

ITU-R SA.1805建议书

在354*和366 THz附近工作的空对空通信系统的
技术与操作特性**

(ITU-R 235/7号课题)

(2007年)

范围

本建议书规定了运行在空对空方向、354 THz和366 THz频率附近的通信系统的技术参数（频率、链路方向、信号和数据特性、天线参数等）和运行特性，这些参数能用于共用研究。

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354 THz和366 THz频率范围内的轨道间通信规划通信链路；
- b) 利用最近的技术进步，天文学家们正在齐心协力地建造望远镜并在这些频谱范围内进行观测；
- c) 该部分频谱也同时用于其它的地面业务和空间业务；
- d) 该部分频谱也同时用于通信以外的科学和工业用途，

建议

1 关于在空对空方向、354 和 366 THz 频率附近操作的空间研究卫星的共用研究，应考虑附件 1 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。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，而且能满足用于空对空应用时对增益和波束方向性要求。

* 1 THz = 1 000 GHz。

** 应提请无线电通信第1研究组注意本建议书。

1.1 频率事项的考虑

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左右，相应的波长为大约1.5、1.06、0.965和0.850 μm 。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。对于轨道间通信，注意力正集中在0.850 μm 高功率半导体激光器的使用和用波长为1.5 μm 的掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大的半导体激光器波束的使用。对于不需要高发射功率的相对低速应用来说，配有工作在0.85 μm 半导体激光器的系统与EDFA相比在可靠性、功率消耗等方面更出色。

1.2 一般的任务参数

适于干扰分析的技术参数应该基于靠近地球的轨道间一般通信链路，因此，链路的距离将会从几千公里到几十万公里不等。运行在354THz和366THz频率附近的近地球轨道间通信链路的基本技术参数一览表见表1。

表 1

运行在354 THz和366 THz频率附近的空对空方向的
参考轨道间通信系统的技术参数

| 参数 | 前向链路 | 后向链路 |
|--------------------------|--|-------------------------------|
| 发射机功率(mW) | 10 | 40 |
| 发射机孔径(cm) | 25 | 26 |
| 发射机频率（波长）(THz) | 通信： 366 (0.819 μm) 信标： 374 (0.801 μm) | 354 (0.847 μm) |
| 调制 | 2PPM | NRZ |
| 定向准确度(μrad) | $\pm 2.6 (3\sigma)$ | |
| 自由空间范围(km) | 最大至40 000 | |
| 数据速率(Mbit/s) | 2.048 | 49.3724 |
| 接收机孔径(cm) | 26 | 25 |
| 探测器类型 | APD探测器 | APD探测器 |

APD: 雪崩光电二极管

NRZ: 非归零

PPM: 百万分率

2 链路方面的考虑

地球同步轨道(GEO)卫星和低地球轨道(LEO)卫星之间在空对空方向建立轨道间链路，在366 THz附近操作前向链路，在354 THz附近操作后向链路。在374 THz发射信标信号以辅助望远镜的定向和跟踪。

2.1 链路性能

像运行在传统无线电频段的空对空系统一样，用数据速率和误码率（BER）来度量运行在354 THz和366 THz附近频率的链路性能。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 误码率

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。

2.1.2 余量要求

运行在354 THz和366 THz频率附近的星际链路的典型余量要求为1到3 dB左右。

2.2 调制

运行在354 THz左右的后向链路采用NRZ，运行在366 THz左右的前向链路采用2PPM。这种调制技术考虑到由接收机进行直接探测，而不是采用相干接收机。

2.3 接收的信号

计算空对空台站在354 THz和366 THz频率附近接收到的信号电平的一般方法与传统的无线电频率系统中使用的方法相同。

$$P_S = P_t + G_t + G_r + L_t + L_r + L_p + L_S \quad \text{dBW} \quad (1)$$

其中：

P_S : 接收信号功率

P_t : 平均激光器输出功率

G_t : 发射机天线增益

G_r : 接收天线增益

L_t : 发射机损耗

L_r : 接收机损耗

L_p : 定向损耗

L_S : 自由空间损耗。

2.4 链路损耗

- L_t ，包括发射机光学系统的吸收、散射和反射损耗；
- L_r ，包括接收机光学系统的吸收、散射和反射损耗；
- L_p ，包括天线的影响或者卫星的抖动和发射天线的定向不准；
- 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。

表 2

运行在354 THz和366 THz频率附近空对空方向的
参考轨道间通信系统的技术参数

| 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 | 0.5 (= -3 dB) |
| 定向损耗, L_p | 0.5 (= -3 dB) |

在354 THz和366 THz频率附近的自由空间损耗 L_s 的计算方法与传统的无线电频率系统相同:

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

其中:

