

# 火星中继通信系统链路规划及计算

钟源，贾岩森，黄蕾，李锦扬

东南大学 信息工程学院，江苏省 南京 211100

**摘要：**本报告详细分析了火星通信系统链路规划及计算，包括火星着陆器与火星轨道器之间的链路以及火星轨道器与地球地面站之间的链路。报告建立了链路模型，分析了影响通信链路的主要因素，如自由空间损耗、火星沙尘、火星云雾、火星大气吸收等。通过具体的链路分析与计算，详细计算了火星着陆器-火星轨道器通信链路段和火星轨道器-地球站通信链路段的损耗。报告还对链路的频率特性进行了分析，并讨论了不同频段下的损耗变化规律。最后，报告提供了通信系统分析，为火星通信系统的设计和优化提供了理论依据和实践指导。

**关键词：**火星中继通信系统，链路规划，自由空间损耗，降雨损耗，太阳闪烁损耗，大气吸收损耗，频率特性，通信链路分析，天线增益

## 引言

随着深空探测技术的不断进步，火星作为太阳系中与地球环境最为相似的行星，成为了人类探索宇宙的重要目标之一。火星中继通信系统作为连接地球与火星的关键技术，其性能直接影响着深空探测任务的成败。火星与地球之间的中继通信系统链路由两段组成：火星着陆器与火星轨道器之间的链路，以及火星轨道器与地球地面站之间的链路。这两段链路由于所处的环境和距离的不同，面临着不同的挑战和影响因素。本报告旨在通过对火星中继通信系统链路的建模、分析与计算，评估链路损耗，探讨频率特性，并提出相应的通信系统设计方案。通过对火星着陆器-火星轨道器通信链路段和火星轨道器-地球站通信链路段的详细分析，本报告将为火星中继通信系统的设计和优化提供理论支持和实践指导，以确保深空通信的可靠性和效率。

一、链路建模

经过论文查找和小组讨论，我们发现火星与地球的通信系统链路可由两段组成（图 1），第一段是火星着陆器与火星轨道器之间的链路，第二段是火星轨道器与地球地面站之间的链路。一个典型的例子便是美国的“好奇号”火星探测器，图 2 为美国“好奇号”火星探测器的数据传输链路，着陆器到达火星后与地球深空站主要通过轨道器（火星奥德赛、火星勘察轨道器）进行中继数据传输。火星到轨道器之间的链路通过特高频 UHF（Ultra High Frequency）进行传输，轨道器到地球之间通过 X 或 Ka 波段传输数据。而我们将选取火星着陆器到火星勘察轨道器以及火星勘察轨道器与地球地面站之间的链路为例，作重点分析。

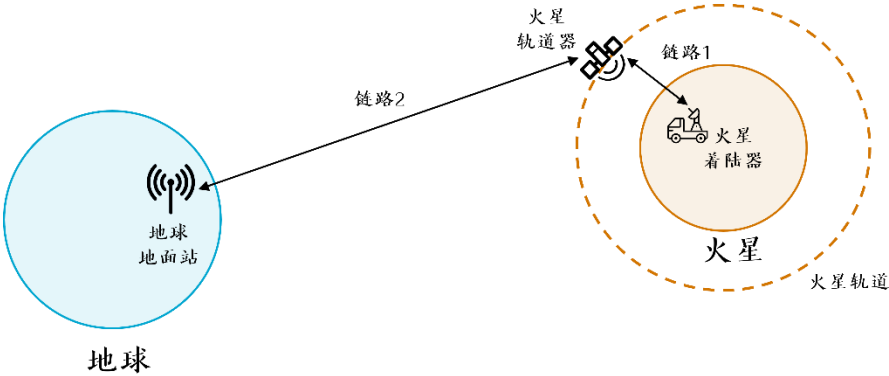


图 1. 火星通信系统链路模型图

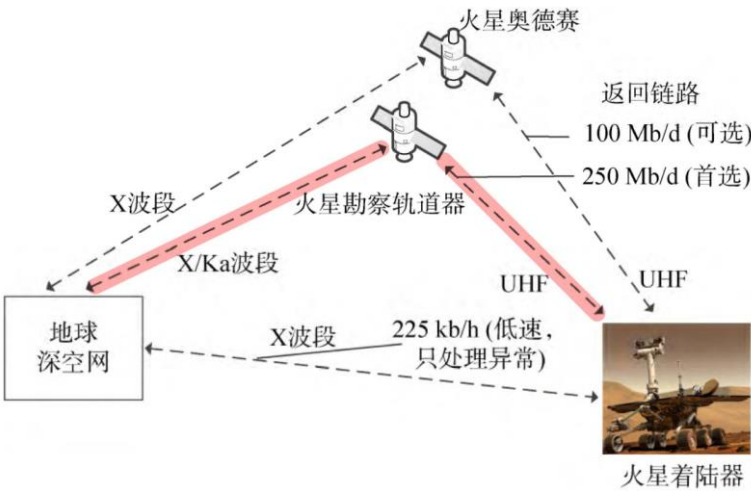


图 2. “好奇号”火星探测器数据传输链路图

两段通信链路中主要的影响因素如图 3<sup>[1]</sup>所示。可以看到火星着陆器与火星

轨道器之间的链路主要考虑自由空间损耗、火星沙尘、火星云雾、火星大气吸收的影响。火星轨道器与地球地面站之间的链路主要考虑地球大气吸收、降雨、云雾、太阳闪烁、自由空间损耗的影响。

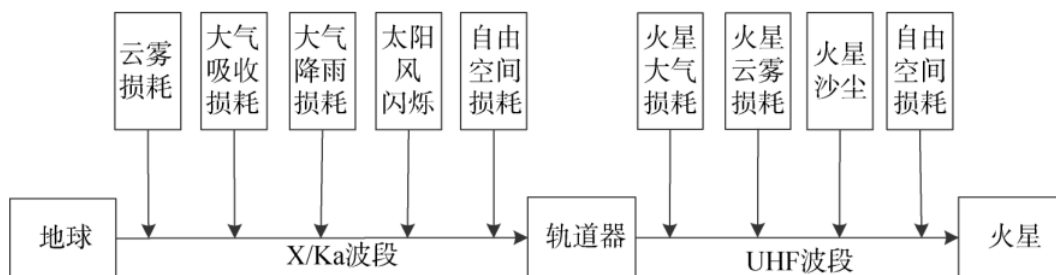


图 3. 通信链路中的主要影响因素

## 二、链路分析与计算

### (一) 火星着陆器-火星轨道器通信链路段

由于火星着陆器-火星轨道器通信链路主要采用 UHF 频段（300MHz-3GHz）进行通信，我们选取通信频率  $f = 400\text{MHz}$ ，波长则为  $\lambda = \frac{c}{f} = 0.75\text{m}$ ，选取天线仰角  $\theta = 10^\circ$ 。由中国气象局发布的数据，火星表面温度温差较大，为简化分析选取火星表面平均气温  $T = -63^\circ\text{C}$ （210K）。表 1 给出了火星中继轨道器的轨道高度，我们主要分析火星全球勘探者与火星着陆器之间的通信链路，故选取轨道高度为  $d = 400\text{km}$ 。

表 1. 火星中继轨道器的轨道高度

Table 1 Orbital altitude of the Mars relay orbiter

轨道器	火星全球勘探者	火星奥德赛	火星快车	火星侦察轨道器
火星轨道高度	400km 圆形轨道	400km 圆形轨道	250×10142km	255×320km

