

电视和调频广播发射台的电磁污染计算

宋学诚

提 要 本文以两个典型的电视和调频广播发射天线为例, 论述了城市电视和调频广播发射台的电磁污染计算方法, 汇集了各台常用电视和调频广播天线的空间场强计算公式及有关测试图表、曲线, 给出了便于各有关部门使用的描绘电磁污染范围的威力图的绘制方法。

随着环境保护的日益受到重视, 电磁污染问题业已提到日程上来。1979年, 我国制定的电磁辐射的职业暴露安全标准为 $38\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (按每日 8 小时工作计算, 每日最大允许剂量为 $300\mu\text{W}\cdot\text{h}/\text{cm}^2$)*, 目前正在研究制定电磁辐射的居民安全标准。显然, 后一标准将比前者为严。对于城市居民而言, 主要的电磁污染源是在城市中或其附近建立的电视 (TV) 和调频广播 (FM) 发射台。这样, 寻求一种较简单而基本合乎实际的计算其电磁污染的方法, 自然成为需要。1984年, 我们应某市广播电视局和环境保护局之託, 对该市拟建的 TV 和 FM 发射台的空间场强 (能流密度) 作了计算; 依同样方法还计算了现有电视台的空间场强分布并进行了实地测试。虽然由于种种条件限制, 该测试工作并不充分, 但所测结果与计算值还比较一致。现以该市 TV、FM 发射天线为例, 论述城市 TV 和 FM 发射台的电磁污染计算方法, 以期引起讨论。

该市三个发射台的有关数据如下:

1. 待建电视台 (TV): 天线为相位差 $\frac{\pi}{2}$ 馈电的正交折合振子, 共四层, 层间距离 $s=0.75\lambda$; 天线阵中心离地高度 $h=52.7$ 米; 各层间等幅同相馈电, 输入总功率 $P_{in}=1000$ 瓦。
2. 待建调频广播台 (FM): 天线设在铁塔四侧, 每侧各有一个带反射板的二元半波对称振子阵, 振子间距 $s=0.75\lambda$, 振子与反射板间距离 $d=0.27\lambda$, 反射板宽度 $D=0.52\lambda$; 各振子等幅同相馈电, $P_{in}=1000$ 瓦; $h=42.5$ 米。
3. 已建电视台 (TVA): 天线为 6 层蝙蝠翼天线, 层间距 $s=\lambda$, 各层间等幅同相馈电。

本文 1985 年 1 月 5 日收到

* 注: $38\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 相当于 $12\text{V}/\text{m}$

一、辐射场计算公式之确定

计算发射天线的空间场，首先遇到的是场区划分问题。按 $r_{min} \geq \frac{2L^2}{\lambda}$ 计算远区最小距离，当发射频率较高而天线阵尺寸 L 较大时所得值可能较大，例如此处已建电视天线的远区最小距离就达到 100m。这种情况下，看来应分别计算中间区（夫累涅尔区）场和远区辐射场，但实际上并无此必要。据文献[1]，当 $r \geq 8\lambda$ 时电抗场只是辐射场的 1%，而当 $r = \lambda$ 时前者是后者的 8%。由于讨论电磁污染时有意义的区域总是在离天线 20~30 米以外的地方，按 $r = 20m$ 计算，这一距离对于 $f \geq 120MHz$ 的发射台就有 $r \geq 8\lambda$ ，即使对于频率较低的电视一频道， r 也达 3.5λ ，因此，当统一用发射天线的远区辐射场公式来计算整个空间的电磁剂量时，对于有实际意义的中间区，所引入的误差完全可处于允许范围之内。

