

ITU-R F.1336-2*建议书

在 1 GHz 到约 70 GHz 频率范围内用于频率共用研究的
点对多点系统的全向、扇区和其它天线的参考辐射图

(ITU-R 202/9 号研究课题)

(1997-2000-2007)

范围

本建议书给出了在频率范围 1 GHz 到约 70 GHz 内的频率共用研究中要使用的点对多点系统中的全向、扇区和定向天线的峰值和平均天线辐射图的参考模型。

国际电信联盟无线电通信全会，

考虑到

- a) 为了进行协调研究和为了估计在点对多点 (P-MP) 固定无线系统 (FWS) 之间和在这样的系统的电台和共用同一频带的空间无线电通信业务的电台之间的相互干扰，可能有必要使用 FWS 天线的参考辐射图；
- b) 根据频率共用的场景不同，在频率共用研究中，考虑峰值包络或平均旁瓣辐射图可能比较合适；
- c) 在下列情况下，使用代表平均旁瓣电平的天线辐射图可能比较合适：
 - 预测从大量固定无线业务电台来的对一个对地静止卫星或非对地静止卫星的综合干扰；
 - 预测从许多对地静止卫星来的对一个固定无线电台的综合干扰；
 - 预测从角度连续变化情况下的一个或多个非对地静止卫星来的对一个固定无线电台的干扰；
 - 在任何其它情况下，使用代表平均旁瓣电平的辐射图是合适的；
- d) 在无法取得有关实际辐射图的资料的情况下，可能需要参考辐射图；
- e) 在大角度方向，必须考虑当地地面反射的可能性；

*应提请无线电通信第 4 (WP 4A)、6 (WP 6S)、7 (WP 7B)、8 (WP 8D) 研究组和 WP 4-9S 注意本建议书。

f) 使用具有最好的可用辐射图的天线将导致最有效地利用无线电频谱，

注意到

a) 在下面建议 1 到 4 没有提到的情况下，ITU-R F.699 和 ITU-R F.1245 建议书给出了分别在协调研究和干扰估计中要使用的峰值和平均参考天线辐射图，

建议

1 在缺乏有关所涉及的 P-MP FWS 天线的辐射图的详细资料的情况下（见注 1），应该按照下面所表述的参考辐射图用于下列场合：

1.1 视距（LoS）P-MP FWS 之间的干扰估计；

1.2 在 P-MP LoS FWS 和共用同一频带的其它业务的电台之间的协调研究和干扰估计；

2 在 1 GHz 到约 70 GHz 的频率范围内，在包含使用全向（在方位面内）天线的电台的情况下，应该使用下面的参考辐射图：

2.1 在考虑到 b) 中参照的峰值旁瓣辐射图的情况下，仰角在 0° 到 90° 范围内时，应该使用下面的公式（见附件 1）：

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{对于 } 0 \leq \theta < \theta_4 \\ G_0 - 12 + 10 \log(k+1) & \text{对于 } \theta_4 \leq \theta < \theta_3 \\ G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1.5} + k \right] & \text{对于 } \theta_3 \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1a)$$

其中：

$$\theta_3 = 107.6 \times 10^{-0.1 G_0} \quad (1b)$$

$$\theta_4 = \theta_3 \sqrt{1 - \frac{1}{1.2} \log(k+1)} \quad (1c)$$

式中：

$G(\theta)$: 相对于全向天线的增益（dBi）

G_0 : 在水平面中或水平面附近的最大增益（dBi）

θ : 相对于最大增益角的俯仰角绝对值（度）

θ_3 : 在垂直面内的 3 dB 射束宽度（度）

k : 计及旁瓣电平高于改善了旁瓣性能的天线所预测的值的参数（见建议 2.3 和 2.4）；

2.2 在考虑到 c) 参照的平均旁瓣图的情况下, 当仰角在 0° 到 90° 范围内时, 应该使用下面的公式 (见附件 1 和附件 5):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{对于 } 0 \leq \theta < \theta_3 \\ G_0 - 15 + 10 \log(k+1) & \text{对于 } \theta_3 \leq \theta < \theta_5 \\ G_0 - 15 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1.5} + k \right] & \text{对于 } \theta_5 \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1d)$$

其中:

$$\theta_5 = \theta_3 \sqrt{1.25 - \frac{1}{1.2} \log(k+1)}$$

这里 θ 、 θ_3 、 G_0 和 k 按照建议 2.1 中的定义和表示方法。

2.3 在包含在 1-3GHz 频率范围内工作的典型天线的情况下, 参数 k 应该为 0.7;

2.4 在包含在 1-3 GHz 范围内的改善了旁瓣性能的天线的情况下和对在 3-70 GHz 范围内工作的所有天线, 参数 k 应该为 0;

3 在频率范围 1 GHz 到约 70 GHz 内, 在包含使用方位面中 3 dB 射束宽度小于约 120° 的扇区天线的情况下, 应该使用下面的参考辐射图 (见附件 4 和注 4);

3.1 在考虑到 b) 中参照的峰值旁瓣辐射图的情况下, 在俯仰角从 0° 到 90° 和方位角从 -180° 到 180° 的范围内, 应该使用下面的公式 (见注 2):

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x) \quad (2a1)$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\tan \theta}{\sin \varphi} \right) \quad (2a2)$$

$$\psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\varphi_3} \right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\theta_3} \right)^2}} \quad (2a3)$$

$$= \varphi_3 \cdot \theta_3 \sqrt{\frac{(\sin \theta)^2 + (\sin \varphi \cdot \cos \theta)^2}{(\varphi_3 \cdot \sin \theta)^2 + (\theta_3 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta)^2}} \quad \text{度}$$

$$\psi = \arcsin(\cos \varphi \cdot \cos \theta) \quad \text{度} \quad (2a4)$$

$$x = \psi / \psi_\alpha \quad (2a5)$$

其中:

φ : 相对于最大增益角的方位角 (度)

φ_3 : 在方位平面中的 3 dB 射束宽度 (度) (一般等于扇区的射束宽度)。

其它变量和参数按照建议 2.1 中的定义。

3.1.1 在 1 GHz 到约 6 GHz 频率范围内（见附件 6）：

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{对于 } 0 \leq x < x_k && (2b) \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1.5} + k) && \text{对于 } x_k \leq x < 4 \\ G_{ref}(x) &= G_0 - \lambda_k - 15 \log(x) && \text{对于 } x \geq 4 \end{aligned}$$

其中 $\lambda_k = 12 - 10 \log(1+8k)$ 和 $x_k = \sqrt{1-0.36k}$ ；

3.1.1.1 在包含典型天线的情况下，参数 k 应该为 0.7（所以， $\lambda_{k=0.7} = 3.8$ 和 $x_{k=0.7} = 0.86$ ）；

3.1.1.2 在包含改善了旁瓣性能的天线的情况下，参数 k 应该为 0（所以， $\lambda_{k=0} = 12$ 和 $x_{k=0} = 1$ ）；

3.1.2 在 6 GHz 到约 70 GHz 频率范围内：

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{对于 } 0 \leq x < 1 && (2c) \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 12 - 15 \log(x) && \text{对于 } 1 \leq x \end{aligned}$$

3.2 在考虑到 c) 中参照的平均旁瓣辐射图的情况下，在俯仰角为 0° 到 90° 和方位角为 -180° 到 180° 的范围内，用于干扰统计估算时，应该使用下面的公式（见附件 5 和注 2）：

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x)$$

3.2.1 在 1 GHz 到约 6 GHz 频率范围内（见附件 6）：

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{对于 } 0 \leq x < x_k && (2d) \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 15 + 10 \log(x^{-1.5} + k) && \text{对于 } x_k \leq x < 4 \\ G_{ref}(x) &= G_0 - \lambda_k - 3 - 15 \log(x) && \text{对于 } x \geq 4 \end{aligned}$$

其中： $\lambda_k = 12 - 10 \log(1+8k)$ 和 $x_k = \sqrt{1.25 - 0.36k}$ ；

3.2.1.1 在包含典型天线的情况下，参数 k 应该为 0.2（所以， $\lambda_{k=0.2} = 7.85$ 和 $x_{k=0.2} = 1.08$ ）；

3.2.1.2 在包含改善了旁瓣性能的天线的情况下，参数 k 应该为 0（所以， $\lambda_{k=0} = 12$ 和 $x_{k=0} = 1.118$ ）；

3.2.2 在 6 GHz 到约 70 GHz 频率范围内：

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{对于 } 0 \leq x < 1.152 && (2e) \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 15 - 15 \log(x) && \text{对于 } 1.152 \leq x \end{aligned}$$

3.3 在包含其方位面内的 3 dB 射束宽度小于 120° 的扇区天线的情况下，最大增益和方位及俯仰两个平面内的 3 dB 射束宽度之间的关系暂定用下式求出（见附件 3 和注 4）：

$$\theta_3 = \frac{31000 \times 10^{-0.1G_0}}{\varphi_3} \quad (3)$$

其中，所有的参数都按照建议 3.1 中的定义；

4 在 1 GHz 到约 3 GHz 频率范围内，在包含使用低增益天线的电台其天线 3 dB 射束宽度呈圆对称型，天线最大增益小于 20 dBi 的情况下，应该使用下面的参考辐射图：

4.1 在鉴于 b) 中参照的峰值旁瓣辐射图的情况下，应该使用下面的公式（见附件 2 和注 3）：

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\varphi_3} \right)^2 & \text{对于 } 0 \leq \theta < 1.08 \varphi_3 \\ G_0 - 14 & \text{对于 } 1.08 \varphi_3 \leq \theta < \varphi_1 \\ G_0 - 14 - 32 \log \left(\frac{\theta}{\varphi_1} \right) & \text{对于 } \varphi_1 \leq \theta < \varphi_2 \\ -8 & \text{对于 } \varphi_2 \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (4)$$

其中：

$G(\theta)$: 相对于全向天线的增益 (dBi)

