

ITU-R SA.1742 建议书

**运行在空对地方向 283 THz 左右的星际和  
外层空间系统的技术和运行特性**

(ITU-R 235/7 号研究课题)

(2006 年)

## 范围

建议书规定了运行在空对地方向 283 THz 左右的星际和外层空间系统的技术参数（频率、链路、信号和数据特性、天线参数等）和运行特性，这些参数能用于共享研究。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 正在一些卫星系统中为 283 THz 频率范围内的外层空间和星际无线电通信规划无线电通信链路；
- b) 运用最近的科技发展成果，天文学家们正在努力在这段频谱内建造望远镜并进行观测；
- c) 这段频谱也被用于其他地面和空间业务；
- d) 除了无线电通信以外，这段频谱也被用于科学的和工业的用途；
- e) 运行在外层空间的卫星与无源系统，例如运行在 20 THz 以上的天文学系统之间的干扰机制，可能不同于在频谱的无线电频率部分的那些系统的干扰机制，

认识到

**1** 国际电联《组织法》第 12 节第 78 条规定无线电通信部门的功能包括，“...没有频率的限制进行研究和采用建议书...”；

**2** 根据国际电联《公约》附件第 1005 条注 2，研究组可以认为“无线电通信”包括空间传播的 3000 GHz 以上的电磁频谱，在他们研究期间和起草新建议书时没有参考准则；

**3** 在 ITU-R 内部尚未对使用和共享这段频谱进行彻底的研究，

建议

**1** 鉴于运行在外层空间空对地方向、283 THz 左右空间研究卫星的共享研究，应考虑附件 1 和附件 2 介绍的技术和运行参数。

## 附件 1

### 1 引言

随着无线电频谱利用压力的增加和技术的进步,用于自由空间无线电通信的、3 000 GHz 以上频率的使用得到了更多的关注。由于在光纤通信领域尤其是激光器领域、调制和接收机技术的许多最近的技术发展,在这个频带内的无线电通信已经成为现实。频率在 3 000 GHz 以上的自由空间无线电通信不但能够支持更高的数据速率、质量小于传统的无线电频率系统,而且能满足用于外层空间应用时对增益和波束方向性要求。

#### 1.1 频率考虑的事项

目前,在 3 000 GHz 以上自由空间无线电通信链路中,大部分的注意力集中在频率 200、283、311 和 353 THz<sup>1</sup>左右,相应的波长为大约 1.5、1.06、0.965 和 0.850  $\mu\text{m}$ ,这些频率与在光纤通信中得到非常广泛使用的那些频率相同。对于空对地方向的星际和外层空间无线电通信,注意力正集中在主振荡器功率放大器(MOPA)配置中采用 1.06  $\mu\text{m}$  的掺镱(Yb)光纤放大器、Q 开关、运行在 283 THz (1.06  $\mu\text{m}$ ) 左右的钕:钇铝石榴石(Nd:YAG)或者钕:钒酸钇(Nd:YVO<sub>4</sub>)激光器。由于可用性和可靠性,主要采用 Yb、Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub>。

#### 1.2 一般的任务参数

适于干扰分析的技术参数应该基于去往火星和木星的一般星际任务。为了使重量和功耗最小化,链路必须支持无线电通信的必需设备在发射后立即启动,并且不需要另外的无线电通信系统而持续整个任务期间,因此,链路的距离将会从几千 km 到几个天文单元(AU<sup>2</sup>)不等。地球到火星或木星的距离从 0.5 AU 到 6.2 AU 不等,运行在空对地方向 283 THz 的外层空间链路的基本技术参数一览表见表 1。

### 2 链路考虑

运行在 283 THz 空对地方向的外层空间链路可以利用 Yb、Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器。波束将由宇宙飞船上 30 cm 的望远镜发射出来,被地球上有效直径为 4.2 m 到 10 m 的望远镜接收。<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> 1 THz = 1 000 GHz。

<sup>2</sup> 1 AU  $\approx$  149 597 870 km。

<sup>3</sup> 对于在 283 THz 左右穿过自由空间的无线电通信而言,望远镜实际上是一个天线。

表 1  
运行在 283 THz 空对地方向的两个参考外层空间任务的技术参数

参 数	火 星	木 星
发射机功率	5 W (平均)	
发射机孔径	30 cm	
发射机频率 (波长)	283 THz (1.06 $\mu\text{m}$ )	
调制	脉冲位置调制 (PPM) ( $M = 64$ 到 $256$ ) 采用级联码	
指向准确度	0.35 $\mu\text{rad}$	
范围	0.5 到 2.5 AU	4.2 到 6.2 AU
数据速率 (白天在地球终端) <sup>(1)</sup>	3 到 30 Mbit/s (4.2 m 地球终端)	1.5 到 3 Mbit/s (10 m 终端)
接收机孔径	4.2 到 10 m 等效尺寸	
探测器类型	盖革型 InGaAsP/InP APD 阵列	
必需的链路余量	2 到 3 dB	

