对辐射计接收机进行定标是为了求得接收机输出电压与输入噪声温度的关系, 即求得辐射计接收机的传递函数. 进行接收机定标时, 可将辐射计的天线用已知输出等效噪声温度的噪声源来代替. 为使辐射计的定标模式与工作模式相一致, 这种替代必须保证接收机接上噪声源与接上天线时的工作状态完全相同. 通常这种定标用的噪声源是恒温的匹配负载. 定标测量原理框图见图 2. 如果辐射计的输出电压与输入噪声温度之间有良好的线性关系, 且各处均有良好的匹配, 则可在其输入端先后分别接入两个温度恒定的匹配负载, 例如一个噪声温度为 T_h 的常温匹配负载和一个噪声温度为 T_c 的低温匹配负载. 在其输出端分别测量出

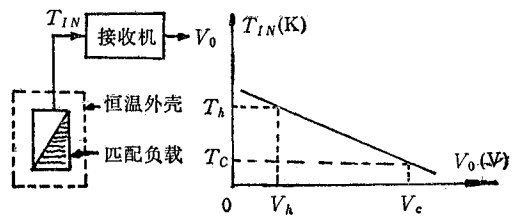


图 2 辐射计接收机传递函数的测试框图及其定标直线

它们相对应的输出噪声电压 V_h 和 V_c . 在 $T_{IN}-V_0$ 平面上, 根据这两点的坐标则可求出描述辐射计接收机输入噪声温度与输出噪声电压之间的函数关系, 即传递函数为

$$T_{IN} = \frac{T_h - T_c}{V_h - V_c} V_0 + T_h - \frac{T_h - T_c}{V_h - V_c} T_h \quad (13)$$

2. 天线辐射效率的测量

(1) 传输线与天线匹配且其损耗可忽略时的情况 由(11)式可知, 要测量天线的辐射效率, 必须测量出 T_{IN} , T_{0A} 和 T_A 的数值.

(a) 小口径天线辐射效率的测量 当天线口径较小(一般指直径小于 1 m 左右的

喇叭天线)时,可采用类似于黑体壳的低温定标负载来测量天线的辐射效率。其测量框图

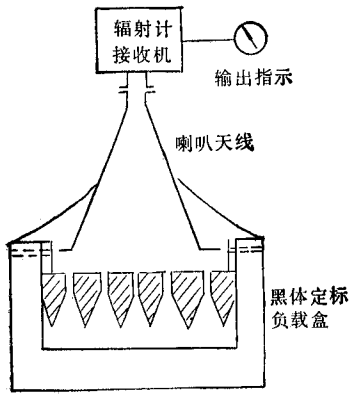


图 3 测量小口径天线辐射效率的原理框图

如图 3 所示。为了建立精确已知的天线温度,可将温度为液氮温度的定标负载盒放在天线口面处。它是一个底部放有吸收材料的铝盒子,外面包有泡沫聚苯乙烯绝热层。

将液氮注入定标负载盒内,使液面刚好达到盒的顶部,即可从接收机输出端读取 V_0 ,再由接收机定标直线上找出对应的 T_{IN} 。此时,必须小心地选取电压最大值作为狄克型辐射计的输出指示。

在确定天线温度时,应考虑液氮沸点的绝对温度随大气压强的变化。一般取天线温度为

$$T_A = 77.36 - 0.011(760 - p) \quad (14)$$

式中 p 为测量地点的大气压,以毫米汞柱表示。

天线的物理温度难以准确计算,也不便于以天线上的某一点的温度作为天线物理温度的近似。在实际中要求对整个辐射计系统(包括天线)进行恒温,然后向定标盒内注入液氮,待液氮充分蒸发、盒内温度处于恒定时,再将天线口面移到定标盒上。但由于恒温能力有限,加上天线所处环境的温差较大,应在天线物理温度分布改变不大时,迅速记下辐射计的输出,并迅速沿天线对天线物理温度进行多点测量,然后将其平均值近似作为天线的物理温度。以某喇叭天线为例,测出喇叭口部的温度为 273K,喇叭中部的温度为 299K,喇叭根部的温度接近于室温 304.6K,由此可得 T_{0A} 近似为