G_0 : 主瓣的天线增益 (dBi)

θ : 偏轴角 (度)

φ_3 : 低增益天线的 3 dB 射束宽度 (度)

$$= \sqrt{27000 \times 10^{-0.1G_0}} \quad (\text{度})$$

$\varphi_1 = 1.9 \varphi_3$ (度)

$\varphi_2 = \varphi_1 \times 10^{(G_0-6)/32}$ (度)

4.2 在考虑到 c) 中参照的平均旁瓣辐射图的情况下，应该使用 ITU-R F.1245 建议书中给出的天线辐射图；

5 下面的注应该看作本建议书的一部分：

注 1 — 重要的是在协调研究和干扰估计中，每次都应该尽力利用实际的天线辐射图。

注 2 — 为了估计在垂直面中俯仰角 θ' 从 0° 到 180° 的所有角度上的增益，仰角超过 90° 的 x 值必须使用在方位角的补角值上，即 $180^\circ \pm \varphi$ 上的仰角的补角值 ($180^\circ - \theta'$) 来确定。

注 3 — 在建议 3.1.1.1 和 3.2.1.1 条中参数 k 的不同数值是考虑了在 1 到 6 GHz 频率范围内实测的大量典型的天线辐射图的峰值包络电平和平均旁瓣电平后推导出来的。

注 4 — 在包含主射束宽度与用公式 (3) 计算出的值不同的天线的情况下，建议使用 θ_3 作为输入参数。

注 5 — 正如在附件 3 中所讨论的那样，指数因子已经用 1 来替代。结果，在俯仰平面小于 45° 的情况下，这一近似所引进的 3 dB 射束宽度的理论误差小于 6%。

注 6 — 在建议 4.1 中给出的参考辐射图主要在天线主瓣增益小于或等于 20 dBi 并且使用 ITU-R F.699 建议书产生不适当的结果的情况下使用。为了确定该公式成立的频率和增益的全部范围，需要进一步研究。

注 7 — 在 20 GHz 左右上使用的专门设计的扇区天线的实测结果表明了符合更严格的参考旁瓣辐射图的可能性。为了利用这样的优化的辐射图，需要进一步研究。

附 件 1

在 P-MP 无线电接力系统中使用的全向天线的参考辐射图

1 引言

在 P-MP 无线电接力系统的中心站上，经常使用全向天线发射和接收信号。在 2 GHz 频带中的这些类型的无线电接力系统和空间业务系统之间的频率共用研究工作已经使用这里所描述的参考辐射图。

2 分析

关于全向天线的参考辐射图是根据下面的假设条件：

- 该天线是以边射模式辐射的 n 元线阵；
- 假设阵的元是偶极子；
- 阵元之间的间隔为 $3\lambda/4$ 。

在俯仰平面内，该天线阵的 3 dB 射束宽度 θ_3 与方向性 D 的关系由下式求出（参见附件 3 中 D 的定义）：

$$D = 10 \log \left[191.0 \sqrt{0.818 + 1/\theta_3} - 172.4 \right] \quad \text{dBi} \quad (5a)$$

当方向性已知时，公式（5a）可以求出 θ_3 ：

$$\theta_3 = \frac{1}{\alpha^2 - 0.818} \quad (5b)$$

$$\alpha = \frac{10^{0.1D} + 172.4}{191.0} \quad (5c)$$

在俯仰平面内的 3 dB 射束宽度和方向性的关系是根据俯仰平面内的辐射图可用下式适当地近似的假设推导出来的:

$$f(\theta) = \cos^m(\theta)$$

式中 m 是表示俯仰平面内的 3 dB 射束宽度和辐射图关系所用的一个任意参数。使用这一近似式, 求方向图在俯仰平面和方位平面上的积分, 就得到方向性。

线阵的远区场的场强由下式求出:

$$E_T(\theta) = E_e(\theta) \cdot AF(\theta) \quad (6)$$

式中:

$E_T(\theta)$: 在与该线阵的轴相垂直的 θ 角上的总电场强度

$E_e(\theta)$: 在与该线阵的轴相垂直的 θ 角上由单个阵元所产生的电场强度

$AF(\theta)$: 在与该线阵的轴相垂直的 θ 角上的阵因子。

一个偶极子元的归一化电场强度为:

$$E_e(\theta) = \cos(\theta) \quad (7)$$

阵因子为

$$AF_N = \frac{1}{N} \left[\frac{\sin\left(N\frac{\Psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)} \right] \quad (8)$$

其中:

N : 阵中的元数

$$\frac{\Psi}{2} = \frac{1}{2} \left[2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \right]$$

d : 辐射器的间距

λ : 波长

为了估计阵中元的数目 N , 已经使用了下面的步骤。它假设阵的最大增益与阵的方向性是相同的。

- 给出了全向天线在俯仰平面中的最大增益后, 就可以用公式 (5b) 和 (5c) 计算 3 dB 射束宽度 θ_3 ;
- 忽略由偶极子元所产生的少量的偏轴增益的降低, 并注意到当 $N\frac{\Psi}{2}=1.396$ 时, 阵因子 AF_N 估计为 0.707 (-3 dB); 并且

— 然后，由下式求出 N ， N 为整数值：

$$N = \left\lfloor \frac{2 \times 1.3916}{2\pi \frac{d}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta_3}{2}\right)} \right\rfloor \quad (9)$$

式中 $|x|$ 的含义是不超过 x 的最大整数的值。

归一化的偏轴鉴别率 ΔD 由下式求出：

$$\Delta D = 20 \log \left[\left| AF_N \times \cos(\theta) \right| \right] \quad \text{dB} \quad (10)$$

已经对几个最大增益值估计公式 (10) 为偏轴角 (即俯仰角) 的函数。对于在 8 dBi 到 13 dBi 范围内的值，已经发现，俯仰平面内的辐射图的包络可以由下面的公式来准确地近似：

$$G(\theta) = \max [G_1(\theta), G_2(\theta)] \quad (11a)$$

$$G_1(\theta) = G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 \quad \text{dBi} \quad (11b)$$

$$G_2(\theta) = G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\max \left\{ \frac{|\theta|}{\theta_3}, 1 \right\} \right)^{-1.5} + k \right] \quad \text{dBi} \quad (11c)$$

k 是计及将预测到的旁瓣电平超过一个改进旁瓣性能的天线的旁瓣电平的值的一个参数。

图 1 到 4 将参考辐射图的包络和从公式 (11) 产生的理论天线辐射图作了比较，其增益范围为 8 dBi 到 13 dBi，使用系数 $k=0$ 。图 5 到 8 将参考辐射图包络与实际测得的天线辐射图作了比较，因子 k 取 $k=0$ 。在图 7 和图 8 中，可以看出，旁瓣电平约为 15 dB 或者说比主瓣电平低得多，估计旁瓣峰值可能超过这一值的百分数很小。然而，实际的因素，例如使用电轴下倾、在频带边缘辐射图的劣化以及生产中的变化等因素，使得在实际现场安装时，旁瓣将会进一步增加，达到约低于主瓣 10 dB。在公式 (11) 中，上面提到的因子 k 是想要表征旁瓣电平的变化。图 9 和图 10 在 2.4 GHz 上将一个增益为 10 dBi 的天线和一个增益为 13 dBi 的天线的辐射图与参考辐射图包络作了比较，取因子 $k=0.5$ 。因子 $k=0.5$ 代表旁瓣电平约低于主瓣峰值 15 dB。然而，为了计入在现场安装过程中可能会发现的旁瓣电平的增加，对典型的天线，应该使用因子 $k=0.7$ ，它代表旁瓣电平约比主瓣电平低 13.5 dB。最后，图 11 和图 12 说明了用不同的 k 值对俯仰面辐射图的效应。