对于具体的发射天线，远区辐射场公式可以推导也可查有关资料，问题在于如何进行合理的简化。

(一) 以前述待建电视天线 (TV) 和调频广播天线 (FM) 为例说明推导和简化过程

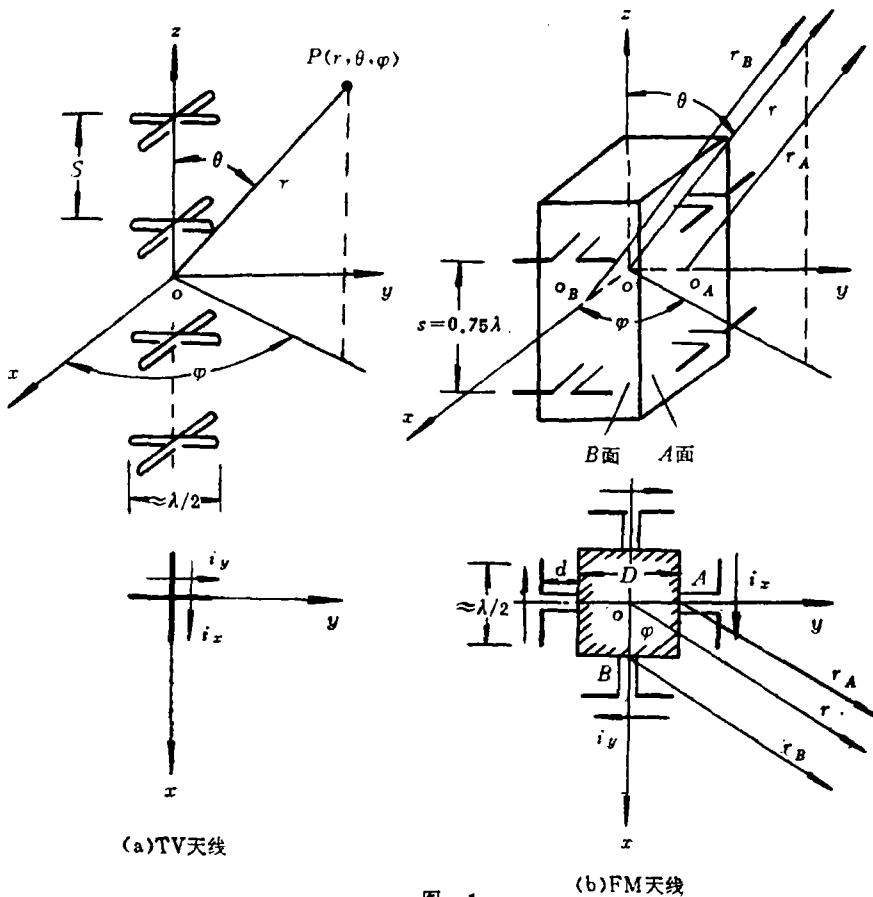


图 1

(b)FM天线

(a)TV天线

1. TV 天线

设振子如图 1(a) 所示设置, $i_x = j i_y$, 交叉振子共 N 层, 各层间分别等幅同相馈电, 则沿 x 轴和沿 y 轴的单个振子在观察点 $P(r, \theta, \varphi)$ 处的场强 $\vec{E}_{(x)}$ 、 $\vec{E}_{(y)}$ 分别为:

$$\vec{E}_{(x)} = j \frac{60 I_{in}}{r} e^{-jkr} (-\hat{\theta} \cos \theta \cos \varphi + \hat{\varphi} \sin \varphi) \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \cos \varphi\right)}{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}$$

$$\vec{E}_{(y)} = j \frac{60 (-j I_{in})}{r} e^{-jkr} (-\hat{\theta} \cos \theta \sin \varphi - \hat{\varphi} \cos \varphi) \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \sin \varphi\right)}{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi}$$

天线阵的辐射场 \vec{E} 为:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_{(x)} + \vec{E}_{(y)} \\ &= -\frac{K e^{-jkr}}{r} \left\{ \hat{\theta} \cos \theta \left[\sin \varphi \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \sin \varphi\right)}{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi} + j \cos \varphi \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \cos \varphi\right)}{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi} \right] \right. \\ &\quad \left. + \hat{\varphi} \left[\cos \varphi \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \sin \varphi\right)}{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi} - j \sin \varphi \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \cos \varphi\right)}{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi} \right] \right\} \\ &\quad \cdot \frac{\sin\left(\frac{N\pi s}{\lambda} \cos \theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi s}{\lambda} \cos \theta\right)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$K = 60 I_{in}$$

I_{in} —— 半波振子输入端电流

讨论电磁污染时场强应按有效值计算, 则

$$I_{in} = \sqrt{\eta P'_{in} / R_r} \quad (2)$$

$R_r = 73.1 \Omega$; 半波振子辐射电阻

P'_{in} : 单个振子的输入功率

η : 天线效率

在超短波段, 天线效率一般较高, 故此处可取 $\eta = 1$; 又当天线为 N 层、总输入功率为 P_{in} 时, $P'_{in} = P_{in} / (2N)$, 于是

$$K = 4.962 \sqrt{P_{in} / N}$$

按(1)式计算空间场显然是繁杂的, 应予简化。为此, 我们先观察水平面方向图。

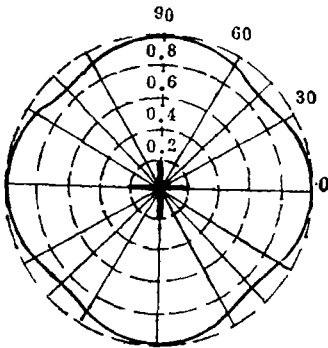
以 $\theta = \pi/2$ 代入(1)式, 则水平面辐射场为水平极化的旋转场:

$$\vec{E} \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = -\hat{\varphi} NK \frac{e^{-jkr}}{r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\varphi\right)}{\cos\varphi} - j \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\varphi\right)}{\sin\varphi} \right] \quad (3)$$

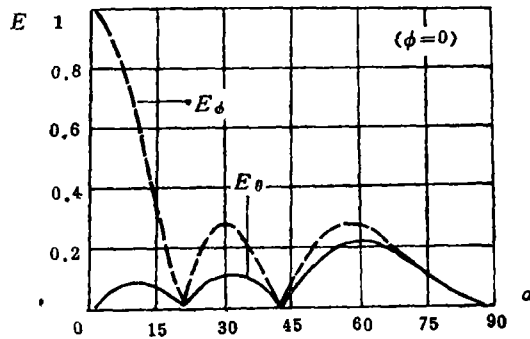
水平面归一化方向性函数 $F(\varphi)$ 为

$$F(\varphi) = \left\{ \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\varphi\right)}{\cos\varphi} \right]^2 + \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\varphi\right)}{\sin\varphi} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

方向图如图 2(a) 所示。由图可见，天线在水平面的辐射略有起伏（沿振子轴线方位上有最大值，在 $\varphi = \frac{\pi}{4}$ 方位上有最小值为 0.888），因而各方位面（垂直面）上空间辐射场不尽相同。但是，对于电磁污染而言，重要的是确定空间场强的最大可能值，所以可用最大辐射的方位面（在这里是振子轴线所在方位面）上场分布代表整个空间的场分布。也就是说，视水平面为全向性的；而水平面为全向性又恰是一般城市建立的电视和调频广播天线所力图作到的指标。



