

## ITU-R SA.1157-1建议书

## 深空研究的保护标准

(1995-2006年)

## 范围

本建议书具体规定了成功地控制、指挥和操作处于深空中的载人研究卫星和无人研究卫星所需要的保护标准。所谓处于深空中的卫星是指在距地球2百万公里以上的空间中执行指定任务的卫星。

国际电联无线电通信全会，

## 考虑到

- a) 载人深空研究对于无线电通信的极端可靠性具有独特的要求，以确保生命安全；
- b) 载人和无人的深空研究，都对无线电通信的极端可靠性具有独特的要求，以确保能够成功地接收到在特定的关键时刻所收集的重要科学数据，而这些数据常常是不可能重复发送的；
- c) 深空地球站的极端灵敏度致使可允许干扰电平极低；
- d) 已推导出了深空研究的地球站和处于深空中的空间电台的保护标准，见附件1；
- e) 已推导出了干扰灵敏度，见附件2，

## 建议

**1** 对于深空研究的地球站，其保护标准应确定为：

在2 GHz附近频带为- 222 dB(W/Hz)，

在8 GHz附近频带为- 221 dB(W/Hz)，

在13 GHz附近频带为- 220 dB(W/Hz)，

在32 GHz附近频带为- 217 dB(W/Hz)；

**2**对于处于深空中的空间飞行器上的电台，其保护标准应确定为：

在2 GHz附近频带为- 193 dB(W/20 Hz)，

在7 GHz附近频带为- 190 dB(W/20 Hz)，

在17 GHz附近频带为- 186 dB(W/20 Hz)，

在34 GHz附近频带为- 183 dB(W/20 Hz)；

**3** 受大气及降水影响所产生的干扰，在计算中应以0.001%时间适用的天气统计量为依据（见附件1的2.3节）。

## 附件1

### 深空研究的保护标准

#### 1 引言

本附件确立了深空研究的保护标准。这些标准既可用于协调距离的计算，也可用于其他一些分析中。该保护标准还与空间研究业务内共用的研究有关。该标准已考虑到与其他业务的潜在干扰，并且得出了有关共用的可行性的结论。本附件未涉及今后在深空任务中所使用的中继星。

该保护标准是以在深空研究中所使用的典型接收机的灵敏度为基础的，附件2对此做了说明。

#### 1.1 干扰的影响和后果

干扰会影响地球站和空间电台接收机的正常工作，其后果是可以降低或者中断对空间飞行器的驾驶和控制能力，以及接收空间飞行器发送的科学和工程数据的能力。

接收机中包含若干个同步环，每一同步环锁定和跟踪一个特殊的信号成分。当干扰足够大时，同步环中的一个或者几个环会对既定的信号失锁。瞬时干扰也可以造成这种失锁。如果要对最微弱的信号重新进行锁定，可能需要花费几分钟的时间。在大多数深空任务的关键时段，准确无误地或不间断地发送和接收科学数据是一项基本要求。在这些时段，因信号失锁而造成的数据丢失是不可挽回的。正是这些特性形成了这种避免受到干扰的严格要求。相比之下，某些其他的无线电业务通常是可以反复传送数据的。

对于某些工作模式，跟踪环的带宽是极窄的。地球站接收机的载波跟踪环就是一例。它的带宽窄到仅有1 Hz，并且在特殊的环境下（300 mHz）会更窄。可以推断，一个干扰信号恰好处于这一带宽内的可能性是微乎其微的。但是也必须意识到，由于地球的旋转，既定信号的频率会产生多普勒频移。例如，一个8.4 GHz的信号由位于纬度35°的地球站接收时，会产生±11 kHz的频移。具有固定频率，且无论在何地都处于深空信号的多普勒频移范围内的干扰信号将扫过载波跟踪环带宽，从而造成失锁。另外，干扰信号不必恰好处于跟踪环带宽内就可以影响跟踪环。只要干扰频率在跟踪环带宽附近，并且具有足够的功率，就可能导致严重的性能恶化。当干扰信号频率远离跟踪环带宽时，仍可以通过其他机制，如微波激光器饱和，使跟踪环性能恶化。

#### 1.2 保护标准的制订

为了确保整个接收系统的正常工作，四个子系统中的一个子系统都必须免受干扰。保护标准用于具体规定将造成最大可接受性能恶化的干扰功率的量值。表1列出了每一子系统的最大可接受性能恶化。利用这些值，可以确定相应的最大可允许干扰。

本附件下面各节中制订了保护标准。对于每一个接收子系统，都存在因干扰而引起的最大可接受性能恶化。附件2给出了可以引起这种恶化的干扰的量值。最大可允许干扰由干扰最为灵敏那个接收子系统所决定。该量值就是接收机的保护标准。更大的干扰则为有害干扰。

