

讲座

影响射电天文观测的有害干扰*

徐 祥

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文从理论上推导出射电天文接收机的灵敏度公式,由此估算了射电天文各个波段观测的灵敏度和有害干扰电平的极限值。简述了三种类型的有害干扰和减小干扰影响的技术措施。

一、概 述

射电天文学是通过接收宇宙中射电源的无线电辐射,发现宇宙空间的新天体和研究各种天体特性的一门科学。天体的辐射信号大多和接收机的噪声或地球及大气的热辐射一样具有随机起伏的性质。因此,不能根据信号的特点区别它们。况且到达射电望远镜的天体辐射信号非常微弱,一般比系统噪声功率低30dB,有时信噪比只有-60dB或更差。因而外界无线电干扰量值对于射电天文工作能否正常进行起着决定性的影响。本文综述射电天文接收设备的灵敏度和有害干扰电平等问题。

二、射电天文观测系统的灵敏度

1. 灵敏度的定义

射电天文观测系统的灵敏度是指接收机可靠地检测出输入端最小信号的功率的变化^[1]。

接收机的输出功率是输入端总功率的函数(假定在观测期间系统的总增益和其他参数保持恒定)。总功率包括有用信号功率 P_s 和噪声功率 P_N (即热辐射和接收机噪声)。两者都是随机起伏噪声,但有各自的平均功率电平。只要精确地测定这些电平,就可以检测出有用信号。一个稳定随机变量的统计平均值(如噪声功率 P),其测量精确度反比于取样数 N 的平方根。此统计平均值的标准偏差是:

$$\Delta P \sim \frac{P}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

标准偏差 ΔP 即均方误差。减小起伏值 ΔP 使它小于有用信号功率 P_s ,就有可能检测出极微弱的信号。在接收机 Δf 的频带中可以近似看作每秒钟测得 Δf 个样品数。 Δf 乘以观测时间 t (也

1985年12月13日收到。

* 本稿是根据国际无线电咨询委员会(CCIR)1982—1986年度末期会议224—5报告草案编写。

称为积分时间)就是总的取样数 N , 即

$$N \approx \Delta f \cdot t \tag{2}$$

公式(2)代入(1)得

$$\frac{\Delta P}{P} \sim \frac{1}{\sqrt{\Delta f \cdot t}} \tag{3}$$

以上就是射电天文系统基本的灵敏度关系式。

若取比例因子为 $1/\sqrt{2}$ *, 那么灵敏度公式成为

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta f \cdot t}} \tag{4}$$

以上涉及到的 P 和 ΔP 是噪声功率, (4)式同样适合于 P 和 ΔP 是功率谱密度的情况, 此时 ΔP 就是功率谱密度的起伏。噪声起伏也可通过波尔兹曼常数表示成温度的单位

$$\Delta P = k\Delta T \quad P = kT \tag{5}$$

那么, 灵敏度公式以温度表示为

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{2\Delta ft}} \tag{6}$$

其中

$$T = T_A + T_R \tag{7}$$

T_A 是天线噪声温度即宇宙背景、地球大气和地球辐射产生的噪声温度。 T_R 是接收机的噪声温度。

2. 灵敏度的估计

用以上的公式估算了表 1 和表 2 所列的射电天文观测的灵敏度和有害干扰电平^[2]。计算

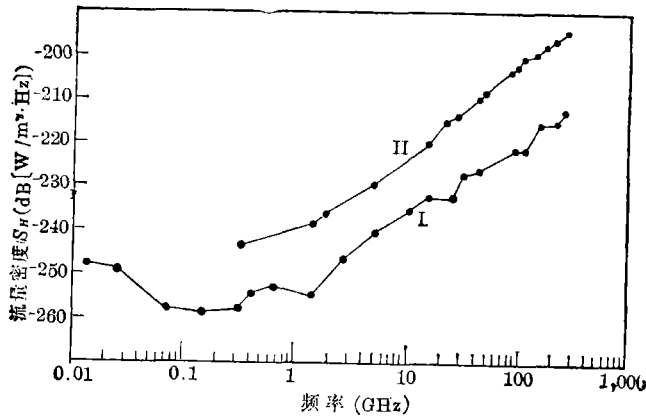


图 1. 有害干扰极限值与频率的关系。

(积分时间 $t=2,000$ 秒)

