

国 际 电 信 联 盟

ITU-R
国际电联无线电通信部门

ITU-R P.1622-1建议书
(08/2022)

**工作在20 THz-375 THz
频段内地对空系统设计
所需的预测方法**

P系列
无线电波传播



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的作用是确保所有无线电通信业务，包括卫星业务，合理、公平、有效和经济地使用无线电频谱，并开展没有频率范围限制的研究，在此基础上通过建议书。

无线电通信部门制定规章制度和政策的职能由世界和区域无线电通信大会以及无线电通信全会完成，并得到各研究组的支持。

知识产权政策（IPR）

国际电联无线电通信部门（ITU-R）的IPR政策述于ITU-R第1号决议所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/zh>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

ITU-R 建议书系列

（可同时在以下网址获得：<http://www.itu.int/publ/R-REC/zh>）

系列	标题
BO	卫星传输
BR	用于制作、存档和播放的记录；用于电视的胶片
BS	广播业务(声音)
BT	广播业务(电视)
F	固定业务
M	移动、无线电测定、业余无线电以及相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定和固定业务系统之间频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和标准频率发射
V	词汇和相关课题

注：本ITU-R建议书英文版已按ITU-R第1号决议规定的程序批准。

电子出版物
2023年，日内瓦

© 国际电联 2023

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段翻印本出版物的任何部分。

ITU-R P.1622-1建议书

工作在20 THz-375 THz频段内
地对空系统设计所需的预测方法

(2003-2022年)

范围

本建议书描述了适用于工作在20至375 THz之间的地空系统规划的传播效应。本书为瑞利和米氏散射以及大气中出现的湍流的影响提供了传播预测方法。这一建议书还参考了提供大气吸收损失预测方法的ITU-R P.676建议书。

关键词

大气吸收、湍流、振幅闪烁、瑞利散射、米氏散射

相关ITU-R建议书

ITU-R P.676建议书

ITU-R P.1621建议书

注 – 应使用建议书的最新修订/版本。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 20 THz-375 THz之间的频谱，在近地和深空环境下适用于某些空基通信；
- b) 合理地规划工作在20 THz-375 THz频段内的地空系统必须具备合适的传播预测技术；
- c) 对工作在20 THz-375 THz频段内地空系统最重要的传播相关影响进行预测的方法已经制定；
- d) 这些方法对可用的数据已尽可能地进行了测试，结果表明其准确度既兼容于传播现象的自然变化量，又适合于工作在20 THz-375 THz频段内的系统规划中的大多数现有应用，

认识到

国际电联《组织法》第12条第78款规定无线电通信部门的职责包括：“……进行无频率范围限制的研究，并通过建议书……”，

建议

采用附件1和2中给出的预测传播相关系统之影响的方法，在附件1和2中所指的各个有效范围内，用于规划地空系统。

注1 – 关于20 THz-375 THz之间频率基本传播数据的附加信息可在ITU-R P.1621建议书中找到。

附件1

1 引言

地球大气是复杂且动态的，会影响20 THz至375 THz频率范围内运行的地球与轨道航天器系统的性能。这些系统影响包括：

- 因沿传播路径存在的大气气体分子吸收而导致的信号振幅整体损耗；
- 信号振幅的总体损耗和背景噪声的增加，造成此现象的原因是沿传播路径存在的粒子散射，粒子的大小从一个波长的几分之一到多个波长不等；
- 由于大气热变化引起的湍流，接收信号的振幅和相位出现波动。