图 1

偶极子元的线阵的归一化辐射图与辐射图的近似包络比较

$G_0 = 10 \text{ dBi}, k = 0$

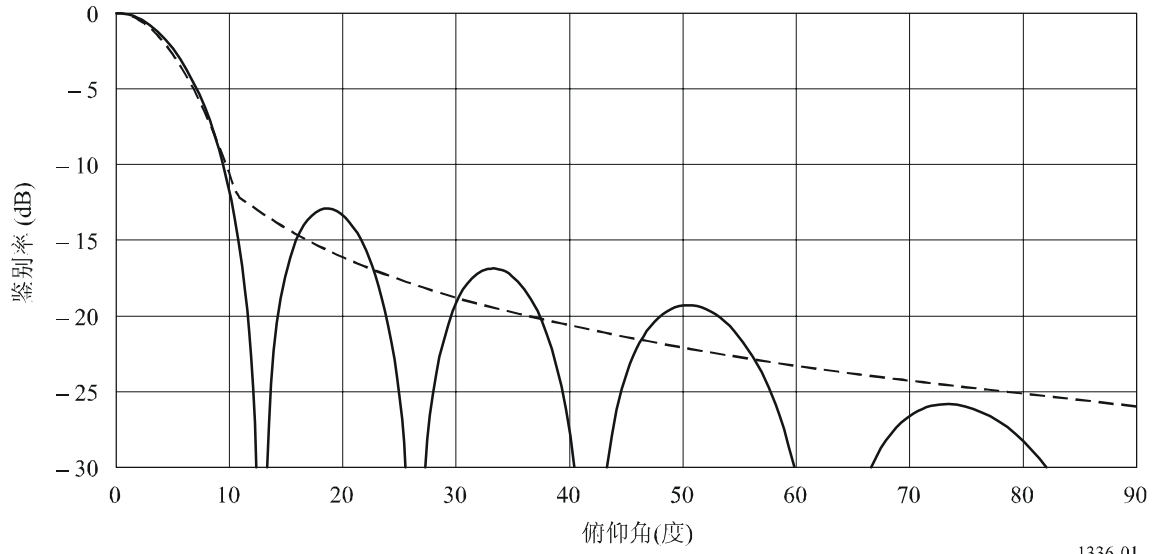


图 2

偶极子元的线阵的归一化辐射图与辐射图的近似包络比较

$G_0 = 11 \text{ dBi}, k = 0$

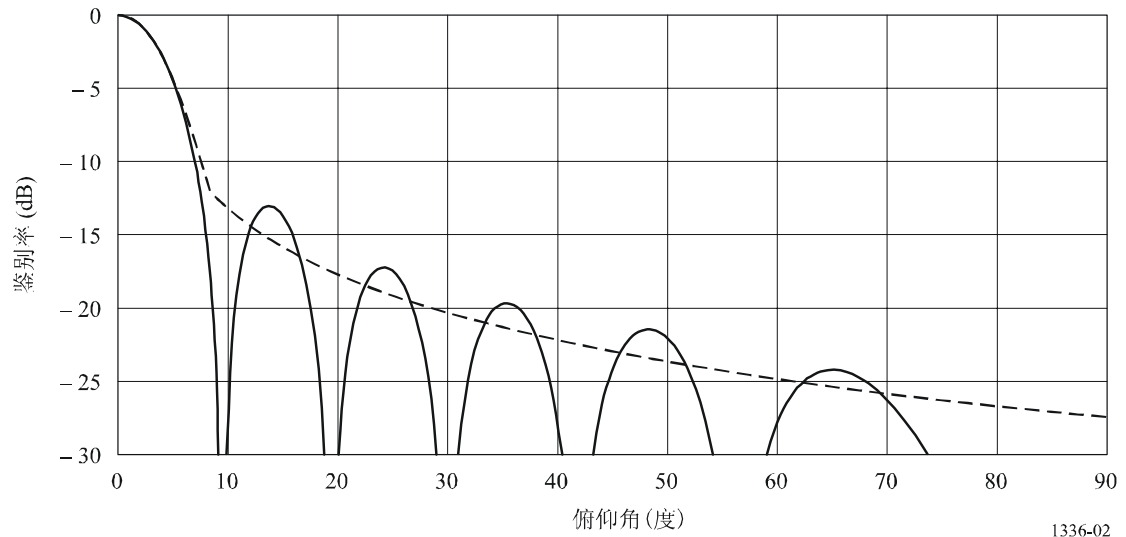
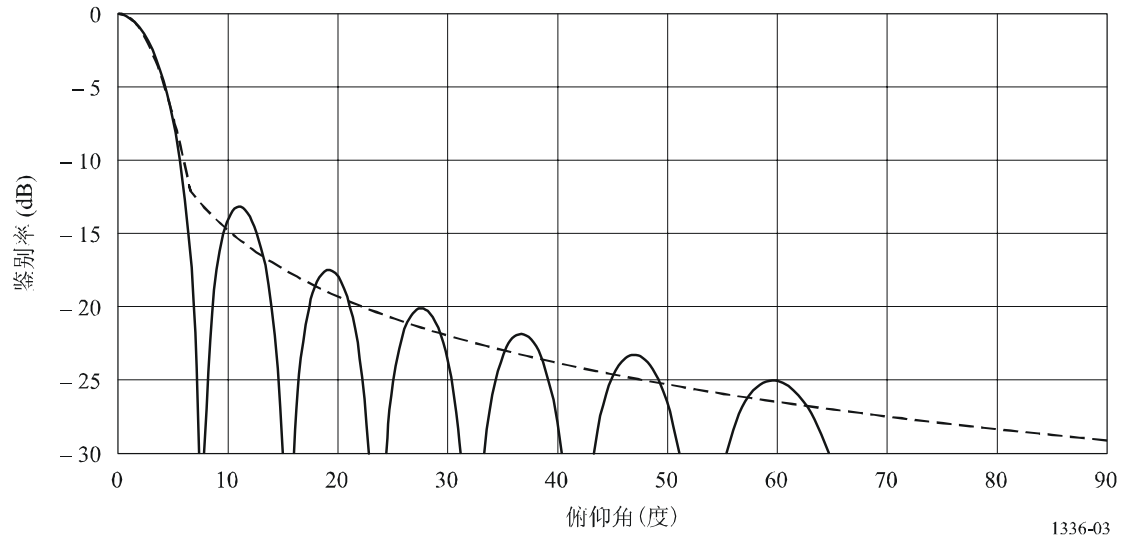


