

内 容 提 要

用射电天文方法测量天线参数不需特殊场地可满足远场条件，且不受 D/λ 的限制。是目前测量大型天线唯一行之有效的方法。其特点是受地面反射和环境影响很小，测量增益时这些影响可消除。这种测量方法具有精度高、设备简单和操作方便等优点。它可以高精度地测量用经典法所无法测量的参数，如天线噪声温度、优值、轴系校准、指向校准和度盘校准等。本文主要介绍用射电天文方法测量天线参数的基本原理、方法、设备和必要的天文知识，并列举了大量测量实例和数据，供读者参考。

本书可作为从事天线、雷达、通讯、电测、无线电和射电天文等专业的学生、研究生和工程技术人员的参考书。

天线参数的射电天文测量

袁惠仁 彭云楼 薛吟章 著

责任编辑 王昌喜

电子工业出版社出版（北京市万寿路）

昊海印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 印张：8 字数：180 千字

1986 年 5 月第 1 版 1987 年 10 月第 1 次印刷

印数：1750册 定价：2.00 元

统一书号：15290·122

ISBN7-5053-0066-0/TN 39

序

袁惠仁、彭云楼和薛吟等同志所著《天线参数的射电天文测量》一书，是他们在多年讲学和科学研究的基础上整理出来的一本较好的书，它系统地介绍了用射电天文方法测量天线参数的基本原理和方法，并介绍了必要的天文基础知识。

天线测量中一个重要问题是地面反射和环境的影响，使用射电天文法测量天线就可避免或全部消除这种影响，使天线测量的精确度大大提高，而且可以节省许多测试设备，是一种先进的测量方法。

作者对这种方法作了系统的研究和大量的测量工作，并积极在国内推广。业已证明，这种方法不仅对大型天线，而且对中、小型天线的测量都是有效的，能得到较为准确的结果，而且简单可行。目前国内尚未出版过这类

后 记

随着近代工业、交通运输业的发展,噪声问题日益引起人们注意。就其性质来讲,噪声属于环境物理污染的一种,它和空气污染、水污染和土壤污染等环境化学污染一起,构成了对人类生活的危害。目前,噪声污染已成为国际公害之一。

近年来,我国相继颁布了《工业企业噪声卫生标准》(试行)和《城市区域环境噪声标准》,控制噪声已逐渐为人们所重视,并把它列为环境保护和劳动保护的一个重要方面。消除噪声危害,创建舒适的声学环境,是生活在现代文明社会中的人的共同要求,也是四化建设进程中需要重视的一项重要任务。有鉴于此,作者根据个人在噪声控制方面的研究成果,并广泛收集了国内外有关资料,编著此书,供噪声控制研究人员和噪声控制设备的设计、制造人员和广大使用者参考。

本书介绍的有关噪声及噪声控制的理论,力求做到系统完整、简明扼要和便于读者查阅,关于实用技术,本书列举了大量的设计计算方法和降低噪声效果显著的应用实例,读者可根据需要直接查阅参考。

本书承陈绎勤教授,向斌南高级工程师审查部分章节,并提出许多宝贵意见,在此致以谢意。

马大猷教授为本书写了序言,特表示衷心的感谢。

书中不妥之处,请广大读者提出意见。

著 者

1984年于北京

前 言

目前，随着雷达技术、空间探测、卫星通信、中继通信和射电天文学的发展，需要研制孔径和工作波长之比 D/λ 为几十、几百甚至几千，工作波长为米波、分米波、厘米波和毫米波高效率天线。对于这类天线不仅遇到安装和运输上的困难，而且如何保证这类天线有较高的表面精度和可靠的刚度以及如何测量这类天线的电参数和机械性能都遇到了一系列困难，特别是如何精确测量这类天线的增益、优值、噪声温度、轴系校准、指向精度和指向跟踪精度等电参数和机械性能仍是无线电工程测量中尚未圆满解决或是无法解决的经典课题。近年来，由于天体射电源绝对测量的成果为测量这类天线的电参数和机械性能提供了比较理想的“发射机”。自六十年代以来，一些射电源如仙后座A（CasA）、金牛座A（TauA）、天鹅座A（CygA）、室女座A（VirA）、猎户座A（OriA）和月亮等的强度、角径和位置等参数已被精确测定。而且它们的数目众多，在空中覆盖区域广。其中，对仙后座A、金牛座A、天鹅A和月亮的研究特别仔细，除月亮外已被确定为天线增益测量的标准源。用射电天文方法测量和校准天线的参数是目前较为理想的方法，它具有测量简单、操作方便和精度高的特点，已被广泛采用，而且日益被人们所重视，特别对大型天线参数的测量，它是目前唯一行之有效的简单可靠的方法。