执行必要预测方法所需的代表性技术和公式在本附录的以下章节中给出。

2 吸收损耗

可以采用与ITU-R P.676建议书中的方法相似的逐线法计算大气吸收。但是，由于在整个10 THz-1 000 THz（30 微米–0.3 微米）频段内存在数千条独立的吸收线，这种方法为密集运算且很麻烦。低大气吸收的窗口在天文学界用表1所述标准滤波器识别。这些滤波器的中心频率仅根据大气吸收特性，对沿地空路径可用于通信的频谱区域做出估算。由于吸收取决于当地的温度、压力和大气化学成分，因此滤波器的带宽不一定与低大气吸收区域的带宽一致。四个最高频段代表可见光和紫外光谱的连续谱，大气吸收水平相对较低，但并非明显的低吸收区域。在部署地球站之前，应尽可能进行大气吸收的测量。

表 1

15 THz以上频率的标准天文滤波器

滤波器	Q	N	M	L'	L	K	H
中心频率 (THz)	15	30	63	79	86	136	180
波长 (微米)	20.25	10.1	4.80	3.80	3.50	2.20	1.65
带宽 (THz)	15.2	18.2	15.9	14.7	17.3	30.1	33.3
(微米)	6.50	5.70	1.20	0.70	0.70	0.48	0.30

滤波器	J	I _J	I _S	R	V	B	U
中心频率 (THz)	240	330	370	430	560	700	830
波长 (微米)	1.25	0.90	0.80	0.70	0.54	0.43	0.36
带宽 (THz)	74.7	90.5	115.1	138.1	93.2	164.5	163.6
(微米)	0.38	0.24	0.24	0.22	0.09	0.10	0.07

3 散射损耗

散射通常被定义为沿传播路径存在的粒子的能量重定向。当出现以下情况时，会对自由空间内在20 THz和375 THz频率工作的通信系统产生重要影响：

- 沿传播路径存在的直径约等于传输信号波长的粒子，会使传输信号偏离其预定路径；
- 传播介质中存在的直径远小于传输信号波长的粒子，会将外来能量重定向到目标接收器。

3.1 由米氏散射造成的传输信号衰减

米氏散射是频率低于375 THz的损耗的主要来源，且主要是由微小的水颗粒引起的。

当表征大气的局部测量不可用时，下述方法可用于计算因沿地空路径散射引起的衰减。如有测量值，可使用附录2中提供的详细方法计算。

以下方法适用于位于海拔0到5公里频率在150 THz到375 THz之间的地球站，这些频率通常与使用自由空间的通信有关。假设仰角大于45°，该方法的精度约为0.1 dB。然而，当地大气条件可能会导致几分贝的差异。

需要如下参数：

λ : 波长（微米）

h_E : 地球站高于平均海平面的高度（公里）

θ : 仰角（度）

步骤1：计算与波长相关的经验系数：

$$a = 0.000487\lambda^3 - 0.002237\lambda^2 + 0.003864\lambda - 0.004442 \quad (1a)$$

$$b = -0.00573\lambda^3 + 0.02639\lambda^2 - 0.04552\lambda + 0.05164 \quad (1b)$$

$$c = 0.02565\lambda^3 - 0.1191\lambda^2 + 0.20385\lambda - 0.216 \quad (1c)$$

$$d = -0.0638\lambda^3 + 0.3034\lambda^2 - 0.5083\lambda + 0.425 \quad (1d)$$

步骤2：计算消光比 τ' ，自 h_E 至 ∞ ：

$$\tau' = a h_E^3 + b h_E^2 + c h_E + d \quad \text{Np} \quad (2)$$

步骤3：沿以下路径计算散射引起的大气衰减 A_S ：

$$A_S = \frac{4.3429\lambda'}{\sin(\theta)} \quad \text{dB} \quad (3)$$

3.2 由于瑞利散射太阳能造成的背景噪声增加

对于工作频率低于375 THz的系统，由于瑞利散射造成的接收信号的损耗可以忽略。瑞利散射对工作频率大于375 THz的系统的最主要影响是在接收机中引入了背景噪声。背景噪声在沿地对空路径和空对地路径上都存在。与空间飞行器工作的地球站在白天操作的主要噪声源来自太阳光的瑞利散射。指向地球的空间飞行器也会受到地表面散射的太阳光产生噪声的影响。