表1

接收子系统的最大可接受性能恶化

接收子系统	最大可接受性能恶化
微波激射前置放大器	1 dB 增益压缩
载波跟踪	10° 跟踪环静态相位误差或者峰值相位抖动
遥测	1 dB符号能量与噪声谱密度比的等效降低 ( $\Delta E/N_0 = -1$ dB)
测距	1 dB符号能量与噪声谱密度比的等效降低 ( $\Delta E/N_0 = -1$ dB)

## 2 深空地球站的保护标准

对干扰反应灵敏的接收子系统有四个：微波激射前置放大器、载波跟踪环、遥测子系统和测距子系统。

### 2.1 最大可接受性能恶化

微波激射前置放大器的增益是输入功率的函数，对于输入功率很强的信号或干扰，微波激射前置放大器的增益会随之减小。这种增益压缩会导致放大器的非线性工作。这样，强干扰可以对既定信号产生非线性影响，包括产生杂散信号。这种最大可接受增益压缩为1 dB。利用增益压缩作为衡量非线性影响的尺度是常见的做法。

受到干扰时，载波跟踪环的反应是增加相位误差和抖动。如果干扰足够强，则可以引起失锁。这种最大可接受性能恶化为静态相位误差增加10°或者峰值相位抖动增加10°。

因干扰造成遥测误码性能和测距准确度的下降，可以用相应的信噪比的降低来表示。遥测和测距子系统最大可接受性能恶化为符号能量与噪声谱密度比相应地降低1 dB。

对于每个接收子系统，其最大可允许干扰来自于相应的最大可接受性能恶化。整个接收机的保护标准，就是最敏感的那个子系统的最大可允许干扰。

表1归纳了四个接收子系统中的每一子系统的最大可接受性能恶化。

### 2.2 与最大可接受性能恶化相对应的干扰电平

#### 2.2.1 微波激射前置放大器

表2给出了使微波激射前置放大器产生1 dB增益压缩的干扰功率。数据来源见附件2。

表2

工作于8.4 GHz的微波激励前置放大器产生1 dB增益压缩的  
最大可允许干扰功率

干扰类别	数据来源	1 dB 增益压缩 所对应的干扰
连续波 (CW)	图2	-114 dBW
噪声 (带宽为40 MHz)	图2	-190 dB(W/Hz)

## 2.2.2 载波跟踪、遥测和测距子系统

### 2.2.2.1 载波跟踪、遥测和测距的干扰比

表3分别给出了干扰与载波比 ( $I/C$ )、干扰与信号比 ( $I/S$ ) 或干扰与噪声比 ( $I/N$ )，对应于载波跟踪、遥测和测距子系统的可接受性能恶化。这些比率可确定如下：

对于连续波 (CW) 干扰，可由附件2中的曲线图确定每一子系统所允许的干扰比。

对于载波跟踪环的类噪声干扰，图8给出了载波余量从10 dB (典型的最小工作点) 减小到5.5 dB所引起的增加10°的相位抖动。相应的  $I/N$  由以下公式给出：

$$I_0/N_0 = 10 \log (10^{(CM_0/10)}/10^{(CM_i/10)} - 1) \quad \text{dB}$$

其中：

$I_0/N_0$ : 干扰噪声谱密度与接收机噪声谱密度比

$CM_0$ : 无干扰条件下的载波余量 (dB)

$CM_i$ : 有干扰条件下的载波余量 (dB)。

载波余量是指载波跟踪环的载波功率与噪声功率比。

对于遥测和测距子系统的类噪声干扰，可允许  $I/N$  由以下公式给出：

$$I_0/N_0 = 10 \log (10^{(\Delta E/N_0)/10} - 1) \quad \text{dB}$$

其中：

$I_0/N_0$ : 干扰噪声谱密度与接收机噪声谱密度比

$\Delta E/N_0$ : 表1中给出了标准，表示符号能量与噪声谱密度比的等效降低或者信噪比的降低。

表3

连续波和类噪声干扰的最大可允许*I/C*、*I/S*或*I/N*

子系统（标准）	干扰类别	数据来源	最大干扰比
载波跟踪 (峰值相位抖动增加10°)	连续波	图 3	$I/C = -15 \text{ dB}$
	类噪声	图 8并计算	$I_0/N_0 = 2.6 \text{ dB}$
遥测 (由于载波跟踪环内干扰的影响, $E/N_0$ 降低1 dB)	连续波	图 5	$I/C = -1.5 \text{ dB}$
遥测 (由于遥测探测带宽内干扰的影响, $E/N_0$ 降低1 dB)	连续波	图 4	$I/S = -11 \text{ dB}$
	类噪声	由计算得出	$I_0/N_0 = -5.9 \text{ dB}$
测距 (由于载波跟踪环内干扰的影响, $E/N_0$ 降低1 dB)	连续波	图 6	$I/C = -5 \text{ dB}$
测距 (由于距离估计带宽内干扰的影响, $E/N_0$ 降低1 dB)	连续波	图 7	$I/S = -7.1 \text{ dB}$
	类噪声	由计算得出	$I_0/N_0 = -5.9 \text{ dB}$