以下为具体分析：

#### 1. 自由空间损耗

对深空通信链路而言，信号在空间传播的最大损耗来自自由空间损耗，信

号在自由空间的损耗为

$$L_f = 20 \cdot \lg(f) + 20 \cdot \lg(d) + 32.442 \quad (1)$$

其中， $L_f$  (dB) 为自由空间损耗， $d$  (km) 为收发天线之间的传播距离， $f$  (MHz) 为通信电磁波的频率。对于火星着陆器-火星轨道器通信链路段，我们选取  $d = 400\text{km}$ ， $f=400\text{MHz}$ ，可以计算得  $L_{M,f} = 136.52\text{dB}$ 。

## 2. 火星大气吸收损耗

火星大气稀薄，主要成分是  $\text{CO}_2$ ，火星大气的平均高度为  $125\text{km}$ ，尽管与地球大气相比，火星大气相对稀薄，但是在深空通信中仍需要考虑电磁波在火星大气中的衰减问题，要留有一定的余量以保证正常的通信过程。电磁波在大气中的损耗主要来自于大气中氧气和水蒸气的吸收损耗。表 2 为火星与地球的大气参数，表 3 和表 4 分别为火星、地球大气主要气体的体积百分数。

表 2. 火星与地球的大气参数

Table 2 Atmosphere parameters of the Mars and earth

行星	压强 (mb)	大气温度 (K)	均质大气高度 (km)
地球	1013	300	9.5
火星	6.1	210	11.1

表 3. 火星大气中主要气体的体积百分数

Table 3 The volume percentages of the main gases in the Mars atmosphere  
i)

气体名称	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$	Ar	$\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	Ne
体积百分比	95.32%	2.7%	1.6%	0.13%	0.03%	0.00025%

表 4. 地球大气中主要气体的体积百分数

Table 4 The volume percentages of the main gases in the earth atmosphere

气体名称	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	Ar	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$
体积百分比	78.08%	20.95%	0.934%	0.033%	0.25%

在考虑火星大气的吸收损耗时，主要考虑大气中氧气和水蒸气对信号的影响，因此火星大气单位长度的损耗  $\gamma_M$  (dB/km) 可表示为

$$\gamma_M = \alpha_o n_{M,o} + \alpha_w n_{M,w} \quad (2)$$

其中， $\alpha_o$ 和 $\alpha_w$ 分别为氧气、水蒸气的吸收系数。 $n_{M,o}$ 和 $n_{M,w}$ ，分别为火星氧气、火星水蒸气的分子数密度（ $m^{-3}$ ）。

小组查阅了文献 ITU-R P.676-13<sup>[2]</sup>，发现在地球上水蒸气和氧气的衰减系数如下图。而火星着陆器到火星轨道器之间的链路通过特高频 UHF（为 0.3~3GHz）进行传输，由图 4 可得在 UHF 频段内， $\alpha_o n_{E,o}$ 和 $\alpha_w n_{E,w}$ 近似不变，故此处选取 $\alpha_o n_{E,o}$ 和 $\alpha_w n_{E,w}$ 的上限0.007dB/km和0.002dB/km。

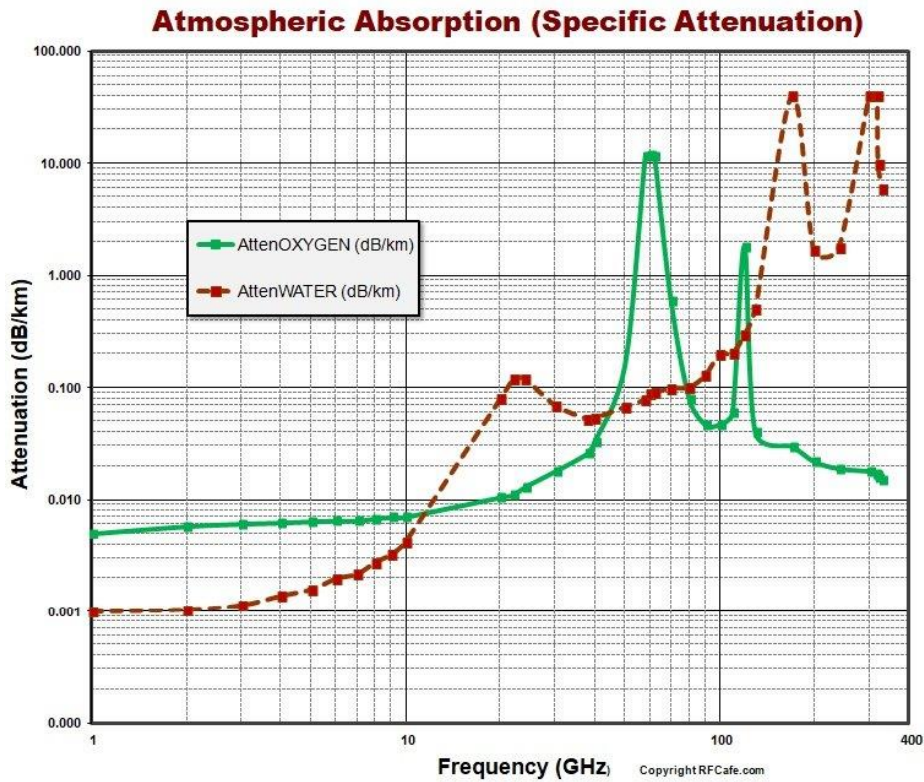


图 4. 地球上的水蒸气和氧气的单位衰减损耗

而地球表面和火星表面氧气分子数密度之比为

$$\frac{n_{E,o}}{n_{M,o}} = \frac{F_{E,o}}{F_{M,o}} \times \frac{P_E}{P_M} \times \frac{T_M}{T_E} \quad (3)$$

$F_{E,o}$ 和 $F_{M,o}$ 分别为氧气在地球、火星的体积百分数， $P_E$ 和 $P_M$ 分别为地球、火星的大气压强， $T_E$ 和 $T_M$ 分别是地球、火星大气温度。同理，计算出地球和火星表面水蒸气分子数密度之比，将相关参数代入式（2）得 $\frac{n_{E,o}}{n_{M,o}} \approx 18733$ ， $\frac{n_{E,w}}{n_{M,w}} \approx 969$ ，则火星单位长度的损耗 $\gamma_M$ 为

$$\gamma_M = \frac{1}{18733} \alpha_o n_{E,o} + \frac{1}{969} \alpha_w n_{E,w} \quad (4)$$

当火星轨道器到达火星着陆器上空附近时，着陆器发送数据给轨道器，因此在粗略估算时暂不考虑路径倾斜问题，火星大气损耗的传输路径约等于火星大气的高度 $H_{M,o}$ （取 10km），火星大气损耗 $A_{M,gas}$ 为

$$A_{M,gas} = \frac{1}{18733} \alpha_o n_{E,o} \times H_{M,o} + \frac{1}{969} \alpha_w n_{E,w} \times H_{M,o} \quad (5)$$

代入火星大气高度 $H_{M,o}=10\text{km}$ ，在单位距离内， $\alpha_o n_{E,o} = 0.007\text{dB/km}$ 和 $\alpha_w n_{E,w} = 0.002\text{dB/km}$ 。代入以上数据，可以计算得到火星大气损耗为 $A_{E,gas} = 0.00002706\text{dB}$ 。