图 3

偶极子元的线阵的归一化辐射图与辐射图的近似包络比较

$$G_0 = 12 \text{ dBi}, k = 0$$

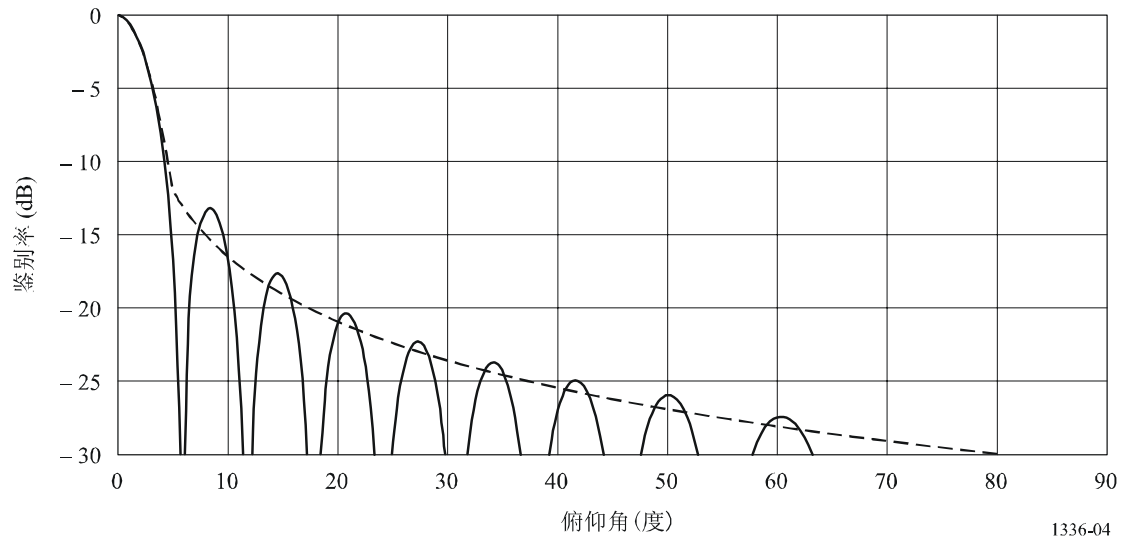


1336-03

图 4

偶极子元的线阵的归一化辐射图与辐射图的近似包络比较

$$G_0 = 13 \text{ dBi}, k = 0$$



1336-04

图 5

增益为 11 dBi 和在频带 928-944 MHz 中工作的 $k=0$ 的全向天线的实测辐射图和参考辐射图包络的比较

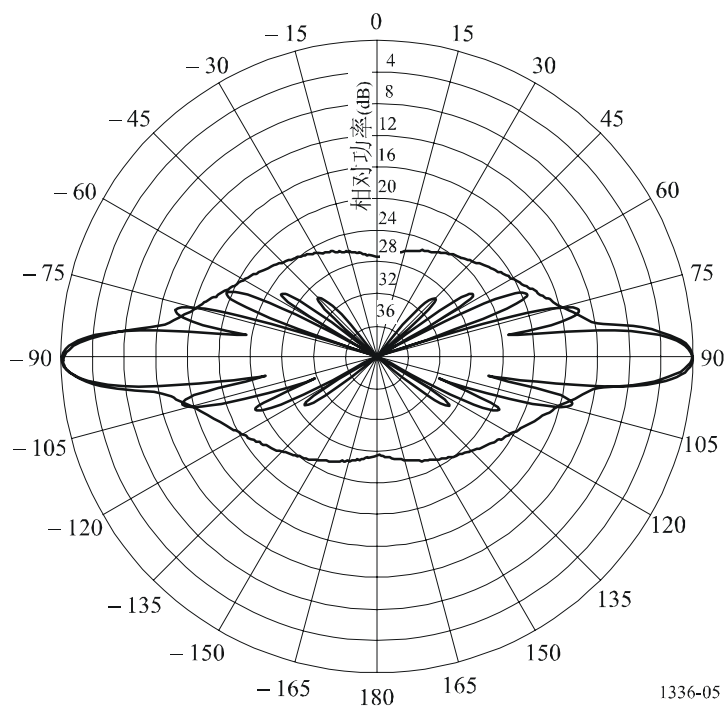


图 6

增益为 8 dBi 和在频带 1850-1990 MHz 中工作的 $k=0$ 的全向天线的实测辐射图和参考辐射图包络的比较

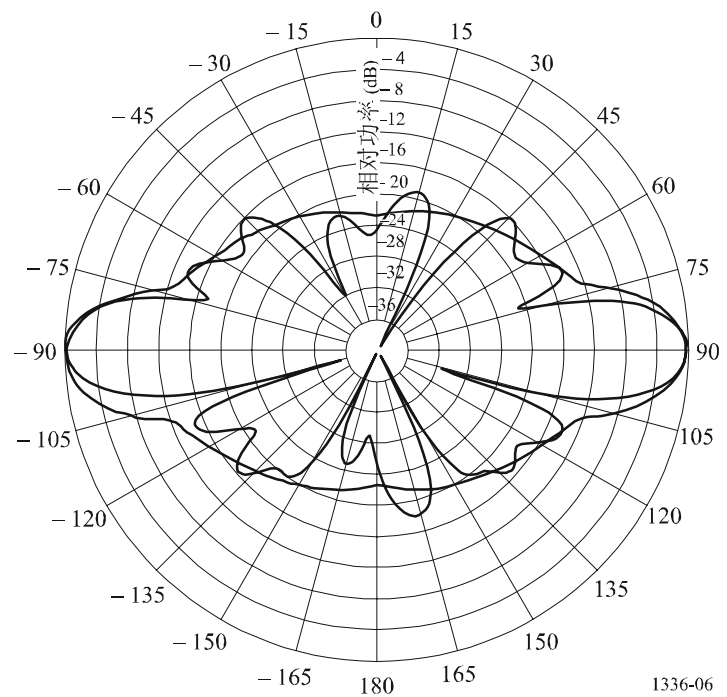


图 7

对增益 10 dBi 和在 1.4 GHz 频带中工作的全向天线的实测辐射图和 $k=0$ 的参考辐射图包络的比较

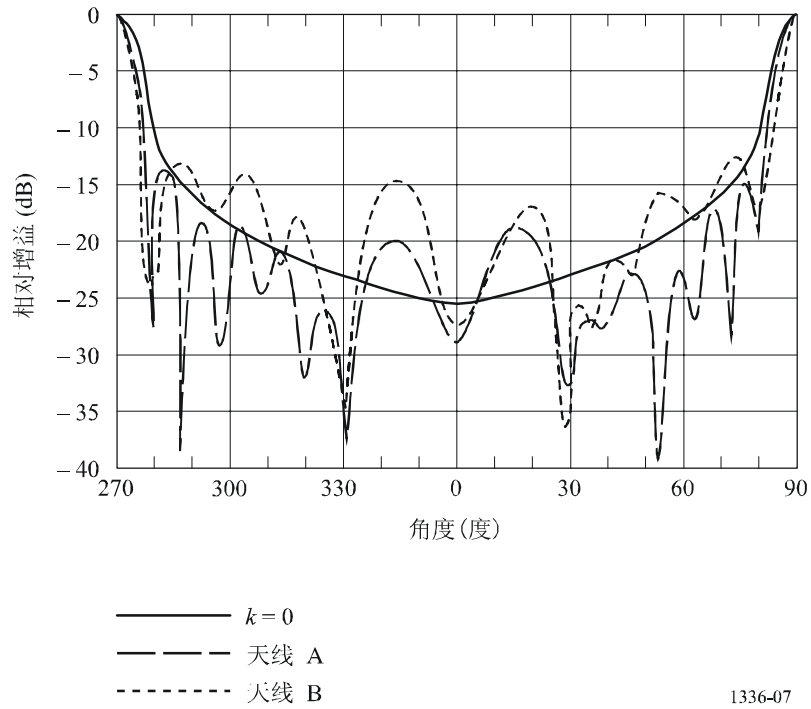


图 8

对增益 13 dBi 和在 1.4 GHz 频带中工作的全向天线的实测辐射图和 $k=0$ 的参考辐射图包络的比较

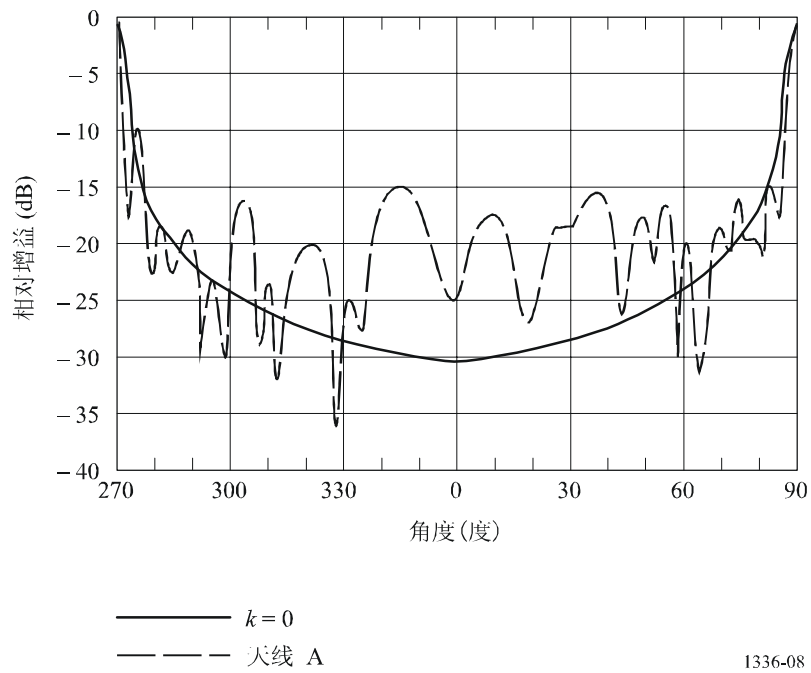
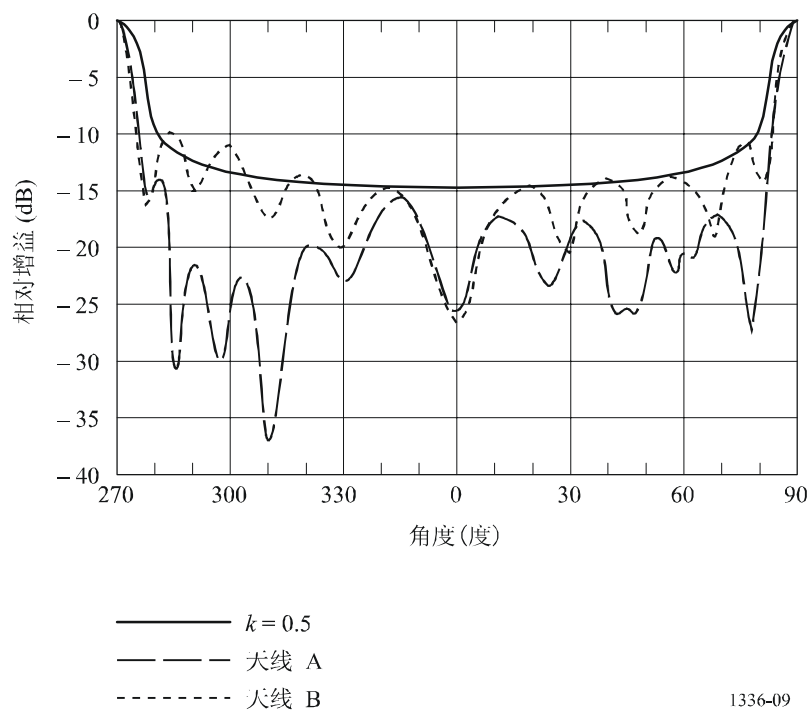


图 9

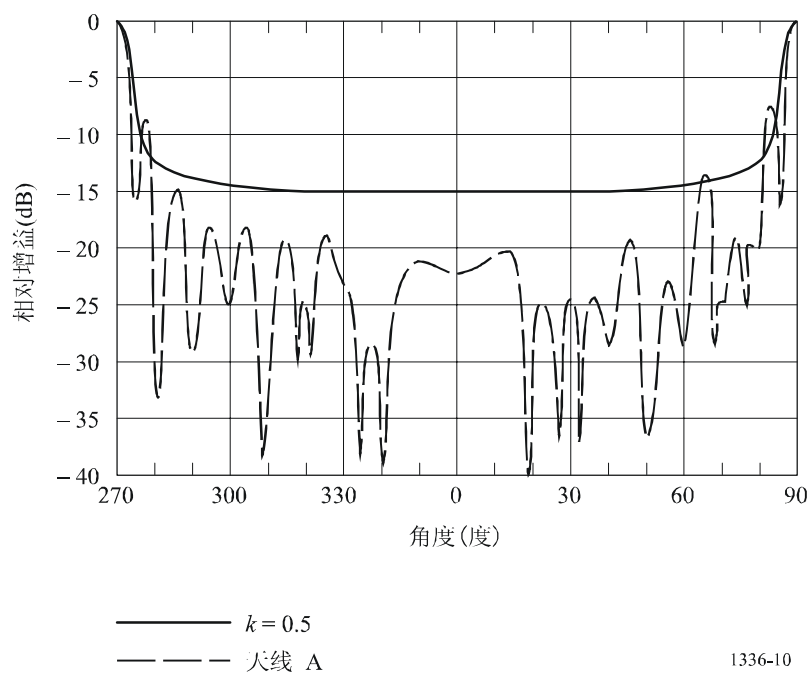
对增益 10 dBi 和在 2.4 GHz 频带中工作的全向天线的实测辐射图和 $k = 0.5$ 的参考辐射图包络的比较