(a) TV 水平面方向图



(b) TV 垂直面方向图

图 2 TV 天线方向图

以 $\varphi = 0$ 代入(1)式，则垂直面辐射场为

$$\vec{E} \Big|_{\varphi=0} = -NK \frac{e^{-jkr}}{r} \left[\hat{\varphi} + j\hat{\theta} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\theta\right)}{\cos\theta} \right] \frac{\sin\left(\frac{N\pi s}{\lambda} \cos\theta\right)}{N \sin\left(\frac{\pi s}{\lambda} \cos\theta\right)} \quad (5)$$

这是一个椭圆极化场，其长轴在 $\hat{\varphi}$ 向。图 2(b) 绘出 $\varphi = 0$ 方位面上水平极化分量 E_ϕ 和垂直极化分量 E_θ 的方向图（其中 $\alpha = \theta - \frac{\pi}{2}$ ，为俯角）。由图可见，在主瓣内基本上是线极化波，在远付瓣内基本上是圆极化波。仍然从计算最大可能值这一考虑出发，计算中可忽略 E_θ 分量而只计 E_ϕ 分量（主极化分量），于是，空间场表示式可有如下简化形式：

$$|E|_{\varphi=0} \approx \frac{NK}{r} \cdot F(\theta)$$

$$= \frac{NK}{r} \left| \frac{\sin\left(\frac{N\pi s}{\lambda} \cos\theta\right)}{N \sin\left(\frac{\pi s}{\lambda} \cos\theta\right)} \right| \quad (\text{伏/米})$$

(6)

式中 $F(\theta)$ 为水平极化分量的归一化垂直面方向性函数。

2. FM 天线

据文献[2], 铁塔四侧设置振子天线时, 相邻两侧振子间的漏洩能量的实测值如图 3 所示。由图可见, 当反射板宽度为 0.52λ 时, 漏洩值约为 -34dB , 即 0.04% , 可予忽略。这样, 反射板的影响可用镜象法计算。

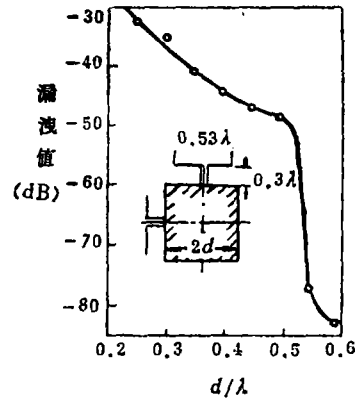


图 3 振子间漏洩能量的实测值

如图 1(b), 当四侧上的振子电流按图示正向等幅同相馈电时, A 面和 B 面上的振子阵的辐射场 \vec{E}_A 、 \vec{E}_B 分别为

$$\vec{E}_A = \frac{4K}{r_A} e^{-jkr_A} \left\{ (\hat{\theta} \cos\theta \cos\varphi - \hat{\varphi} \sin\varphi) \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\theta \cos\varphi\right)}{1 - \sin^2\theta \cos^2\varphi} \right.$$

$$\left. \cdot \sin(kd \sin\theta \sin\varphi) \cdot \cos\left(\frac{\pi s}{\lambda} \cos\theta\right) \right\} \quad (7)$$

$$\vec{E}_B = -\frac{4K}{r_B} e^{-jkr_B} \left\{ (\hat{\theta} \cos\theta \sin\varphi + \hat{\varphi} \cos\varphi) \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\theta \sin\varphi\right)}{1 - \sin^2\theta \sin^2\varphi} \right.$$

$$\left. \cdot \sin(kd \sin\theta \cos\varphi) \cdot \cos\left(\frac{\pi s}{\lambda} \cos\theta\right) \right\} \quad (8)$$

式中 $K = 60 I_{in} = 60 \sqrt{\frac{P_{in}}{8R_r}} = 2.481 \sqrt{P_{in}}$

d —— 振子与反射板距离

s —— 一个侧面上两振子间距

D —— 反射板宽度

r_A 、 r_B —— A 面和 B 面阵中心到观察点距离

对振幅项: $r_A \approx r_B \approx r$

对相位项: $r_A = r - \frac{D}{2} \sin\theta \sin\varphi$, $r_B = r - \frac{D}{2} \sin\theta \cos\varphi$

第一、五卦限内的辐射场为

$$\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_B \quad (9)$$

其他卦限内的辐射场可由同样方法求出, 由图 1(b) 所示馈电情况, 它们将有同上

相同的结果。

图 4 给出了 $\phi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 等四个方位面上 E_ϕ 、 E_θ 的方向图。可见主极化分量为 E_ϕ (水平极化分量)；交叉极化分量 E_θ 较小，计算中可予忽略。

