

浅析卫星地球站上行信号对微波站干扰的计算

摘至 2006-11-28 清华大学与非门电子论坛

引言

由于卫星通信系统与微波接力系统共用频段，会产生同频干扰。为了避免新建卫星地球站建成后的上行频率对地球站周围微波接力系统造成有害干扰，依据中华人民共和国信息产业部第 21 号令《建立卫星通信网和设置使用地球站管理规定》【2002.6.21】和《建设卫星通信网和设置使用地球站的暂行规定》【国无管（1995.1）4 号】，要求建站单位在卫星地球站确定站址之前，在申报有关技术资料的同时，提供数据要准确、论证要充分、分析要科学、结论要明确的卫星地球站对微波接力站的干扰分析报告。无线电管理部门根据建站单位提供的拟建站址电磁环境测试报告和干扰分析报告，作为审批站址时的技术参考。本文主要介绍卫星地球站周围(以卫星地球站天线为中心)半径 100 km 以内共用频段的卫星地球站对微波接力站的干扰计算步骤和具体方法，供大家参考。

1.相关技术标准

根据 GB13616—92“微波接力站电磁环境保护要求”规定，卫星地球站上行信号对微波接力通信系统的干扰允许值为——

(1) 对于模拟微波接力通信系统 2500 km 假设参考电路的任何话路的相对零电平点，干扰功率应符合以下要求：

a.任何月份 20%以上的时间内，噪声计加权 1 分钟平均功率不超过 1000 pW。

b.任何月份 0.01%以上的时间内，噪声计加权 1 分钟平均功率不超过 50000 pW。

(2) 对于数字微波接力通信系统 2500 km 假设参考数字通路道的 64 kbit/s 输出端，干扰功率应符合以下要求：

a.任何月份 0.04%以上的时间内，任意 1 分钟射频干扰功率引起的平均误码率应不超过 10⁻⁶。

b.任何月份 0.0054%以上的时间内，任意 1 秒钟射频干扰功率引起的平均误码率应不超过 10⁻³。

c.任何月份由于射频干扰功率引起的误码秒累积时间应不超过 0.032%。

2.相关参数的计算

在实际的干扰分析计算中，预选卫星地球站站址的经纬度和静止卫星星下点的经纬度及微波接力站（以下简称：微波站）站址的经纬度是已知的，通过这些已知的参数可以计算出：卫星地球站的通信方位角和仰角、卫星地球站与微波站之间的距离、卫星地球站与微波站的空间损耗、卫星地球站鉴别角、微波站鉴别角、卫星地球站天线增益、微波站天线增益、实际干扰信号电平值、干扰信号允许值（干扰容限值）。

2.1 地球站通信方位与仰角的计算

设卫星地球站 A 的经纬度分别为 ϕ_1 和 θ_1 ，静止卫星 W 的星下点 S 的经纬度为 ψ 和 0 ， $\phi_0 = \psi - \phi_1$ 为星下点 S 对卫星地球站 A 的经度差，微波站 B 点的经纬度分别为 ϕ_2 和 θ_2 。

当卫星地球站 A 天线对准卫星 W 时，其仰角 EL 和方位角 AZ 分别为：

$$\operatorname{tg} EL = \frac{\cos \phi_1 \cos \phi_0 - \frac{R_E}{R_E + h_E}}{\sqrt{1 - (\cos \phi_1 \cos \phi_0)^2}} \quad (1),$$

$$\operatorname{tg} AZ = \frac{\operatorname{tg} \phi_0}{\sin \phi_1} \quad (2),$$

对于对地静止卫星而言，

$$\frac{R_E}{R_E + h_E} = \frac{6378}{6378 + 35786.6} \approx 0.151$$

$$\text{所以, } EL = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\cos \phi_1 \cos \phi_0 - 0.151}{\sqrt{1 - (\cos \phi_1 \cos \phi_0)^2}} \right) \quad (3),$$

$$AZ = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\operatorname{tg} \phi_0}{\sin \phi_1} \right) \quad (4),$$

式中，RE 为地球半径，6378 公里；hE 为卫星距地面距离大约 35786.6 公里。

注意：方位角有正有负，此公式是以正南为基准。我国基本上以正北为准，因此：

$$AZ = 180 - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\operatorname{tg} \phi_0}{\sin \phi_1} \right) \quad (5),$$