4 湍流对工作在20-375 THz之间的系统的影响

如ITU-R P.1621建议书所述，湍流的大小是根据 C_n^2 剖面测量的。

湍流的影响通常可分为以下几类：

- 波束内能量重新分布引起的振幅闪烁；
- 输入信号到达角度的明显变化；
- 波束漂移导致波束质心偏离传播轴；
- 波前折射不均匀导致波束扩散，从而降低了接收天线孔径平面内的功率。

4.1 振幅闪烁

150 THz至375 THz频率间的湍流通过随机在波前表面空间重新分布功率，造成入射波对数辐照度 N 引起高斯分布的波动称为闪烁。

闪烁的强度根据波束振幅的变化测量。计算闪烁强度需要以下参数：

h_0 : 地面以上的地球站高度（米）

λ : 波长

θ : 仰角

Z : 湍流的有效高度（通常为20 000米）。

传统上，闪烁以 $\ln(N)$ 的方差（ σ^2 ）的形式给出：

$$\sigma_{\ln N}^2 = 2.253 k^{7/6} \sec^{11/6} \varphi \int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^{5/6} dh \quad \text{Np}^2 \quad (4a)$$

式中：

k : 波数（ $= 2\pi/\lambda$ ）

λ : 波长（米）

φ : 天顶角

h : 地面以上的高度（米）

相当于：

$$\sigma_{\ln N}^2 = \frac{1.924 \times 10^8 \int_{h_0}^Z C_n^2(h) (h - h_0)^{5/6} dh}{\lambda^{7/6} \sin^{11/6} \theta} \quad \text{Np}^2 \quad (4b)$$

其中波长为微米，其他参数如上所述。

如果需要，可通过将分子的系数与基数变化率和因子10相乘，轻松转换为波动的dB N ，其结果为：

$$\sigma_{\text{dB}N}^2 = \left(\frac{10}{\ln(10)} \right)^2 \sigma_{\ln N}^2 = \frac{3.622 \times 10^9 \int_{h_0}^Z C_n^2(h) (h - h_0)^{5/6} dh}{\lambda^{7/6} \sin^{11/6} \theta} \quad \text{dB}^2 \quad (4c)$$

如果 C_n^2 的本地测量值不可用，可使用ITU-R P.1621建议书第5.1.1段的剖面图。

表2提供了10 THz至1 000 THz（30微米至0.3微米）频谱范围内选定频率的示例。假设在使用ITU-R P.1621建议书第5.1.1段提供的湍流结构剖面，孔径小于大气相干长度 r_0 ，仰角为75°，地球站天线距离地面5.5米，垂直路径 v_{rms} 上的均方根风速为21米/秒和30米/秒的情况下，计算每个频率的 $\sigma_{\ln N}^2$ 和 $\sigma_{dB N}^2$ 值。

表 2

$C_0 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 的闪烁统计示例

频率 (THz)	波长 (微米)	$\sigma_{\ln N}^2$	$\sigma_{dB N}^2$	$\sigma_{\ln N}^2$	$\sigma_{dB N}^2$
		($v_{rms} = 21 \text{ m/s}$)		($v_{rms} = 30 \text{ m/s}$)	
563.9	0.532	0.23	4.35	0.36	6.84
352.9	0.850	0.13	2.52	0.21	3.96
282.0	1.064	0.10	1.94	0.16	3.05
193.5	1.55	0.07	1.25	0.10	1.97

4.1.1 地对空方向路径上的振幅闪烁

在从地球到太空方向的路径上，对数辐照度的变化 σ_{E-s}^2 始终较小 ($\ll 4$)。实验证明，超过这个极限的概率很低。典型情况下，随着频率从24 THz增加到750 THz（12.5微米到0.4微米）， $\sigma_{\ln N}^2$ 会下降大约两个数量级。

