



東南大學  
SOUTHEAST UNIVERSITY

# 火星通信系统 链路规划及计算

Link planning and calculation for Mars communication system

任课老师：郭健

小组成员：

钟源 黄蕾  
贾岩森 李锦扬

信息科学与工程学院

2024年12月18日

# 目录



## ● PART 01

---

### 小组分工

Division of Labor in Groups

## ● PART 03

---

### 链路分析与计算

Link analysis and Calculation

## ● PART 02

---

### 链路建模

Link Modeling

## ● PART 04

---

### 频率分析

Frequency Analysis

## 小组分工

Division of Labor in Groups

**李锦扬**

文稿撰写(火星链路部分)  
PPT制作(火星链路部分)  
汇报

**黄 蕾**

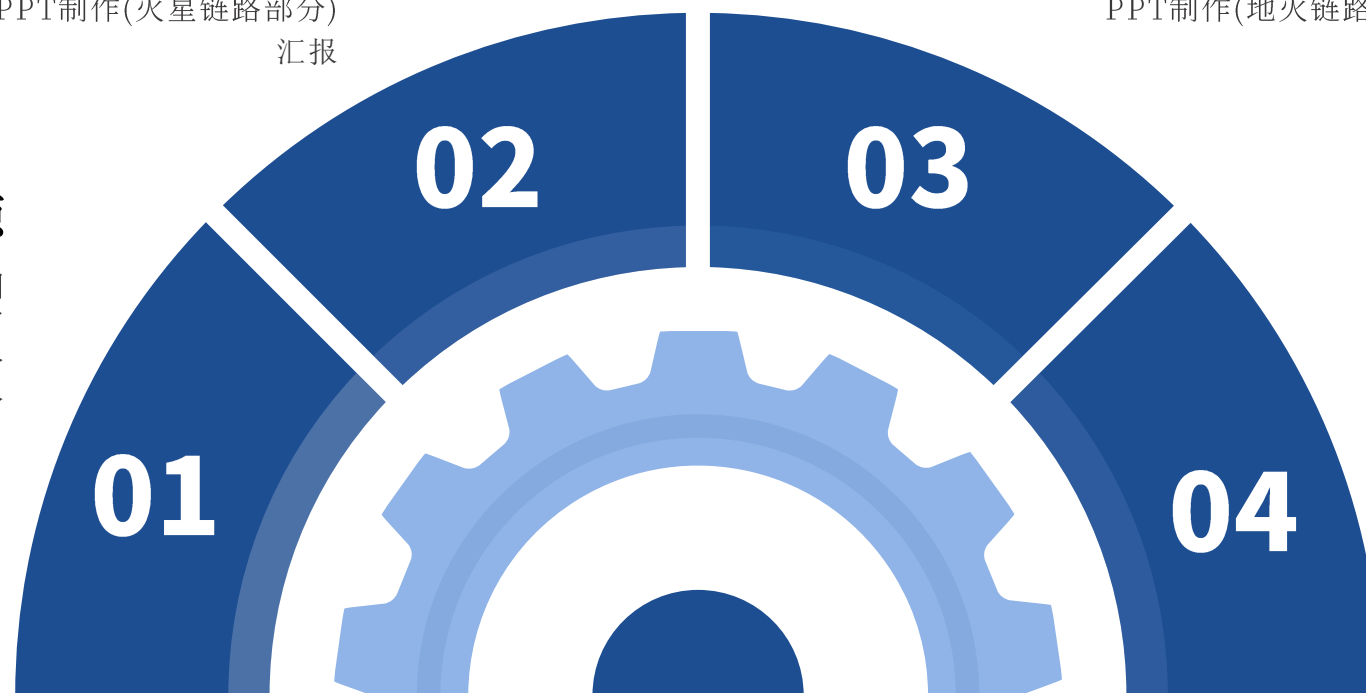
文稿撰写(地火链路)  
PPT制作(地火链路)

**钟 源**

文献查找、拟定大纲  
计算程序的代码撰写  
计算程序的文稿撰写与整合  
PPT制作与整合

**贾岩森**

文献查找  
计算程序的代码撰写  
文稿撰写(频率分析)  
PPT制作(频率分析)