2.2 卫星地球站和微波站间的通信方位及路径的计算

已知卫星地球站和微波站两点 A、B 的经纬度，可进行以下计算。

2.2.1 计算 A 点到 B 点的真北方位角

A 点到 B 点的真北方位角 AZ 用下式计算：

$$AZ = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)}{\cos \theta_1 \operatorname{tg} \theta_2 - \sin \theta_1 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (6)$$

当 $\operatorname{tg}AZ > 0, \theta_1 < \theta_2$ ，方位角为 AZ；

若 $\theta_1 > \theta_2$ ，方位角为 $\pi + AZ$ ；

当 $\operatorname{tg}AZ < 0, \theta_1 > \theta_2$ ，方位角为 $\pi - |AZ|$ ；

若 $\theta_1 < \theta_2$ ，方位角为 $2\pi - |AZ|$ 。

式中： φ_1 为 A 点经度，弧度； φ_2 为 B 点经度，弧度；

θ_1 为 A 点纬度，弧度； θ_2 为 B 点纬度，弧度。

2.2.2 计算 A 点到 B 点的距离

① 大圆路径计算方法

$$d = \cos^{-1}(\cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\sin\beta\cos C) * a \quad (7)$$

式中， $C = \varphi_2 - \varphi_1$ ； θ_1 ， θ_2 ， φ_2 和 φ_1 的定义同上。

② 平坦地面计算方法（ $d < 10 \text{ km}$ ）

$$d = R * \sqrt{(\theta_2 - \theta_1)^2 + [(\varphi_1 - \varphi_2)\cos\theta_2]^2} \quad (8)$$

式中，R 为地球半径，为 6378 公里； θ_1 ， θ_2 ， φ_2 和 φ_1 的定义同上。

2.3 卫星地球站和微波站干扰鉴别角的计算

卫星地球站通信方向 AC 与微波站被干扰方向 AB 之间夹角为 ψ ，即卫星地球站通信方向对微波站的干扰鉴别角。 φ_A 为卫星通信方向在其通信方位角上的投影与该卫星地球站至微波站方向在水平面的夹角。 CB 垂直于 AB ， C 点向地面投影交于 O 点（见图 1）。

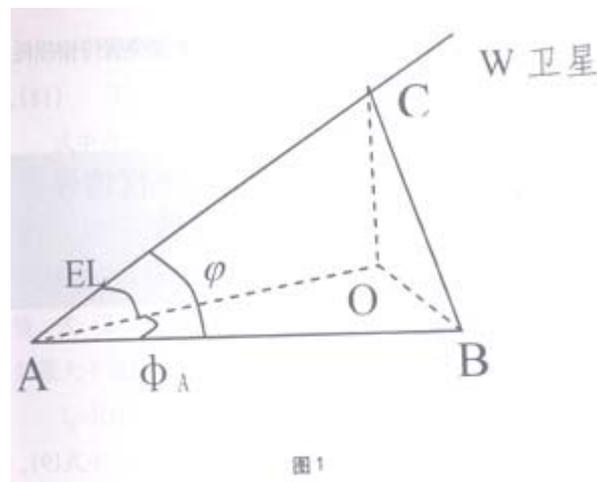
由图 2 可知：

$$\varphi_{A'} = |AZ - AZ'| \quad (\text{rad}) ,$$

$$\varphi_A = \varphi_{A'} \quad 0 \leq \varphi_{A'} \leq \pi ,$$

$$\text{或 } \varphi_A = 2\pi - \varphi_{A'} \quad \varphi_{A'} > \pi .$$

2.3.1 卫星地球站通信方向对微波站被干扰方向的干扰鉴别角的计算



由图 1 可知： $\psi = \cos^{-1} (\cos EL * \cos \varphi_A)$ (9)。

(以上计算假设微波站工作仰角 $\epsilon=0$ 时) 若 $\epsilon \neq 0$ ，则 (9) 式应写成如下式：

$$\psi = \cos^{-1} (\cos \epsilon * \cos EL * \cos \varphi_A + \sin \epsilon * \sin EL)$$
 (10) 。