### 2.2.2.2 载波跟踪、遥测和测距的最大可允许干扰

对于连续波（CW）干扰，最大可允许干扰取决于*I/C* (*I/S*)和由接收机的设计工作点决定的最小载波（信号）电平。假设载波、遥测和测距三者的信号功率相同，由于载波跟踪环所要求的*I/C*是最小的，所以表3表明连续波的最大可允许干扰由载波跟踪环决定。

对于载波跟踪，最小载波与噪声比为10 dB，类噪声干扰相应的最大可允许干扰功率为：

$$P_i = N_0 + 10 \log B + 10 + I/C$$

其中：

$P_i$ : 载波跟踪的最大可允许干扰功率（dBW）

$N_0$ : 接收机噪声谱密度，见表4 (dB(W/Hz))

$B$ : 载波跟踪环带宽，采用1 Hz

$I/C$ : 表3中给出的干扰与噪声比（dB）。

计算结果在表4中做了归纳。

表4

地球站接收机的最大可允许干扰功率

频带 (GHz)	接收机噪声谱密度 (dB(W/Hz))	连续波的最大 干扰功率(dBW)	类噪声的最大 干扰功率谱密度 (dB(W/Hz))
2.29-2.30	-216.6	-221.6	-222.5
8.40-8.45	-215.0	-220.0	-220.9
12.75-13.25	-214.6	-219.6	-220.5
31.8-32.3	-211.4	-216.4	-217.3

### 2.3 深空地球站接收机的保护标准

表5给出了不致引起超过可接受地球站接收机性能恶化的最大可允许干扰。这些数值是针对深空地球站接收机输入端而制订的保护标准，更大的干扰则为有害干扰。另外还给出了直径为70 m的无源天线处相应的功率谱通量密度。该天线工作在较低频带时，面积效率约为70%，工作在32 GHz时，面积效率约为40%。

表5

深空地球站的干扰保护

频带 (GHz)	最大可允许干扰功率谱密度 (dB(W/Hz))	最大可允许干扰功率谱通量密度 (dB(W/m <sup>2</sup> ·Hz))
2.29-2.30	-222.5	-257.0
8.40-8.45	-220.9	-255.1
12.75-13.25	-220.5	-254.3
31.8-32.30	-217.3	-249.3

为了保护地球站的接收机，类噪声干扰的功率谱密度或者连续波（CW）干扰的总功率不应超过表5所示的数值。

要获知地球站周围的协调区，就必须考虑不同的天气条件对电波传播所造成的影响。要将因增强的超视距传播引起的业务中断限定为在一年中的任何一天都不超过5分钟，就有必要考虑在一年中天气条件最差的一小时内和该小时内天气条件最差的5分钟内的电波传播。这种天气条件占一年中时间的0.001%。

国际电联《无线电规则》附录7中指出，与可容许更长中断的某项业务所必需的协调距离相比，因采用0.001%的天气条件而增加的协调距离微不足道。

### 3 处于深空的空间电台的保护标准

就深空研究而言，空间电台接收机和地球站接收机采用了基本相同的工作方式，只是空间电台不包含微波激射器。空间电台对干扰敏感的方式也与上文描述过的地球站类似。

深空电台接收机的保护标准是干扰功率不得超过接收机噪声功率。与深空地球站的保护标准相比，该保护标准有所放宽，因此地对空链路通常情况下有更大的性能余量。为了保护处于深空的空间飞行器上的电台，在接收机输入端，宽带干扰在20 Hz带宽内的功率谱密度或者连续波（CW）干扰在20 Hz带宽内的总功率不应超过表6中的数值，高于这些数值的干扰则为有害干扰。20 Hz的带宽要求是根据空间飞行器的转发器工作在信号门限强度时载波跟踪环的带宽而提出。表6中所列噪声温度值是目前在深空中可能使用的实际系统的估计值。

表6

处于深空的空间飞行器上的接收机的干扰保护

频带 (GHz)	接收机噪声温度 (K)	最大可允许干扰功率谱密度 (dB(W/20 Hz))
2.11-2.12	200	-192.6
7.145-7.190	330	-190.4
16.6-17.1	910	-186.0
34.2-34.7	2 000	-182.6