### 3. 火星云雾损耗

火星大气中的水蒸气含量只有地球的千分之一，但即使这么小的数量也可以凝结成团，形成云雾。对于火星云雾损耗的计算，可以参考地球云雾损耗的计算模型，在 ITU-R P.840-6 建议书中，给出了计算地球云雾损耗的方法，云雾损耗每千米的衰减值 $\gamma_c$  (dB/km) 为

$$\gamma_c = K_1 M \quad (6)$$

其中， $K_1((\text{dB/km})/(\text{g/m}^3))$ 是衰减系数， $M(\text{g/m}^3)$ 是云或雾中的水蒸气密度。对于能见度约为300m的中等雾，水蒸气密度约为  $0.05\text{g/m}^3$ ，能见度为50m的浓雾，水蒸气密度约为  $0.5\text{g/m}^3$ 。衰减系数 $K_1$ 为

$$K_1 = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \quad (7)$$

其中 $f(\text{GHz})$ 是传输频率，

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (8)$$

$\varepsilon'(f) + j\varepsilon''(f)$ 是水的复介电常数，

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]} \quad (9-1)$$

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]} \quad (9-2)$$

其中  $\varepsilon_0 = 77.66 + 103.3 (\phi - 1)$ ,  $\varepsilon_1 = 0.0671\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_2 = 3.52$ ,  $\phi = \frac{300}{T}$ 。  $T$  是火星表面温度, 单位为 K ( $T=210K$ )。而  $f_p$  和  $f_s$  为主要和次要弛豫频率, 有  $f_p = 20.2 - 146(\phi - 1) + 316(\phi - 1)^2(\text{GHz})$ ,  $f_s = 39.8f_p(\text{GHz})$ 。可以得到云雾衰减  $A_g(\text{dB})$  为

$$A_g = \frac{\gamma_c L_c}{\sin \theta} \quad (10)$$

其中,  $L_c(\text{km})$  是云层或雾层的厚度,  $\theta$  是接收站天线的倾斜角度。假设雨雾的密度为  $M=0.5\text{g/m}^3$ , 云层厚度  $L_c=1\text{km}$ , 天线仰角设为  $\theta = 10^\circ$ , 可计算得云雾的吸收损耗为  $A_g=0.000179\text{dB}$ 。

#### 4. 火星沙尘损耗

火星最大的特点之一是沙尘暴, 火星风常常会引发巨大的沙尘暴, 这种现象在南半球的春末或夏初尤为明显。沙尘粒子通过散射或吸收引发电磁波的衰减。火星沙尘粒子的大小在  $10\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$  左右, 沙尘引发的衰减  $A(\lambda)(\text{dB/km})$  可表示为

$$A(\lambda) = \frac{1.029 \times 10^6 \varepsilon_d''}{\lambda [(\varepsilon_d' + 2)^2 + \varepsilon_d'']} \sum_i N_i r_i^3 \quad (11)$$

其中,  $N_i$  是每平方米中粒子半径在  $r_i$  到  $r_i + \Delta r_i$  之间的所有粒子数目,  $\varepsilon_d''$  和  $\varepsilon_d'$  是尘埃颗粒的相对介电常数的实部和虚部,  $\lambda$  是波长。沙尘引发的衰减也可通过平均粒子尺寸  $\bar{r}(\mu\text{m})$  来计算

$$A(\lambda) = \frac{1.029 \times 10^6 \varepsilon_d''}{\lambda [(\varepsilon_d' + 2)^2 + \varepsilon_d'']} N_T \bar{r}^{-3} \quad (12)$$

$N_T(m^{-3})$ 是尘土的总数目。表 5 列出了地球与火星的沙尘暴参数。

表 5. 地球与火星的沙尘暴参数

Table 5 Sandstorm parameters of the earth and Mars

	$N_T(m^{-3})$	$\rho(g/m^3)$	$\bar{r}(\mu m)$	$r_{max}(\mu m)$	路径长度 (km)	能见度 (m)
地球	$10^8$	$2.6 \times 10^6$	30~40	80~300	10	3.8~5.1
火星	$3 \times 10^7$	$3 \times 10^6$	1~10	20	10	184

表 5 中  $r_{max}(\mu m)$  是最大粒子半径,  $\rho(g/m^3)$  是粒子的密度。火星上沙尘的平均介电常数  $\epsilon_d(\epsilon_d = \epsilon'_d + j\epsilon''_d)$  的实部和虚部取决于无线电波的频率、沙尘的组成成分、沙尘大小和沙尘的含水量。火星中水分的含量只有 0.13%，因此按照干燥沙尘中  $\epsilon'_d$  和  $\epsilon''_d$  的值 ( $\epsilon'_d = 5.23$ ,  $\epsilon''_d = 0.26$ ) 来进行估算。

在波长  $\lambda = \frac{c}{f} = 0.75m$  情况下, 选取沙尘半径为  $\bar{r} = 10\mu m$ , 电磁波穿过长度为  $H_{M,dust} = 10km$  的沙尘云时, 可以得到火星沙尘损耗为  $A_{M,dust} = 0.0020dB$ .

综上分析, 可得地火星着陆器-火星轨道器通信链路段的总损耗为

$$A_M = L_{M,f} + A_{M,dust} + A_{M,gas} + A_g \quad (13)$$

代入各部分损耗, 可计算得:  $A_M = 136.5266dB$ .

## (二) 火星轨道器-地球站通信链路段

火星轨道器到地球站之间通过 X 波段 (8-12GHz) 或 Ka 波段 (26.5-40GHz) 传输数据, 此段通信链路直接与对地通信链路的特性差别不大, 主要考虑自由空间损耗、太阳风闪烁损耗、地球大气降雨损耗、大气吸收损耗、云雾损耗的影响。我们选取通信频率为  $f = 8GHz$ , 波长为  $\lambda = \frac{c}{f} = 0.0375m$ , 假设通信站为北京站为例, 选取天线仰角  $\theta = 41.76^\circ$ , 地球表面空气温度  $T = 15^\circ C (288K)$ 。

以下为具体分析:

### 1. 自由空间损耗

火星距离地球的最近距离为 0.6 亿公里, 最远距离为 4 亿公里。与火星轨道器-火星着陆器之间的通信链路相比, 火星轨道器-地球站之间的通信距离巨



大，因此自由空间损耗对该段链路影响更大。分别取距离 $d$ 为 0.6、1、2、3、4 亿公里，带入计算自由空间损耗的公式 $L_f = 20 \cdot \lg(f) + 20 \cdot \lg(d) + 32.442$ ，代入不同的 $d$ 值，可以计算得 $L_{E,f} = 266.0248$ 、 $270.4618$ 、 $276.4824$ 、 $280.0042$ 、 $282.5030$ dB。

## 2. 地球大气降雨损耗

平均年度 $p\%$ 时间可能达到的雨衰量 $A_p$ (dB)为

$$A_p = \gamma_R L_E \quad (14)$$

其中， $\gamma_R$ (dB/km)为雨衰率， $L_E$ (km)为有效路径长度。 $\gamma_R = kR^\partial$ ， $R$ 是降雨率 (mm/h)， $k$ 和 $\partial$ 是随频率和极化方式而变化的参数，通过查阅资料，我们可以在 ITU-R P. 839-3<sup>[3]</sup> 建议书中查到了 $k$ 和 $\partial$ 的计算方法。已知通信频率为 $f = 8$ GHz，我们选择分析极化方式为圆极化的电磁波（这是十分常见的极化方式），计算方法如下：