用射电天文法测量天线参数，无疑能满足远场要求，只要射电源选得适当，并不受 D/λ 的限制，因此用该方法测量

大型天线的优点是一目了然的。用该方法测量中小型天线同样也是有效的。该方法的特点是地面反射和环境对测量的影响都很小，在测量增益时这些因素的影响都可以完全消除。与经典法相比，它可以测量经典法无法测量的一些参数，如天线噪声温度、优值、度盘校准、轴系校准、指向校准和指向跟踪校准等。该方法的另一个特点是不要特殊的测试场地，这一点在军事上特别有价值，对于那些不具备测试场地的使用或研制天线的单位提供了测量和检验天线的有效手段。

从我们多年的实践中，证实该测量方法不仅具有测量精度高而且具有测量数据量丰富和容易掌握测量技术等优点。我们在此介绍这方面的内容，以期读者在实际中使用。由于作者水平有限，书中难免有不少缺点和错误，欢迎读者批评指正。

本书共分六章，第一章由薛吟章同志完成，第二、三、四、五章由袁惠仁同志完成，第六章由彭云楼同志完成。由袁惠仁同志统一全稿。

第一章由莫纯昌同志审校，第二、三、四、五章由徐之材同志审校，第六章由肖耐园同志审校。

在本书写作中得到茅于宽、章文勋、罗先汉、江淑英和魏双林等同志的热忱帮助和兄弟单位的大力支持，在此一一表示感谢。

作者

1984·6 于南京大学

目 录

第一章 射电天文测量设备	1
§1.1 总功率接收机.....	1
§1.1.1 总功率接收机的工作原理.....	1
§1.1.2 接收机的灵敏度.....	2
§1.2 调制型辐射计.....	4
§1.2.1 狄克 (Dicke) 型辐射计的工作原理.....	5
§1.2.2 调制型辐射计的技术指标.....	6
§1.2.3 主要部件的工作原理及调试方法.....	10
§1.2.4 主要技术指标的测试.....	22
§1.3 校准装置.....	25
§1.4 相关干涉仪.....	25
§1.4.1 双天线干涉仪的工作原理.....	26
§1.4.2 相关干涉仪的主要组成部分.....	28
§1.4.3 相关干涉仪在天线参数测量中的应用.....	31
参考文献.....	33
第二章 天线增益测量	34
§2.1 引言.....	34
§2.1.1 测量场地的限制.....	34
§2.1.2 地面影响.....	34
§2.1.3 其它限制.....	35
§2.2 基本公式.....	36
§2.3 系统噪声温度和最小可测信号.....	40
§2.3.1 系统噪声温度.....	40
§2.3.2 最小可测信号.....	41

§2.4	Tas和Y的测量	45
§2.4.1	Tas的测量	45
§2.4.2	Y的测量	48
§2.5	大气吸收修正因子K ₁ 的测量	50
§2.5.1	大气吸收的一般表达式	51
§2.5.2	Γ_0 的测量	56
§2.6	射电源角扩展修正因子K ₂ 的测量	68
§2.6.1	K ₂ 的近似计算	68
§2.6.2	K ₂ 的测量	70
§2.6.3	用宇宙射电源为校准源时K ₂ 的确定	82
§2.7	K ₃ 、K ₄ 和K ₅ 的确定	87
§2.7.1	射电源流量密度随时间变化的修正因子K ₄	87
§2.7.2	射电源偏振流量修正因子K ₅	88
§2.7.3	流量随频率变化的修正因子K ₃	89
§2.8	线性范围和线性的测量	89
§2.8.1	线性区的测量	91
§2.8.2	线性误差的测量	92
§2.9	微波校准基准	93
§2.9.1	气体放电管噪声发生器	94
§2.9.2	低温负载	94
§2.9.3	冷、热负载	95
§2.9.4	xZ-25冷热源	96
§2.9.5	微波黑体	96
§2.10	积分时间	97
§2.11	射电源的选择	98
§2.12	误差分析	100
§2.13	测量举例	102
§2.14	总结	111
	参考文献	114