I — 连续谱
II — 谱线

* 在有的文献著作中这个比例因子随不同的接收和检波方式取不同的数值, 但数值之间差别不大。

表 1** 射电天文连续谱观测的灵敏度和有害干扰电平 (积分时间 2,000 秒)

中心频率* f_0 (兆赫)	假定带宽 Δf (兆赫)	最小天线 噪声温度 T_A (K)	接收机 噪声温度 T_R (K)	系统灵敏度(噪声起伏)		有害干扰电平		
				温 度 ΔT (mK)	功率谱密度 ΔP (dB(W/Hz))	输入功率 ΔP_H (dBW)	功率流密度 $S_H \Delta f$ (dB(W/m ²))	谱功率流密 度 S_H (dB (W/m ² ·Hz))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
13.385	0.05	60,000	100	4,250	-222	-185	-201	-248
25.610	0.120	20,000	100	917	-229	-183	-199	-249
73.8	1.6	1,000	100	14	-217	-195	-196	-258
151.525	2.95	200	100	2.76	-254	-199	-194	-259
325.3	6.6	40	100	0.86	-259	-201	-189	-258
408.05	3.9	25	100	1.00	-259	-203	-189	-255
611	6.0	15	100	0.74	-260	-202	-185	-253
1,413.5	27	10	20	0.091	-269	-205	-180	-255
2,695	10	10	20	0.15	-267	-207	-177	-247
4,995	10	10	20	0.15	-267	-207	-171	-241
10,650	100	12	20	0.05	-272	-202	-160	-240
15,375	50	15	30	0.10	-269	-202	-156	-233
23,800	400	15	50	0.051	-271	-195	-147	-233
31,550	500	18	100	0.033	-269	-192	-141	-228
43,000	1,000	25	100	0.063	-271	-191	-137	-227
89,000	6,000	30	150	0.037	-273	-185	-125	-222
110,500	11,000	40	150	0.029	-274	-184	-121	-222
166,000	4,000	40	150	0.048	-272	-186	-120	-216
224,000	14,000	40	200	0.032	-274	-182	-114	-215
270,000	10,000	40	200	0.033	-273	-183	-113	-213

* 有害干扰电平的计算都用这个中心频率。

注意: 如果积分时间是 15 分钟、1 小时、2 小时、5 小时或 10 小时, 表中相应的数值将分别变化 +1.7、-1.3、-2.8、-4.8 或 -6.3dB。

** 各栏说明。

(1) 射电天文频段中心频率。

(2) 假定的频带宽度等于分配给射电天文的频段的宽度。

(3) 最小天线噪声温度, 包括电离层的温度、地球大气和地面辐射。

(4) 接收机的噪声温度。这种接收机是应用在高灵敏度射电天文观测中性能良好的辐射计系统内。

(5) 总系统灵敏度单位用毫K表示, 由公式(4)计算, 用第(2)栏的频宽及积分时间是 2,000 秒。

(6) 如以上第(5)项所述, 公式 $\Delta P = k \Delta T$ 可表示噪声功率谱密度, 其中 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ (J/K), 表中数值用 ΔP 的对数表示。

(7) 在接收机输入端, 对高灵敏度射电观测有害的功率电平 (ΔP_H) 的存在, 使测量 ΔP 时的误差不大于 10%。 $\Delta P_H = 0.1 \Delta P \Delta f$, 表中数值用 ΔP_H 的对数表示。

(8) 功率流密度。在指定的频带中, 对于各向同性的天线接收系统应产生 ΔP_H 的功率电平。表中数值用 $S_H \Delta f$ 的对数表示。

(9) 谱功率流密度。单位带宽的功率流密度, 对于各向同性天线的接收系统应产生 ΔP_H 的功率电平。表中数值用 S_H 的对数表示。

表 2 射电天文谱线观测*的灵敏度和有害干扰电平(积分时间 2,000 秒)