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 \left( a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k \log_{10} f + c_k \quad (15-1)$$

$$\partial = \sum_{j=1}^5 \left( a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_\partial \log_{10} f + c_\partial \quad (15-2)$$

其中， $f$ 为频率， $k$ 为 $k_H$ 或 $k_V$ ， $\partial$ 为 $\partial_H$ 或 $\partial_V$ ，水平极化的系数 $k_H$ 的常数值在表 6 中给出，而垂直极化的系数 $k_V$ 的常数值在表 7 中给出。表 8 给出了水平极化的系数 $\partial_H$ 的常数值，而表 9 给出了垂直极化的系数 $\partial_V$ 的常数值。

表 6. 水平极化系数 $k_H$ 的常数值

Table 6 Constant value of horizontal polarization coefficient  $k_H$

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-5.33980	-0.10008	1.13098	-0.18961	0.71147
2	-0.35351	1.26970	0.45400		
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

表 7. 垂直极化系数 $k_V$ 的常数值Table 7 Constant value of vertical polarization coefficient  $k_V$ 

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-3.80595	0.56934	0.81061	-0.16398	0.63297
2	-3.44965	-0.22911	0.51059		
3	-0.39902	0.73042	0.11899		
4	0.50167	1.07319	0.27195		

表 8. 水平极化系数 $\partial_H$ 的常数值Table 8 Constant value of horizontal polarization coefficient  $\partial_H$ 

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
1	-0.14318	1.82442	-0.55187	0.67849	-1.95537
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		

表 9. 垂直极化系数 $\partial_V$ 的常数值Table 9 Constant value of vertical polarization coefficient  $\partial_V$ 

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
1	-0.07771	2.33840	-0.76284	-0.053739	0.83433
2	0.56727	0.95545	0.54039		
3	-0.20238	1.14520	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

对于线极化和圆极化中所有的路径几何，可以通过等式(15-1)和(15-2)中给定的值由下列等式计算出等式(14)中的系数：

$$k = [k_H + k_H + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2 \quad (16-1)$$

$$\partial = [k_H \partial_H + k_H \partial_V + (k_H \partial_H - k_H \partial_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2k \quad (16-2)$$

此处的 $\theta$ 是路径斜角， $\tau$ 是相对水平位置的极化斜角（对于圆极化， $\tau=45^\circ$ ）。而表 10 给出了我国典型站点的降雨率。

表 10. 我国典型站点的降雨率

Table 10 Rainfall rate at typical stations in my country

站名	降雨率 0.01% (mm/h)	纬度 ( $^\circ$ )	海拔高度 (km)	天线仰角 ( $^\circ$ )
北京	42	39.54	0.043	41.76
西安	39	34.3	0.3969	49.67
昆明	42	25.12	1.891	60.72
乌鲁木齐	12	43.5	0.91	37.24

图 5<sup>[4]</sup> 给出了计算等效长度 $L_E$ 的模型示意图。

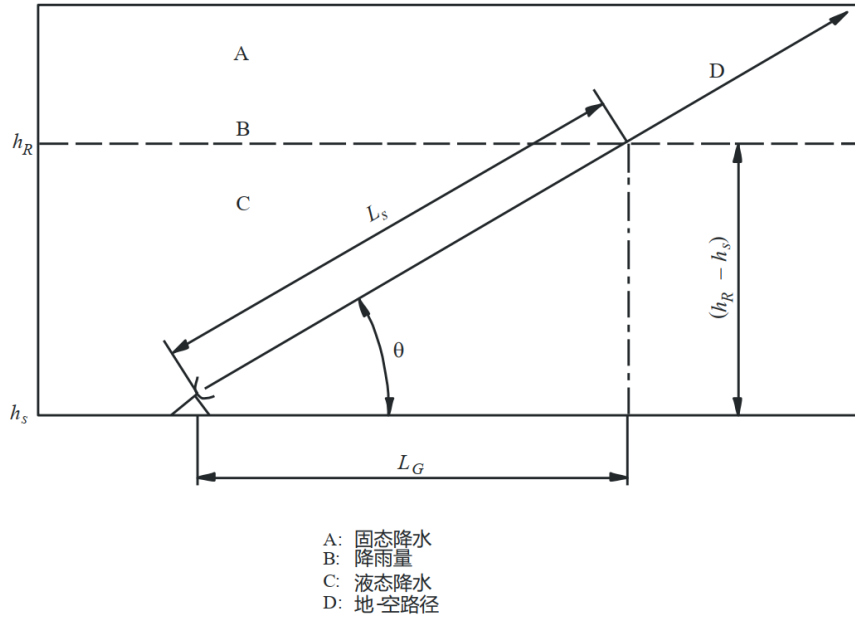


图 5. 地-空路径上给定降雨衰减预测过程输入参数示意图

降雨高度 $h_R$ 可表示为 $h_R = h_\varphi + 0.36$ ，其中 $h_\varphi$ 与地面站纬度 $\varphi$ 的关系为：

- 1) 当 $\varphi > 23^\circ$ 时， $h_\varphi = 5 - 0.075(\varphi - 23)$ ；
- 2) 当 $-21^\circ \leq \varphi \leq 23^\circ$ 时， $h_\varphi = 5$ ；
- 3) 当 $-71^\circ \leq \varphi \leq -21^\circ$ 时， $h_\varphi = 5 + 0.1(\varphi + 21)$ ；
- 4) 当 $\varphi < -71^\circ$ 时， $h_\varphi = 0$ 。

目前我国地面站的天线仰角都大于 $5^\circ$ ，因此倾斜路径长度 $L_S = \frac{h_R - h_S}{\sin(\theta)}$ ， $h_S$ 是地面站的海拔高度。倾斜路径的水平投影 $L_G = L_S \cos \theta$ ，衰减水平缩减因子 $r_{0.01} = [1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G Y_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})]^{-1}$ ，垂直修正因子 $v_{0.01} = [1 + \sqrt{\sin \theta} \left( 31 \left( 1 - e^{-\left(\frac{\theta}{1+\chi}\right)} \right) \times \frac{\sqrt{L_R Y_R}}{f^2} - 0.45 \right)]^{-1}$ ，其中， $L_R$ 、 $\chi$ 为系数：

- 1) 当 $|\varphi| < 36^\circ$ 时，系数 $\chi = 36^\circ - |\varphi|$ ，否则 $\chi = 0^\circ$ ；
- 2) 当 $\arctan\left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}}\right) > 0$ 时，系数 $L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta}$ ，否则 $L_R = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta}$ 。

等效路径长度 $L_E = L_R v_{0.01}$ ，0.01%时间百分比的降雨衰减 $A_{0.01}$ 为

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad (17)$$

以北京为例，使用 MATLAB 对降雨衰减的影响因素进行仿真，仿真条件：圆极化电磁波，北京地面站的纬度 $\varphi = 39.54^\circ$ 、海拔高度 $h_S = 0.043\text{km}$ 、天线仰角代入 $\theta = 41.76^\circ$ 、降雨率 $R = 42\text{mm/h}$ 。