第三章 天线功率方向性图的测量 117

§3.1 天线噪声温度表达式	117
§3.2 功率方向性图的测量	120
§3.2.1 满足点源条件时功率方向性图的测量	121
§3.2.2 不满足点源条件时功率方向性图的测量	121
§3.2.3 天线副瓣电平的测量	127
参考文献	146

第四章 天线的电轴和指向校准 147

§4.1 天线的电轴校准	147
§4.1.1 轴系校准	147
§4.1.2 馈源最佳位置的调整	153
§4.1.3 度盘校准	154
§4.1.4 电轴校准	155
§4.2 天线指向校准	160
§4.2.1 方位轴偏离天顶	161
§4.2.2 方位轴和俯仰轴不垂直	163
§4.2.3 准直误差	164
§4.2.4 重力变形	165
§4.2.5 温度引起天线的变形	165
§4.3 指向跟踪校准	171
参考文献	172

第五章 天线噪声温度、主波束效率

和表面精度的测量 173

§5.1 天线噪声温度的测量	173
§5.1.1 噪声注入法	174
§5.1.2 Y因子法	180
§5.1.3 讨论	182

§5.2 主波束效率 η_B 的测量	182
§5.2.1 大气辐射法	183
§5.2.2 高斯函数近似法	186
§5.3 表面精度 e_f 的测量	187
§5.3.1 天线表面不规则相关半径 r_s	187
§5.3.2 表面精度 e_f	188
参考文献	189
第六章 天文基础知识	190
§6.1 地球的运动和天球坐标系	190
§6.1.1 天球	190
§6.1.2 地球自转和天球的周日旋转	191
§6.1.3 地球公转和星空的周年变化	192
§6.1.4 地理坐标	194
§6.1.5 天球坐标系	197
§6.2 时间的计量	204
§6.2.1 恒星时	206
§6.2.2 真太阳时和平太阳时	207
§6.2.3 地方时、世界时和区时	210
§6.2.4 恒星时单位和平时单位的换算	217
§6.2.5 恒星时时刻和平时时刻的换算	220
§6.3 射电源	225
§6.3.1 用于天线测量的射电源	225
§6.3.2 射电源位置的计算	238

符号表

第一章 射电天文测量设备

本章主要介绍用于天线参数射电天文测量设备的基本工作原理、主要的性能指标和调试方法。

§1.1 总功率接收机

射电天文测量设备实际上就是一架用途特殊的接收机，它是用来测量和记录微弱射电信号的仪器。由于天体的射电辐射具有各种不同的特征，例如，有的是连续谱，有的是线谱，有的是快速变化的脉冲信号谱等。为了测量这些不同性质的射电信号，需要设计各种不同类型的接收机系统。例如要测量射电线谱的信号，就要设计谱线接收机，但无论是那种类型接收机，它们的许多特性都可以从总功率接收机的相应特性中演变出来，因此在这一节中主要介绍总功率接收机。