1336-09

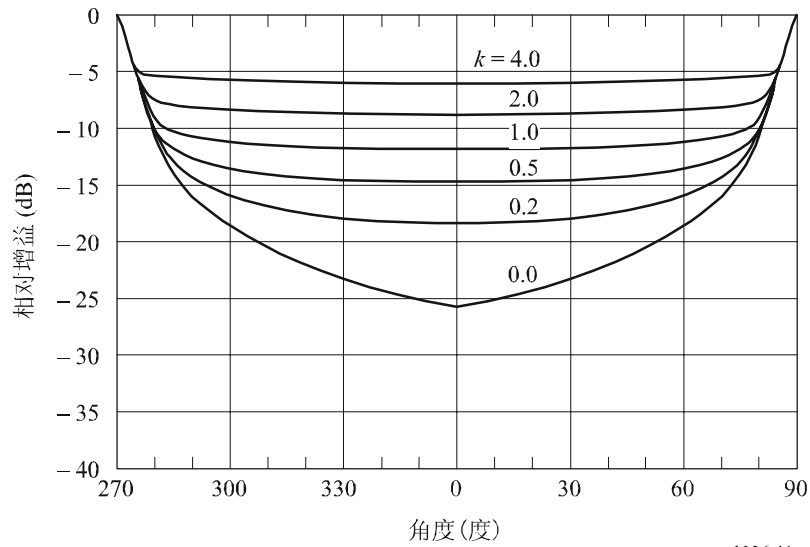
图 10

对增益 13 dBi 和在 2.4 GHz 频带中工作的全向天线的实测辐射图和 $k = 0.5$ 的参考辐射图包络的比较



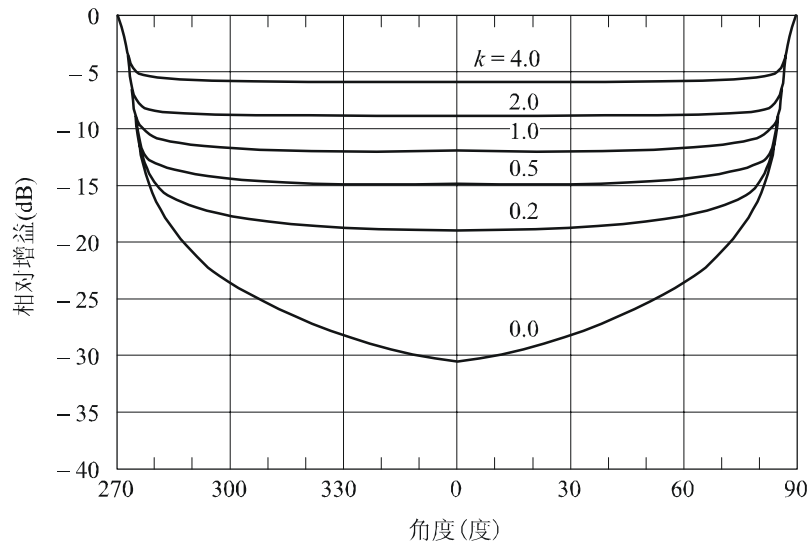
1336-10

图 11

增益 10 dBi 的全向天线在不同的 k 值时的参考辐射图包络

1336-11

图 12

增益 13 dBi 的全向天线在不同的 k 值时的参考辐射图包络

1336-12

3 综述、结论和进一步分析

对增益在 8 dBi 和 13 dBi 之间的全向天线，已经提供了一个参考辐射图。已经根据偶极子的共线阵的辐射图的理论分析导出了参考辐射图。为了充分代表增益从 8 dBi 到 13 dBi 范围内的理论辐射图和实测辐射图，已经显示了所提出的参考辐射图。为了确定参考辐射图适用的增益范围，特别有关在 3 GHz 以上频带上工作的天线，还需要做进一步的工作。

附件 2

在 1-3 GHz 频率范围内的 P-MP 无线电接力系统所用的
低增益圆对称的用户台天线的参考辐射图

1 引言

在 P-MP 无线电接力系统的外围站或在中心站的扇区中，经常使用增益相当低的天线发射和接收信号。这些天线可能呈现的增益为 20 dBi 的量级或更低一些。已经发现，若使用 ITU-R F.699 建议书中给出的参考辐射图，对这些增益相当低的天线来说，将导致在相当大的偏轴角方向上的增益估计过高。结果，若使用 ITU-R F.699 建议书的参考辐射图，将可能会显著过高估计在相当大的偏轴角方向上对其它系统产生的干扰量和从其它系统接收到的干扰量。

2 分析

用户台天线的参考辐射图基于下面的假设：

- 天线的方向性小于约 20 dBi；
- 天线辐射图呈现围绕主瓣圆对称；
- 主瓣增益等于方向性。

所建议的参考辐射图由下式表示：

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\varphi_3} \right)^2 & \text{对于 } 0 \leq \theta < 1.08 \varphi_3 & (12) \\ G_0 - 14 & \text{对于 } 1.08 \varphi_3 \leq \theta < \varphi_1 & (13) \\ G_0 - 14 - 32 \log \left(\frac{\theta}{\varphi_1} \right) & \text{对于 } \varphi_1 \leq \theta < \varphi_2 & (14) \\ -8 & \text{对于 } \varphi_2 \leq \theta \leq 180^\circ & (15) \end{cases}$$

其中：

$G(\theta)$: 相对于全向天线的增益 (dBi)

G_0 : 最大轴向增益 (dBi)

θ : 偏轴角 (度)

φ_3 : 3 dB 射束宽度 (度)

$$= \sqrt{27\,000 \times 10^{-0.1G_0}} \text{ 度}$$

$\varphi_1 = 1.9 \varphi_3$ (度)

$\varphi_2 = \varphi_1 \times 10^{(G_0-6)/32}$ 度

3 综述和结论

对于增益小于或等于 20 dBi 的低增益用户站天线，已经提供了一个参考辐射图。已经根据考虑用于在 2 GHz 频带中工作的本地接入 P-MP 系统的平板阵列天线的辐射图的有限数据导出了参考辐射图。所建议的参考辐射图已经显示出比 ITU-R F.699 建议书中给出的参考辐射图能够更准确地代表实际的辐射图。为了确定参考辐射图适合于哪一个增益范围和为了将参考辐射图与实测辐射图进行比较，还需要进一步做工作。

附 件 3

全向和扇区天线的增益和射束宽度之间的关系

1 引言

本附件的目的是导出全向天线和扇区天线的增益与它们在方位平面和俯仰平面中的射束宽度之间的关系。第 2 节是分析全向和扇区天线的方向性，为此在方位平面中，假设了两个不同的辐射强度函数。对于两种情况，假设在俯仰平面中的辐射场强是一个指数函数。第 3 节将用第 2 节的方法所得到的增益—射束宽度结果和本建议书的前一版本中有关全向天线的结果进行比较。第 4 节将结果进行汇总，提出了一个关于全向和扇区天线的增益—射束宽度关系的暂定公式，并建议了需要进一步研究的领域。

2 分析

假设扇区天线在俯仰平面中的远场辐射图符合指数函数，而假设在方位平面中的远场辐射图符合矩形函数或指数函数。有了这些假设，可以从下面的（球坐标）中的公式推导出扇形天线的方向性：

$$D = \frac{U_M}{U_0} \quad (16)$$

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\varphi) F(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi \quad (17)$$

式中：

U_M : 最大辐射场强

U_0 : 全向点源的辐射场强

φ : 方位平面中的角度

θ : 俯仰平面中的角

$F(\varphi)$: 方位平面中的辐射强度

$F(\theta)$: 俯仰平面中的辐射强度

下一小节估计全向天线和扇区天线的方向性，估计时，假设在方位平面中的辐射强度是一个矩形函数或指数函数。

2.1 矩形扇区的辐射强度

假设矩形的扇区辐射强度函数 $F(\varphi)$ 用下式表示：

$$F(\varphi) = U\left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi|\right) \quad (18)$$

其中：

φ_s : 扇区的射束宽度，

$$\begin{aligned} U(x) &= 1 && \text{对于 } x \geq 0 \\ U(x) &= 0 && \text{对于 } x < 0 \end{aligned} \quad (19)$$

对于矩形或指数形扇区辐射函数，假设在俯仰平面中的辐射函数由下式表示：

$$F(\theta) = e^{-a^2\theta^2} \quad (20)$$

其中：

$$a^2 = -\ln(0.5) \times \left(\frac{2}{\theta_3}\right)^2 = \frac{2.773}{\theta_3^2} \quad (21)$$

θ_3 : 天线在俯仰平面中的 3 dB 射束宽度 (度)。

将公式 (18) 和 (20) 代入公式 (17)，就得到：

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U\left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi|\right) d\varphi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \quad (22)$$

可以将这一二重积分分解为两个独立的积分之积。用直接法估算沿 φ 的积分。然而，估算沿 θ 的积分要稍微更困难一些。可以用将结果列表或与数据拟合的多项式来在数值上估算沿 θ 的积分。然而，要注意，若将积分限改变到 $\pm\infty$ ，则由下式以近似的形式给出沿 θ 的积分：

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \approx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta = \frac{1}{a} \sqrt{\pi} e^{-1/4a^2} \quad (23)$$

这是一个相当简单和灵活的公式，它与它的精确度有关，在估计扇区天线以及全向天线的方向性过程中，这一公式可能是十分有用的。

对用无限积分近似有限积分的精确度已经作了估计。有限积分，即公式（23）左边的积分已经用 24 点高斯求积分法对几个 3 dB 射束宽度值作了估计，并且将得到的结果与用公式（23）右边的无限积分相对应的公式所得出的值进行比较。（实际上，由于它的对称性，有限积分已经在积分域 0 到 $\pi/2$ 上进行数值计算并将所得结果加倍。）在俯仰平面内，对许多典型的 3 dB 射束宽度值的结果示于表 1。从该表可以看出，3 dB 射束宽度为 45° 时，用有限积分和无限积分近似所得到的值之间的差别小于 0.03%。在 25° 或低于 25° 情况下，误差实际上等于零。现在，公式（22）很容易计算了：

$$U_0 = \frac{\varphi_s \theta_3}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{2.773}} \times e^{\frac{\theta_3^2}{11.09}} \quad (24)$$

表 1
在计算平均辐射强度中公式（23）的无限积分的相对精度

在俯仰平面中的 3 dB 射束宽度（度）	有 限 积 分	无 限 积 分	相对误差 （%）
45	1.116449558	1.116116449	0.0298
25	0.67747088	0.67747088	0.0000
20	0.549744213	0.549744213	0.0000
15	0.416896869	0.416896869	0.0000
10	0.280137168	0.280137168	0.0000
5	0.140734555	0.140734558	0.0000

从公式（18）和（20）， $U_M = 1$ 。只要给出了俯仰平面和方位平面中的射束宽度，将这些值和公式（24）代入公式（16），就得出扇区天线的方向性：

$$D = \frac{11.805}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11.09}} \quad (25)$$

式中角度以弧度来表示。当角度用度表示时，公式（25）变成下式：

$$D = \frac{38750}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (26)$$

请注意，对全向天线，公式（26）简化成下式：

$$D = \frac{107.64}{\theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (27a)$$