地对空方向的路径通常不考虑计算平均孔径。离开大气层的波前（wavefront）经历了与空对地方向相同的能量空间重新分布。然而，当波前在空间传播时，其衍射在大范围内扩散了单个振幅和相位扰动。因此，航天器接收孔径的相位相干半径远大于航天器接收器孔径可能的尺寸 (< 1 米)。因此，不会出现孔径平均化。接收器上出现的闪烁由下式给出：

$$\sigma_{E-s}^2 = \sigma_{\ln N}^2 N_p^2 \tag{5}$$

对于150 THz（2.0 微米）以下的操作，当 $\sigma_{\ln N}^2$ 约为0.15时，4 dB衰落以约150 Hz的频率和 10^{-5} 秒的时长出现约1%的时间。

4.1.2 空对地方向路径上的振幅闪烁

闪烁对空对地方向路径的影响可能大到严重限制接收器的性能。如果接收器具有大于大气相干长度 r_0 的有限孔径，闪烁的影响在孔径上呈空间平均分布，从而导致虽然孔径平均分布可减轻幅度闪烁效应，但被破坏的相位会显著降低单空间模式光接收器系统的性能，例如：相干检测或前置放大直接检测。

空对地方向路径上的 $\sigma_{\ln N}^2$ 值 σ_{s-E}^2 ，通过孔径平均因子A修改。孔径平均因子的定义为从有限尺寸收集孔径获得的对数辐照度方差与从点孔径获得的相应量的比值，计算公式如下：

步骤1：通过下式计算湍流标高， z_0 ：

$$z_0 = \left[\frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^2 dh}{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^{5/6} dh} \right]^{6/7} \quad \text{m} \quad (6)$$

式中：

h_0 ：地面以上的地球站高度（米）

h ：地面以上的高度（米）

Z ：地面以上湍流的有效高度（通常为20 000米）

步骤2：通过下式计算孔径平均因子A：

$$A = \frac{1}{1 + 1.1 \times 10^7 \left(\frac{D^2 \sin \theta}{z_0 \lambda} \right)^{7/6}} \quad (7)$$

式中：

D ：地球站孔径的直径（米）

θ ：仰角

λ ：波长（微米）

步骤3：通过下式计算空对地方向路径上对数辐照度的方差 σ_{s-E}^2 ，公式为：

$$\sigma_{s-E}^2 = A \sigma_{\ln N}^2 \quad \text{Np}^2 \quad (8)$$

4.2 到达角

接收波束到达角湍流造成的波动，是沿传播路径空气包的折射率变化引起的。这些波动对地球到太空方向的影响可以忽略不计。典型的均方根到达角变化约为1 μrad ，因此影响很小。然而，空对地的方向上的均方根波动更接近几个 μrad ，必须予以考虑。

对于大于45°的仰角，下述方法可用于计算通过给定湍流剖面空对地方向路径的到达角的方差。计算需要如下参数：

h_0 ：地面以上的地球站高度（米）

θ ：仰角

D_R ：接收器孔径的直径（米）

Z ：湍流的有效高度（通常为20 000米）

步骤1：获得大气的垂直湍流剖面。如果无法从本地数据来源获得该长期统计数据，则可从ITU-R P.1621建议书第5.1.1段中获得估算值。

步骤2: 通过下式计算综合湍流剖面 ζ :

$$\zeta = \int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh \quad \text{m}^{1/3} \quad (9)$$

其中 h 是地面以上的高度(米)。

如果综合 C_n^2 剖面的局部测量不可用, ITU-R P.1621建议书的公式(9)至(12)中给出的经验近似值可为大多数应用提供令人满意的结果。

步骤3: 通过正式计算到达角的变化 σ_β^2 :

$$\sigma_\beta^2 = \frac{2.914 \zeta D_R^{-1/3}}{\sin \theta} \quad \text{rad}^2 \quad (10)$$