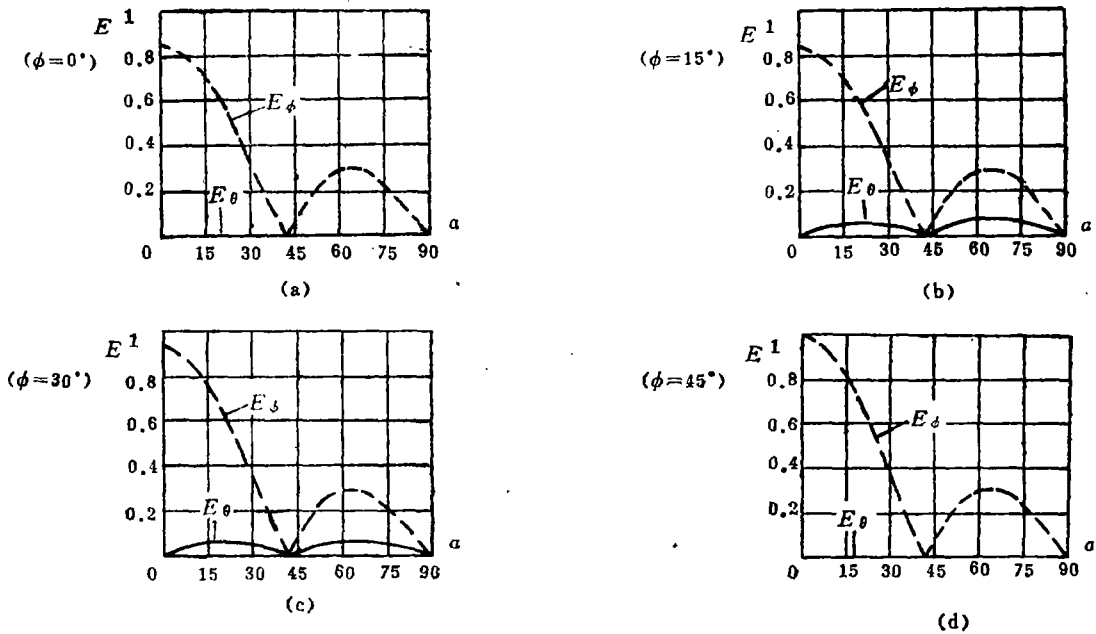


图 4 FM 天线不同方位面上的 E_θ 、 E_ϕ 方向图

对水平面，辐射场是水平极化波：

$$\begin{aligned}
 |E|_{\varphi=\frac{\pi}{2}} &= \left\{ |E_A|^2 + |E_B|^2 + 2|E_A| \cdot |E_B| \cdot \cos \left[\frac{kD}{2} (|\cos \varphi| - |\sin \varphi|) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{4K}{r} \left\{ \frac{\cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi \right)}{\sin^2 \varphi} \sin^2(kd \sin \varphi) + \frac{\cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \sin \varphi \right)}{\cos^2 \varphi} \sin^2(kd \cos \varphi) \right. \\
 &\quad \left. + 2 \frac{\cos \left(\frac{\pi}{2} \cos \varphi \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} \sin \varphi \right)}{\sin \varphi \cos \varphi} \cdot \sin(kd \sin \varphi) \cdot \sin(kd \cos \varphi) \right. \\
 &\quad \left. \cdot \cos \left[\frac{kD}{2} (|\cos \varphi| - |\sin \varphi|) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)
 \end{aligned}$$

水平面方向图示于图 5，它基本上是全向性的，最大辐射方向在 $\varphi = \frac{\pi}{4}$ ，即铁塔对

角线所在的方位上。同前述，以该方位面的辐射场代表空间场分布，即以 $\varphi = \frac{\pi}{4}$ 代入 (7)、(8)、(9) 式，则有

$$\begin{aligned} \vec{E}|_{\varphi=\frac{\pi}{4}} &= \vec{E}_A|_{\varphi=\frac{\pi}{4}} + \vec{E}_B|_{\varphi=\frac{\pi}{4}} \\ &= -\hat{\varphi} \frac{4\sqrt{2}K}{r} e^{-jk\left(r - \frac{\sqrt{2}}{4}D\sin\theta\right)} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\sqrt{2}}{4}\pi\sin\theta\right)}{1 - \frac{1}{2}\sin^2\theta} \\ &\quad \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{2}\pi d}{\lambda}\sin\theta\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi s}{\lambda}\cos\theta\right) \end{aligned} \quad (11)$$

由 (11) 式可得

$$|E| = 12.463\sqrt{P_{in}} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{2}}{\lambda}\pi d\right) \cdot \frac{1}{r} \cdot F(\theta) \quad (12)$$

式中
$$F(\theta) = \left| \frac{\cos\left(\frac{\sqrt{2}}{4}\pi\sin\theta\right) \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{2}}{\lambda}\pi d\sin\theta\right) \cos\left(\frac{\pi s}{\lambda}\cos\theta\right)}{\left(1 - \frac{1}{2}\sin^2\theta\right) \cdot 0.888 \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{2}}{\lambda}\pi d\right)} \right|$$

为归一化垂直面方向性函数。

(6)式和(12)式表明,对于水平面基本上是全向性、交叉极化分量又较小的电视或调频广播发射天线,其空间场可由如下一般表示式计算:

$$|E| = |E_{max}| \cdot F(\theta) \quad (13)$$

式中 $|E_{max}|$ 为最大辐射方向上的场强值, $F(\theta)$ 为主极化分量在最大辐射方位上的归一化方向性函数。

(二) 通用型电视和调频广播天线辐射场之计算

由天线增益 G 的定义式 $G = \frac{E_{max}^2/120\pi}{P_{in}/4\pi r^2}$, 可解得 $E_{max} = \sqrt{30P_{in}G}/r$, (13)式变为

$$|E| = (\sqrt{30P_{in}G}/r) \cdot F(\theta) \quad (14)$$

对于通用型天线, G 和 $F(\theta)$ 均可由有关资料查得。例如,对 N 层蝙蝠翼电视天线,由文献[2]查得:

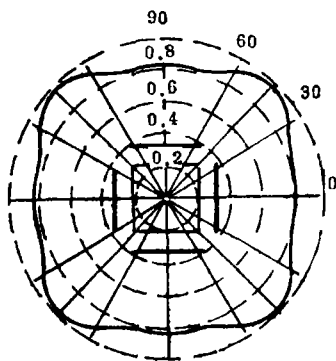


图 5 FM 天线水平面方向图

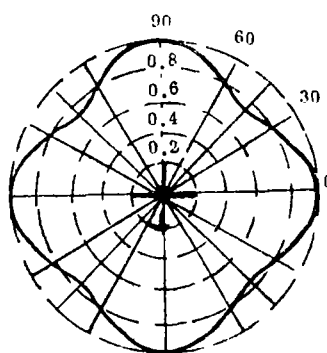


图 6 蝙蝠翼天线水平面方向图

当每层的两振子等幅、相差 $\frac{\pi}{2}$ 馈电，各层间均匀同相馈电时，其水平面归一化方向性函数为

$$F(\varphi) = \frac{1}{1 - \cos 0.7\pi} \left\{ \left[\frac{\cos(0.7\pi \sin \varphi) - \cos 0.7\pi}{\cos \varphi} \right]^2 + \left[\frac{\cos(0.7\pi \cos \varphi) - \cos 0.7\pi}{\sin \varphi} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

方向图如图6，当 $\varphi = \frac{\pi}{4}$ 时有最小值为0.76。

其垂直面归一化方向性函数为：

$$F(\theta) = \frac{1}{2.5508} \{ 0.0941 + 0.7501 \cos(0.72\pi \cos \theta) + 0.9995 \cos(0.48\pi \cos \theta) + 0.7071 \cos(0.24\pi \cos \theta) \} \frac{\sin\left(\frac{N\pi s}{\lambda} \cos \theta\right)}{N \sin\left(\frac{\pi s}{\lambda} \cos \theta\right)} \quad (16)$$

增益可按式近似计算

$$G \approx 1.1Ns/\lambda \quad (17)$$

文献[2]还给出了增益的测试值如表1。

表 1

| G(dB) \ 频道 N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| 2 | 3.5 | 3.2 | 3.3 | 3.1 | 3.1 | 3.2 | 3.0 | 3.1 | 3.1 | 3.1 | 3.2 | 3.1 |
| 3 | 5.2 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.2 |
| 4 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.4 | 6.3 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.4 | 6.2 | 6.0 |
| 6 | 8.3 | 8.3 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.3 | 8.4 | 8.4 | 8.3 | 8.3 | 8.2 |
| 8 | 9.5 | 9.6 | 9.6 | 9.5 | 9.4 | 9.3 | 9.6 | 9.6 | 9.5 | 9.4 | 9.2 | 9.0 |
| 12 | 11.3 | 11.3 | 11.4 | 11.4 | 11.4 | 11.4 | 11.3 | 11.4 | 11.4 | 11.3 | 11.3 | 11.2 |

再如设置在铁塔四侧的双环天线，由文献[2]可知：

当各侧同相馈电，其水平面方向图如图7所示。最大值亦在铁塔对角线方位上，最小值约为0.8，可视为全向性的。

在图8所示的坐标系下，其归一化垂直面方向性函数为：

$$2L \text{ 形} \quad F(\theta) = \cos\left(\frac{2\pi d_1}{\lambda} \cos \theta\right) \cdot F_0(\theta) \quad (18)$$

$$4L形 \quad F(\theta) = \frac{1}{2.06} \left[1.06 \cos\left(\frac{2\pi d_1 \cos\theta}{\lambda}\right) + \cos\left(\frac{2\pi d_2 \cos\theta}{\lambda}\right) \right] \cdot F_0(\theta) \quad (19)$$

$$6L形 \quad F(\theta) = \frac{1}{3.308} \left[1.248 \cos\left(\frac{2\pi d_1 \cos\theta}{\lambda}\right) + 1.06 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_2 \cos\theta\right) + \cos\left(\frac{2\pi d_3 \cos\theta}{\lambda}\right) \right] \cdot F_0(\theta) \quad (20)$$