<sup>(1)</sup> 地球终端在晚上的数据速率要高出大约 30% (1.13 dB)。

## 2.1 链路性能

像运行在传统无线电频带的外层空间系统一样，用数据速率和误码率 (BER) 来度量运行在 283 THz 链路的性能。把性能作为功率、望远镜质量、传播考虑、噪声和接收机灵敏度的函数来计算，这些参数中的每一个都是更多变量的函数。

### 2.1.1 数据速率

与运行在传统无线电频带的外层空间系统不同，当所有的其他参数为常量时，数据速率不是严格地与传播距离的平方成反比；然而，它非常接近于运行在火星和木星附近链路的近似值，是一个好的经验估计方法。来自火星的数据速率将会随着许多参数（包括链路距离和与太阳的几何关系）而变化，来自火星的数据速率一般会比来自木星的数据速率高出大约一个数量级。

### 2.1.2 BER

为了保持数据帧，经过纠错以后数据帧的误码率必须小于  $10^{-6}$ 。链路必须保持 99% 的数据帧。

### 2.1.3 余量要求

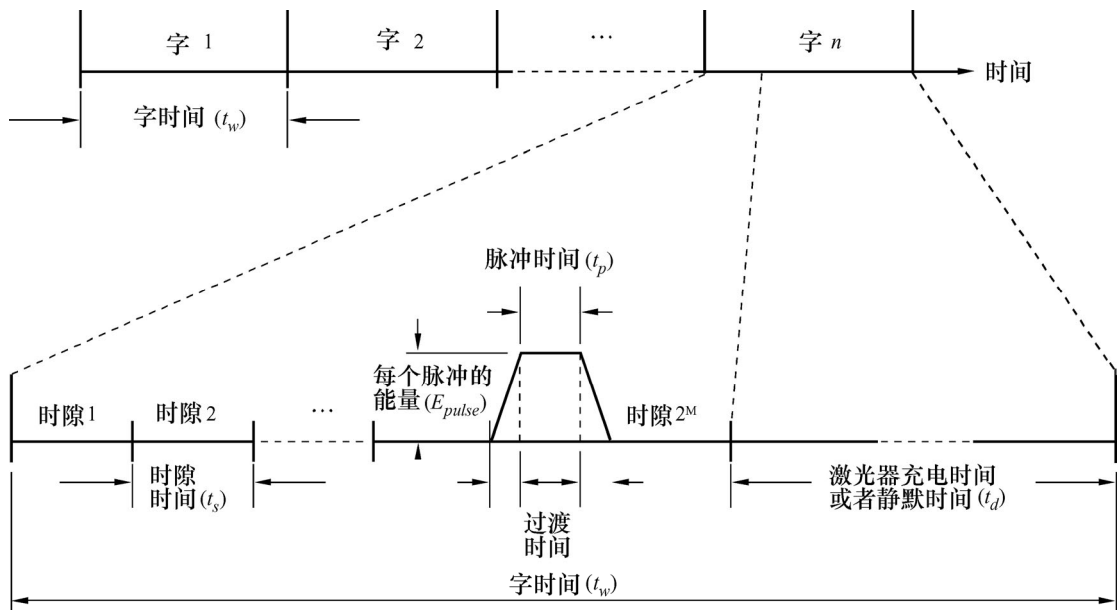
运行在 283 THz 空对地方向的外层空间或星际链路的典型余量要求为 2 到 3 dB 左右，主要取决于天气、时刻和仰角等因素。

## 2.2 调制

运行在 283 THz 左右的外层空间和星际链路将采用 PPM，这种调制技术考虑到由接收机进行直接检测（特别是光子计数），而不是采用相干接收机。PPM 信号将采用级联码进行编码。

PPM 利用在一个字的时间内单个脉冲的能量， $M$  比特的数据可以与暂时位于一个字的  $2^M$  个时隙内的单个脉冲能量一起传输，在整个字时间中有一部分时间用于激光器充电，不会包含一个脉冲。充电或者“静默”时间在低数据速率时通常会占用字时间中的大部分，但在较高数据速率时所占用的比例会变小。PPM 信号的瞬时特性及其相应长度如图 1 所示。

图 1  
PPM 信号的特性



7/02-01  
182127

## 2.3 可提供的功率

Yb、Q 开关、Nd:YAG 或者 Nd:YVO<sub>4</sub> 发射机将典型地产生 5 W 的平均功率，峰值功率将随数据速率而变化，但是可能在 30 到 40 dBW 左右。可以采取下面的步骤来计算 PPM 发射机的峰值功率  $P_{peak}$ ，下列参数是必需的：

$M$ : 调制指数

$P_{ave}$ : 平均发射机功率 (W)

$t_d$ : 静默时间 (s)

$t_p$ : 发射机脉冲时间 (s)

$t_s$ : 时隙时间 (s)。

步骤 1: 计算字时间  $t_w$ ，采用：

$$t_w = M \cdot t_s + t_d \quad \text{s} \quad (1)$$

步骤 2: 计算每个字的能量  $E_{word}$ , 采用:

$$E_{word} = P_{ave} \cdot t_w \quad \text{J} \quad (2)$$

注 1 — 由于在每个字时间内只出现一个脉冲, 每个脉冲的能量相当于每个字的能量 (即  $E_{pulse} = E_{word}$ )。

步骤 3: 计算峰值功率  $P_{peak}$ , 采用:

$$P_{peak} = \frac{E_{pulse}}{t_p} \quad \text{W} \quad (3)$$

## 2.4 接收到的信号

计算地球站接收到的 283 THz 信号电平的一般方法与传统无线电频率系统采用的方法相同:

$$P_S = P_t + G_t + G_r + L_t + L_r + L_p + L_a + L_s \quad \text{dBW} \quad (4)$$