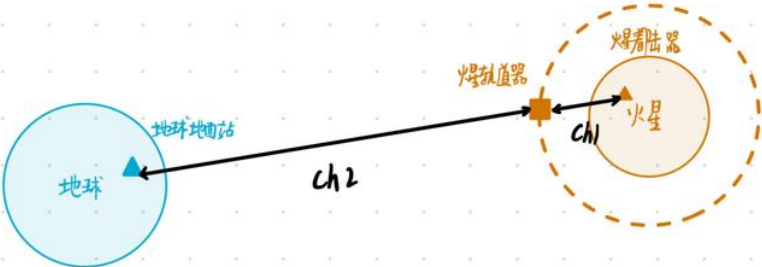


图 1. 火星通信系统链路模型草图

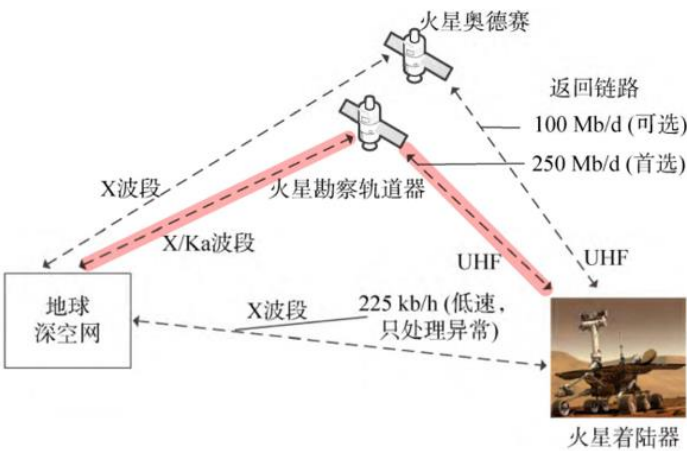


图 2. “好奇号”火星探测器数据传输链路图

## 两段链路

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**。

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。



两段通信链路中主要的影响因素如图3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、云雾、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**自由空间损耗、地球大气吸收、降雨、云雾**、太阳闪烁（由于比较复杂，暂未计算）的影响。

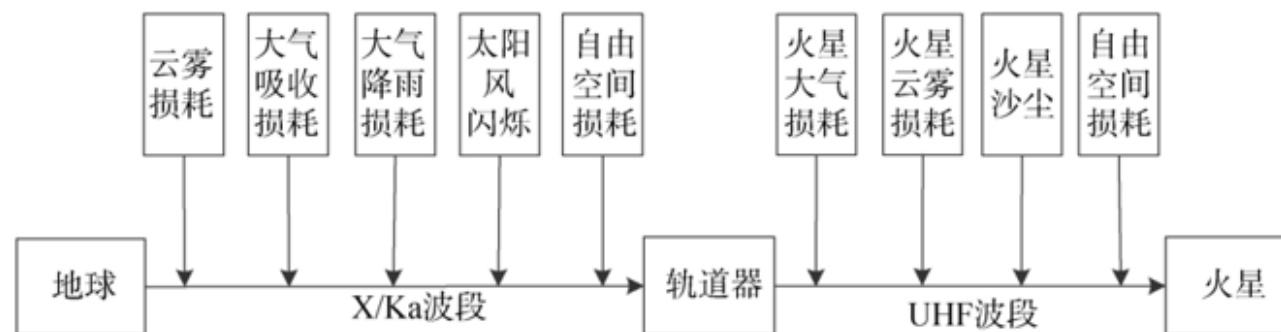


图 3. 通信链路中的主要影响因素

# 火星链路

- PART 01

---

自由空间损耗

- PART 03

---

火星云雾损耗

- PART 02

---

火星大气吸收损耗

- PART 04

---

火星沙尘损耗

# 条件分析

Condition analysis

由于火星着陆器-火星轨道器通信链路主要采用UFH频段（300Hz-3GHz）进行通信，我们选取通信频率**f 为400MHz**，波长则为 $\lambda = \frac{c}{f} = 0.75m$ ，选取天线仰角 **$\theta$ 为10°**。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°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=400km**。

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

### 自由空间损耗

Free space loss

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

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

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。我们选取 $d = 400\text{km}$ ， $f=400\text{MHz}$ ，可以计算得 $L_f = 136.52\text{dB}$ 。

%%%%%%%%%%%%%%计算火星自由空间损耗%%%%%%%%%%%%%%

```
L_M_f=32.442+20*log10(d_M)+20*log10(freq)
```

```
L_M_f = 136.5244
```



# 火星大气吸收损耗

Martian atmospheric absorption loss

火星大气稀薄，主要成分是CO<sub>2</sub>，火星大气的平均高度为125km。

深空通信中仍需要考虑电磁波在火星大气中的衰减问题。

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. 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

气体名称	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ne
体积百分比	95.32%	2.7%	1.6%	0.13%	0.03%	0.00025%