可以计算得 $A_{0.01} = 3.6258\text{dB}$ 。

### 3. 地球大气吸收损耗

地球大气吸收损耗主要受到地面站高度、地面站仰角、信号传输频段、水蒸气密度的影响。在空气温度为  $15^\circ\text{C}$  (288K)、水蒸气密度一定时，分别计算信号在干燥空气下每千米的衰减 $r_0(\text{km/dB})$ 和一定水蒸气密度下每千米的衰减 $r_w(\text{dB/km})$ 。干燥空气下每千米的衰减值为

$$r_0 = \left[ 7.19 \times 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.50} \right] f^2 \times 10^{-3} \quad (18)$$

一定水蒸气密度下每千米的衰减值为

$$r_w = \left[ 0.05 + 0.0021\rho_w + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f - 183.3)^2 + 9.0} + \frac{8.9}{(f - 325.4)^2 + 26.3} \right] f^2 \rho_w \times 10^{-4} \quad (19)$$

其中， $f(\text{GHz})$ 是信号的传输频率， $\rho_w(\text{g/m}^3)$ 是水蒸气密度。

至于其他温度下每千米的衰减，

- 1) 干燥空气：温度每升高  $1^\circ\text{C}$ ， $r_0$ 修正 $-0.1\%$ ；
- 2) 水蒸气：温度每升高  $1^\circ\text{C}$ ， $r_w$ 修正 $-0.6\%$ 。

在空气温度为  $15^\circ\text{C}$  (288K)、水蒸气密度一定时，分别计算干燥空气的等效高度 $h_0(\text{km})$ 和水蒸气的等效高度 $h_w(\text{km})$ 。干燥空气的等效高度 $h_0 = 6\text{km}$ ，水蒸气的等效高度 $h_w$ 为

$$h_w = h_{w0} \left[ 1 + \frac{3.0}{(f - 22.2)^2 + 5} + \frac{5.0}{(f - 183.3)^2 + 6} + \frac{2.5}{(f - 325.4)^2 + 4} \right] \quad (20)$$

其中，晴天时 $h_{w0} = 1.6\text{km}$ ，雨天时 $h_{w0} = 2.1\text{km}$ 。至于其他温度，有：

- 1) 当  $0.3\text{GHz} \leq f \leq 10\text{GHz}$  时, 温度每升高  $1^\circ\text{C}$ ,  $h_0$  修正 0.1%,  $h_w$  修正 1%;
- 2) 当  $10\text{GHz} < f \leq 35\text{GHz}$  时, 温度每升高  $1^\circ\text{C}$ ,  $h_0$  修正 0.2%,  $h_w$  修正 2%。

在目前常用的地面站中, 天线仰角都大于  $10^\circ$ , 因此这里只考虑天线仰角大于  $10^\circ$  时的大气吸收损耗  $A_g(\text{dB})$ 。

$$A_{E,gas} = \frac{r_0 h_0 e^{-h_s/h_0} + r_w h_w}{\sin\theta} \quad (21)$$

以北京站为例, 使用 MATLAB 对大气吸收损耗进行仿真, 仿真条件: 北京地面站的海拔高度  $h_s = 0.043\text{km}$ 、天线仰角  $\theta = 41.76^\circ$ 、温度  $T = 15^\circ\text{C}(288\text{K})$ 、水蒸汽密度  $\rho_w = 0.25\text{g/m}^3$ , 晴天。

可以计算得  $A_{E,gas} = 0.0598\text{dB}$ 。

#### 4. 地球云雾损耗

具体分析可以参考前文的“火星云雾损耗”部分, 不再赘述。

我们使用 MATLAB 对地球云雾损耗情况进行计算, 计算条件为: 水蒸气密度为  $\rho_w = 0.25\text{g/m}^3$ , 云层厚度为  $L_c = 1\text{km}$ , 北京站海拔高度  $h_s = 0.043\text{km}$ , 天线仰角代入  $\theta = 41.76^\circ$ , 带入公式  $A_g = \frac{\gamma_c L_c}{\sin\theta}$ 。

可以计算得  $A_g = 0.0145\text{dB}$ 。

#### 5. 太阳闪烁损耗

太阳风对通信的影响, 由太阳、地球、探测器之间的相对位置决定。太阳位于探测器和地球之间为上合, 此时探测器与地球之间的距离最远、信号最微弱, 受太阳闪烁的影响较大。地球位于探测器与太阳之间为下合, 此时探测器与地球之间的通信几乎不受太阳闪烁影响。但当太阳—地球—探测器夹 SEP (Sun-Earth-Probe) 较小时, 有可能无法建立可靠的通信链路。太阳闪烁下的深空信道近似为莱斯信道, 闪烁指数  $m$  与莱斯因子  $K$  之间的关系为  $K = \frac{\sqrt{1-m^2}}{1-\sqrt{1-m^2}}$ 。一般认为  $m < 1$  为弱闪烁。莱斯信道模型如图 6 所示<sup>[5]</sup>。

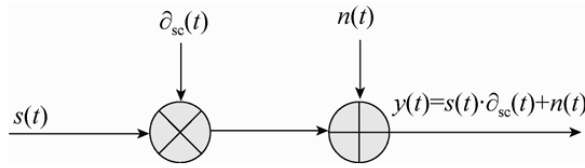


图 6. 莱斯信道模型

其中， $s(t)$ 是调制后的信号，时变的闪烁系数 $\partial_{sc}(t)$ 为非零均值的复高斯随机过程， $n(t)$ 是均值为零、方差为 $\sigma^2$ 的高斯白噪声，接收信号 $y(t)$ 为

$$y(t) = s(t) \cdot \partial_{sc}(t) + n(t) \quad (22)$$

$\partial_{sc}(t)$ 的包络 $r$ 服从莱斯分布，其概率密度函数为[6]

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_{nsc}^2} \exp\left[-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma_{nsc}^2}\right] I_0\left(\frac{rA}{\sigma_{nsc}^2}\right) \quad (23)$$

其中， $I_0(\cdot)$ 是第一类零阶修正的贝塞尔函数， $A$  为直视波信号的最高幅值， $\sigma_{nsc}^2$ 是平均多径功率，莱斯因子 $K$ 为直视信号功率与平均多径功率的比值，即 $K = \frac{A^2}{2\sigma_{nsc}^2}$ 。要保持功率守恒，必须满足 $K_s + 2\sigma_{nsc}^2 = 1$ 。

假设相位补偿理想，此处只考虑幅度的衰落，在信号状态未知时，用幅度衰落的均值 $E(\partial_{sc})$ 代替 $\partial_{sc}$ 。

$$E(|\partial_{nsc}(t)|) = \int_0^{+\infty} p(r) dr \quad (24)$$

绘制不同闪烁指数所对应的 $E(\partial_{sc})$ 如图 7 所示。

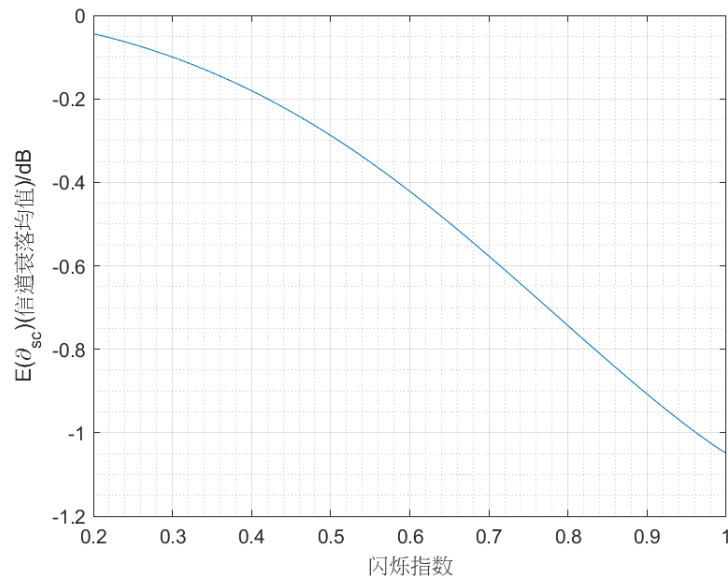


图 7. 闪烁指数对应的信道衰落因子的均值曲线图

不同莱斯因子所对应的 $E(\partial_{sc})$ 如表 11 所示。

表 11. 莱斯因子对应的信道衰落因子的均值

Table 11 Mean value of the channel fading factor corresponding to Rician factors

$K / \text{dB}$	-17	-5	0	1	3	5	10	28
$E[\partial_{sc}]$	0.8862	0.89	0.9065	0.9126	0.9276	0.9443	0.9776	0.9996