频 率 f (MHz)	谱线信道 带宽 Δf_c (KHz)	最小天线 噪声温度 T_A (K)	接 收 机 噪声温度 T_R (K)	系统灵敏度(噪声起伏)		有害干扰电平		
				温 度 ΔT (mK)	功率谱密度 ΔP (dB(W/Hz))	输入功率 ΔP_H (dBW)	功率流量密度 $S_H \Delta f_c$ (dB(W/m ²))	谱功率流量密度 S_H (dB(W/m ² ·Hz))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
327	10	40	100	22.1	-245	-215	-204	-244
1,420	20	10	20	3.35	-253	-220	-196	-239
1,665	20	10	20	3.35	-253	-220	-194	-237
4,830	50	10	20	2.12	-255	-218	-193	-230
14,500	150	15	30	1.84	-256	-214	-169	-221
22,200	250	40	50	2.85	-254	-210	-162	-216
23,700	250	40	50	2.85	-254	-210	-161	-215
43,000	500	25	100	2.80	-254	-207	-153	-210
48,000	500	30	100	2.91	-254	-207	-152	-209
88,600	1,000	30	150	2.85	-254	-204	-144	-204
98,000	1,630	40	150	3.00	-254	-204	-143	-203
115,000	1,000	50	150	3.16	-254	-204	-141	-201
140,000	1,500	40	150	2.45	-255	-203	-139	-200
178,000	1,500	40	150	2.45	-255	-203	-136	-198
220,000	2,500	40	200	2.40	-255	-201	-133	-197
265,000	2,500	40	200	2.40	-255	-201	-131	-195

* 此表没有列出所有的谱线, 仅仅是频谱中具有代表性的。

注意: 如果积分时间是15分、1小时、2小时、5 小时或10小时表中相应的数值将分别变化+1.7、-1.3、-2.8、-4.8 或-6.3dB。

(1) 谱线的频率。

(2) 谱线接收机信道带宽, 这个带宽是谱线观测中典型的信道宽度。

(3) 最小天线噪声温度。包括电离层温度, 地球大气和地面辐射。

(4) 同表1(4)。

(5) 总系统灵敏度单位以毫K表示, 按公式(4)计算, 用第(2)栏假定的信道宽度, 积分时间是2,000秒。

(6) 同表1(6)。

(7) 同表1(7)。

(8) 功率流密度, 一个谱线信道对于各向同性的接收天线系统应产生 ΔP_H 的功率电平。表中数值以 $S_H \Delta f_c$ 的对数表示。

(9) 谱功率流量密度, 是每赫兹的能流, 一个谱线信道对于有各向同性天线的接收系统应产生 ΔP_H 的功率电平。表中数值以 S_H 的对数表示。

时假定观测时间(或积分时间)都是2,000秒。表1(连续谱观测)中, Δf 是指定的射电天文频段的带宽。表2(谱线观测)中 Δf 是谱线系统典型的信道宽度(约相当于3,000米/秒的视向速度)。

干扰电平定义为由于这个电平的介入使测量 ΔP (或 ΔT)时有10%的误差, 即

$$\Delta P_H = 0.1 \Delta P \Delta f \quad (8)$$

这个 ΔP_H 就是表1和表2列出的有害干扰电平。

有害干扰也可用到达天线的功率流量密度表示, 可以是总的频带宽度, 也可以是每赫兹带宽的谱功率流量密度 S_H 。为简便起见, 假定干扰到达的天线是增益为1的各向同性的天线

(其有效面积是 $c^2/4\pi f^2$, 其中 c 是光速, f 是频率)。如果天线增益是别的数值, 表中所给的干扰电平值要作适当的修正。 $S_H\Delta f$ 的单位是 $\text{dB}(\text{W}/\text{m}^2)$, 可从 ΔP_H 加上

$$20 \log f - 38.6 \quad \text{dB} \quad (9)$$

导出。其中 f 的单位是MHz。那么, 再减去 $10 \log \Delta f$ 就可以得到 S_H 的数值。

图 1 是用图表示表 1 和表 2 中有害干扰电平和频率的关系。因为在不同的频段有不同的带宽, 所以曲线不平滑。

表中所列的灵敏度和有害干扰电平是假定积分时间为2,000秒。实际上用在射电天文观测的积分时间范围很宽, 因连续谱单天线的设备性能优良, 观测用2,000秒比较合理, 但一般采用的积分时间要高一个数量级, 谱线观测很少用2,000秒的积分时间。相关频谱仪的应用更加长了积分时间。观测谱线通常要持续几个小时。最有代表性的是连续10个小时的观测, 此时表 2 中的灵敏度将提高6dB。