§1.1.1 总功率接收机的工作原理

总功率接收机是直接测量天线输出功率的接收机。应用最广泛的是超外差式接收机，如图 1-1 (a) 所示，图 1-1 (b) 是它的等效电路。

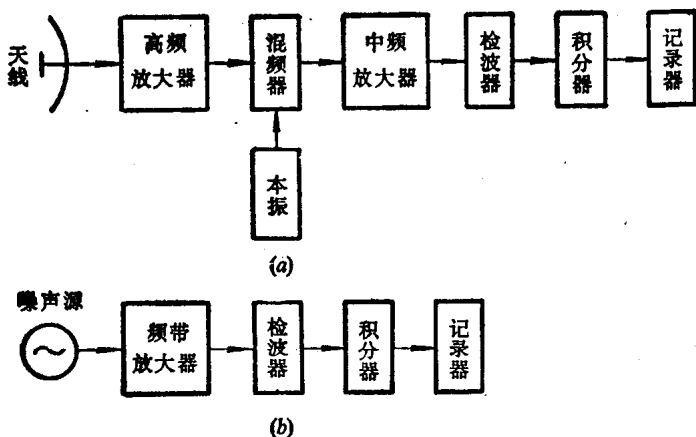


图 1-1 总功率接收机

(a)总功率接收机的方框图

(b)总功率接收机的等效方框图

接收机检波器前的几部分可看作一个通带放大器，它具有均匀连续谱的输入噪声信号中选取以中心频率为 f_0 ，带宽为 Δf 的那部分的信号加以放大。检波器特性通常采用平方律检波法，它的输出电流正比于输入电压的平方，即正比于输入功率，因此检波输出电流就可以反映所接收的噪声信号的功率。若用标准噪声源的输出信号代替天线接收的信号，就可以对记录仪表（如记录仪）进行刻度校准，用以测量天线接收到的噪声功率。积分器的作用是为了平滑检波器的输出电流。

§1.1.2 接收机的灵敏度

接收机的灵敏度主要受两方面因素的限制：一是接收机的系统噪声；二是接收机系统的增益稳定性。

由于天体的射电辐射具有噪声的特性，在接收机的通带

内射电辐射谱密度不变；而且天线接收到的射电辐射信号又是非常微弱的，往往比接收系统的机内噪声弱很多，因而接收系统必须具有从强大的附加噪声背景中检出和测量变化十分微小的噪声信号的能力，这就要求接收机具有很高的灵敏度。在射电天文学领域内，通常用绝对温度K来定量地表征灵敏度。也就是说接收机的灵敏度就是可检测的天线温度的最小增量。也可用噪声起伏的中误差来表示接收机的灵敏度，接收机灵敏度的普遍表达式为：

$$\Delta T_{\text{amin}} = M \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{\Delta f \tau}} = M \frac{T_{\text{af}} + T_{\text{r}}}{\sqrt{\Delta f \tau}} \quad (1-1)$$

式中 M ——灵敏度常数；
 Δf ——接收机的等效噪声带宽；
 τ ——积分时间常数；
 T_{sys} ——系统噪声温度；
 T_{r} ——机内噪声温度在接收机输入端的等效噪声温度；
 T_{af} ——天线输出端的等效噪声温度。

式(1-1)中讨论的灵敏度是理想的情况，即假定接收机性能非常稳定，只考虑噪声起伏的影响推导出来的，但实际上由于各种因素的影响，例如元件老化，温度效应，电源波动等使接收机性能不可能非常稳定，主要表现在增益的变化、带宽 Δf 的不稳定等方面，使通过接收机的噪声功率变化。在接收机系统中增益和带宽等的变化是随机的（通常把带宽等变化的效果等效为增益的变化，为了讨论方便起见，只考虑增益起伏的影响），用 $\Delta g/g$ 表示增益的不稳定度，考虑到它的变化是随机的，则接收机输出的均方根起伏正比于：

$$T_{sys} \cdot \left\{ \frac{1}{\Delta f \tau} + \left(\frac{\Delta g}{g} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (1-2)$$

这时接收机的灵敏度为：

$$\Delta T_{amin} = M T_{sys} \left\{ \frac{1}{\Delta f \tau} + \left(\frac{\Delta g}{g} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (1-3)$$

由式(1-3)可见，由于增益不稳定，严重地降低了接收机的灵敏度，例如 $T_{sys} = 1000\text{K}$ ， $\Delta f = 20\text{MHz}$ ， $\tau = 5\text{s}$ ， $M = 1$ ，按式(1-1)计算灵敏度得：

$$\Delta T_{amin} = \frac{T_{sys}}{\sqrt{\Delta f \tau}} \approx \frac{1000}{\sqrt{2 \times 10^7 \times 5}} = 0.1\text{K}$$

如果增益变化了1%，按式(1-3)计算灵敏度得1K，如果要使接收机灵敏度接近式(1-1)所达到的理想灵敏度，就要求 $(\Delta g/g)^2 \ll 1/\Delta f \tau$ ，在上例中，要求 $\Delta g/g$ 小于 10^{-4} ，这对接收机的稳定性提出了非常苛刻的要求，实际上一般的接收机系统很难达到，因此发展了一些专门技术来减小增益变化对测量的影响。