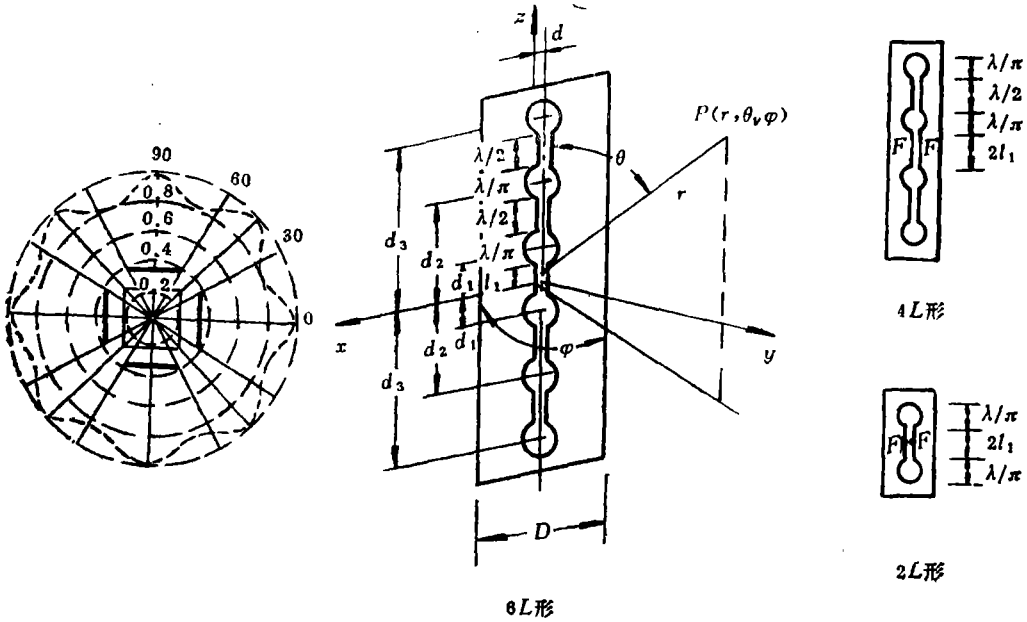


图 7 设在矩形铁塔四侧的双环天线水平面方向图
反射板宽 $D = \lambda$ ，环距反射板 $d = \lambda/4$ 。

图 8 双环天线阵

式中 $F_0(\theta)$ 为单环的垂直面归一化方向性函数，

$$F_0(\theta) = \frac{1}{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d\right)} [J_0(\cos\theta) - J_2(\cos\theta)] \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta\right) \quad (21)$$

文献[2]还给出了双环天线增益的测试值和理论计算值如表 2。

表 2

| 天 线 形 式 | | 2L形 | 4L形 | 6L形 |
|------------------------|---------------------|----------------------|---------------|---------------|
| 每个侧面的单环数 | | 2 | 4 | 6 |
| 四侧设双环时(水平面为全向性)的增益(dB) | $l_1 = 0.25\lambda$ | 3.0 (3.53) | 6.1 (6.65) | 7.8 (8.42) |
| | () 内为理论计算值 | $l_1 = 0.175\lambda$ | 2.5 (2.5) | 5.5 (5.7) |

註：环与反射板距离 $d = \lambda/4$

二、反射场之计算

由于地面和建筑物的存在，它们将产生反射场，因此到达一个观察点的场应该是天线的直接辐射场 \vec{E}_1 和各反射场 \vec{E}_{2n} 的迭加：

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_1 + \sum^n \vec{E}_{2n} \\ &= \vec{E}_1(r_1, \theta_1) + \sum^n |\Gamma_n| \cdot \vec{E}_1(r_{2n}, \theta_{2n}) e^{j\phi_n} \end{aligned} \quad (22)$$

式中 $|\Gamma_n|$ 、 ϕ_n 为地面及建筑物的反射系数的幅值和相角。

显然，如果全面计及各种物体的反射波，不仅 $|\Gamma_n|$ 和 ϕ_n 的确定是很困难的，而且会使计算极其复杂。为规范化起见，可作如下处理：

1. 仅考虑一般土壤地面的反射。

对水平极化波，由文献 [3]，

$|\Gamma|$ 、 ϕ 随频率和俯角 β 的变化如图 10 所示。对于电视和调频广播，可取 $f=100\text{MC}$ 曲线值；作为电磁污染计算，重要的是距天线较近、距地面高度较小的区域，亦即

$\beta > \frac{\pi}{4}$ 的范围，因此计算中 $|\Gamma|$ 值可统一取为 0.7， ϕ 值统一取为 -180° 。

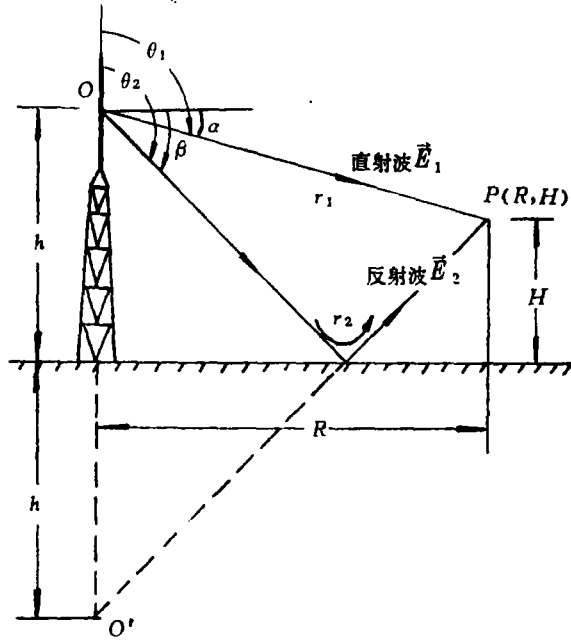


图 9 直射波和地面反射波

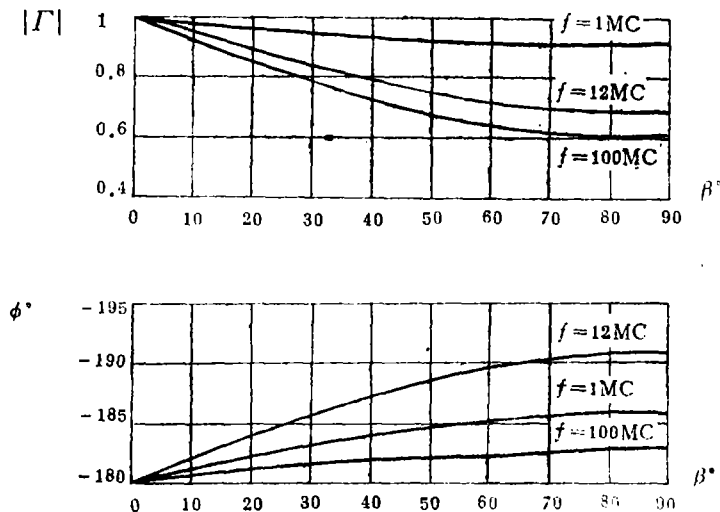


图 10 水平极化平面波反射系数的幅值和相角 (土壤较好—— $\sigma=12 \times 10^{-3}$, $\epsilon_r=15$ ——时的情况)