## 附件2

### 深空研究接收系统的干扰灵敏度

#### 1 引言

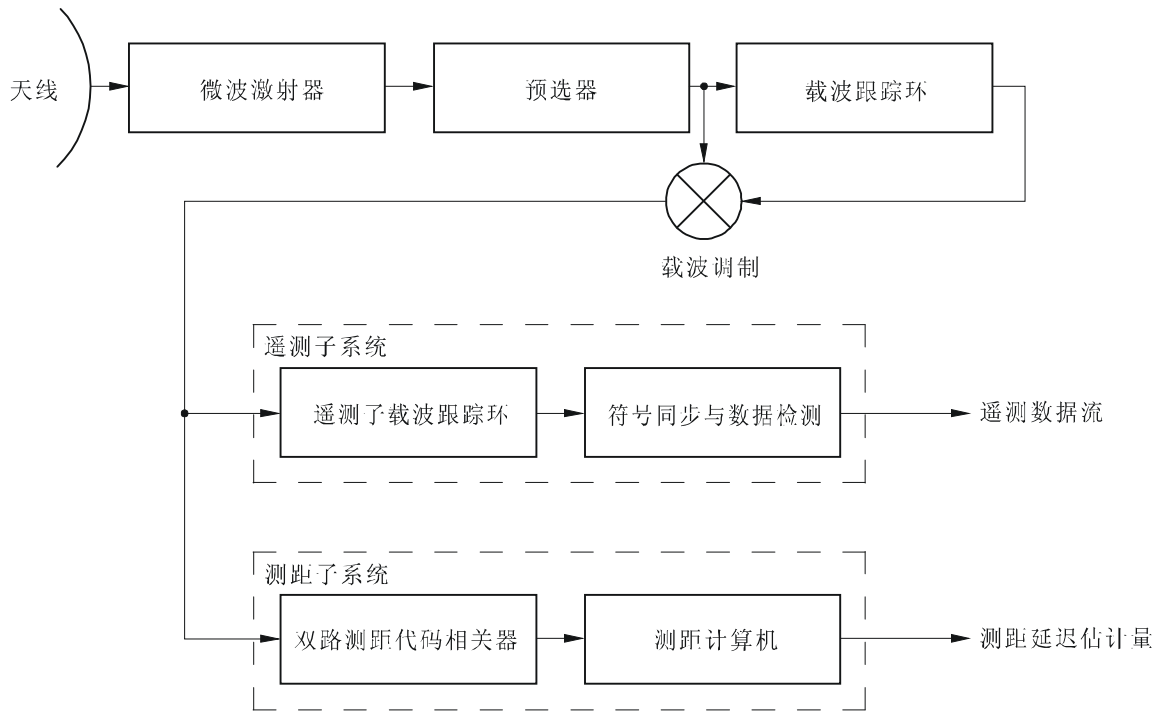
本附件介绍了与深空研究有关的无线电通信接收系统干扰灵敏度的相关信息。考虑了两类干扰：连续波（CW）干扰和类噪声干扰。先前分析过的那些特殊的接收系统是由美国操作的深空网络（DSN）中的组成部分。

## 2 接收系统

接收系统包含四个主要部分：微波激励前置放大器、载波跟踪环、遥感勘测子系统和测距子系统。其中每一个部分都必须免受干扰。每一部分的干扰灵敏度将在下述第4节中加以论述。接收系统的简化框图见图1。

图1

典型的深空网络接收系统的简化功能框图



1157-01

## 3 干扰的结果

干扰可以导致性能恶化、非线性工作或者数据丢失。干扰的影响取决于干扰的强度以及与有用信号的频率间隔。

在功率电平由弱到中的状态下，同频道干扰会增加载波跟踪环的静态相位误差和相位抖动，还会增加遥测的误码率，或者降低测距估计的准确度。这些性能的恶化一般可表示为信噪比的等效降低，并且在理论上可以用提高有用信号的功率电平来补偿这种性能恶化。但是实际上，有用信号的功率往往是不可调的。

与有用信号存在大的频率间隔的强干扰可以使性能恶化，同时迫使接收机中一个或多个元器件进入非线性工作区，进而导致增益压缩并产生谐波、杂散信号和互调产物。这些非线性影响统称为饱和影响。饱和影响与性能恶化不同，通常即使提高信号的功率电平也不能补偿饱和影响。