2.3.2 微波站通信方向对被卫星地球站 干扰方向的鉴别角的计算

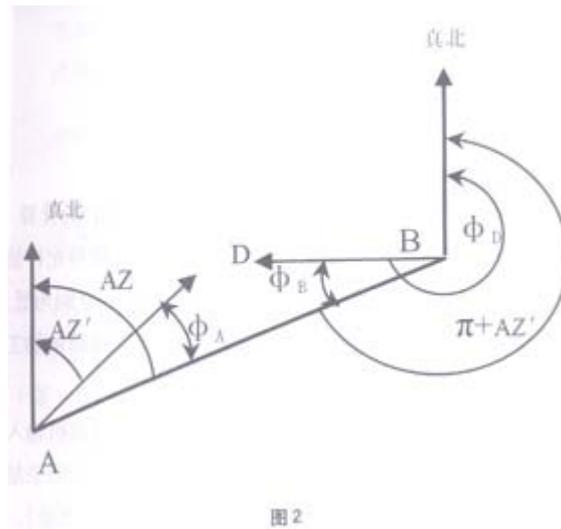


图2

由图2可知:

$$\varphi_{B'} = |\varphi_D - AZ' + \pi| \text{ (rad)},$$

$$\varphi_B = \varphi_{B'} \quad 0 \leq \varphi_{B'} \leq \pi;$$

$$\text{或 } \varphi_B = 2\pi - \varphi_{B'} \quad \varphi_{B'} > \pi.$$

图2中, BD为有用信号传输路径, AB为干扰信号传输路径, φ_D 为微波站通信方向。

2.4 天线增益的确定

天线增益是通过实际天线方向图来确定的, 当缺少天线方向图资料时, 可利用下述公式计算天线在某一方向的增益。

设D为天线直径(m); λ 为波长(m); 当 $D/\lambda > 100$ 时,

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_{\max} - 2.5 \cdot 10^{-3} |\varphi|^{1.5} & 0^\circ \leq \varphi \leq \varphi_0 \\ G_1 & \varphi_0 < \varphi \leq \varphi_1 \\ 32 - 25 \lg \varphi & \varphi_1 < \varphi \leq 40^\circ \\ -10 & 40^\circ < \varphi \leq 180^\circ \end{cases} \text{ (dB)} \quad (11)$$

当 $D/\lambda \leq 100$ 时,

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_{\max} - 2.5 \cdot 10^{-3} |\varphi|^{1.5} & 0^\circ \leq \varphi \leq \varphi_0 \\ G_1 & \varphi_0 < \varphi \leq \varphi_1 \\ 52 - 10 \lg(D/\lambda) - 25 \lg \varphi & \varphi_1 < \varphi \leq 40^\circ \\ 10 - 10 \lg(D/\lambda) & 40^\circ < \varphi \leq 180^\circ \end{cases} \text{ (dB)} \quad (12)$$

其中: G_{\max} —天线主瓣增益 dB, $G_{\max} = 10 \lg[0.6(nD/\lambda)^2]$, 0.6为天线效率;

G_1 —天线第一旁瓣增益 dB, $G_1 = 2 + 15 \lg(D/\lambda)$;

ψ —偏离主波束中心轴的张角，度；

ψ_1 —主瓣半功率角宽度的一半，可用下式表示：

$$\psi_1 = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{\max} - G_1} \quad (^\circ) ;$$

ψ_2 —第一副瓣位置， $\psi_2 = 15.85(D/\lambda)^{-0.6} \quad (^\circ)$ 。

2.5 传输损耗的计算

2.5.1 视距路径传输损耗计算

视距路径传输损耗主要包括自由空间传输损耗及氧气和水汽的吸收损耗：

$$L_{sd} = L_0 + (\gamma_0 + \gamma_w)d \quad (13)。$$

$$L_0 = 92.5 + 20\lg f + 20\lg d \quad (14)。$$

式中： L_{sd} —视距路径传输损耗，dB；

L_0 —自由空间传输损耗，dB；

f —频率，GHz； d —路径长度，km；

γ_0 —氧气吸收衰减系数，dB/km；

γ_w —水汽吸收衰减系数，dB/km。

当 $f < 15$ GHz 时， $\gamma_w = 0$ ，则

$$\gamma_0 = \left[0.00719 + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.5} \right] f^2 \times 10^{-3} \quad (15)。$$

当 $f \geq 15$ GHz 时，则

$$\gamma_0 = \left[6.73 + \frac{300}{(f - 22.3)^2 + 7.3} \right] f^2 p / 10^6 \quad (16)。$$

式中： p —水汽浓度，取决于无线电气候区。

2.5.2 超视距路径传输损耗计算

超视距传播机制主要是绕射（包括障碍物绕射和光滑球面绕射）和对流层散射。对于距离稍超过视距的传输路径，在大多数情况下绕射是主要传播机制，散射可忽略不计；对于远远超过视距的路径，散射是主要传播机制，绕射可忽略不计；对于介于两者之间的中等长度的路径，两种传播机制都需要考虑。考虑参数有： HC —路径余隙， m ； HO —自由空间余隙， m 。主要传播损耗有四种：