其中:

$P_S$ : 接收机信号功率

$P_t$ : 平均激光器输出功率 (典型值为 4.7 到 7.0 dBW)

$G_t$ : 发射机天线增益 (典型值为 119 dB) 在第 2.6.2 节中详细讨论

$G_r$ : 接收天线增益 (典型值为 129 至 149 dB) 在第 2.6.3 节中详细讨论

$L_t$ : 发射机损耗

$L_r$ : 接收机损耗

$L_p$ : 定向损耗

$L_a$ : 沿着空对地链路的大气损耗

$L_s$ : 自由空间损耗。

## 2.5 链路损耗

有 5 个主要的链路损耗来源:

- 发射机内部损耗,  $L_t$ , 包括发射机光学系统的吸收、散射和反射损耗;
- 接收机内部损耗,  $L_r$ , 包括接收机光学系统的吸收、散射和反射损耗;
- 定向损耗,  $L_p$ , 包括天线的影响或者航天飞船的抖动和发射天线的定向不准;
- 大气损耗,  $L_a$ , 包括大气的散射和湍流的影响;
- 自由空间损耗,  $L_s$ , 由于发射机和接收机之间的物理隔离形成的。

每一种损耗源的值将会随着硬件设计、硬件使用年限、任务要求和任务的阶段而变化, 表 2 给出了用于一般干扰分析时的损耗建议值。关于这段频谱内的大气传播, 无线电通信第 3 研究组已经在 ITU-R P.1621 和 ITU-R P.1622 建议书中进行了详细的说明。

表 2  
运行在 283 THz 空对地方向两个参考外层空间任务的技术参数

损耗的机制	典型值
发射机损耗, $L_t$	0.63 (= -2 dB)
接收机损耗, $L_r$	0.63 (= -2 dB)
定向损耗, $L_p$	0.63 (= -2 dB)
大气损耗, $L_a$	在 90°, 0.89 (= -0.5 dB) 在 30°, 0.56 (= -2.5 dB)

在 283 THz 处自由空间损耗  $L_s$  的计算方法与传统的无线电频率系统相同:

$$L_s = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \left( \frac{c}{4\pi f R} \right)^2 \quad (5a)$$

在 283 THz 处, 这个公式可简化为:

$$L_s = \frac{7.169 \times 10^{-15}}{R^2} \quad (5b)$$

其中:

$R$ : 发射机和接收机之间的距离 (m)。

## 2.6 发射/接收望远镜参数

运行在 283 THz 左右的外层空间和星际无线电通信链路将把望远镜作为发射和接收天线使用, 发射和接收望远镜的典型参数相互之间差异很大。这些差异将会影响每个望远镜各自的增益方向图, 由于提供给发射机光学系统的通常是高斯分布的波束, 而接收机光学系统具有一个平面探测器, 因此发射机和接收机天线的样式也不同。运行在 283 THz 左右发射和接收天线增益方向图的限值, 详见附件 2。

### 2.6.1 直径

为了进行干扰分析, 应假设发射天线的直径为 30 cm, 对于发射孔径可以没有遮挡, 也可以有 3 cm 的遮掩。

接收天线的有效直径在 1 m 到 10 m 之间变化, 但是对于绝大多数应用而言, 至少需要 4.2 m 的有效直径。为了进行干扰分析, 应该考虑 1 m、4.2 m 和 10 m 的天线, 主接收孔径将有一个直径仅为主孔径直径 20% 的附属遮掩。

### 2.6.2 发射增益方向图

发射机采用的望远镜以激光器作为输入, 这样的激光器通常只运行在最小的空腔谐振模式  $TEM_{00}$ , 这种模式导致波束的能量呈现高斯分布并且最大的强度会沿着传输的轴线。波束的方向图要经过修改, 以便当与传输轴线存在方向夹角时波束强度的幅度会减小, 仅浪费少量的波束功率。波束幅度下降到轴线上幅

度的 37%和 13%的角度被当做两个参考点，这两点分别被称做  $1/e$  和  $1/e^2$  点，在发射激光方向图的描述中常常被提及。

$1/e^2$  点处全角的波束宽度大约为：

$$\theta_{1/e^2} = \frac{4\lambda}{\pi D} \quad \text{rad} \quad (6)$$

其中：

$\theta_{1/e^2}$ ：波束宽度 (rad)

$\lambda$ ：波长 (m)