与有用信号存在小的频率间隔的强干扰可以引起接收系统失锁或者不同步，从而导致数据的完全丢失。



## 4 连续波 (CW) 干扰的影响

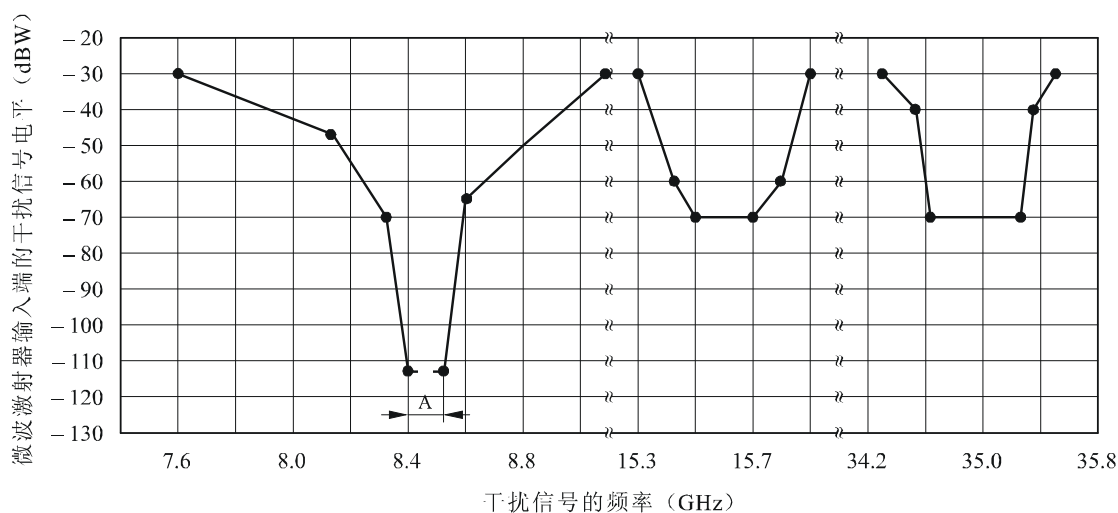
以下部分将针对四个接收子系统中每一子系统的具体干扰情况，分别加以论述。虽然接收系统对同频道干扰最为敏感，但是邻频道干扰甚至带外干扰有时也会产生有害影响。同频道干扰是指干扰频率处于子系统的通频带内。除非另有说明，假设干扰信号的频率是固定不变的。

### 4.1 微波激光前置放大器的干扰灵敏度

微波激光器的干涉灵敏度主要是指由强信号所造成的饱和（增益压缩）。微波激光器对处于通频带内或者通频带附近频率的干扰亦或处于微波激光器空闲频率的干扰最为敏感。图2显示了对工作在8.4 GHz频带的典型微波激光器造成1 dB增益压缩的干扰功率。

图2

8.45 GHz微波激光器增益降低1 dB  
所要求的干扰信号电平和与之相对应的频率



RFI类型：连续波  
A：微波激光器信号带通

1157-02

### 4.2 载波跟踪环的连续波 (CW) 射频干扰灵敏度

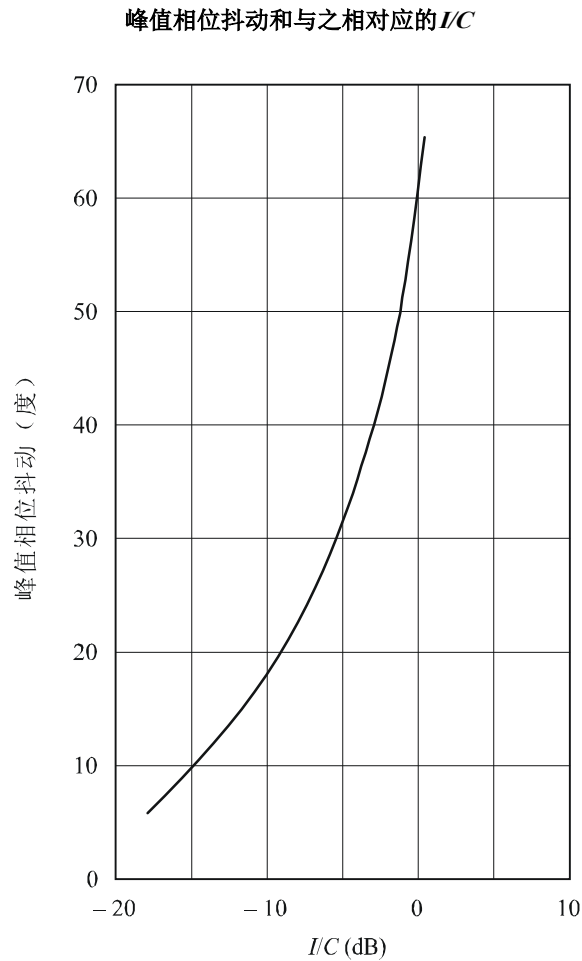
载波跟踪环是一个双外差跟踪环，由同步检波器自动增益控制（AGC）环和置于带通限幅器之后的二阶锁相环组合为一体。

强干扰可以引起跟踪环对有用信号失锁，而且跟踪环还有可能锁定干扰信号。无论频率固定还是扫描（频率变化）的连续波（CW）干扰都可以造成这种影响。如果干扰频率发生变化，跟踪环可能首先会对有用信号失锁，之后，当干扰频率移动到有用信号频率附近时，可能会锁定干扰信号。当干扰频率移动到有用信号频率，再远离有用信号频率时，跟踪环就会对干扰信号失锁，经一定时间之后，再次锁定有用信号。跟踪环再次锁定有用信号所需的时间，由信号强度、干扰强度及扫描速率共同决定。这个过程可能需要几秒钟到几分钟。如果干扰频率是固定的，则跟踪环不一定能重新锁定有用信号。