$$T_{0A} = (273 + 299 + 304.6)/3 = 292.2K \quad (15)$$

测出测试地点的大气压强,并将(14),(15)式以及由辐射计测量到的 T_{IN} 代入(11)式,即可求得小口径天线的辐射效率。

(b) 大口径天线辐射效率的测量 利用微波辐射计测量大口径天线的辐射效率的主要困难是寻求一个均匀分布且视在温度已知的展源。如果在天线主瓣和几个相邻的旁瓣所张的立体角内,此展源的视在温度 $T_{AP}(\theta, \phi)$ 为一常数则天线指向这个展源就可得到一个测量点。最方便的方法是把辐射计指向天顶,由(2)式可知,此时的天线温度为

$$T_A = \frac{\iint_{\Omega_A} T_{skv}(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega}{\iint_{\Omega_A} F_n(\theta, \phi) d\Omega} \quad (16)$$

在晴朗的天气,天空温度 $T_{skv}(\theta)$ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内基本不变。因此(16)式可简化为

$$T_A = T_{skv}(\theta = 0^\circ) \quad (17)$$

确定天顶的天空温度可采用两种方法:一是理论计算。根据当地的气象资料用理论公式计算天空温度。图 4 即为 0.1 到 100GHz 频率范围内,几种天顶角下的天空温度的理论计算值。在计算中假定天线指向远离银河中心。另一种方法是实验。用同一频率已经定标的辐射计实测出天顶温度。或者将大口径天线换成小口径角锥喇叭天线,经定标后测出天顶温度,然后换成大口径天线指向天顶进行测量。

当辐射计天线指向天顶时,要避免其它高温噪声源的能量从旁瓣进入天线。如果天

线的旁瓣、后瓣电平低于主瓣 30~40dB, 测量地点可选在山顶或当地的高层建筑物上; 如果天线的旁瓣、后瓣电平只低于主瓣 20dB 左右, 最好把辐射计及其天线放在一个大尺寸的金属桶内, 使得远离天顶角的天空温度不能进入天线。当天线指向天顶时, 从辐射计输出可根据定标直线求得对应的 T_{IN} 。 $T_{0A}(=T_0)$ 仍取环境温度, 且由实测而定。

(2) 传输线与天线不匹配且具有损耗时的情况 由(12)式可知, 要测出此时的天线辐射效率, 除根据天线口径大小按与匹配时相同的方法测出相应的 T_0, T_A, T_{0A}, T_{IN} 外, 还需测出接收机向天线方向传输的噪声温度 T_R 和天线输入端的电压驻波比 ρ , 然后根据传输线的 S 参数和(6)~(7)式分别算出 $|R_A|^2, \alpha_m$ 和 γ 。最后将所得数据代入(12)式即可求出天线的辐射效率 η_i 。为了测出 T_R , 必须把接收机输入端用短路板封闭, 读出此时的输出电压, 然后由接收机定标直线查出相应的输入噪声温度, 这就是 T_R 。