R : 发射机和接收机之间的距离 (m)

λ : 波长(m)

f : 光学频率(Hz)

c : 光速(m/s)。

2.5 发射/接收望远镜参数

运行在354 THz和366 THz频率附近的通信链路将望远镜作为发射和接收天线使用。发射和接收望远镜的天线方向图差异很大, 因为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。运行在354 THz和366 THz频率附近的接收和发射天线的增益方向包络图, 可参见ITU-R SA.1742建议书的附件2。ITU-R SA.1742建议书提供了运行在283 THz、空对地方向光学系统的参考天线增益方向图。该方向图也同时适用于运行在354 THz和366 THz频率附近空对空方向操作的系统。

2.5.1 直径

为了进行干扰分析, 应假设光学天线的直径为26/25cm, 发射孔径或者没有遮挡, 也可以有5 cm的遮掩。

2.5.2 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, 在发射激光能量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:

$$\theta_{1/e^2} = \frac{4\lambda}{\pi D} \quad \text{rad} \quad (3)$$

其中:

θ_{1/e^2} : 在 $1/e^2$ 点处波束的角宽度 (rad)

D : 孔径直径 (m)。

在26 cm的孔径发射354 THz高斯波束的情况下, $1/e^2$ 点处的波束宽度大约为 4.1×10^{-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。

以下公式(4)给出了孔径半径为 a 、输入收敛半径为 ω 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 ω 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。

$$G_t(\alpha, \gamma, X) = G_0 g_t(\alpha, \gamma, X) \quad (4)$$

其中:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad (5)$$

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = 2\alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^1 J_0(X\sqrt{u}) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (7)$$

- A : 望远镜孔径的面积 (m^2)
- a : 主镜的半径 (m)
- b : 副镜的半径 (m)
- g_t : 增益效率
- J_0 : 第一类零阶贝塞尔函数
- α : 比率 α/ω
- γ : 遮挡比率
- u : 积分变量

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

θ : 光轴的角度 (rad)。

对于轴线上, $X=0$, 公式 (6) 中的增益效率项变为:

$$g_t(\alpha, \gamma, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (8)$$

于是公式 (4) 中轴线上最大主波束增益变为:

$$G_t(\alpha, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (9)$$

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。

2.5.3 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:

$$\varphi = \frac{d}{F} \quad (10)$$

其中:

φ : 探测器视场 (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 φ 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:

$$G_R = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) + 10 \log (1 - \gamma^2) + \delta \quad \text{dBi} \quad (11)$$

其中:

A : 接收孔径的面积 (m^2)

λ : 波长 (m)

δ : 探测器边界溢出的能量导致的损耗 (dB)

且:

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (12)$$

其中：

a ：主镜的半径（m）

b ：副镜的半径（m）。

公式（11）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（11）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（12）中 b 值变为0，公式（11）第二项可以被忽略。

公式（11）的第三项 δ 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， δ 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， δ 仅为-0.5 dB。

2.6 定向和跟踪

运行在354 THz和366 THz频率附近波束宽度狭窄且长距离的空对空链路给系统强加了精确定向和跟踪的要求，典型的定向要求由不同的通信波束决定。对于表1中概述的参考系统，定向准确度为2.6微弧度（ μrad ），定向损耗仅为3 dB。

3 信噪比(S/N)

运行在354 THz和366 THz频率附近的空对空通信链路的性能直接取决于接收机获得高的信噪比（SN）。SN越高，BER越低。通常：

$$S/R = \frac{P_s}{N_t} \quad (13)$$

其中：

P_s ：按公式（1）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。背景信号是由于来自星体反照率的外部能量和太阳、行星或恒星光线到达探测器引起的，在第3.1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 探测器噪声

运行在354 THz和366 THz的通信系统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，是受探测器噪声限制的。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SN：

计算过量噪声因子 N_E ，采用：

$$N_E = Gk + \left(2 - \frac{1}{G}\right)(1-k) \quad (14)$$

其中：

- N_E : 过量噪声因子
- G : 增益
- k : 电子/空穴的电离速率。

于是，可按下式计算SN：

$$S/N = \frac{G^2 R_D^2 P_S^2}{2eG^2 B(N_E)(R_D P_S + i_B) + 2ei_S + 4N_A B_F \left(\frac{k_B T}{R_L}\right)} \quad (15)$$

其中：

- e : 电子电荷 (1.6×10^{-19} 库仑)
- P_S : 接收信号功率 (W)
- R_D : APD 响应度
- k_B : 玻尔兹曼常数 (1.38×10^{-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 (Ω)
- N_A : 放大器噪声数值
- B : 滤波器带宽(μm)
- B_F : 滤波器带宽 (Hz)。