在低电平状态下，干扰会造成跟踪环静态相位误差和相位抖动的增加。

图3表明了峰值相位抖动与连续波（CW）I/C之间的函数关系。

图3



RFI类型：连续波

1157-03

### 4.3 遥测子系统的连续波（CW）射频干扰灵敏度

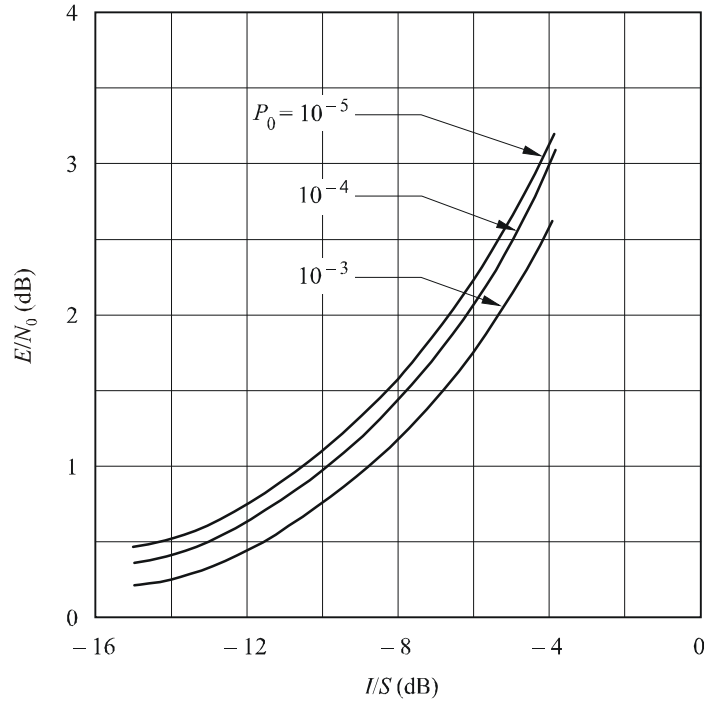
遥测子系统的性能恶化可以表示为符号能量与噪声谱密度比的等效降低 $\Delta E/N_0$ ， $\Delta E/N_0$ 可以定义为，在无干扰情况下，为获得与有干扰时相同的符号差错率而降低的 $E/N_0$ 谱密度的量值。

连续波（CW）干扰在遥测探测带宽内所造成的 $\Delta E/N_0$ 见图4。

落入载波环带宽内的连续波（CW）干扰也能够造成遥测性能的恶化。图5表明了对于频偏为10 Hz、工作在8.4 GHz频带的典型接收模式，载波环相位抖动和与之相对应I/C对 $\Delta E/N_0$ 的影响。