§1.2 调制型辐射计

在射电天文测量中，一般把测量天体辐射信号的接收系统称为辐射计。

天线接收到的噪声信号的频谱和接收机机内的噪声频谱一样。总功率接收机的主要缺点是无法把它们区分开来，所以机内噪声和噪声信号一起出现在接收机的输出端。当接收机增益不稳定时，就使噪声信号的测量结果产生误差。

如果能把噪声信号和机内噪声区分开来，那么接收机增益变化对测量误差的影响就能显著地减小，用调制型辐射计进行测量，则可以实现这种设想。

调制型辐射计的原理示意图如图 1-2 所示。主要是在接收机输入端加一“开关”，以每秒几十至几百次的速率将天线接收的待测信号 T_{af} 与已知的参考信号 T_c 轮流地接入接收机的输入端，实现对待测信号的幅度调制。输出功率正比于 $(T_{af} - T_c)$ ，调制型辐射计由于增益不稳定引起的输出起伏为 $\Delta g/g (T_{af} - T_c)$ ，而 $(T_{af} - T_c) \ll (T_{af} + T_R)$ ，所以大大地减小了接收机增益不稳定对测量的影响。如果调节 T_c ，使它总是等于 T_{af} ，则可以完全消除增益不稳定产生的影响，这就是所谓“平衡调制辐射计”。

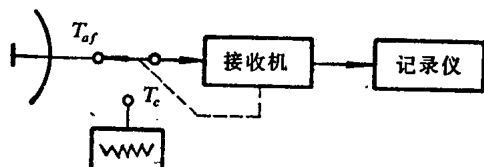


图 1-2 调制型辐射计原理示意图

§ 1.2.1 狄克 (Dicke) 型辐射计的工作原理

调制型辐射计中最基本的，应用最广泛的一种是狄克型辐射计 (1)，其他类型的辐射计可参考资料 [2、3]。狄克型辐射计的工作原理见图 1-3。

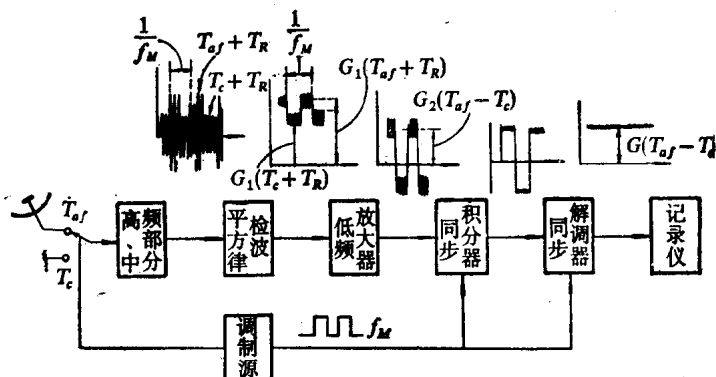


图 1-3 狄克型辐射计的原理图

图中 G_1 是辐射计检波前的增益；
 G 为与辐射计总增益成比例的常数；
 G_2 为辐射计的总增益。

天线接收到的射电辐射信号和比较源信号（即已知的参考信号）由转换开关（即调制器）交替地接入辐射计输入端，而转换开关由调制源产生的频率为 f_M 的低频方波（正弦波亦可，但灵敏度常数 M 不同）信号控制。如果在调制信号的正半周只让天线输出信号通过，负半周只让比较源信号通过，这样就将天线接收到的射电辐射信号进行了幅度调制。调制后的信号经高频部分和混频器（图 1-3 中未标明）变成 30 兆赫（或 60 兆赫）的中频信号，经平方律检波器检波后，其输出电流与高频调幅波振幅包络的平方成正比，即与输入功率成正比。因此检波电流在 $G_1(T_{af} + T_R)$ 和 $G_1(T_c + T_R)$ 之间变化，它可以分解成一个 $G_1[T_R + (T_{af} + T_c)/2]$ 的直流信号和另一个振幅等于 $G_1(T_{af} - T_c)/2$ 频率为 f_M 的矩形波。这个矩形波分量由宽带低频放大器取出并加以放大。放大的低频信号送入同步积分器，同步积分器的工作由调制源来的参考信号控制。同步积分器实际上是一个窄带滤波器，将噪声和干扰平滑掉，而有用的方波信号无保留地通过，大大地提高了同步解调器输入电压的信噪比。同步积分器输出的“干净”方波信号送至同步解调器。同步解调器的工作受调制源输出的参考信号控制，它输出的直流信号由记录仪或其他终端设备记录下来。当辐射计工作在线性范围内，记录仪读数便反映天线所接收到的射电辐射信号的强度。