(1) 光滑球面绕射损耗。

(2) 不规则地形障碍物上的绕射损耗。

在传播路径上往往会遇到一个或多个障碍物，为了估算这些障碍物的附加绕射损耗，通常是将障碍物的形状理想化。当障碍物的厚度相对较窄时，可视为刃形障碍；当障碍物的厚度相对较宽、顶部比较平缓时，可视为圆形障碍。因此又可细分为①刃形绕射损耗的计算；②单圆形障碍物绕射损耗的计算。

(3) 多重障碍物绕射计算。

(4) 对流层散射传播。

以上四种传播损耗具体计算比较复杂，由于受篇幅的限制在这里就不详细赘述，具体方法见《微波接力通信系统干扰计算方法》（国标 GB/T 13619-92）。

2.5.3 不同类型路径传输损耗 L_{sd} 的计算

(1) 当路径余隙 $HC > HO$ ，并且路径距离不超过 100 km 时， L_{sd} 按自由空间传输损耗计算：

$$L_{sd} = L_o = 92.5 + 20 \lg f + 20 \lg d \quad (17)。$$

(2) 当路径余隙 $HC \leq HO$ ，并且路径距离不超过 100 km 时， L_{sd} 按自由空间传输损耗计算并附加绕射传输损耗：

$$L_{sd} = L_o + L_d \quad (18)。$$

3. 微波接收机输入端实际干扰信号电平值和干扰信号允许值（干扰容限）的计算

3.1 实际干扰信号电平值的计算

实际干扰信号电平值计算公式为：

$$I = PI - LI + GI + GR - LR - L_{sd} - XPD + K \quad (19)。$$

式中, I—微波收信机输入端干扰信号功率, dBm;

PI—干扰发信机输出端信号功率, dBm;

GI—卫星地球站天线在干扰站方向的天线增益, dBi;

GR—微波天线在被干扰源方向的天线增益, dBi;

LR—接收端馈线系统损耗, dB;

LI—干扰站发射端馈线系统损耗, dB;

Lsd—路径传输损耗, dB;

XPD—交叉极化去耦, dB; (由于影响不大可以省略)

信号带宽

K—带宽修正因子, $K=10\lg \frac{\text{信号带宽}}{\text{干扰带宽}}$ 。

干扰带宽

3.2 干扰信号允许值(干扰容限值)的计算

3.2.1 模拟微波站干扰信号允许值(干扰容限值)的计算

模拟 TV/FM 系统和 FDM/FM 系统干扰信号允许值的计算比较复杂,需要计算有用信号和干扰信号分别为低、中、高调制指数时的载噪比。本文介绍两种比较简单的工程上常用的计算方法。

A. 采用 FM 制式的微波接力系统的微波接收机输入端对来自同一频段,采用 FDM/FM/FDM A 制式的卫星地球站干扰电平允许值采用下述公式估算(用于选址)。

1.任何月份 20%以上时间, 干扰信号电平允许值为:

$$I_0=10\lg TR-176.6 \text{ (任一 } 4 \text{ kHz 带宽) (20)}。$$

2.任何月份 0.01%以上时间, 干扰信号电平允许值为:

$$I_0=10\lg TR-159.6 \text{ (任一 } 4 \text{ kHz 带宽) (21)}。$$

式中: I_0 —微波接收机输入端干扰信号允许值, dBW;

TR—微波接收机的噪声温度, K。

对于噪声温度 T_R ，可用下式求出：

$$T_R = (F - 1) \times 290 \quad (22)$$

式中： F —微波接收机的噪声系数。

B.通过门限恶化量来估算干扰信号允许值（干扰容限值）。门限电平是指恰好满足中断概率指标的接收信号电平。描述门限恶化的一种方法就是给出最大干扰信号允许值。式（23）可以用来估算 TV/FM 系统和 FDM/FM 系统的最大干扰信号允许值。（23）式表示如下：

$$I_0 = R_{th} - 10 + S_e \quad (23)$$

式中： I_0 —最大干扰信号允许值 dBm；

R_{th} —被干扰的微波接收机门限电平值，dBm；

S_e —被干扰的微波接收机有效选择性，dB。

3.2.2 数字微波站干扰信号允许值(干扰容限值)的计算

A.由干扰允许值的误码率计算公式可知：

①MPSK 调制系统

$$P_e \approx 0.5 \exp(-E_b/N_0) = 0.5 \exp(-C/N) \quad (\text{DBPSK});$$

当 $M=2$ 时 $P_e \approx 0.5 \operatorname{erfc}(X)$ (BPSK);