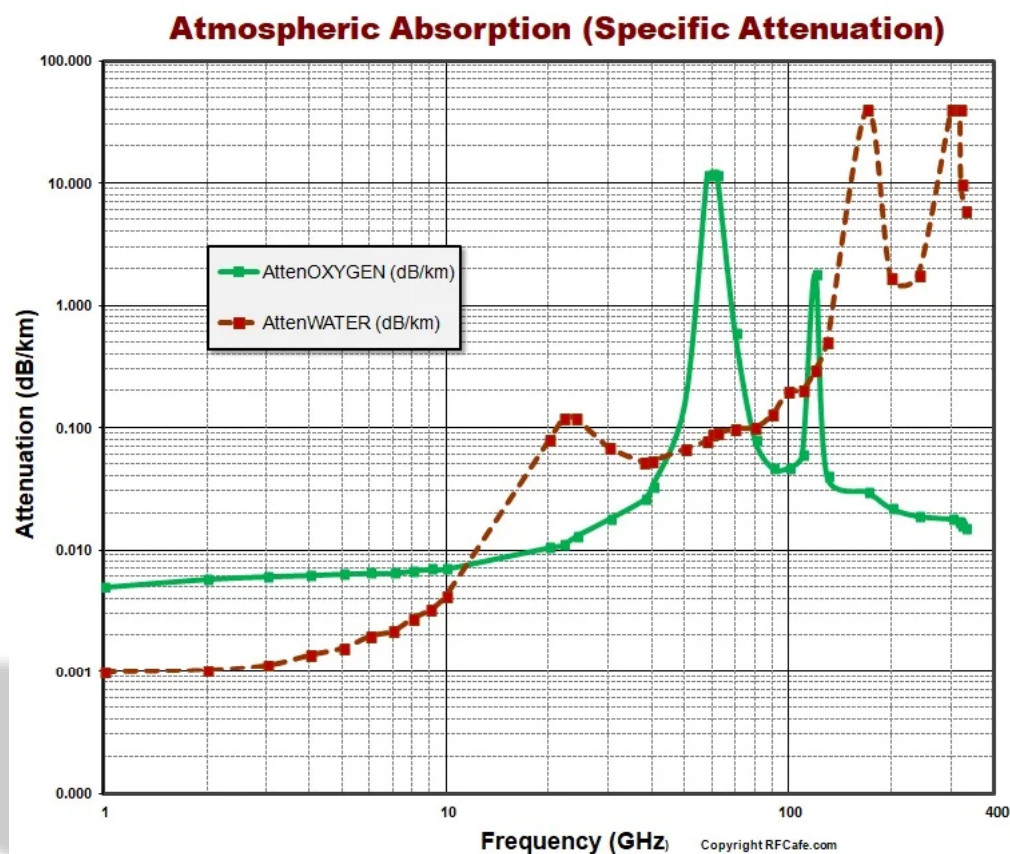
表 4. 地球大气中主要气体的体积百分数

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

气体名称	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
体积百分比	78.08%	20.95%	0.934%	0.033%	0.25%

# 火星大气吸收损耗

Martian atmospheric absorption loss



## 火星大气单位长度损耗

$$\gamma_M = \alpha_O n_{M,O} + \alpha_W n_{M,W},$$

$\alpha_O$ 和 $\alpha_W$ 分别为氧气、水蒸气的吸收系数。



## 在地球上的单位长度衰减

链路通过特高频UHF进行传输（UHF频段为0.3~3GHz）， $\alpha_O n_{E,O}$ 和 $\alpha_W n_{E,W}$ 取上限0.007dB/km和0.002dB/km。

## 火星大气吸收损耗

Martian atmospheric absorption loss

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

将相关参数代入得到**火星单位长度的损耗** $\gamma_M$ 为

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

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%计算火星大气损耗%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%由于吸收系数在UHF频段下波动很小，近似地取其上限
H_M_o=11.1;%单位: km
n_E_air=2.7*1e25/(6.02214129*1e23);%空气的分子数密度，单位: 分子/m^3
n_E_o=n_E_air*0.2095;%氧气的分子数密度，单位: 分子/m^3
alpha_o=0.007;%氧气的吸收系数
n_E_w=n_E_air*0.0025;%水蒸气的分子数密度，单位: 分子/m^3
alpha_w=0.002;%水蒸气的吸收系数
A_M_gas=H_M_o*((1/18733).*alpha_o+(1/969).*alpha_w)

```

A\_M\_gas = 2.7058e-05

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 $H_{M,o}(km)$ ，**火星大气损耗**为

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

代入参数可得火星大气损耗为 $A_{E,gas} = \mathbf{0.00002706dB}$ .

### 火星云雾损耗

Martian cloud loss

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。

%%计算云雾损耗%%

M=0.5;%单位: g/m^3

L\_c=1;%单位: km

K1=getK1(freq/1000,T);

A\_M\_g=(L\_c.\*K1\*M)/(sin(theta1\*pi/180))

A\_M\_g = 1.7854e-04

## 火星云雾损耗

Martian cloud loss

云雾损耗每千米的衰减  
值  $\gamma_c$  (dB/km) 为

$$\gamma_c = K_1 M$$

$K_1$  ((dB/km)/(g/m<sup>3</sup>)) 是衰减系数,  
 $M$  (g/m<sup>3</sup>) 是云或雾中的水蒸气密度。

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

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}$$

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

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

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

其中  $\varepsilon_0 = 77.66 + 103.3 (\phi - 1)$ ,  $\varepsilon_1 = 0.0671\varepsilon_0$ ,  
 $\varepsilon_2 = 3.52$ ,  $\phi = \frac{300}{T}$ ,  $T$  是火星表面温度取 210K,  $f_p$  (GHz)  
和  $f_s$  (GHz) 有:

$$f_p = 20.2 - 146(\phi - 1) + 316(\phi - 1)^2, \quad f_s = 39.8f_p$$

### 火星云雾损耗

Martian cloud loss