2. 直射波 \vec{E}_1 和地面反射波 \vec{E}_2 迭加时应计及两者的相位差 $\psi = k(r_2 - r_1) + \phi$ 。但是, 考虑到当 $(r_2 - r_1)$ 在一个波长范围内变动时就会出现一次同相迭加的情况, 而电视和调频广播的波长又只有几米, 因此, 作为最大可能值计算, 可只计算它们同相迭加的情况, 即取

$$|E| = |E_1| + |E_2| = |E(r_1, \theta_1)| + 0.7|E(r_2, \theta_2)| \quad (23)$$

三、观察点座标的选择与计算曲线的设计

1. 辐射场的计算习惯上选用球坐标系, 对于本问题, 观察点 P 的座标以水平距离 R 和垂直高度 H 表示更适宜于各有关部门的应用。由图 9, 有

$$\text{直射波:} \quad \text{俯角 } \alpha = \arctg \frac{h - H}{R}$$

$$r_1 = R / \cos \alpha$$

$$\theta_1 = \alpha + \frac{\pi}{2}$$

$$\text{反射波:} \quad \text{俯角 } \beta = \arctg \frac{h + H}{R}$$

$$r_2 = (h + H) / \sin \beta$$

$$\theta_2 = \beta + \frac{\pi}{2}$$

其中, h 为天线阵中心距地高度。

这样, 对于前例 TV 天线

$$|E| = 4.962 \sqrt{N P_{in}} \left[\left| \frac{\cos \alpha}{R} \cdot \frac{\sin \left(\frac{N \pi s}{\lambda} \sin \alpha \right)}{N \sin \left(\frac{\pi s}{\lambda} \sin \alpha \right)} \right| + 0.7 \left| \frac{\sin \beta}{h + H} \cdot \frac{\sin \left(\frac{N \pi s}{\lambda} \sin \beta \right)}{N \sin \left(\frac{\pi s}{\lambda} \sin \beta \right)} \right| \right] \quad (\text{伏/米}) \quad (24)$$

对前例 FM 天线

$$|E| = 14.035 \sqrt{P_{in}} \left[\left| \frac{\cos \alpha}{R} \cdot \cos \left(\frac{\sqrt{2} \pi}{4} \cos \alpha \right) \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{2} \pi}{\lambda} d \cos \alpha \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi s}{\lambda} \sin \alpha \right) \right| + 0.7 \left| \frac{\sin \beta}{h + H} \cdot \frac{\cos \left(\frac{\sqrt{2} \pi}{4} \cos \beta \right)}{1 - 0.5 \cos^2 \beta} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{2} \pi}{\lambda} d \cos \beta \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi s}{\lambda} \sin \beta \right) \right| \right] \quad (25)$$

2. 在电磁剂量的限定标准中所用的单位并不统一, 有时用电场强度 E 表示, 其单位为“伏/米”(V/m), 有时用功率密度 W 表示, 其单位为“微瓦/厘米²”(μW/cm²)。计算时可同时给出两种单位的数值, 其间的换算关系为

$$W = E^2 / 3.77 \quad (\mu\text{W}/\text{cm}^2) \quad (26)$$

式中 E 的单位为 V/m。

3. 将发射台的输入功率 P_{in} 、层数 N 或增益 G 以及天线阵中心离地高度 h 的数值代入前述计算式中, 运用计算机可列出 H 为参变数、 R 为变数的场强 E (和功率密度 W) 的数表。根据数表可绘出 E (或 W) 的曲线。