$D$ ：孔径直径 (m)。

在 30 cm 的孔径发射 283 THz 高斯波束的情况下， $1/e^2$  点处的波束宽度大约为  $4.5 \times 10^{-6}$  rad。

对于发射终端而言，下列公式可以在高斯幅度平面波输入望远镜的时候，用来计算激光器的远端场辐射方向图。使用这些公式要做出下列基本假设：

- 把激光源作为单一模式的高斯发射进行特性化；
- 在远端场测量天线增益的方向图；
- 孔径是圆形的。

公式 (7) 给出了孔径半径为  $a$ 、输入收敛半径为  $\omega$  的高斯幅度平面波、中心遮挡半径为  $b$  的发射望远镜的增益方向图，其中  $\omega$  为光学系统中心轴到  $1/e^2$  强度点的距离。 $G_0$  项是天线增益的上限，被均匀辐射、没有遮挡的圆形孔径可以得到  $G_0$ ，第二项  $g_t(\alpha, \gamma, X)$  是增益效率项，用来说明遮挡、截断、偏离轴线强度和散焦的影响。

$$G_t(\alpha, \gamma, X) = G_0 \cdot g_t(\alpha, \gamma, X) \quad \text{dBi} \quad (7)$$

其中：

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left( \frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad \text{dBi} \quad (8)$$

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = 2\alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^1 J_0(X\sqrt{u}) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (10)$$

$A$ ：望远镜孔径的面积 ( $\text{m}^2$ )

$a$ ：主孔径的半径 (m)

$b$ ：遮挡的半径 (m)

$J_0$ ：第一类零阶贝塞尔函数

$\alpha$ ：比率  $\alpha/\omega$ ，发射机孔径的半径  $a$  比上高斯输入波束在  $1/e^2$  点处的收敛半径  $\omega$

$u$ ：积分变量

$$X: \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot a \cdot \sin(\theta)$$

$\theta$ : 离开光轴的角度 (rad)。

对于轴线上,  $X=0$ , 公式 (9) 中的增益效率项变为:

$$g_t(\alpha, \gamma, 0) = \left[ \frac{2}{\alpha^2} \left[ e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (11)$$

于是公式 (7) 中轴线上最大主波束增益变为:

$$G_t(\alpha, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \left[ \frac{2}{\alpha^2} \left[ e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad \text{dBi} \quad (12)$$

任何的遮挡  $b$  都将会减少主波束的增益, 填充零和增加旁瓣。

### 2.6.3 接收增益方向图

视场的大小与探测器的物理尺寸和望远镜的焦距有关, 可以由下式确定:

$$\varphi = \frac{d}{F} \quad (13)$$

其中:

$\varphi$ : 视场 (rad)

$d$ : 探测器直径 (典型  $10^{-4}$  到  $10^{-3}$ ) (m)

$F$ : 望远镜的焦距 (m)。

接收天线的样式要与探测器典型地匹配。采用视场光阑实现探测器与无用能量的隔离, 探测器只暴露于主波束轴线  $\varphi$  rad 以内的部分主波束。因此, 接收天线方向图的旁瓣接收到的无用能量不会达到探测器, 可以在干扰分析期间被忽略。

假设接收孔径在发射天线的远端场内, 接收到的能量通常被看做平面波, 接收系统可以与发射系统使用一个共同的或者独立的孔径。接收孔径的波束宽度也典型地用  $1/e^2$  点来度量。

接收天线在轴线上的最大增益  $G_R$  由下式给出:

$$G_R = 10 \log \left( \frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) + 10 \log (1 - \gamma^2) + \delta \quad \text{dBi} \quad (14)$$

其中:

$A$ : 接收孔径的面积 ( $\text{m}^2$ )

$\lambda$ : 输入信号的波长 (m)

以及

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (15)$$



其中：

$a$ : 主镜的半径 (m)

$b$ : 副镜的半径 (m)。

公式 (14) 中计算的增益表示入射到探测器上能量的大小,  $G_R$  项假设接收天线位于发射机的远端场内并且孔径和探测器是圆形的。公式 (14) 第一项是孔径面积为  $A$  的理想无遮挡天线获得的典型天线增益。第二项说明了由于遮挡带来的损耗, 而遮挡是由卡塞格伦系统的副镜引入的。在系统没有副镜的情况下, 公式 (15) 中  $b$  值变为 0, 公式 (14) 第二项可以被忽略。

公式 (14) 的第三项  $\delta$  表示由于超出探测器边界的信号能量溢出带来的损耗 (dB)。对于直接检测系统如 PPM,  $\delta$  随着探测器尺寸与望远镜焦距之比的增加而减少。对于大多数实际数值,  $\delta$  仅为 -0.5 dB。

## 2.7 定向和跟踪

运行在 283 THz 左右波束宽度狭窄且长距离的外层空间或星际链路给系统强加了精确定向和跟踪的要求, 典型的定向要求是定向准确度大约为波束宽度 1/10, 对于表 1 中概述的参考系统, 定向准确度为 0.35 微弧度 ( $\mu\text{rad}$ ), 定向损耗仅为 2 dB。