```
function K1=getK1(f,T) %f单位为GHz
phi=300/T;
e_0=77.66+103.3*(phi-1);
e_1=0.067*e_0;
e_2=3.52;
f_p=20.2-146*(phi-1)+316*(phi-1)^2;
f_s=39.8*f_p;

e_imag=((e_0 - e_1) / f_p) ./ (1 + (f ./ f_p).*(f ./ f_p)) + ...
    ((e_1 - e_2) / f_s) ./ (1 + (f ./ f_s).*(f ./ f_s)) ;
e_imag=e_imag.*f;
e_real= (e_0 - e_1) ./ (1 + (f ./ f_p).*(f ./ f_p)) + ...
    (e_1 - e_2) ./ (1 + (f ./ f_s).*(f ./ f_s)) + e_2;
K1=(0.819)./(e_imag.*(1+ ((2+e_real)./e_imag).*((2+e_real)./e_imag) ));
K1=f.*K1;
end
```

云雾衰减 $A_g(dB)$

$$A_g = \frac{\gamma_c L_c}{\sin \theta}$$

$L_c(km)$ 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 $M=0.5g/m^3$ ，而云层厚度 $L_c=1km$ ，天线仰角设为 $\theta=10^\circ$ 。

云雾损耗为 $A_g = 0.000179dB$ 。

## 火星沙尘损耗

Martian dust loss

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 $10\mu m \sim 20\mu m$ 左右，沙尘引发的衰减可表示为

$$A(\lambda) = \frac{1.029 \times 10^6 \varepsilon_d''}{\lambda \left[ (\varepsilon_d' + 2)^2 + \varepsilon_d'' \right]} \sum_i N_i r_i^3 (\text{dB/km})$$

$$A(\lambda) = \frac{1.029 \times 10^6 \varepsilon_d''}{\lambda \left[ (\varepsilon_d' + 2)^2 + \varepsilon_d'' \right]} N_T \bar{r}^{-3} (\text{dB/km})$$



# 火星沙尘损耗

Martian dust loss

表 5. 地球与火星的沙尘暴参数  
Table 5 Sandstorm parameters of the earth and Mars

	$N_T(\text{m}^{-3})$	$\rho(\text{g}/\text{m}^3)$	$\bar{r}(\mu\text{m})$	$r_{\text{max}}(\mu\text{m})$	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

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%计算火星沙尘损耗%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
e_d_real=5.23;
e_d_imag=0.26;
N_T=3e7;
r_av=10e-6;%单位: m
H_M_dust=10;%单位: km
A_M_dust=H_M_dust*N_T*(r_av)^3*(1.029e6*e_d_imag)/(e_d_imag+(e_d_real+2)^2);
A_M_dust=A_M_dust./lambda

A_M_dust = 0.0020
```



## 结果分析

Result analysis

综上所述，地火星着陆器-火星轨道器通信链路段的总损耗为

$$A_M = L_f + A_{M,dust} + A_{M,gas} + A_g$$

代入各部分损耗，可计算得： **$A_M = 136.5266\text{dB}$** .