绘制不同莱斯因子所对应的 $E(\partial_{sc})$ 如图 8 所示。

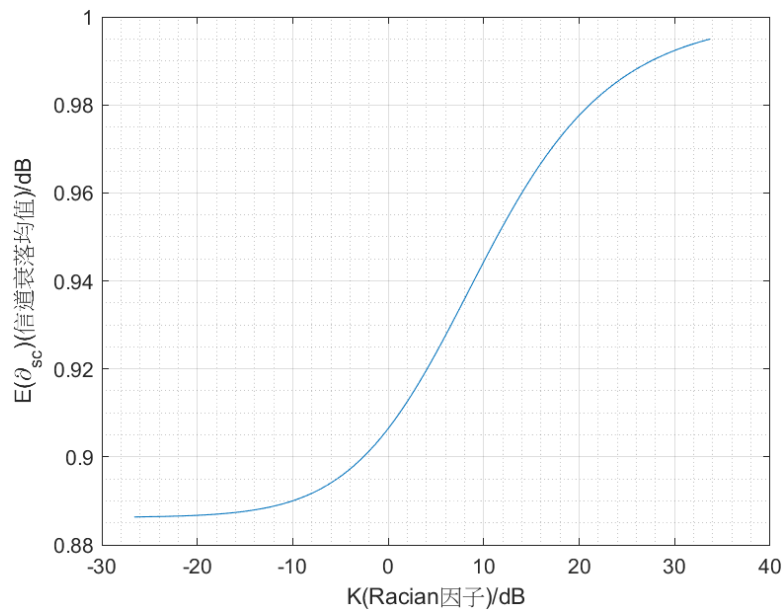


图 8. 莱斯因子对应的信道衰落因子的均值曲线图

根据可查到的资料，在晴天时 $K$ 通常在 8dB 以上，故选取 $K$ 为 10dB 为例，则计算得太阳闪烁损耗 $A_{Sun} = 0.9776\text{dB}$ 。

综上所述，可得火星轨道器-地球站通信链路段的总损耗为

$$A_E = L_{E,f} + A_{0.01} + A_{E,gas} + A_g + A_{Sun} \quad (25)$$

当地火距离 $d$ 分别取 0.6、1、2、3、4 亿公里时，可计算得：

$$A_E = 270.7026、275.1395、281.1601、284.6820、287.1807\text{dB}.$$

### 三、链路的频率分析

#### （一）火星着陆器-火星轨道器通信链路段

由前文分析，火星着陆器-火星轨道器通信链路段损耗一共由四部分损耗组成，即自由空间损耗、火星大气吸收损耗、火星云雾损耗、火星沙尘损耗。

经计算，在 UHF 频段（300MHz-3GHz），火星大气损耗、云雾损耗和沙尘损耗只有  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$  左右的数量级（单位为 dB），而自由空间损耗超过了 100dB，所以该链路的总损耗与频率的关系应几乎完全按照自由空间损耗的规律变化，即对数规律。作图如下：

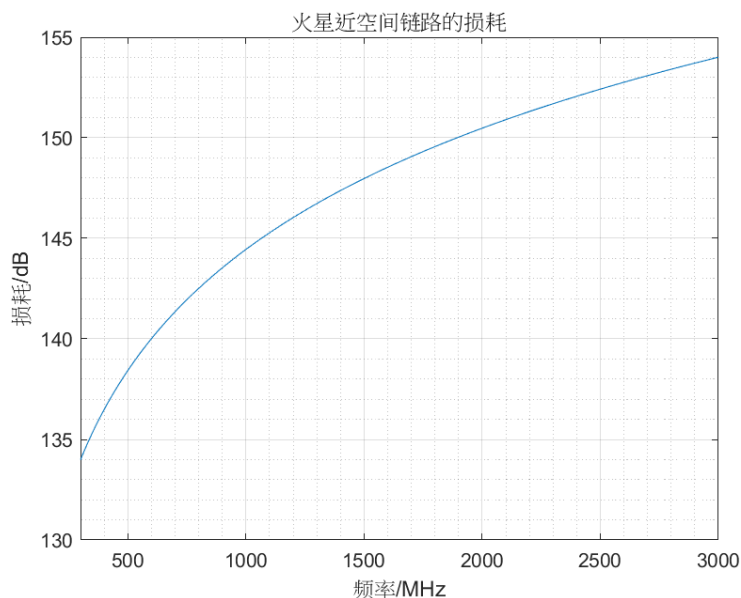


图 9. 火星着陆器-火星轨道器通信链路段损耗的频率特性

故火星近空间链路的损耗随着频率升高而增大，呈现对数变化规律，在 UHF 频段的损耗在 130dB 到 155dB 之间。

#### （二）火星轨道器-地球站通信链路段

与火星链路段类似，由前分析计算可发现，地球大气吸收损耗和云雾损耗只有  $10^{-2}$  的数量级，主要影响地火链路段的仍是自由空间损耗，但与火星链路段不同的是，地球大气降雨损耗的影响很大。虽然其在 X 频段（8-12GHz）的低频区只有几 dB，但随着频率的增长，雨衰会迅速增大到几十 dB，而在 Ka 频段（26.5-40 GHz）上近似呈现线性的增长趋势，经计算，作图如下：