§1.2.2 调制型辐射计的技术指标

一、灵敏度和噪声系数

对辐射计灵敏度的要求，视观测对象不同而不同，同时与天线的口径有关。例如天线口径为2米，观测3.2厘米波长的太阳辐射总强度时，要求灵敏度为(1~2)K即可，而用它来观测月亮时，要求灵敏度为0.5K左右。又如用口径为15米的天线，在7.5厘米波长上观测较强的宇宙射电源(如仙后座A、天鹅座A、金牛座A等)时，要求灵敏度为0.25K左右。如果用它来观测更弱的射电源，则要求更高的灵敏度 \ominus 。

从式(1-1)可知，辐射计灵敏度在确定的带宽和积分时间情况下，主要决定于天线噪声温度和辐射计的机内噪声水平，即系统噪声温度 T_{sys} 。一般用噪声系数来表示辐射计的机内噪声水平。噪声系数的定义是：一个线性放大器或接收机输入端信号噪声功率比与输出端信号噪声功率比之比：

$$F_N = \frac{(P_c/P_N)_i}{(P_c/P_N)_o} \quad (1-4)$$

其中 $(P_c/P_N)_i$ 为输入信噪比， $(P_c/P_N)_o$ 为输出信噪比。

若在接收机输入端输入信号功率为 P_{ci} ，其噪声源内阻为 R_i ，在接收机输入阻抗与信号源内阻 R_i 相匹配的情况下，则接收机输入端的噪声功率 $P_{Ni} = kT_o \Delta f$ (其中 k 为玻尔兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/开； T_o 为电阻 R 所处的温度， Δf 为接收机的带宽)。设接收机的输出信号功率为 P_{co} ，输出噪声功率为 P_{No} ，则式(1-4)可写成：

$$F_N = \frac{P_{ci}/P_{Ni}}{P_{co}/P_{No}} = \frac{P_{No}}{P_{Ni}} \cdot \frac{1}{g} \quad (1-5)$$

式中 $g = P_{co}/P_{ci}$ ，为接收机的功率增益； P_{No} 由两部分组

\ominus 以上数据为我们在测量中所用辐射计的技术指标。

成，一部分是信号源内阻 R_i 产生的噪声功率 P_{Ni} 经过放大后得到的，即 $P_{Ni}g$ ，另一部分是机内噪声产生的，用等效输入噪声温度 T_R 表示为 $kT_R\Delta f$ ，这一部分的输出噪声功率为 $T_R\Delta fg$ ，则 $P_{No} = P_{Ni}g + kT_R\Delta fg = kT_0\Delta fg + kT_R\Delta fg = k\Delta fg(T_0 + T_R)$ 。

代入式(1-5)得：

$$F_N = \frac{P_{No}}{P_{Ni}} \cdot \frac{1}{g} = \frac{k\Delta fg(T_0 + T_R)}{k\Delta fgT_0}$$

$$= \frac{T_0 + T_R}{T_0} = 1 + \frac{T_R}{T_0} \quad (1-6)$$

改写为：

$$T_R = (F_N - 1) T_0 \quad (1-7)$$

用噪声系数表示调制型辐射计灵敏度得：

$$\Delta T_{amim} = M \frac{(F_N - 1) T_0 + (T_{af} + T_c) / 2}{\sqrt{\Delta f \tau}} \quad (1-8)$$

噪声系数一般用分贝表示：

$$F_N = 10 \lg \left(1 + \frac{T_R}{T_0} \right) \quad (\text{分贝}) \quad (1-9)$$

我们在测量工作中所用辐射计的噪声系数为(5.7~6.2)分贝。

二、辐射计的线性

为了使输出信号直接表示输入信号功率的大小，要求辐射计输出信号与输入功率成线性关系，否则会对归算和定标带来很大困难，造成较大的测量误差，因而调试辐射计时，总是要把它的线性范围测量出来。对一架辐射计来说，总希望它的线性范围尽量大，我们所用辐射计的线性范围为