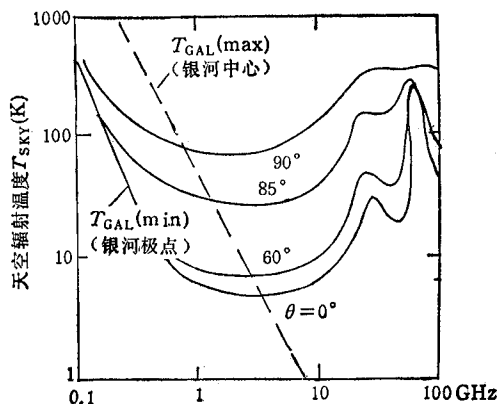


图 4 在 0.1~100GHz 的频率范围内, 几种天顶角下的天空温度的计算值

四、实验结果

利用上述测量方法, 我们测试了一种 L 波段机载遥感辐射计天线的辐射效率, 其测试

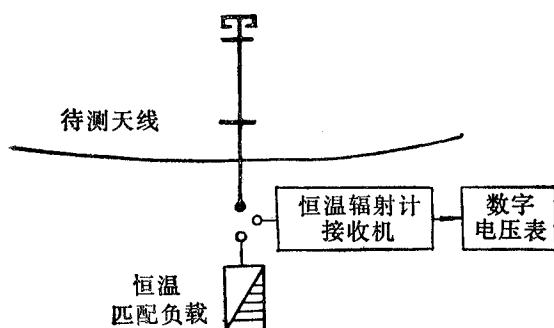


图 5 实验测试天线和测试装置方框图

框图示于图 5。该天线由折合振子馈电, 这样可提高它的输入电阻。在折合振子的一边放置两个不等间距的半波振子作为引向器, 并在引向器前面放置一直径为 1m 的折线型反射圆盘, 以增强天线的方向性。测试中所使用的辐射计为脉冲噪声注入式零平衡狄克辐射计。

在测试过程中, 首先对辐射计接收机进行定标, 即先测出匹配负载的物理

温度 $T_h = 308\text{K}$ 和辐射计的输出电压 $V_h = 0.392\text{V}$, 再将匹配负载置于液氮内, 测出气压 $p = 743\text{mmHg}$, 由(14)式算出 $T_c = 77.17\text{K}$, 测出对应的 $V_c = 3.718\text{V}$, 代入(13)式可求得定标直线方程为

$$T_{IN} = 335.21 - 69.40V_0 \quad (18)$$

测出天线输入端的电压驻波比 $\rho = 1.6$, 传输线长度 $l = 0.5\text{m}$, 其损耗为 0.5dB/m , 算出 $|R_A|^2 = 0.053$, $\alpha_m = 0.953$, $\gamma = 0.938$, 然后将接收机与天线相接, 并将天线对准天顶, 读出此时接收机的输出电压 $V_0 = 3.5\text{V}$, 代入(18)式可得 $T_{IN} = 92.31\text{K}$; 再测出 $T_R = 338\text{K}$; 最后由图 4 查得 $T_A \approx 5\text{K}$ 。由于此时 $T_{0A} = T_0$, (12)式可简化为

$$\eta_l = \frac{T_R - \alpha_m(T_R - T_0) - T_{IN}}{\alpha_m \gamma(T_0 - T_A)} \quad (19)$$

将所得之 $T_h(=T_0)$, $|R_A|^2$, T_A , T_R , T_{IN} , α_m 和 γ 之值代入(19)式, 可得天线辐射效率 $\eta_l \approx 0.80$ 。本实验已于 1988 年 8 月在武汉、杭州、宁波等地反复进行过多次, 所得效率之值在 0.76~0.82 之间波动, 其相对波动范围约 3.8%。

五、结 束 语

本天线与辐射计接收机一起, 曾首次完成杭州湾海域海水含盐度机载遥感试验, 航空遥感海水盐度的精度达 1.28~2.05‰, 优于目前国际上 3‰的精度, 达到了国际先进水平。可见此种天线的辐射效率、主波束效率以及整个辐射计的性能指标都较高, 这说明此种测试天线辐射效率的方法所得到的数据是较准确的。

值得注意的是本文所介绍的方法对那些具有较高的主波束效率, 低旁瓣、后瓣电平的天线尤为适用, 而不宜用于测量那些具有较高旁瓣、后瓣电平或全方向性等天线的辐射效率, 因为这将会引入较大的测量误差。

参 考 文 献

- [1] 林昌禄, 天线测量, 国防工业出版社, 1981 年, 第三章、第四章。
- [2] [美] F.T. 乌拉比, R.K. 穆尔, 冯建超著, 侯世昌等译, 微波遥感, 第一卷, 微波遥感基础和辐射测量学, 科学出版社, 1988 年, 第四章、第六章。
- [3] 吴培亨, 微波电路, 科学出版社, 1980 年, 第三章。

MEASURING ANTENNA RADIATION EFFICIENCY WITH MICROWAVE RADIOMETER

Liao Lianchang Lin Shijie

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

Abstract The mathematical expression of the antenna radiation efficiency which is measured using radiometer is derived, then the methods for measuring antenna radiation efficiency and the experimental results are presented.

Key words Microwave radiometer; Antenna radiation efficiency; Antenna measurement