图4

在给定符号差错概率 ( $P_0$ ) 的条件下, 遥测信道中干扰所引起的  
遥测  $E/N_0$  的等效降低和与之相对应的  $I/S$

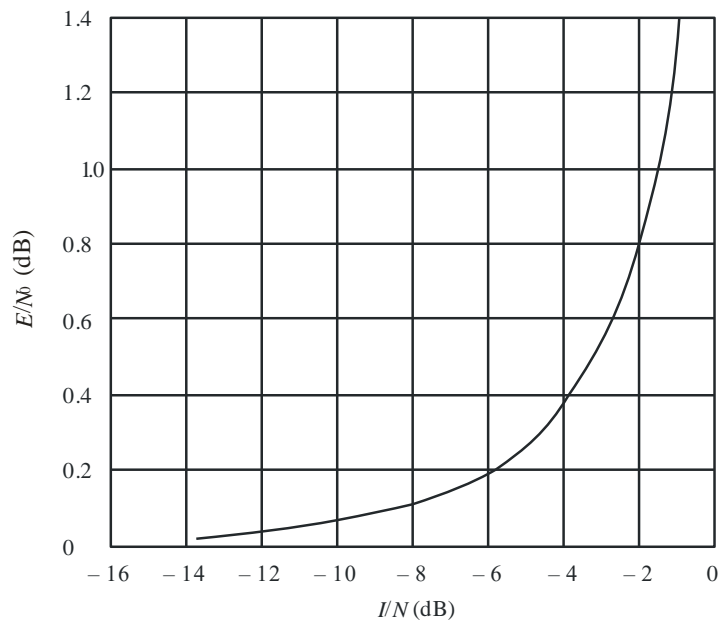


RFI类型: 连续波  
 $P_0$ : 符号差错概率

1157-04

图5

载波环相位误差和抖动所引起的测距  $E/N_0$  的  
等效降低和与之相对应的  $I/N$



RFI type: CW  
Band = 8.45 GHz  
Frequency offset = 10 Hz

1157-05

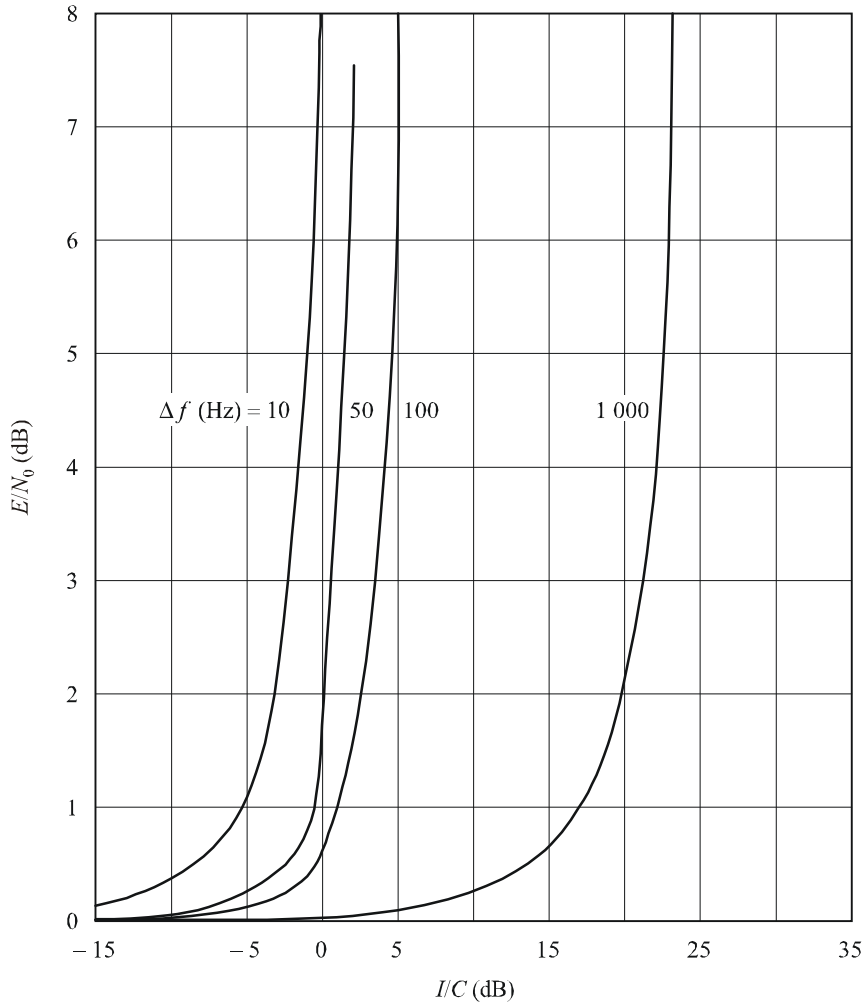
#### 4.4 测距子系统的连续波（CW）射频干扰灵敏度

由于干扰会引起测距延迟估计值的变化，造成测距子系统性能的恶化。这种恶化可以用有效测距信噪比的等效降低来表示。

载波跟踪环带宽内的连续波干扰对测距系统的性能造成影响，情况如图6所示。载波跟踪环带宽内连续波干扰的效果如图7所示。图中的  $I/S$  表示干扰功率与测距信号功率之比。

图6

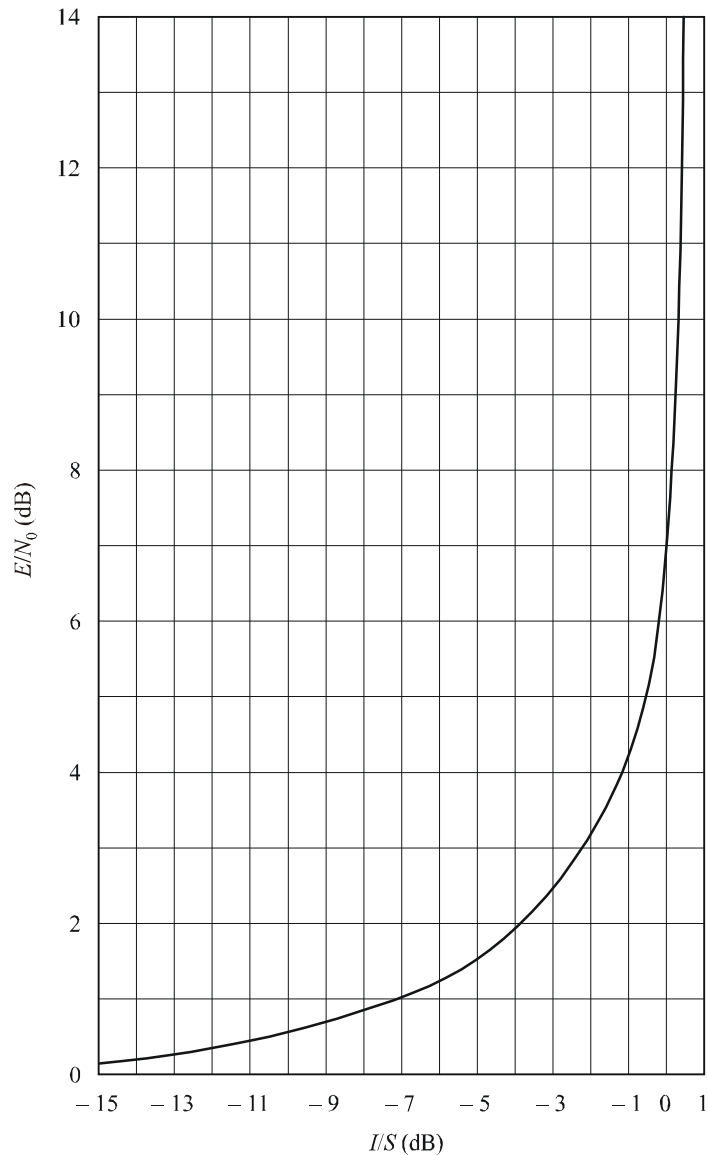
在给定频率偏移的条件下，载波环相位误差和抖动所引起的  
测距 $E/N_0$ 的等效降低和与之相对应的 $I/C$