沿着空对地方向的路径, 波束的发散和通过自由空间的长距离传播, 将使波前端在到达湍流时远大于 r_0 。因此, 大气的影晌在波束的宽度上是平均的。公式(11)中的天线尺寸项表示地球站看到的波束部分。

4.3 波束飘移

波束飘移是波束偏离预期传播方向的位移。波束飘移在地对空的方向上是显著的, 并且变化可以波束的宽度为量级。在距离 L 处, 飘移波束的均方根位移 r_c 由下式给出:

$$\sigma_{rc} = 2080 \cdot L \sqrt{\frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh}{D_T^{1/3} \sin(\theta)}} \quad \text{米} \quad (11a)$$

式中:

L : 从地球站到卫星的传播距离(公里)

D_T : 发射孔径的直径(米)

h_0 : 地面以上的地球站高度(米)

h : 地面以上的高度(米)

Z : 湍流的有效高度(通常为20 000米)

飘移波束的均方根角位移 ω_c 可通过从公式中去除传播路径长度来计算:

$$\sigma_{\omega c} = \frac{\sigma_{rc}}{L \times 10^3} = 2.08 \sqrt{\frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh}{D_T^{1/3} \sin(\theta)}} \quad \text{rad} \quad (11b)$$

如果综合 C_n^2 剖面的局部测量不可用, ITU-R P.1621建议书的公式(9)至(12)给出的经验近似值可为大多数应用提供令人满意的结果。

通过使用多波束或由跟踪设备控制的发射器, 有可能减轻地对空方向的波束飘移。波束飘移在空对地的方向上并非重大问题。沿这个方向传播的波束只在最后10到20公里的路径中通过湍流传播。

4.4 波束扩展

波束扩展是指波束直径的增加超过了由于发散造成的直径增大，这是大气湍流传播的结果。因为发射的能量被扩展到更大的区域，所以波束扩展导致到达接收机的功率电平降低。然而，相对于发散而言，由大气引起的扩展量通常非常小，并且不考虑在地对空或空对地方向上信号的明显损耗。

附件2

对瑞利和米氏散射衰减的详细计算

如果表征大气的局部测量值可用，下述方法可用于计算沿地空路径的衰减。该模型所需的参数如下：

λ : 波长（微米）

h_E : 地球站高于海平面的高度（公里）

θ : 仰角

步骤1：从地球站高度到海平面上30公里计算 β_R 瑞利散射系数，增量为1公里，计算公式如下：

$$\beta_R(h) = \sigma_R n_R(h) \times 10^3 \quad \text{km}^{-1} \quad (12)$$

式中：

σ_R : 瑞利散射截面（米²）

$n_R(h)$: 大气数密度（米⁻³）

在30公里以上，瑞利散射的影响可以忽略不计。如果没有 σ_R 的测量值，则使用表3中给出的标准参考大气值。如果没有可用的 n_R 测量值，则使用表4中给出的标准参考大气值。

步骤2：计算米氏（即气溶胶）散射系数 β_A ，从地球站高度到海平面上30公里，增量为1公里：

$$\beta_A(h) = \frac{\beta_A(0) n_A(h)}{n_A(0)} \quad \text{km}^{-1} \quad (13)$$

式中：

$\beta_A(0)$: 海平面气溶胶散射系数（公里⁻¹）

$n_A(h)$: 海拔 h 公里上的气溶胶数密度（米⁻³）

如果没有 β_A 的海平面测量值，则使用表3中给出的标准参考大气值。如果没有可用的 n_A 测量值，则使用表4中给出的标准参考大气值。

表3

对于几个波长的瑞利散射交叉面 (σ_R) 和
海平面的米氏散射系数 ($\beta_A(0)$)