# 地火链路

- PART 01

---

自由空间损耗

- PART 03

---

地球大气吸收损耗

- PART 02

---

地球大气降雨损耗

- PART 04

---

地球云雾损耗

### 条件分析

Condition analysis

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，此段通信链路与直接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  $f=8\text{GHz}$ ，波长为  $\lambda = \frac{c}{f} = 0.0375\text{m}$ ，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  $T=15^\circ\text{C}$ （288K）。

#### 条件设置

```
d_E=[0.6,1,2,3,4];  
d_E=1e8*d_E;% 轨道高度, 单位: km  
freq=8000;% 频率, 单位: MHz  
lambda=(3e8/1e6)./freq % 波长, 单位: m
```

```
lambda = 0.0375
```

```
theta2=41.76;% 天线仰角, 单位: °  
h_S=0.043;% 单位: km  
T=288;% 温度, 单位: K  
rho_w = 0.25;% 水蒸汽密度(g/m^3)
```

# 自由空间损耗

Free space loss

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

可以计算得 $L_f =$ **266.0248、270.4618、276.4824、280.0042、282.5030dB.**

### 3.1.自由空间损耗

```
L_E_f=zeros(length(freq),length(d_E));  
for i=1:length(freq)  
    for j=1:length(d_E)  
        L_E_f(i,j)=32.4+20*log10(d_E(j))+20*log10(freq(i));  
    end  
end  
L_E_f
```

```
L_E_f = 1x5  
    266.0248    270.4618    276.4824    280.0042    282.5030
```

## 地球大气降雨损耗

Earth's atmospheric rainfall loss

平均年度 $p\%$ 时间可能达到的雨衰量 $A_p(dB)$ 为 $A_p = \gamma_R L_E$  (1)

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，可以在**ITU-R P.839-3建议书**中查到 $k$ 和 $\partial$ 的值。我们**选取频率为8GHz**，**极化方式为圆极化**。

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

$$\partial = \sum_{j=1}^5 \left( a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_\partial \log_{10} f + c_\partial \quad (3)$$

其中， $f$ 为频率，水平极化的系数 $k_H$ 的常数值在表1中给出，而垂直极化的系数 $k_V$ 的常数值在表2中给出。表3给出了水平极化的系数 $\partial_H$ 的常数值，而表4给出了垂直极化的系数 $\partial_V$ 的常数值。

# 地球大气降雨损耗

Earth's atmospheric rainfall loss

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 6 Constant value of vertical polarization coefficient  $k_H$

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
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 6 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. 水平极化系数 $\partial_H$ 的常数值

Table 6 Constant value of vertical polarization coefficient  $\partial_H$

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
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(2)和(3)中给定的值由下列等式计算出等式(1)中的系数：

$$k = [k_H + k_H + (k_H - k_V)cos^2\theta cos2\tau]/2$$

$$\partial = [k_H\partial_H + k_H\partial_V + (k_H\partial_H - k_H\partial_V)cos^2\theta cos2\tau]/2k$$

此处 $\theta$ 是路径斜角， $\tau$ 是相对水平位置的极化斜角（对于圆极化， $\tau=45^\circ$ ）。

# 地球大气降雨损耗

Earth's atmospheric rainfall loss

```
function [k, partial] = getKP_vh(freq, flag)
if flag==1 %水平极化
    a = [-5.33980, -0.35351, -0.23789, -0.94158];
    b = [-0.10008, 1.26970, 0.86036, 0.64552];
    c = [1.13098, 0.45400, 0.15354, 0.16817];
    mk = -0.18961;
    ck = 0.71147;
    k = 0;
    for i=1:4
        k = k+a(i)*exp(-((log10(freq)-b(i))/c(i)).^2);
    end
    k = k+mk*log10(freq)+ck;
    %%%%%%%%%%%%%%%
    a = [-0.14318, 0.29591, 0.32177, -5.37610, 16.1721];
    b = [1.82442, 0.77564, 0.63773, -0.96230, -3.29980];
    c = [-0.55187, 0.19822, 0.13164, 1.47828, 3.43990];
    mk = 0.67849;
    ck = -1.95537;
    partial = 0;
    for i=1:5
        partial = partial+a(i)*exp(-((log10(freq)-b(i))/c(i)).^2);
    end
    partial = partial+mk*log10(freq)+ck;
elseif flag==0 %垂直极化
    a = [-3.80595, -3.44965, -0.39902, 0.50167];
    b = [0.56934, -0.22911, 0.73042, 1.07319];
    c = [0.81061, 0.51059, 0.11899, 0.27195];
    mk = -0.16398;
    ck = 0.63297;
```

```
k = 0;
for i=1:4
    k = k+a(i)*exp(-((log10(freq)-b(i))/c(i)).^2);
end
k = k+mk*log10(freq)+ck;
%%%%%%%%%%%%%%
a = [-0.07771, 0.56727, -0.20238, -48.2991, 48.5833];
b = [2.33840, 0.95545, 1.14520, 0.791669, 0.791459];
c = [-0.76284, 0.54039, 0.26809, 0.116226, 0.116479];
mk = -0.053739;
ck = 0.83433;
partial = 0;
for i=1:5
    partial = partial+a(i)*exp(-((log10(freq)-b(i))/c(i)).^2);
end
partial = partial+mk*log10(freq)+ck;
end
k = 10.^k;
end

function [k, partial] = getKP(freq, theta)
[k_v, partial_v] = getKP_vh(freq, 0);
[k_h, partial_h] = getKP_vh(freq, 1);
tau = pi/4; %圆极化
k = ( k_h+k_v+(k_h-k_v)*cos(theta*pi/180)*cos(theta*pi/180)*cos(2*tau) )/2;
partial = ( k_h.*partial_h+k_v.*partial_v+(k_h.*partial_h-k_v.*partial_v)*...
    cos(theta*pi/180)*cos(theta*pi/180)*cos(2*tau) )/2./k;
end
```