当 $M>2$ 时 $P_e \approx \operatorname{erfc}[X \sin(t)]$ (MPSK)。

式中， $\operatorname{erfc}(Y)$ —补余误差函数，可用下式表示：

$$\operatorname{erfc}(Y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_Y^{\infty} \exp(-z^2) dz,$$

$$X = \sqrt{\log_2 M (E_b / N_0)} = \sqrt{\left(\frac{C}{N}\right)_0} \quad t = \pi / M;$$

E_b/N_0 —归一化信噪比;

$(C/N)_0$ —平均载波功率与平均噪声功率之比,即对应于某一误码率的信噪比理论值。

② MQAM 调制系统

$$P_t = 2P_L \left(1 - \frac{1}{2} P_L\right)$$

$$P_L = \frac{L-1}{L} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{3}{2(M-1)}} (C/N)_0 \right]$$

$(C/N)_0$ —平均载波功率与平均噪声功率之比,即对应于某一误码率的信噪比理论值;

P_L —MQAM 调制系统两个正交分量之一的基带信号误码率;

M —调制电平数;

$L = \sqrt{M}$ 。

B. 实际门限信噪比的计算

根据 3.2.2 A 中公式可算出信噪比的理论值 $(C/N)_0$, 另外还有设备不完善引起的恶化, 系统内部干扰引起的恶化和系统外部干扰引起的恶化; 因此, 实际的门限信噪比可表达如下:

$$(C/N)_{th} = (C/N)_0 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \quad (24)。$$

式中: $(C/N)_{th}$ —对应于某一误码率 (如 10^{-3} 或 10^{-6}) 的门限信噪比值, dB;

$(C/N)_0$ —对应于某一误码率 (如 10^{-3} 或 10^{-6}) 的信噪比理论值, dB;

δ_1 —设备恶化量 (设备厂家给出), dB;

δ_2 —系统内部干扰的恶化量, dB;

δ_3 —系统外部干扰的恶化量, dB。

C. 信号干扰比允许值计算

信号干扰比允许值可按式近似估算:

$$(C/I)_0 = (C/N)_{th} + \Delta \text{ (dB)} \quad (25)$$

式中： Δ —由于系统外部干扰所要求的信号干扰比增量，dB。

Δ 与 δ_3 有如下关系：

$$\Delta = -10 \lg(100.1\delta_3 - 1)$$

通常取 $\delta_3 = 0.04 \sim 0.4$ dB，则 $\Delta = 10 \sim 20$ dB。

D. 干扰信号允许值（干扰容限值）的计算

$$I_0 = C - (C/I)_0 \quad (26)$$

式中： I_0 —干扰信号允许值；

C —门限接收电平；

$(C/I)_0$ —对应于某一误码率（如 10^{-3} 或 10^{-6} ）的信噪比理论值，dB。

4. 微波接收机输入端实际干扰信号电平和干扰信号允许值（干扰容限）的比较

经计算可以得出微波接收机输入端实际干扰信号功率 I 的数值（dBm）和干扰信号允许值 I_0 （dBm）（干扰容限值）。

当卫星地球站周边只要有一个微波站的 $I \geq I_0$ 时，不可以在拟选的站址上架设卫星地球站，卫星地球站会对工作在同频段 100 km 以内的微波接力站产生干扰。

当 $I < I_0$ 时可以在拟选的站址上架设卫星地球站，卫星地球站不会对工作在同频段 100 km 以内的微波接力站产生干扰。

5. 结束语

卫星地球站的电磁环境测试和干扰分析是卫星地球站建设前的一项非常重要的工作。认真做好这项工作，可提高无线电频谱资源的利用率，有效地避免卫星地球站建成后上行信号可能对周边同频段内微波站造成的干扰，降低建设卫星地球站的成本。本文按照“暂行规定”要求，只给出卫星地球站周围（以卫星地球站天线为中心）半径 100 km 以内的计算方法。在实际的工程设计中，要进行发射卫星地球站协调区计算，画协调区图，协调区内所有同频段的微波站都要进行干扰计算，最后确定协调区内哪几个微波站和卫星地球站间存在有害干扰，尽量避免新建的卫星地球站可能对周边同频段内微波站造成的干扰。