波长 (微米)	$\sigma_R^{(1)}$ (米 ²)	$\beta_A(0)^{(2)}$ (公里 ⁻¹)	波长 (微米)	$\sigma_R^{(1)}$ (米 ²)	$\beta_A(0)^{(2)}$ (公里 ⁻¹)
0.50	6.735×10^{-31}	0.167	1.06	3.320×10^{-32}	0.113
0.55	4.563×10^{-31}	0.158	1.26	1.600×10^{-32}	0.108
0.60	3.202×10^{-31}	0.150	1.67	5.210×10^{-33}	0.098
0.65	2.313×10^{-31}	0.142	2.17	1.800×10^{-33}	0.085
0.70	1.713×10^{-31}	0.135	3.50	2.681×10^{-34}	0.070
0.80	9.989×10^{-32}	0.127	4.00	1.571×10^{-34}	0.063
0.90	6.212×10^{-32}	0.120			

(1) 表格中未包括的波长的 σ_R 值可采用对数线性关系进行插值。

(2) 假设在幂律关系的前提下, 可以对表中未包括的波长的 $\beta_A(0)$ 值进行插值。

表4

针对海平面以上的几个高度的气溶胶数
密度 n_A 和大气数密度 n_R ,

高度 (公里)	n_A (米 ⁻³)	n_R (米 ⁻³)	高度 (公里)	n_A (米 ⁻³)	n_R (米 ⁻³)
0	2.0×10^8	2.548×10^{25}	16	6.7×10^4	3.462×10^{24}
1	8.7×10^7	2.312×10^{25}	17	7.3×10^4	2.959×10^{24}
2	3.8×10^7	2.093×10^{25}	18	8.0×10^4	2.530×10^{24}
3	1.6×10^7	1.891×10^{25}	19	9.0×10^4	2.163×10^{24}
4	7.2×10^6	1.704×10^{25}	20	8.6×10^4	1.849×10^{24}
5	3.1×10^6	1.532×10^{25}	21	8.2×10^4	1.574×10^{24}
6	1.3×10^6	1.373×10^{25}	22	8.0×10^4	1.341×10^{24}
7	4.0×10^5	1.227×10^{25}	23	7.6×10^4	1.144×10^{24}
8	1.4×10^5	1.093×10^{25}	24	5.2×10^4	9.760×10^{23}
9	5.0×10^4	9.713×10^{24}	25	3.6×10^4	8.335×10^{23}
10	2.6×10^4	8.599×10^{24}	26	2.5×10^4	7.123×10^{23}
11	2.3×10^4	7.586×10^{24}	27	2.4×10^4	6.092×10^{23}
12	2.1×10^4	6.487×10^{24}	28	2.2×10^4	5.214×10^{23}
13	2.3×10^4	5.544×10^{24}	29	2.0×10^4	4.466×10^{23}
14	2.5×10^4	4.739×10^{24}	30	1.9×10^4	3.848×10^{23}
15	4.1×10^4	4.050×10^{24}			

注1 – 表中未包括的高度的 n_A 和 n_R 值, 可以采用线性插值。

步骤3: 通过下式计算从地球站高度到海拔30公里的每个高度上的散射消光系数 β_T :

$$\beta_T(h) = \beta_R(h) + \beta_A(h) \quad \text{km}^{-1} \quad (14)$$

步骤4: 通过下式计算从地球站高度到海拔30公里的散射消光比 τ'_T :

$$\tau'_T = \sum_{h=h_0}^{30} \overline{\beta_T(h)} \Delta h \quad (15)$$

式中:

h_E : 地球站高于海平面的高度 (公里)

$\overline{\beta_T(h)}$: $\beta_T(h)$ 和 $\beta_T(h-1)$ (公里⁻¹) 的平均值

Δh : h 与 $h-1$ 之间的距离 (公里)

步骤5: 通过下式计算沿地空路径的散射总衰减 A_S :

$$A_S = 10 \log_{10}(e^{\tau'_T / \sin \theta}) \approx \frac{4.3429}{\sin \theta} \tau'_T \quad \text{dB} \quad (16)$$