长为 2 AU 和 6 AU 的链路的  $1/e^2$  等高线覆盖区域分别如表 2 和表 3 所示。这两幅图都假设宇宙飞船正在沿着地球的赤道平面发射, 指向位于美国加利福尼亚州莱特伍德的国家航空航天局试验光学下行链路设备, 每幅图中内侧的等高线实线代表采取准确定向时的覆盖面积, 外侧的等高线虚线表示的是存在随机 0.35  $\mu\text{rad}$  定向误差时等高线的范围。2 AU 和 6 AU 的距离等于分别从火星和木星到地球的典型距离。

图 2

来自 2 AU 处 8  $\mu\text{rad}$  波束的覆盖区域

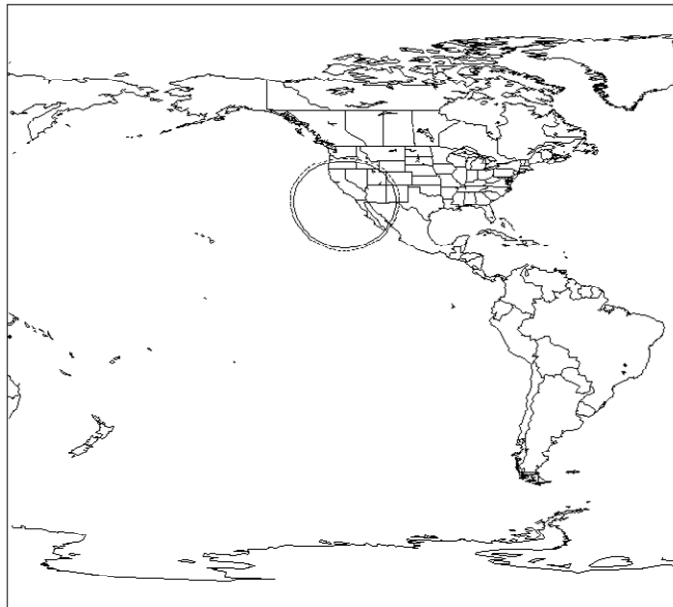
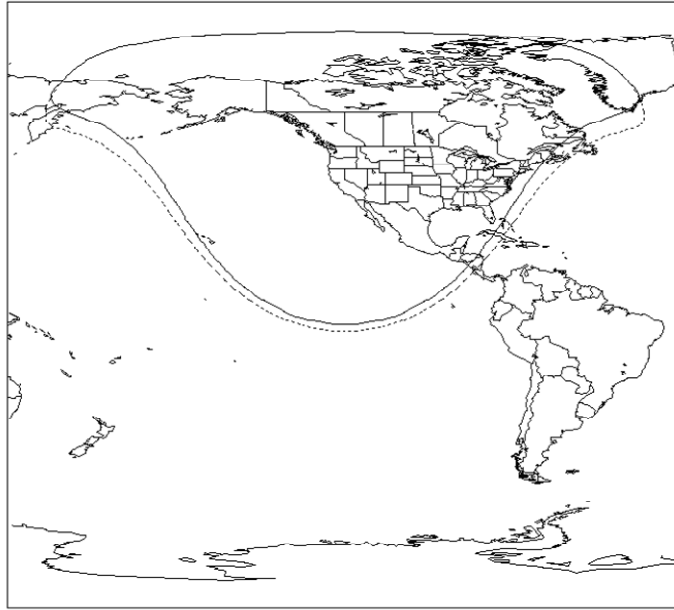


图 3  
来自 6 AU 处 8  $\mu\text{rad}$  波束的覆盖区域



1742-03

### 3 信噪比 (SNR)

运行在 283 THz 左右的、外层空间和星际的无线电通信链路的性能直接取决于接收机获得高的信噪比 (SNR)。SNR 越高, BER 越低。通常:

$$SNR = \frac{P_s}{N_t} \quad (16)$$

其中:

$P_s$ : 按公式 (4) 给出的接收信号功率

$N_t$ : 所有源的噪声功率。

噪声来自两个独立的源, 探测器噪声和背景信号。在第 3.1 节中讨论的背景信号是由于来自空中的外部能量到达探测器引起的, 在第 3.2 节中讨论的探测器噪声是由于探测器内部的固有噪声引起的。

通过下列基本假设, 描述激光器光学交联或者穿过大气层链路的性能的基本公式可以被简化:

- 光学发射和接收天线没有中央遮挡物。
- 发射波形是高斯的, 并在  $1/e^2$  点处被截断。
- 接收到的波形是平面波。
- 空中圆形方向图在第一个零点处被截断。

#### 3.1 背景信号

在白天期间运行或者当被照射的物体出现在探测器视场中时, 背景信号将是主要的噪声源, 入射到探测器上背景信号的功率  $P_{\text{back}}$  可能源自天空、行星或恒星扩散的能量。天电噪声在白天的时候较大并且会随着当地气象条件而变化, 但总是以相当有限的电平出现, 当来自行星或恒星的噪声在接收机的视场之内时,

它们将是合成背景信号一个因素，可以将所有来源的噪声合计起来计算总的背景信号。

可以采取下面的步骤来计算地球站探测器的背景信号电平，下列参数是必需的：

$D$ : 接收机孔径直径 (m)

$\gamma$ : 地球站望远镜的遮挡比

$\varphi$ : 探测器视场 (rad)