图11是根据 (24)、(25) 式算出的前例 TV 和 FM 天线的空间场强曲线。

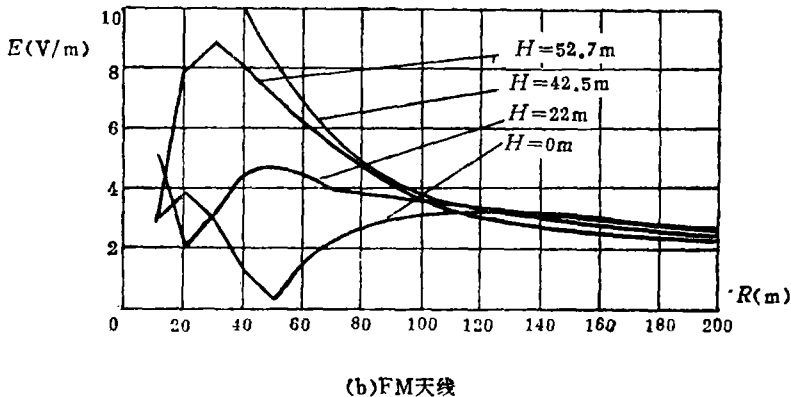
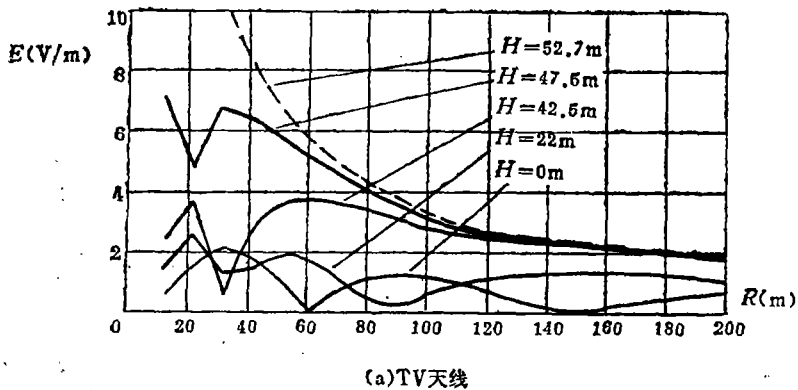
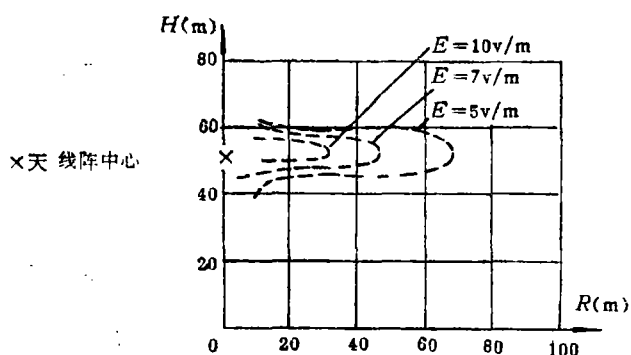


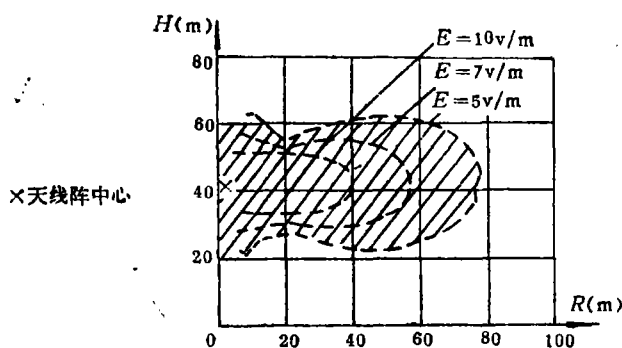
图 11 不同高度上的 $E \sim R$ 曲线

4. 讨论电磁污染问题时, 一般是给定电磁剂量限额, 然后观察超过限额的空间是否处于可允许的范围内, 或者根据其超过限额的空间范围确定以后城市建筑方面的限制。所以, 运用计算机运算并作出发射天线的等场强图(威力图)将更直观, 更便于使用。

图 12 是前述 TV 和 FM 天线的威力图。图中等场强值分别选为 5、7、10 V/m, 对应的功率密度为 6.63、13 和 26.53 μW/cm²。例如, 当选定电磁剂量的限额为 5 V/m



(a)TV天线



(b)FM天线

图 12 等场强图(威力图)

时,图中阴影部分即为超过限额的空间区域;阴影以外的空间范围则为限额以下的安全区域。

四、结 语

综上所述,城市电视和调频广播发射台的电磁污染计算可按以下几点进行:

1. 统一选用远区辐射场公式计算空间场。
2. 由于一般电视和调频广播发射天线的水平面方向图接近全向性,主极化为水平极化分量,交叉极化分量较小,故可由其垂直面归一化方向性函数和增益按下式求解空间场分布:

$$|E| = |E_{max}| F(\theta) = \frac{\sqrt{30P_{in}G}}{r} \cdot F(\theta) \quad (\text{伏/米})$$

或
$$W = \frac{30P_{in}G}{3.77r^2} F^2(\theta) \quad (\text{微瓦/厘米}^2)$$

其中 P_{in} 、 r 之单位分别为瓦、米。

3. 对于反射波,仅计算一般土壤地面的反射,且认为地面反射系数为 0.7,反射

波与直射波同相，即

$$|E| = |E(r_1, \theta_1)| + 0.7|E(r_2, \theta_2)|$$

式中 $r_1, r_2, \theta_1, \theta_2$ 参见图 9。

4. 观察点坐标以水平距离 R 和垂直高度 H 表示；运用计算机列出数表，作出不同高度 H 上的 $E \sim R$ （或 $W \sim R$ ）曲线。

5. 根据给定的电磁剂量安全限额值，作出威力图——等场强曲线或等功率密度曲线。

参 考 文 献

- [1] 雷达手册（第六分册），[美] M·I 斯科尔尼克主编，国防工业出版社。
- [2] TV·FM 放送アンテナ（电视和调频广播发射天线），[日] 远藤敬二，日本放送出版协会。
- [3] 电磁波与辐射系统，E. C. 约敦著，人民邮电出版社。

A Computational Method for Electromagnetic Pollution of TV and FM Broadcasting Transmitting Stations

Song Xuecheng

Abstract

Taking two typical TV and FM broadcasting transmitting antennas for example, the paper relates to a computational method for electromagnetic pollution of TV and FM broadcasting transmitting stations. In the paper are also compiled different computational formulas in common use and their relative measuring charts and curves for some TV and FM broadcasting antennas field-strength. In addition, the general method of drawing "equivalent field-strength curve" is given to describe electromagnetic pollution range.