RFI类型：连续波  
频带 = 8.45 GHz  
 $\Delta f$ : 频率偏移

1157-06

图7

测距信道干扰所引起的测距 $E/N_0$ 的等效降低和与之相对应的 $I/S$ 

RFI类型：连续波

1157-07

## 5 类噪声干扰的影响

类噪声干扰既可以造成微波激射前置放大器的饱和，也可以造成载波跟踪环、遥测子系统和测距子系统性能的恶化。假设微波激射器带宽为40 MHz，在此情况下，要使微波激射器产生1 dB的增益压缩，则类噪声干扰 $I_0$ 的功率谱密度应为-190 dB(W/Hz)。

对于载波跟踪环，其峰值相位抖动与载波余量有关，见图8。类噪声干扰的存在会减少载波余量并因此增加相位抖动。载波余量与 $I_0/N_0$ 的关系可以表示为：

$$CM_i = CM_0 + 10 \log (1 + I_0/N_0)^{-1}$$

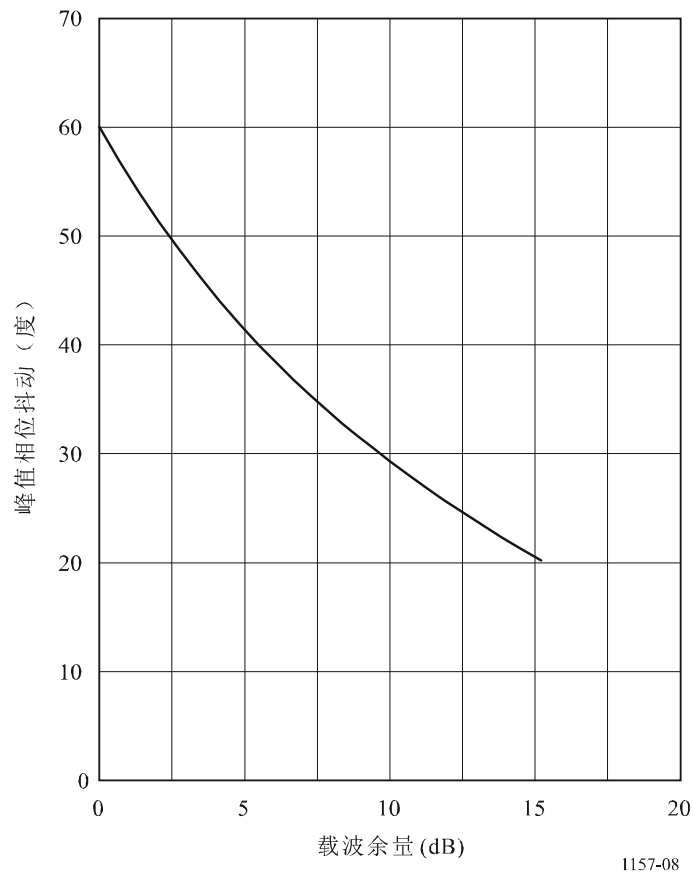
其中：

- $CM_i$ : 存在干扰时的载波余量 (dB)
- $CM_0$ : 无干扰时的载波余量 (dB)
- $I_0/N_0$ : 干扰噪声谱密度与接收机噪声谱密度比。

给定一个特定的无干扰时的载波余量并给定接受相位抖动增量, 即可按图8和前面写明的表达式计算出 $I_0/N_0$ 。例如, 假定典型的载波余量为10 dB, 由于干扰的影响, 载波余量会降到5.5 dB, 峰值相位抖动将增加 $10^\circ$ 。在此情况下的 $I_0/N_0$ 为2.6 dB。

图8

峰值相位抖动和与之相对应的载波余量



1157-08

对于遥测和测距子系统, 类噪声干扰的影响是降低有效的 $E/N_0$ , 从而增加遥测的差错率和测距延迟估计值的变化。

等效降低 $\Delta E/N_0$ 可以表示为:

$$\Delta E/N_0 = 10 \log (1 + I_0/N_0) \quad \text{dB}$$

其中 $I_0/N_0$ 为干扰噪声谱密度与接收机噪声谱密度比。已知可接受的 $E/N_0$ 降低的量值, 就可以计算出相应的 $I_0/N_0$ 。