$B$ : 接收机带宽 ( $\mu\text{m}$ )。

步骤 1: 计算接收机面积  $A_{rec}$ ，采用：

$$A_{rec} = (1 - \gamma^2) \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \quad \text{m}^2 \quad (17)$$

步骤 2: 计算接收机探测器视场立体角  $\varphi'$ ，采用：

$$\varphi' = 2\pi \left( 1 - \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right) \quad \text{Sr} \quad (18a)$$

对于较小的角度，可以简化成：

$$\varphi'_{det} = \frac{\pi\varphi^2}{4} \quad \text{Sr} \quad (18b)$$

步骤 3: 确定天空在 283 THz 处的辐射率数值  $H_{sky}$ 。如果无法测量这个数值，可从表 3 的数值中选取。

表 3

天空任意亮度条件下在 283 THz 处的辐射率， $H_{sky}$  ( $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{Sr}$ )

源	辐射率
明亮白天的太阳	54.45
正常白天	25.32
多云白天	17.99
夜晚	$1.000 \times 10^{-5}$

步骤 4: 计算探测器上来自天空的功率  $P_{sky}$ ，采用：

$$P_{sky} = H_{sky} \cdot A_{rec} \cdot \varphi' \cdot B \quad \text{W} \quad (19)$$

步骤 5: 如果恒星在 283 THz 存在辐照度的话，确定其出现在地球站视场中的数值  $N_{star}$ 。若无法测得这个数值，可以从表 4 中选取。如果视场中没有恒星，设  $P_{star} = 0$ ，前进到步骤 7。

表 4  
选择恒星在 283 THz 的辐照度  $N_{star}$ , ( $W/m^2/\mu m$ )

源	辐照度	源	辐照度
阿却尔纳星	$1.944\ 62 \times 10^{-9}$	五车二	$1.676\ 42 \times 10^{-8}$
毕宿五	$2.876\ 47 \times 10^{-8}$	双子座 $\beta$ 星	$1.613\ 59 \times 10^{-8}$
牵牛星	$2.688\ 64 \times 10^{-9}$	南河三	$1.225\ 10 \times 10^{-8}$
大角星	$3.227\ 19 \times 10^{-8}$	参宿七	$4.769\ 26 \times 10^{-9}$
参宿四	$3.992\ 78 \times 10^{-8}$	瑞吉尔肯特星	$1.676\ 42 \times 10^{-8}$
老人星	$2.094\ 29 \times 10^{-8}$	天狼星	$2.090\ 13 \times 10^{-8}$

步骤 6: 计算探测器上来自恒星的功率  $P_{star}$ , 采用:

$$P_{star} = N_{star} \cdot A_{rec} \cdot B \quad W \quad (20)$$

步骤 7: 由表 5 的数值可以确定接收机视场中行星的直径  $D_{planet}$ 、反照率  $\chi_{planet}$  和功率谱密度  $\psi_{planet}$ , 如果接收机的视场中没有行星, 设  $P_{planet} = 0$ , 前进到步骤 10。

表 5  
行星的直径、反照率和频谱密度

行星	直径 (m)	行星的 反照率	入射到行星上的 频谱密度 ( $W/\mu m$ )
水星	4 866 070	0.119	$8.336 \times 10^{16}$
金星	12 108 756	0.75	$1.469 \times 10^{17}$
火星	6 778 400	0.25	$1.043 \times 10^{16}$
木星	142 989 171	0.343	$3.950 \times 10^{17}$
土星	120 582 610	0.342	$8.228 \times 10^{16}$
天王星	51 204 220	0.3	$3.891 \times 10^{15}$
海王星	49 508 383	0.29	$1.373 \times 10^{15}$
冥王星	2 308 404	0.145	$1.803 \times 10^{12}$

步骤 8: 计算行星对着的角度  $\theta_{planet}$ , 如同由接收机看到的角度一样, 采用:

$$\theta_{planet} = \frac{D_{planet}}{R_{planet}} \quad rad \quad (21)$$

其中:

$R_{planet}$ : 从地球到行星的距离 (m)。

步骤 9: 当 $\theta_{planet} < \phi$ 时, 计算探测器上来自行星的功率, 采用:

$$P_{planet} = \left( \frac{\Psi_{planet} \cdot \chi_{planet}}{R_{planet}^2} \right) \cdot A_{rec} \cdot B \quad \text{W} \quad (22a)$$

否则,

$$P_{planet} = \left( \frac{\Psi_{planet} \cdot \chi_{planet}}{R_{planet}^2} \right) \cdot A_{rec} \cdot B \cdot \left( \frac{\phi'}{\theta'_{planet}} \right) \quad \text{W} \quad (22b)$$

其中 $\theta'_{planet}$ 是行星对着探测器的立体角, 由下式给出:

$$\theta'_{planet} = 2\pi \left( 1 - \cos \left( \frac{\theta_{planet}}{2} \right) \right) \approx \frac{\pi \theta_{planet}^2}{4} \quad \text{S/r} \quad (23)$$