射电天文接收系统对宽频带辐射的灵敏度随频宽的增加[公式(4)和(6)]而提高, 虽然噪声功率增加, 但信号也是宽频带噪声。信噪比是常数, 与频带宽度没有关系。然而, 频宽增加, 判断信号的准确性会改善 $\sqrt{\Delta f}$ 的因子, 故灵敏度相应提高。

从公式(4)和(5)看来, 要达到人们期望的灵敏度似乎需要延长观测时间。实际上射电天文观测的灵敏度总是要受到限制的; 例如, 接收机的稳定性及观测者的耐心。表 1 和表 2 选用的频宽和积分时间给出的灵敏度数值使得其他因素不起重要影响。可是这些灵敏度电平并不是极限值。目前已投入观测的很多性能优异的设备的灵敏度超过了表中所给的数值。

除了外界无线电辐射的干扰, 射电源的辐射也影响着观测的灵敏度。这些源的谱功率流量密度超过表 1 的数值。太阳就是最强的辐射源, 因此, 有的观测只能在夜间进行。有的虽可在白天观测, 但要避开太阳活动期, 特别是工作频率低于200MHz时。38MHz 以下, 木星也可能超过极限值, 在这个频率, 木星是一个偶现辐射射电源, 仅仅在可以精确断定的一个自转周期的百分之几的时间内强辐射, 所以可以避开这个辐射期。

频率在1GHz以下, 许多射电源辐射强度超过表 1 的谱功率流量密度。这些源的坐标都已确定, 辐射强度几乎不变, 所以可在处理观测资料时, 特别是在高灵敏度观测时, 除去它们的影响。地面上各种正常的无线电发射设备的低电平干扰都有一定的位置、流量密度和频谱。倘若干扰源的位置、强度等参量随时间变化很大, 那么就无法消除它们的影响。

3. 观测灵敏度

可用表 1 和表 2 的灵敏度数值来比较射电观测设备是否具有高灵敏度性能。这些灵敏度的量值要比其他用途的无线电设备, 例如通信卫星的地面接收系统高几个数量级。

表 3 观测结果和表1、表2的有害干扰极限值比较

频率(GHz)	谱线和连续谱	观测的谱功率流量密度 ($\text{dB}(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$)	有害极限值 ($\text{dB}(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$)	参考文献
2.7	连续谱	-283	-247	[3]
5.0	连续谱	-293	-241	[4]
1.42	谱线(中性氢)	-283	-239	[5]
10.5	谱线(氦85 α)	-279	-229	[6]

表 3 列举了近期著作中发表的几个射电天文观测设备,其中包括美国的甚大天线阵对若干连续谱和谱线所作的高灵敏度观测。目前世界上已广泛应用表 1 和表 2 给出的有害干扰电平数据。如果干扰强度超过了它,高灵敏度射电观测就会毫无价值。

今后,尽管接收系统必定还会逐步改进,但只要进行常规观测的设备其灵敏度稍优于表中所给的数据,在七、八年内还能适用。看来在低频端接收系统的改进主要不在于噪声温度,频率低于 150MHz 时,总噪声温度中接收机的噪声并不重要。在射电天文工作使用的频谱高端,接收机技术的改进影响较大,如果 30GHz 以上的频率噪声温度能限制在 10K,毫米波段的灵敏度将改善 6dB。

三、干 扰

1. 有害干扰的类型

有害干扰可分成三种主要类型。

第一类:使接收机进入非线性工作状态酌强干扰,有时甚至烧毁灵敏的前置放大器。

幸而这类干扰极少,不会来自正常的电波发射。但有时低空飞行器的雷达会损坏射电天文接收系统;

第二类:易于辨认的较强干扰。

一般这种干扰的功率比所接收的信号源功率较强。这类干扰存在时所得的资料毫无使用价值;