至此，我们可以求得 $\gamma_R = 0.6714\text{dB}$ ，接下来对 $L_E$ 进行求解。

# 地球大气降雨损耗

Earth's atmospheric rainfall loss

站名	降雨率 0.01% (mm/h)	纬度 (°)	海拔高度 (km)	天线仰角 (°)
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

**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 $L_S = (h_R - h_S)/\sin\theta$ ， $h_S$ 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 $r_{0.01} = [1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})]^{-1}$

垂直修正因子 $v_{0.01} = [1 + \sqrt{\sin\theta} \left( 31 \left( 1 - e^{-\left(\frac{\theta}{1+\chi}\right)} \right) \times \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)]^{-1}$

其中， $L_R$ 、 $\chi$ 为：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 $L_R = \frac{h_R - h_S}{\sin\theta}$ 。



## 地球大气降雨损耗

Earth's atmospheric rainfall loss

### 3.2. 地球大气降雨损耗

```
%以北京为例
R = 42; %降雨率
phi = 39.54; %纬度
[k, partial] = getKP(freq/1000, theta2);
f=freq/1000;
gamma_R = k.*R.^partial;
h_phi = (5-0.075*(phi-23))*(phi>23)+5*(phi<=23&&phi>=-21)+...
    (5+0.1*(phi+21)).*(phi<-21&&phi>=-71);
h_R = h_phi+0.36; %降雨高度
L_S = (h_R-h_S)./sin(theta2*pi/180); %倾斜路径长度
L_G = L_S*cos(theta2*pi/180); %倾斜路径的水平投影
r = 1./(1+0.78*sqrt(L_G*gamma_R./f)-0.38*(1-exp(-2*L_G))); %衰减水平缩减因子
chi = (abs(phi)<36)*(36-abs(phi))*pi/180;
L_R = ( atan((h_R-h_S)/L_G./r)>0 ).*(L_G.*r/cos(theta2*pi/180))+...
    (atan((h_R-h_S)/L_G./r)<=0).*((h_R-h_S)/sin(theta2*pi/180));
v_pre = (1-exp(-theta2*pi/180/(1+chi)))*sqrt(L_R.*gamma_R)./f.^2;
v = 1./(1+sqrt(sin(theta2*pi/180))*(31*v_pre-0.45)); %垂直修正因子
L_E = L_R.*v; %等效路径长度
A_p = gamma_R.*L_E %雨衰量
```

A\_p = 3.6258

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值 $A_{0.01}$ 为 $A_{0.01} = \gamma_R L_E$

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 $A_{0.01} = 3.6258\text{dB}$ 。

## 地球大气吸收损耗

Absorption loss of the earth's atmosphere

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**衰减值** $r_0(\text{km/dB})$ 和**一定水蒸气密度**下每千米的**衰减值** $r_w(\text{dB/km})$ 。干燥空气下每千米的衰减值为

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

一定水蒸气密度下每千米的衰减值为

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

其中， $f(\text{GHz})$ 是信号的传输频率， $\rho_w\left(\frac{\text{g}}{\text{m}^3}\right)$ 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 $-0.6\%$

## 地球大气吸收损耗

Absorption loss of the earth's atmosphere

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

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

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

- 1) 当 $0.3GHz \leq f \leq 10GHz$ 时，温度每升高1°C， $h_0$ 修正0.1%， $h_w$ 修正1%；
- 2) 当 $10GHz < f \leq 35GHz$ 时，温度每升高1°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°，因此这里只考虑天线仰角大于10°时的大气吸收损耗 $A_g(dB)$ 。

$$A_{gas} = \frac{r_0 h_0 e^{-h_s/h_0} + r_w h_w}{\sin \theta}$$

## 地球大气吸收损耗

Absorption loss of the earth's atmosphere

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 $T = 15^\circ\text{C}$ （288K）、水蒸汽密度 $\rho_w = 0.25\text{g/m}^3$ ，晴天。