若假设辐射效率是 100%和天线损耗是可以忽略的,则全向天线的增益和方向性是相同的。此外,对 3 dB 射束宽度小于约 45° 的全向天线,只要设指数因子等于 1,就可以简化增益和俯仰面中的 3 dB 射束宽度之间的关系式。所产生的误差小于 6%。

$$G_0 \approx \frac{107.64}{\theta_3} \quad (27b)$$

2.2 指数的扇区辐射强度

为扇区辐射强度所考虑的第 2 种情况是指数函数的情况。

具体表示为:

$$F(\varphi) = e^{-b^2\varphi^2} \quad (28)$$

其中:

$$b^2 = -\ln(0.5) \times \left(\frac{2}{\varphi_s}\right)^2 \quad (29)$$

和 φ_s 是扇区的 3 dB 射束宽度。

将公式 (20) 和 (28) 代入公式 (14), 改变积分限, 使得有限积分变为无限积分, 积分并将其结果代入公式 (16), 就得到下面的近似式:

$$D = \frac{11.09}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11.09}} \quad (30)$$

式中角度按以前的定义并用弧度来表示。若将角度变换为用度表示, 则公式 (30) 就变换成下式:

$$D = \frac{36400}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (31)$$

将公式 (26) 和 (31) 进行比较, 可以看出, 用任何一个公式计算出的方向性之间的差别小于 0.3 dB。

为了确定天线的辐射效率和其它损耗对系数的固有效应, 应该将公式 (31) 给出的结果与大量的实测辐射图进行比较。在这个时候, 为在 25.25 GHz 到 29.5 GHz 频带中工作设计的扇区天线, 只有两套测试结果可用。图 13 和图 14 分别给出了一套天线在方位平面和俯仰平面中的实测辐射图, 而图 15 和图 16 分别给出了第 2 套天线在方位和俯仰平面中的实测辐射图。从图 13 和图 14 可以看出, 方位平面中的 3 dB 射束宽度为 90°, 而俯仰平面中的 3 dB 射束宽度为 2.5°。由公式 (31), 得出方向性是 22.1 dB。这一值要与在频率范围 25.5-29.5 GHz 内该天线测出的增益 20.5-21.4 dBi 进行比较。假设在 28 GHz 附近频带中天线的

增益 G_0 比它的方向性小 0.7 dB，而且指数因子用 1 来代替，这要造成误差随着射束宽度增加而增加。在射束宽度 45° 时，误差达到 6%。射束宽度越大，误差也越大。基于这些考虑，扇区天线的增益和射束宽度之间的半经验关系式由下式给出：

$$G_0 \approx \frac{31000}{\varphi_s \theta_3} \quad (32a)$$

同样，从图 15 和图 16，那个扇区天线的增益和射束宽度之间的半经验关系式如下：

$$G_0 \approx \frac{34000}{\varphi_s \theta_3} \quad (32b)$$

图 13

90° 扇区天线在方位面中的实测辐射图。辐射图是在 27.5 GHz 到 29.5 GHz 频带内测出的。图的左边上手画的交叉号相当于从公式 (28) 得到的假设 3 dB 射束宽度 90° 时方位面中得到的值 (用 dB 表示)

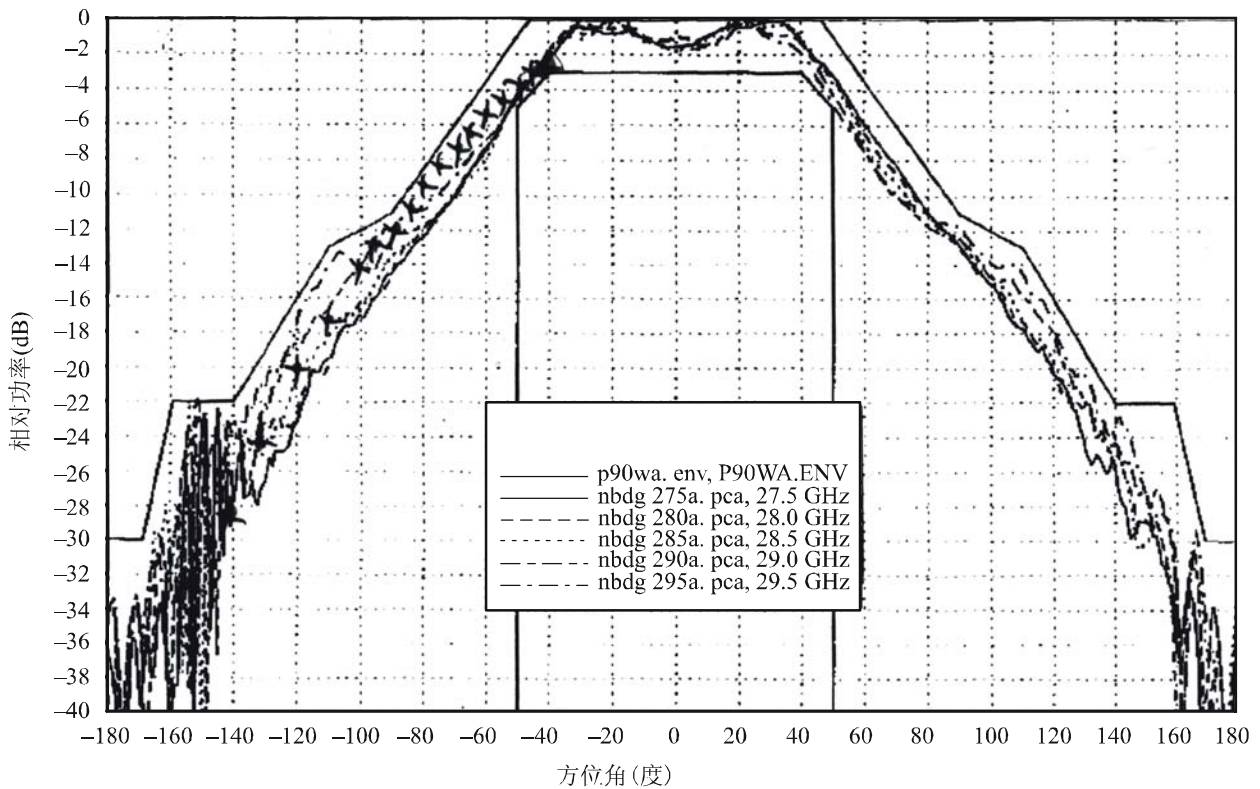
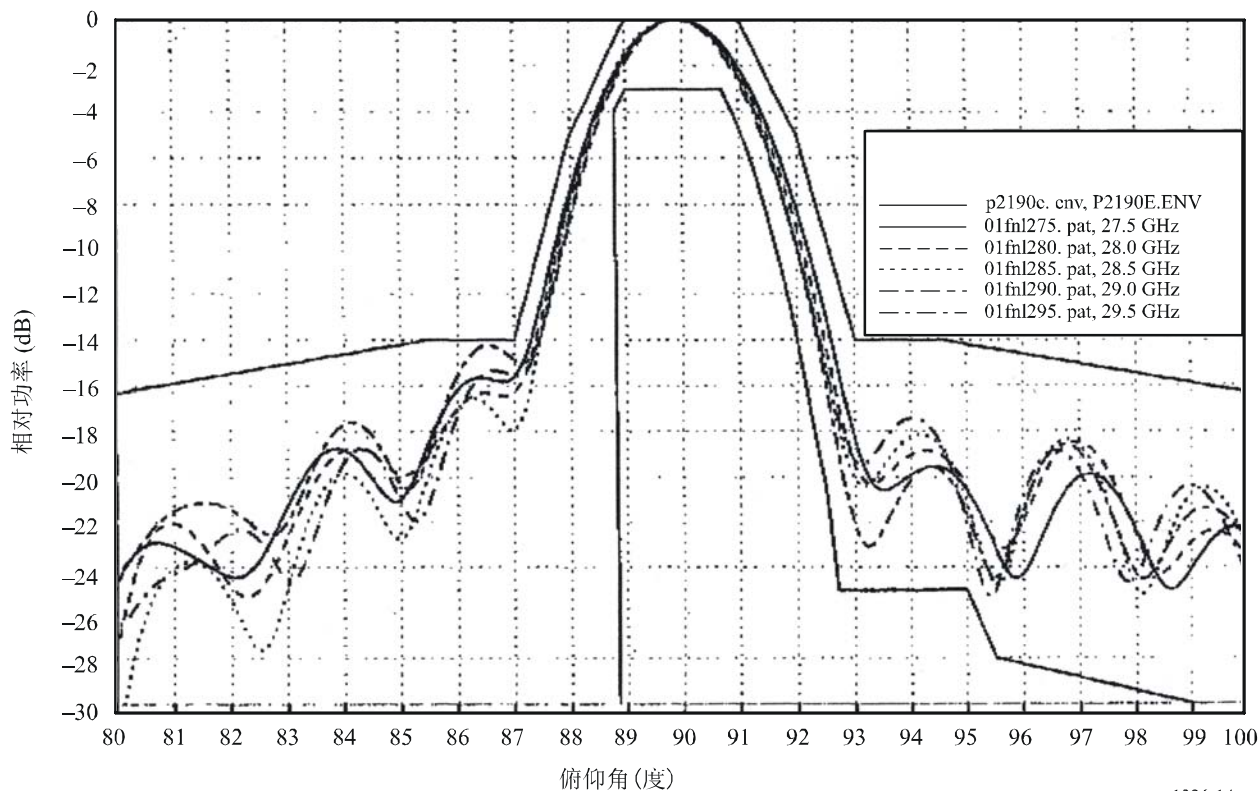