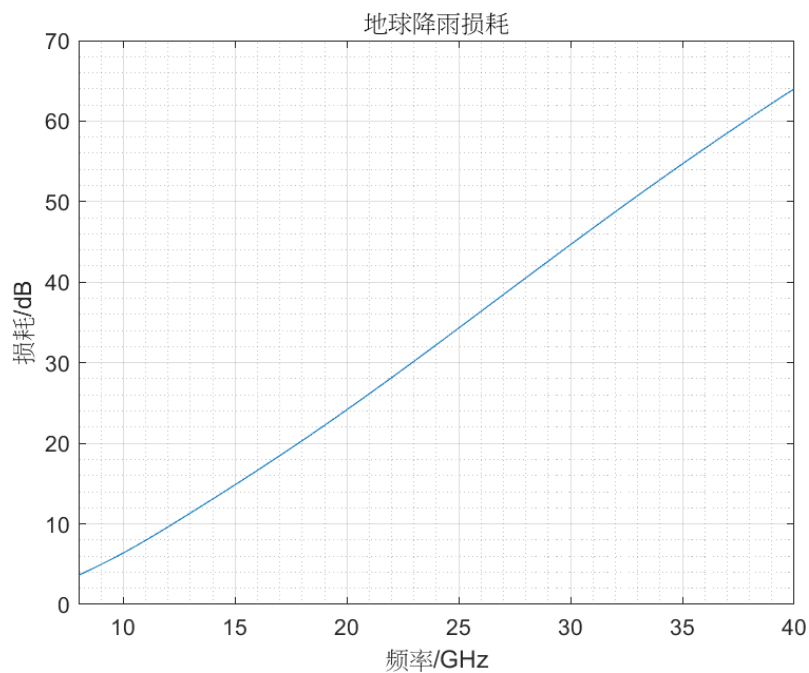


图 10. 地球大气降雨损耗的频率特性

可以看出，在 Ka 频段上，雨衰从 40dB 开始快速增长，而自由空间损耗呈对数增长，所以最终的总损耗随频率的增长趋势应该更靠近线性增长，经计算，做作图如下：

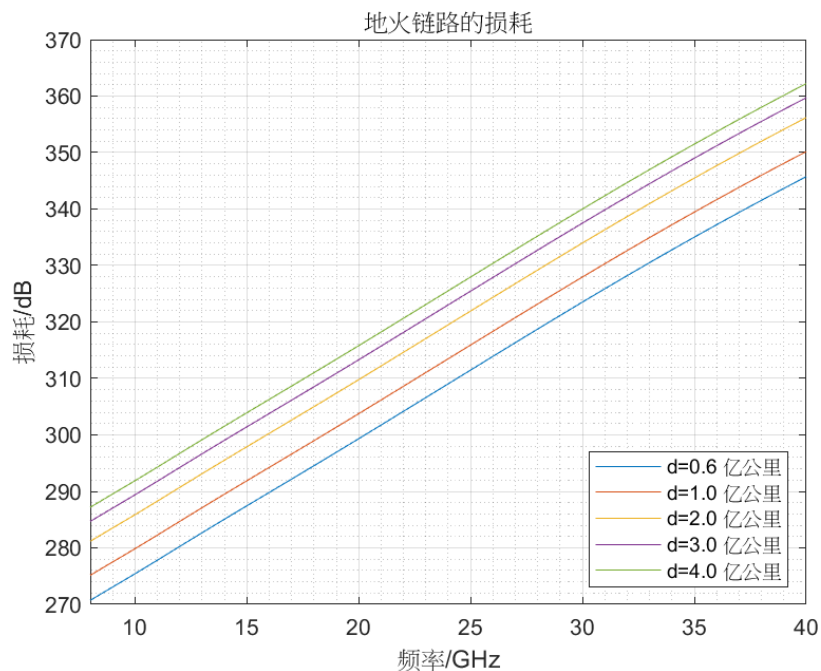


图 11. 火星轨道器-地球站通信链路损耗的频率特性

在 X、Ku、Ka 三个频段上，地火链路总损耗呈近似线性增长，并且轨道离地表越高，损耗越大。

## 四、通信系统分析

若火星探测器通过中继卫星(如轨道器)将数据传回地球,其链路设计通常基于 CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems)标准<sup>[7]</sup>,小组选择的单位比特能量/噪声功率 $E_b/N_0$ 的具体值如下:

地火链路,取决于发射功率和接收天线口径:  $(E_b/N_0)_E = 12\text{dB}$  ;

火星轨道器与火星着陆器通信:  $(E_b/N_0)_M = 8\text{dB}$  。

### (一) 火星着陆器-火星轨道器通信系统

我们以火星着陆器向火星轨道器通信为例进行分析,结合之前课程学习内容,意图在一定的参数要求下求出满足通信要求的接收系统天线尺寸。

由火星到轨道器之间的链路通过特高频 UHF 进行传输,已知轨道高度 $d = 400\text{km}$ ,工作频率  $f=400\text{MHz}$ ,小组根据资料选取的单位比特能量/噪声功率为  $(E_b/N_0)_M = 8\text{dB}$ ,玻尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 。

常见深空探测任务噪声温度 $T_S$ 范围如图所示,我们选取 UHF 频段对应的接收系统的噪声温度 $T_S = 150\text{K}$ 。

频段	常见噪声温度范围 (K)
UHF (400 MHz)	100 - 150
S 波段 (2 GHz)	50 - 80
X 波段 (8 GHz)	20 - 40
Ka 波段 (32 GHz)	30 - 60

图 12. 常见深空探测任务噪声温度范围

我们再假设发射天线与接收天线均为口径天线,其中发射天线的直径是  $D_t = 80\text{cm}$ ,假设需满足要求有发射数字信号的比特率为  $R = 250\text{Mbit/s}$ ,发射功率取  $P_t = 43\text{dBm}(20\text{W})$ 。则可按照以下过程计算满足通信要求的接收系统天线的最小直径 $D_r$ :<sup>[8][9]</sup>

噪声功率 $N_0(\text{J})$ 为:

$$N_0 = kT_S \quad (26)$$

已知噪声功率，则单位比特能量 $E_b(\text{J})$ 为：

$$E_b = (E_b/N_0)_M \cdot N_0 \quad (27)$$

所需要的最小接收功率 $P_r(\text{dBm})$ 为：

$$P_r = E_b \cdot R \quad (28)$$

则系统最大允许链路损耗 $L_{max}$ 可得：

$$L_{max} = P_t - P_r \quad (29)$$

口径天线增益 $Gain(\text{dBi})$ 可有以下公式(29)计算得到，代入频率  $f=400\text{MHz}$ ，发射天线直径  $D_t = 80\text{cm}$ ，可得发射天线的增益 $G_t$ 。

$$Gain = 18 + 20 \cdot \log D + 20 \cdot \log f \quad (30)$$

在之前的分析中，我们已知了整个“火星着陆器-火星轨道器”链路的总损耗 $A_M$ 。而系统最大允许链路损耗 $L_{max}$ 由以下部分组成：

$$L_{max} = A_M - (G_t + G_r) \quad (31)$$

由公式(31)可得 $G_r$ ，我们计算得 $G_r = 1.5936\text{dB}$ 。代入到公式(29)可得接收天线所需最小直径 $D_r = 0.3781\text{m}$ 。

同样地，我们对一定条件下满足通信要求的接收系统天线尺寸的频率因素进行分析，选取 300MHz-3GHz 频段，计算满足上述要求的接收天线所需最小直径 $D_r$ ，绘制的火星近空间通信系统接收天线尺寸随频率变化曲线如下图所示：