步骤 10: 计算入射到探测器上背景信号的总功率 $P_{back}$ , 采用:

$$P_{back} = P_{sky} + P_{star} + P_{planet} \quad \text{W} \quad (24)$$

### 3.2 探测器噪声

大多数为外层空间和星际无线电通信规划的应用将采用具有雪崩光电二极管 (APD) 的直接检测接收机。APD 探测器通常工作在两个噪声受限检测区域的其中一个区域内。接收高输入功率电平的探测器通常会受到光子散粒噪声的限制, 然而, 接收低输入功率电平的探测器, 例如那些与外层空间和星际链路联系在一起的探测器, 是探测器噪声受限的。下面推导直接检测系统中紧跟着下一级放大器的、常用 APD 的 SNR:

计算过量噪声因数 $N_E$ , 采用:

$$N_E = Gk + \left( 2 - \frac{1}{G} \right) (1 - k) \quad (25)$$

其中:

$G$ : 增益

$k$ : 电子/空穴的电离速率。

于是, 可按下式计算 SNR:

$$SNR = \frac{G^2 R_D^2 P_S^2}{2eG^2 B(N_E) (R_D P_S + i_B) + 2ei_S + 4N_A B_F \left( \frac{k_B T}{R_L} \right)} \quad (26)$$

其中:

$e$ : 电子电荷 ( $1.6 \times 10^{-19}$  C)

$P_S$ : 接收信号平均功率 (W)

$R_D$ : APD 响应度

- $k_B$ : 玻尔兹曼常数 ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)  
 $T$ : 温度 (K)  
 $i_s$ : 探测器表面暗电流 (A)  
 $i_b$ : 探测器容积暗电流 (A)  
 $R_L$ : 互阻抗放大器的阻抗 ( $\Omega$ )  
 $N_A$ : 放大器噪声数值  
 $B_F$ : 接收机带宽 (Hz)。

#### 4 变量列表

- $a$ : 望远镜反射镜半径 (m)  
 $A$ : 望远镜孔径面积 ( $m^2$ )  
 $A_{rec}$ : 接收望远镜的面积 ( $m^2$ )  
 $\alpha$ : 比率,  $a/\omega$   
 $b$ : 副镜的半径 (m)  
 $B$ : 滤波器带宽 ( $\mu m$ )  
 $B_F$ : 滤波器带宽 (Hz)  
 $c$ : 光速 (m/s)  
 $\chi_{planet}$ : 行星的反射率  
 $d$ : 探测器的直径 (m)  
 $D$ : 孔径的直径 (m)  
 $D_{planet}$ : 行星的直径 (m)  
 $\delta$ : 由于探测器边缘能量泄漏带来的损耗 (dB)  
 $e$ : 电子电荷 (C)  
 $E_{pulse}$ : 每脉冲的能量 (J)  
 $f$ : 光学频率 (Hz)  
 $F$ : 望远镜的焦距 (m)  
 $\varphi$ : 探测器视场 (rad)  
 $\varphi'$ : 探测器立体角视场 (srad)  
 $G_0$ : 最大轴上天线增益 (dBi)  
 $G_r$ : 接收天线增益 (dBi)  
 $g_t$ : 增益效率  
 $G_t$ : 发射机天线增益 (dBi)  
 $\gamma$ : 遮挡比  
 $H_{sky}$ : 天空的辐射率 ( $W/m^2/\mu m/Sr$ )  
 $i_b$ : 探测器容积暗电流 (A)  
 $i_s$ : 探测器表面暗电流 (A)  
 $k$ : 电子/空穴的电离速率  
 $k_B$ : 玻尔兹曼常数  
 $L_t$ : 发射机损耗

$L_r$ :	接收机损耗
$L_p$ :	定向损耗
$L_a$ :	沿着空对地链路的大气损耗
$L_s$ :	自由空间损耗
$\lambda$ :	波长 (m)
$M$ :	调制指数
$N_A$ :	放大器噪声数值
$N_E$ :	过量噪声因数
$N_{star}$ :	恒星的辐照度 ( $W/m^2/\mu m$ )
$N_t$ :	所有源的噪声功率
$P_{ave}$ :	平均发射机功率 (W)
$P_{back}$ :	接收到总的背景功率 (W)
$P_{peak}$ :	峰值功率 (W)
$P_{planet}$ :	接收的来自受到光辐射行星的功率 (W)
$P_S$ :	接收到的信号功率 (W)
$P_{sky}$ :	接收到的来自天空的功率
$P_{star}$ :	接收到的来自恒星的功率 (W)
$P_t$ :	激光器平均输出功率 (W)
$\theta$ :	离开光轴的角度 (rad)
$\theta_{planet}$ :	行星对着的角度 (rad)
$\theta_{1/e^2}$ :	波束在点 $1/e^2$ 处的角宽度 (rad)
$\theta'_{planet}$ :	行星对着的立体角 (rad)
$R$ :	发射机和接收机之间的距离 (m)
$R_D$ :	APD 的响应度
$R_L$ :	互阻抗放大器的阻抗
$R_{planet}$ :	行星和接收机之间的距离 (m)
$t_d$ :	发射机静默时间 (s)
$t_p$ :	发射机脉冲时间 (s)
$t_s$ :	发射机时隙时间 (s)
$t_w$ :	发射机字时间 (s)
$T$ :	温度 (K)
$\omega$ :	波束在 $1/e^2$ 点处的收敛尺寸
$\Psi_{planet}$ :	月亮或行星的功率谱密度 ( $W/\mu m$ )。