图 14

90° 扇区天线方位面中的实测辐射图。在 27.5 GHz 到 29.5 GHz 频带上测得的辐射图

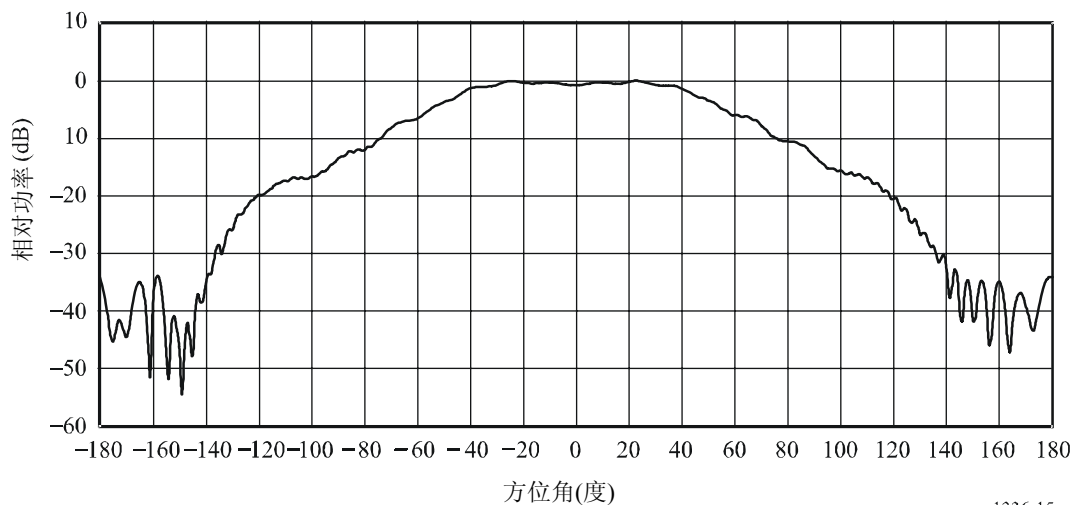


1336-14

图 15

典型的 90° 扇区天线 (V 极化) 的方位面辐射图。

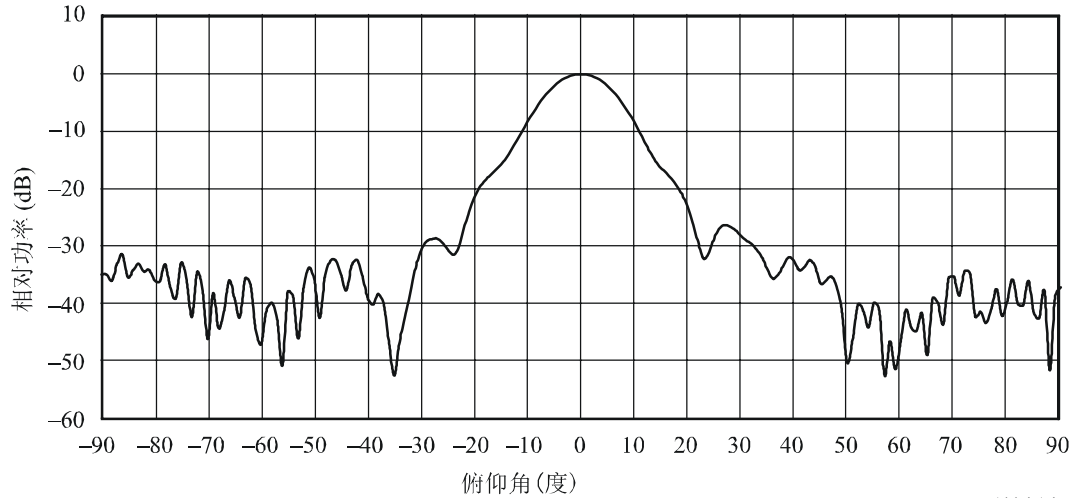
15 dBi 增益, 半功率角: 90° (喇叭型天线, 在 26 GHz 上)



1336-15

图 16

典型的 90° 扇区天线 (V 极化) 俯仰面中的辐射图。
15 dBi 增益、半功率角 12° (喇叭型天线, 在 26 GHz 上)



1336-16

3 与以前的全向天线的结果的比较

本节的目的是将由公式 (27) 给出的全向天线的结果与本建议书附件 1 中报告和汇总的以前的结果进行比较。

全向天线所使用的俯仰面中的辐射强度有如下形式:

$$F(\theta) = \cos^{2N} \theta \quad (33)$$

将公式 (33) 代入公式 (17) 并假设 $F(\varphi) = 1$, 得到:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2N}(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi \quad (34)$$

计算这一二重积分, 得出:

$$U_0 = \frac{(2N)!!}{(2N+1)!!} \quad (35)$$

式中 $(2N)!!$ 是按照 $(2 \cdot 4 \cdot 6 \cdots (2N))$ 所定义的二重阶乘, 而 $(2N+1)!!$ 也是按照 $(1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2N+1))$ 定义的二重阶乘。

所以, 方向性变成下式:

$$D = \frac{(2N+1)!!}{(2N)!!} \quad (36)$$

在俯仰平面中的 3 dB 射束宽度由下式给出:

$$\theta_3 = 2 \cos^{-1} (0.5^{1/2N}) \quad (37)$$

表 2 给出了使用公式 (27) 中具体表达的假设和方法所计算出的方向性和在推导公式 (36) 和 (37) 中所使用的方向性之间的比较。可以看出, 用公式 (27) 得到的结果似优于用公式 (36) 和 (37) 得到的结果。在所有情况下, 公式 (27) 比用公式 (36) 和 (37) 得到的方向性稍微低估一点。当俯仰面中的 3 dB 射束宽度为 65° 时, 估计的相对误差 (%) (当方向性用 dB 表示时) 最大, 数值为 -2.27% 。在这种情况下, 用 dB 表示的误差 (dB) 为 -0.062 dB。当 3 dB 射束宽度角小于 65° 时, 相对误差 (%) 和误差 (dB) 是随着 3 dB 射束宽度减小而减小的一个单调递减函数。3 dB 射束宽度为 16° 时, 相对误差 (%) 约为 -0.01% , 而误差 (dB) 小于约 -0.0085 dB。对 $2N$ 的值在 10 000 以下 (相当于 3 dB 射束宽度 1.35° 和方向性 19.02 dB) 时, 估计值与表 2 中所示的结果相似, 证实了两个方法的结果汇合在一起。

表 2

用公式 (27a) 计算出的全向天线的方向性和用公式 (36) 和 (37) 计算出的方向性的比较

$2N$	θ_3 (度) (公式 (37))	方向性 (dB) (公式 (36))	方向性 (dB) (公式 (27a))	相对误差 (%)	误差 (dB)
2	90.0000	1.7609	1.7437	-0.98	-0.0172
4	65.5302	2.7300	2.6677	-2.28	-0.0623
6	54.0272	3.3995	3.3419	-1.69	-0.0576
8	47.0161	3.9110	3.8610	-1.28	-0.0500
10	42.1747	4.3249	4.2814	-1.01	-0.0435
12	38.5746	4.6726	4.6343	-0.82	-0.0383
14	35.7624	4.9722	4.9381	-0.69	-0.0341
16	33.4873	5.2355	5.2047	-0.59	-0.0307
18	31.5975	5.4703	5.4423	-0.51	-0.0280
20	29.9953	5.6822	5.6565	-0.45	-0.0256
22	28.6145	5.8752	5.8516	-0.40	-0.0237
24	27.4083	6.0525	6.0305	-0.36	-0.0220
26	26.3428	6.2164	6.1959	-0.33	-0.0205
28	25.3927	6.3688	6.3496	-0.30	-0.0192
30	24.5384	6.5112	6.4931	-0.28	-0.0181
32	23.7649	6.6449	6.6278	-0.26	-0.0171
34	23.0603	6.7708	6.7545	-0.24	-0.0162
36	22.4148	6.8897	6.8743	-0.22	-0.0154
38	21.8206	7.0026	6.9879	-0.21	-0.0147
40	21.2714	7.1098	7.0958	-0.20	-0.0140
42	20.7616	7.2120	7.1986	-0.19	-0.0134
44	20.2868	7.3096	7.2967	-0.18	-0.0129
46	19.8431	7.4030	7.3906	-0.17	-0.0124
48	19.4274	7.4925	7.4806	-0.16	-0.0119

表 2 (续完)

2N	θ_3 (度) (公式 (37))	方向性 (dB) (公式 (36))	方向性 (dB) (公式 (27a))	相对误差 (%)	误差 (dB)
50	19.0367	7.5785	7.5671	-0.15	-0.0115
52	18.6687	7.6613	7.6502	-0.14	-0.0111
54	18.3212	7.7410	7.7302	-0.14	-0.0107
56	17.9924	7.8178	7.8075	-0.13	-0.0104
58	17.6808	7.8921	7.8820	-0.13	-0.0100
60	17.3847	7.9638	7.9541	-0.12	-0.0097
62	17.1031	8.0333	8.0239	-0.12	-0.0094
64	16.8347	8.1007	8.0915	-0.11	-0.0092
66	16.5786	8.1660	8.1571	-0.11	-0.0089
68	16.3338	8.2294	8.2207	-0.11	-0.0087
70	16.0996	8.2910	8.2825	-0.10	-0.0085
72	15.8751	8.3509	8.3426	-0.10	-0.0083
74	15.6598	8.4092	8.4011	-0.10	-0.0081

4 综述和结论

已经研究出一些公式，这些公式使得有可能很容易地计算在 P-MP 无线电接力系统中所使用的全向和扇区天线的方向性以及射束宽度和增益之间的关系。建议使用下面的公式计算扇区天线的方向性：

$$D = \frac{k}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (38)$$

其中：

$$\begin{aligned} k &= 38750 && \text{对于 } \varphi_s > 120^\circ \\ k &= 36400 && \text{对于 } \varphi_s \leq 120^\circ \end{aligned} \quad (39)$$

而 φ_s 是在假设方位面内是指数型辐射强度情况下，扇区天线在方位面中的 φ_s 3 dB 射束宽度（度），而 θ_3 是扇区天线在俯仰平面中的 3 dB 射束宽度（度）

对全向天线，建议用下面的简化公式来确定俯仰面中的 3 dB 射束宽度，其中增益用 dBi 表示（见公式 (27b)）：

$$\theta_3 \approx 107.6 \times 10^{-0.1 G_0}$$

在扇区角在 120° 左右或更小和俯仰平面中的 3 dB 射束宽度小于 45° 左右（见公式 (32a)）的情况下，建议暂时使用下面的有关扇区天线增益（dBi）与在俯仰面和方位面中的 3 dB 射束宽度关系的半经验公式：

$$\theta_3 \approx \frac{31000 \times 10^{-0.1G_0}}{\varphi_s}$$

为了确定怎样处理在公式 (39) 中隐含的过渡区和它们应用于为 P-MP 无线电接力系统在 1 GHz 到约 70 GHz 频率范围内使用而设计的扇区天线和全向天线的实测辐射图时, 怎样确定这些近似公式的精确度, 还需要做进一步研究。