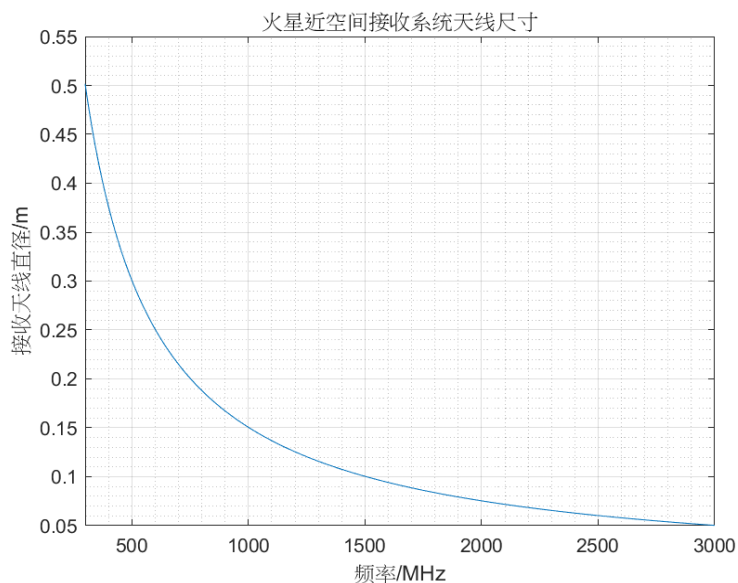


图 13. 火星近空间通信系统接收天线尺寸随频率变化曲线

可以看到, 在 300MHz-3GHz 频段内, 随着频率的增加, 所需的接收系统天线最小直径反而是下降的。

小组成员通过讨论, 认为“火星着陆器-火星轨道器通信链路段”中, 自由空间损耗占绝大部分, 其他各部分损耗都远小于自由空间损耗, 则对比公式(1), 公式(30), 公式(31)可以发现, 随着频率增加, 自由空间损耗的增长正好可以由发射天线增益的增长抵消弥补, 故而系统所需的最小接收天线增益近似不变, 则由公式(30),  $G_r$ 一定的条件下, 随着频率 $f$ 的增加, 所需的接收天线直径 $D_r$ 就会相应降低。

## (二) 火星轨道器-地球站通信系统

对于“火星轨道器-地球站”通信系统, 其接收系统天线的最小直径 $D_r$ 可以按照公式(26) – (31)得到, 不再进行赘述。

我们以火星轨道器向地球地面站通信为例进行分析, 使用 MATLAB 求解接收天线的最小直径 $D_r$ , 条件设置为:

选取工作频率  $f=8\text{GHz}$ , 轨道高度 $d$ 分别取 0.6、1、2、3、4 亿公里, 单位比特能量/噪声功率取为 $(E_b/N_0)_E = 12\text{dB}$ , 接收系统的噪声温度取 $T_s = 150\text{K}$ , 假设发射数字信号的比特率要求为  $R = 2.5 \text{ Mbit/s}$ , 发射天线与接收天线均为口径天线, 其中发射天线的直径是  $D_t = 3\text{m}$ , 并已知玻尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 。

我们分别选取发射功率选取 $P_t$ 为 53dBm(200W)和 63dBm(2000W), 以观察不同的发射功率对于接收系统天线所需尺寸的影响。

若 $P_t = 53\text{dBm}(200\text{W})$ , 当地火距离 $d$ 分别取 0.6、1、2、3、4 亿公里, 求解得:  $D_r = 31.57$ 、 $52.63$ 、 $195.26$ 、 $157.89$ 、 $210.52\text{m}$ ; 若  $P_t = 63\text{dBm}(2000\text{W})$ , 当地火距离 $d$ 分别取 0.6、1、2、3、4 亿公里, 求解得:  $D_r = 9.98$ 、 $16.64$ 、 $33.28$ 、 $49.93$ 、 $66.57\text{m}$ 。可见在发射功率 $P_t$ 与接收系统天线尺寸 $D_r$ 存在权衡关系。

同样地, 我们对一定条件下满足通信要求的接收系统天线尺寸的频率因素

进行分析, 选取 8MHz-40GHz 频段, 计算满足上述要求的接收天线所需最小直径  $D_r$ , 绘制的地火通信系统接收天线尺寸随频率变化曲线如下图所示:

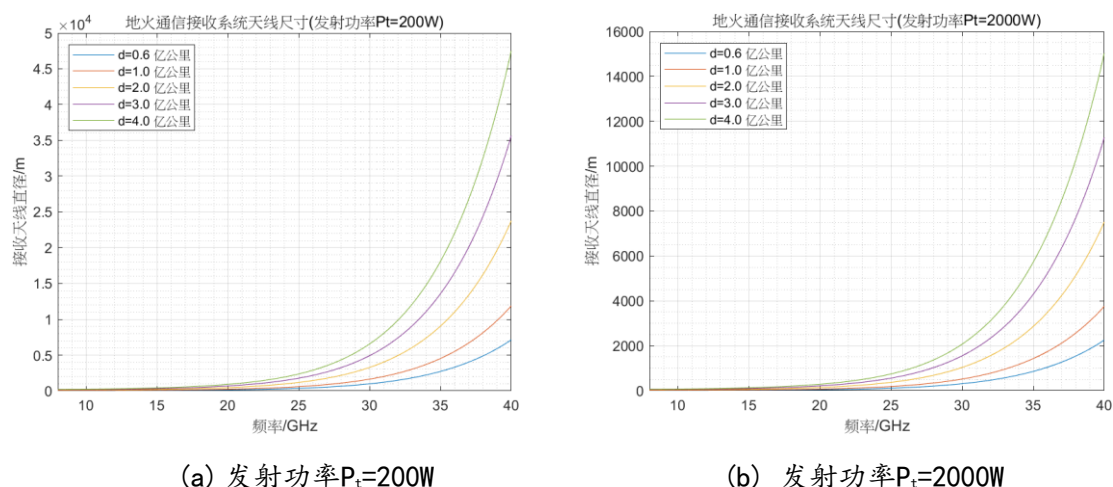


图 14. 不同发射功率下地火通信接收系统天线尺寸随频率变化曲线

可以看到, 在 8MHz-40GHz 频段下, 随着频率的升高, 系统所需的接收天线直径呈现指数级增长, 这是由于除自由空间损耗的其他部分损耗 (以地球大气降雨损耗为主) 随着频率升高而快速上升。

## 五、分工说明

- 1) **钟源**: 负责文献查找、拟定报告和 PPT 的大纲、计算程序的代码撰写、报告撰写 (建模、部分的通信系统分析、部分的火星链路)、PPT 制作与整合、报告整合与排版
- 2) **贾岩森**: 负责文献查找、计算程序的代码撰写、报告撰写 (频率分析)、PPT 制作 (频率分析)
- 3) **李锦扬**: 负责报告撰写 (部分的火星链路)、PPT 制作 (部分的火星链路)、现场汇报
- 4) **黄蕾**: 负责报告撰写 (地火链路、部分的通信系统分析)、PPT 制作 (地火链路)、计算程序的部分参数设置

## 六、参考文献

- [1] 周凡琨, 张晓林, 李赞. 火星-地球中继通信链路预算分析[J]. 遥测遥控, 2018, 39(2): 48-56.
- [2] ITU-R. (2022). ITU-R P.676-13 建议书: 大气气体的衰减和相关影响. Geneva: International Telecommunication Union.
- [3] ITU-R. (2015). ITU-R P.838-3 建议书: 预测方法中使用的雨天衰减的具体模型. Geneva: International Telecommunication Union.
- [4] ITU-R. (2017). ITU-R P.618-13 建议书: 设计地对空电信系统所需的传播数据和预测方法. Geneva: International Telecommunication Union.
- [5] 赵娜, 孟新, 胡圣波. 弱太阳闪烁对深空通信的影响[J]. 空间科学学报, 2009, 29(2): 244-248.
- [6] 周凡琨, 张晓林, 李赞. 太阳闪烁下的深空信道中LDPC-MPSK系统性能分析[J]. 遥测遥控, 2017, 38(3): 13-19.
- [7] 饶启龙. 基于CCSDS的火星探测器测控通信系统链路分析与设计[D]. 上海交通大学, 2012.
- [8] Haslett C. Essentials of radio wave propagation[M]. Cambridge University Press, 2008.
- [9] 部分课程PPT