## 附件 2

## 1 没有遮挡的圆形发射孔径天线的方向图

运行在 283 THz 左右没有遮挡的、圆形发射孔径天线增益方向图的限值大约为：

$$G_t(\varphi) = G_{max} - 0.9 - (4.5 \times 10^{-4}) \left( \frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2.5} \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 35 - 30 \log \left( \frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ$$

其中：

$$G_{max} = 20 \log \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right) : \text{主波束增益 (dBi)}$$

$$G_1 = G_{max} - 25.8 : \text{第一旁瓣增益 (dBi)}$$

$D$ : 孔径直径 (m)

$\lambda$ : 波长 (m)

$\varphi$ : 离开轴线的角度 (度)

$$\varphi_r = 5.83 \left( \frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right) : \text{第一旁瓣的角度 (度)}$$

$$\varphi_m = 0.75\varphi_r : \text{主瓣增益等于第一旁瓣增益的角度 (度)}$$

$\varphi_1$ : 光阑限制的视场 (度)。

## 2 有遮挡的圆形发射孔径天线的方向图

运行在 283 THz 左右有遮挡的、圆形发射孔径天线增益方向图的限值大约为：

$$G_t(\varphi) = G_{max} - 0.9 + 32 \log(1 - \gamma^2) - \left( 4 \times 10^{-4} + \frac{\gamma}{2000} \right) \left( \frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2.5} \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 40 + 15\gamma - 30 \log \left( \frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ$$



其中:

$G_{max} = 20 \log \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)$ :	主波束的增益 (dBi)
$G_1 = G_{max} + 2.17 + 15\gamma - 30 \log(5.77 - 2.9\gamma^2)$ :	第一旁瓣的增益 (dBi)
$D$ :	孔径直径 (m)
$\lambda$ :	波长 (m)
$\varphi$ :	离开轴线的角度 (度)
$\varphi_r = (5.77 - 2.9\gamma^2) \left( \frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right)$ :	第一旁瓣的角度 (度)
$\varphi_m = (0.71 - 0.5\gamma) \cdot \varphi_r$ :	当主瓣的增益等于第一旁瓣增益时的角度 (度)
$\varphi_1$ :	受光阑限制的视场
$\gamma = \frac{b}{a}$ :	遮挡比
$a$ :	主孔径的半径 (m)
$b$ :	副孔径的半径 (m)。

### 3 没有遮挡的圆形接收孔径天线的方向图天线

运行在 283 THz 左右没有遮挡的、圆形接收孔径天线增益方向图的限值大约为:

$G_t(\varphi) = G_{max} - (6 \times 10^{-4}) \left( \frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2.5}$	dBi	对于 $0 \leq \varphi \leq \varphi_m$
$G_t(\varphi) = G_1$	dBi	对于 $\varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$
$G_t(\varphi) = G_{max} + 42 - 30 \log \left( \frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi)$	dBi	对于 $\varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$
$G_t(\varphi) = -10$	dBi	对于 $\varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ$

其中:

$G_{max} = 20 \log \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)$ :	主波束的增益 (dBi)
$G_1 = G_{max} - 17.5$ :	第一旁瓣的增益 (dBi)
$D$ :	孔径直径 (m)
$\lambda$ :	波长 (m)
$\varphi$ :	离开轴线的角度 (度)
$\varphi_r = 5.14 \left( \frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right)$ :	第一旁瓣的角度 (度)

$\varphi_m=0.65\varphi_r$ : 当主瓣的增益等于第一旁瓣增益时的角度 (度)

$\varphi_1$ : 受光阑限制的视场 (度)。

#### 4 有遮挡的圆形接收孔径天线的方向图

运行在 283 THz 左右有遮挡的、圆形接收孔径天线增益方向图的限值大约为:

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 20 \log(1 - \gamma^2) - \left(6 \times 10^{-4} + \frac{\gamma}{3000}\right) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi\right)^{2.5} \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 44 + 8\gamma - 30 \log\left(\frac{D}{\lambda}\right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi} \quad \text{对于 } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ$$

其中:

$$G_{max} = 20 \log\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right): \text{主波束的增益 (dBi)}$$

$$G_1 = G_{max} - 15.15 + 8\gamma: \text{第一旁瓣的增益 (dBi)}$$

$D$ : 孔径直径 (m)

$\lambda$ : 波长 (m)

$\varphi$ : 离开轴线的角度 (度)

$$\varphi_r = 5.14 \cdot \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D}\right): \text{第一旁瓣的角度 (度)}$$

$\varphi_m = (0.62 - 0.3\gamma) \cdot \varphi_r$ : 当主瓣的增益等于第一旁瓣增益时的角度 (度)

$\varphi_1$ : 受光阑限制的视场

$$\gamma = \frac{b}{a}: \text{遮挡比}$$

$a$ : 主孔径的半径 (m)

$b$ : 副孔径的半径 (m)。