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

### 3.3.地球大气吸收损耗

```
A_E_gas = getA_E_g(freq/1000,h_S,rho_w,theta2);  
A_E_gas=real(A_E_gas(1,:))
```

```
A_E_gas = 0.0598
```

```
function A_E_g=getA_E_g(freq,h_S,rho_w,theta2)  
h_w0 = [1.6, 2.1];  
r_0 = zeros(length(freq));  
h_0 = 6;  
r_w = zeros(length(freq));  
h_w = zeros(2, length(freq));  
A_E_g = zeros(2,length(freq));  
for i=1:length(freq)  
    r_0(i) = (7.19e-3+6.09./((freq(i).^2+0.227)+4.81./(((freq(i)-57).^2+1.5)).*freq(i).^2*1e-3; %干燥空气下每千米的衰减  
    r_w(i) = (0.05+0.0021*rho_w+3.6./(((freq(i)-22.2).^2+8.5)+10.6./(((freq(i)-183.3).^2+9)+...  
        8.9./(((freq(i)-325.4).^2+26.3)).*freq(i).^2*rho_w*1e-4;  
    h_w(:,i) = h_w0.*(1+3./((freq(i)-22.2)^2+5)+5./(((freq(i)-183.3)^2+6)+...  
        2.5./(((freq(i)-325.4)^2+4)));  
    A_E_g(:,i) = (r_0(i)*h_0*exp(-h_S/h_0)+r_w(i)*h_w(:,i)')/sin(theta2*pi/180);  
end  
end
```

## 地球云雾损耗

Earth cloud loss

使用MATLAB对**地球云雾损耗**情况进行仿真，仿真条件：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 $A_g = 0.0145\text{dB}$ 。

### 3.4.地球云雾损耗

```
M = 0.25;    %单位: g/m^3
L_c = 1;      %单位: km
K1 = getK1(freq/1000,T);
A_E_g = (L_c.*K1*M)/(sin(theta2*pi/180))

A_E_g = 0.0145
```

## 结果分析

Result analysis

综合分析，可得火星轨道器-地球站通信链路段的总损耗为

$$A_E = L_f + A_{0.01} + A_{E,gas} + A_g$$

当 $d$ 分别取0.6、1、2、3、4亿公里时，可计算得：

**$A_E = 269.7249、274.1619、280.1825、283.7043、286.2031\text{dB}.$**

## 火星着陆器-火星轨道器通信链路段

Mars lander-Mars orbiter communication link segment

火星着陆器-火星轨道器通信链路段是由四部分损耗组成的。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，所以这段链路的总损耗与频率的关系应该完全按照自由空间损耗的规律变化，即对数规律。

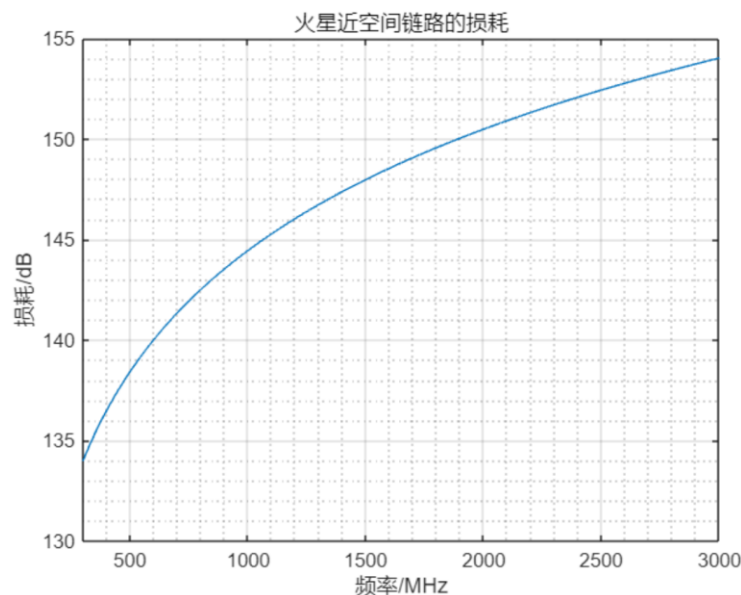


图 5. 火星着陆器-火星轨道器通信链路段损耗的频率特性

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。

## 火星轨道器-地球站通信链路段

Mars orbiter-earth station communication link segment

地球大气吸收损耗和云雾损耗只有 $10^{-2}$ 的数量级（单位为dB），主要影响地火链路段的仍是自由空间损耗。

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，在Ka频段（26.5-40GHz）上呈现**近似线性**的增长趋势。