第三类:十分低的电平干扰,干扰和信号噪声比小于 -20dB ,因此无法识别。

为了收到微弱的射电源信号,需要长的积分时间,这样,干扰信号就被掩盖了。存在这种类型干扰的资料引出的结果当然是错误的,并且这种错误还不为人们所认识。因此,低电平干扰是最有害的,它使人们不能鉴别出射电源的真实性质,反而有可能作出不正确的结论。

2. 减小干扰的技术方法

射电天文工作者为了减小干扰对观测的影响,在设计和制作接收系统时曾经用过很多方法,除了在设计天线时尽可能降低天线场强方向图旁瓣的电平响应,以防止干扰从旁瓣进入以外,还有以下一些措施,但是它们的作用都有限,而且必然导致观测时间的增加。

(1) 滤波

用带通滤波器可以抑制接收频带以外的干扰。因为中频滤波器频率低,选择性能好,容易制作,对灵敏度要求不高的双边带辐射计可以在中频部分滤波。对于高灵敏度或单边带接收系统,除中频滤波外,在高频部分也需要滤波。滤波器频带窄并有插入损耗,不仅损失了一部分接收的信号能量,还增加了系统的噪声温度。如果把滤波器放在接收机的输入端,抑制带外干扰的效果就更显著。可是,灵敏度降低的因子将更大。

(2) 观测技术

有时可用特殊的观测方式减小干扰的影响。倘若干扰只是偶尔出现,可对观测目标重复测量多次。在干扰长时间存在的情况下,观测时让天线的指向时而对准射电源,时而又离开

它。这两种方式都假定干扰的强度和方向不变(实际上, 干扰源的频谱、强度和方向通常随着时间的变化非常复杂), 所以这种方法也不适宜于观测变源。

(3) 资料处理

在射电天文观测中几乎没有办法减小十分低的电平干扰影响。只有准确掌握干扰源的特点, 例如脉冲雷达有规律的间歇性发射, 才能在处理资料时除去它的影响。在观测射电源连续谱时, 如果仿效谱线接收机的结构, 用一系列频率紧挨着的信道组成需要接收的频带宽度, 这样遇到有窄带干扰就能在处理资料时鉴别出来。

由两个以上的天线组成的干涉仪或综合孔径天线系统抗外界干扰的能力比较强, 这是因为同一干扰源的电磁波到达每个天线时的入射角、时间和强度不同。甚长基线干涉仪(VLBI)的天线距离有时在数千公里以上, 受到干扰的条件很不一样。但必须注意到在VLBI观测时, 倘若外界干扰造成其中一个天线接收系统所得资料不能使用, 那么整个观测实验就可能失败。

综上所述, 高灵敏度射电望远镜的观测面临着外界无线电电磁波干扰的严重威胁。为了使观测设备能正常工作, 在设计制造射电天文接收系统时, 必须考虑有效地减小干扰影响的措施。另一方面, 近年来空间技术的发展导致天空中飞行器数目日趋增多, 如果其带外电磁波辐射进入射电天文工作波段, 将对射电天文研究造成很大的损害, 因此射电天文观测工作要求世界范围的保护。希望在设计各种无线电设备的发射机时, 要注意到严格抑制带外频谱电磁波辐射的功率电平。

参 考 文 献

- [1] W. N. 克里斯琴森等著, 射电望远镜(中译本), 科学出版社(1977).
- [2] Interference Protection Criteria for The Radioastronomy Service, Documents, CCIR Study Groups, Period 1982—1986, The Final Meeting of Study Group 2, Draft Report 224—225.
- [3] Wade, C. M. and Hjelling, R. M., *Ap. J.*, 163 (1971), L105—L106.
- [4] Weiler, K. W. et al., *Ap. J.*, 243 (1981), L151—L106.
- [5] Giovanelli, R. et al., *Ap. J.*, 247 (1981), 383—402.
- [6] Higgs, L. A. et al., *Ap. J.*, 84 (1979), 77—85.

(责任编辑林一梅)

Harmful Interference in Radioastronomy Observations

Xu Xiang

(Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Abstract

The sensitivity equations of radiometer have been derived theoretically, from which the sensitivities and harmful interference levels for radioastronomy observations in most allocated bands are evaluated. Three types of interference and interference reduction techniques are discussed in general.