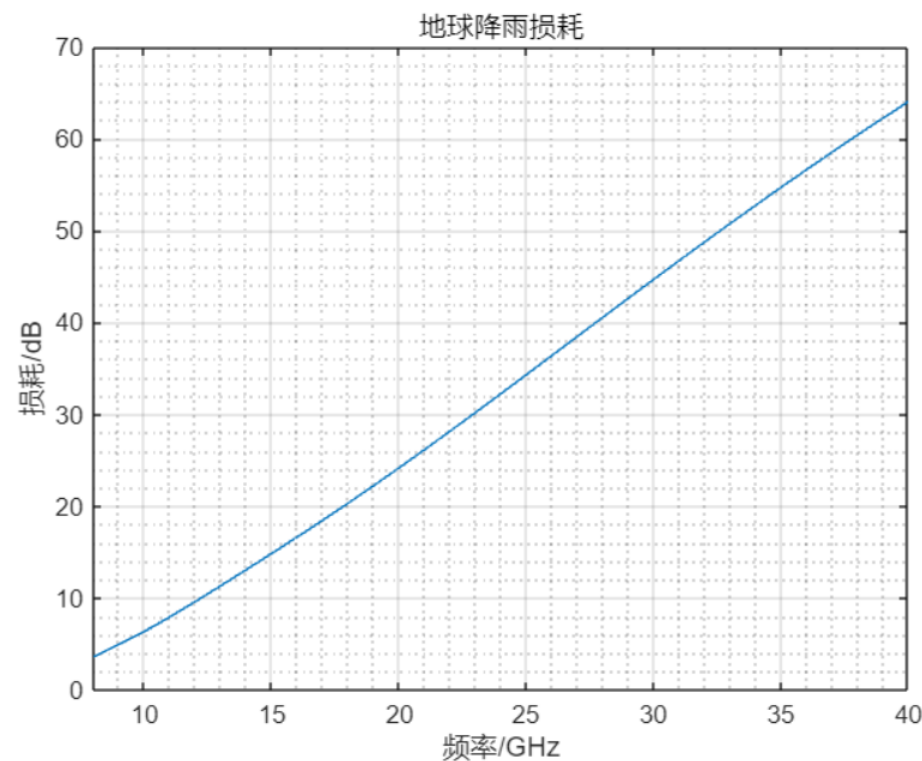


图 6. 地球大气降雨损耗的频率特性



## 火星轨道器-地球站通信链路段

Mars orbiter-earth station communication link segment

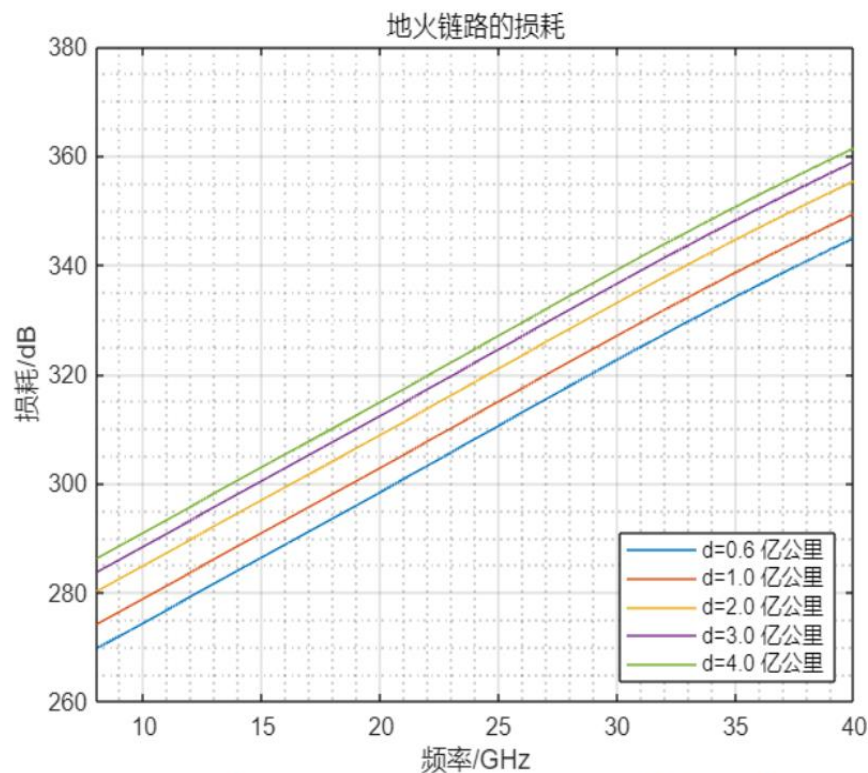


图 7. 火星轨道器-地球站通信链路段损耗的频率特性

在Ka频段上，雨衰从40dB开始**近似线性增长**，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，如右图所示。

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。

# 感谢您的观看

THANKS

任课老师：郭健

小组成员：

钟源 黄蕾  
贾岩森 李锦扬