附件 4

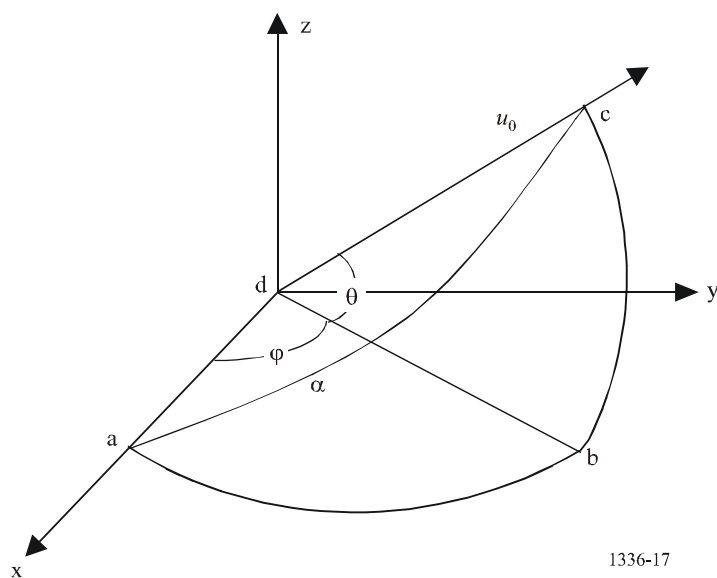
确定在由一个方位角和一个俯仰角所规定的以天线视轴为参考的任意偏轴角上扇区天线增益的方法

1 分析

用于确定在任意偏轴角上扇区天线增益的基本几何关系如图 17 所示。假设天线位于球坐标系统的中心, 最大辐射的方向是沿 x 轴方向; x-y 平面是当地的水平面; 俯仰平面包含 z 轴; 而 u_0 是用于确定扇区天线增益的那个方向上的单位矢量。

图 17

给定了相关的方位角和俯仰角的情况下确定偏轴角



1336-17

有关这一程序的两个基本假设是：

- 当将远区场辐射图的-3 dB 增益轮廓线以二维的方式画成方位角和俯仰角的函数时，它将是一个椭圆，如图 2 所示；和
- 扇区天线在任意偏轴角方向上的增益是 3 dB 射束宽度和在包含 x 轴和单位矢量 u_0 的平面中（见图 1）测量时得到的 3 dB 射束宽度的函数。

知道了扇区天线在方位面和俯仰面中的 3 dB 射束宽度（度） φ_3 和 θ_3 以后，暂定用下式给出轴向增益的数值（见建议 3.3 和公式（32a））：

$$G_0 = \frac{31\,000}{\varphi_3 \theta_3} \quad (40)$$

计算扇区天线在任意偏轴角 φ 和 θ 上的增益过程中，第一步是确定 α 的值。参照图 1 和认识到 abc 是一正球面三角形，所以 α 可以由下式求出：

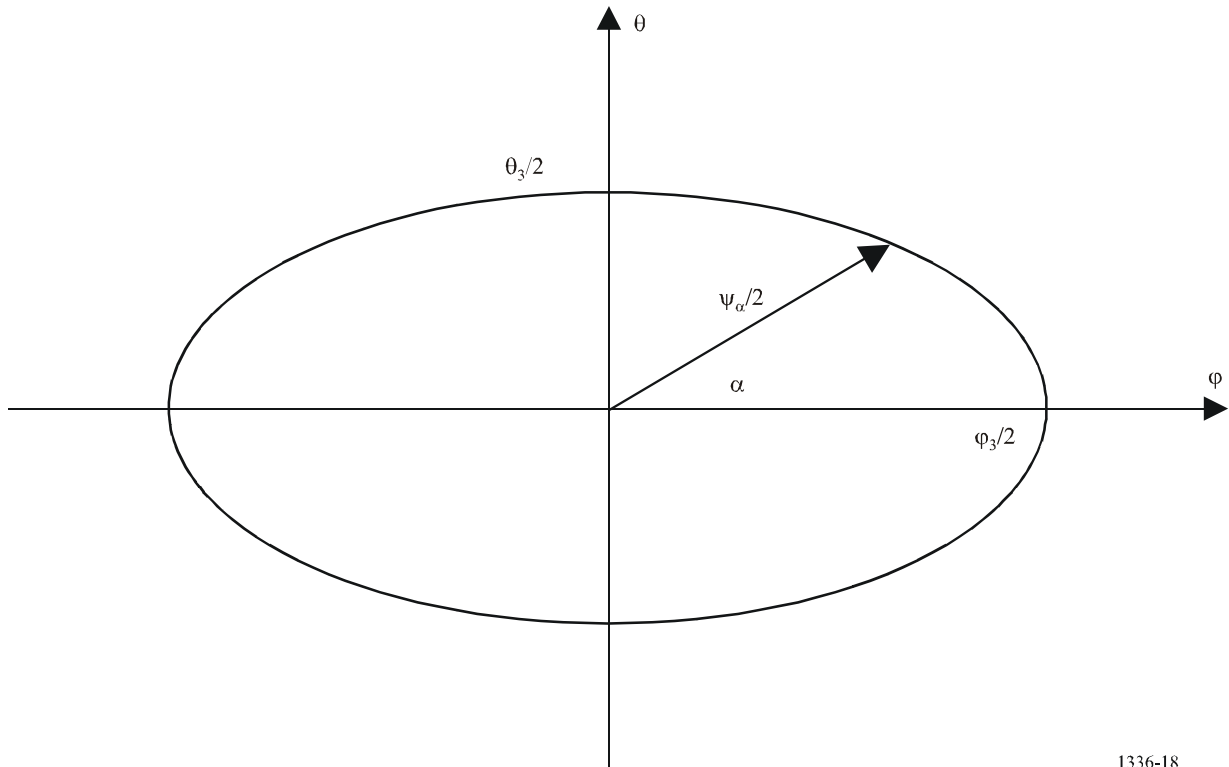
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta}{\sin \varphi} \right) \quad (41a)$$

而 adc 平面中的偏轴角可以由下式求出：

$$\psi_\alpha = \cos^{-1} (\cos \varphi \cos \theta) \quad (41b)$$

图 18

确定一椭圆射束在任意倾角 α 上的 3 dB 射束宽度



知道了该射束为椭圆形后，可以由下式确定扇区天线在 adc 平面中的 3dB 射束宽度：

$$\frac{1}{\Psi_{\alpha}^2} = \left(\frac{\cos \alpha}{\Phi_3} \right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\Theta_3} \right)^2 \quad (42a)$$

或

$$\Psi_{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\Phi_3} \right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\Theta_3} \right)^2}} \quad (42b)$$

可以暂定用本建议书的建议 3.1 和 3.2 中所给出的参考辐射图确定在任意偏轴角上的扇区天线增益。

2 结论

已经给出了一个计算扇区天线在任意偏轴角上的增益的程序。为了说明对扇区天线而言，这一程序适用的范围，需要进一步研究。为了可以作这个决定，要求各主管部门提交扇区天线的实测辐射图。

附 件 5

在干扰统计评定中使用的 P-MP FWS 的全向和扇区天线的通用辐射图的数学模型

1 引言

本建议书（在建议 2.2 和 3.2 中）的正文是给出代表全向（在方位面内）和扇区两种天线的平均旁瓣电平参考辐射图。这些辐射图可以在多干扰输入或时变干扰输入的情况下应用。

另一方面，为了在干扰的空间统计分析中使用，例如从几个对地静止轨道（GSO）卫星系统进入大量的受干扰 FWS 的干扰分析，需要通用辐射图的数学模型，这将在本附件中的下一节中给出。

应该指出，这些数学模型是以正弦函数为基础的，当将它们应用于多输入干扰计算中时，除非干扰源分布在相当大的方位角/俯仰角范围内，否则可能导致有偏差的结果。所以，建议仅在上面所表述的情况下才使用这些辐射图。

2 全向天线的数学模型

在对从一个或几个 GSO 卫星系统进入大量 FS 站的干扰进行空间分析的情况下，对仰角在 0° 到 90° 范围内的情况下，应该使用下面的平均旁瓣电平辐射图（见附件 1）：

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{对于 } 0 \leq \theta < \theta_4 \\ G_0 - 12 + 10 \log(k+1) + F(\theta) & \text{对于 } \theta_4 \leq \theta < \theta_3 \\ G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1.5} + k \right] + F(\theta) & \text{对于 } \theta_3 \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (43a)$$

其中：

$$F(\theta) = 10 \log \left(0.9 \sin^2 \left(\frac{3\pi\theta}{4\theta_3} \right) + 0.1 \right) \quad (43b)$$

式中 θ 、 θ_3 、 θ_4 、 G_0 和 k 在正文的建议 2.1 中作了定义和表示。

注 1 — 在包含 1-3 GHz 频率范围工作的典型天线的情况下，参数 k 应该为 0.7。

注 2 — 在包含 1-3 GHz 范围内的改进了旁瓣性能的天线的情况下和对于在 3-70 GHz 频率范围内工作的所有天线，参数 k 应该为 0。

3 扇区天线的数学模型

在对从一个或几个 GSO 卫星系统进入大量的 FS 站的干扰进行空间分析的情况下，对俯仰角在 0° 到 90° 的范围和方位角在 -180° 到 180° 的范围内的情况下，应该使用下面的平均旁瓣辐射图：

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x) \quad (44)$$

其中：

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{对于 } 0 \leq x < 1.396 \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 12 - 15 \log(x) + F_{ref}(x) && \text{对于 } 1.396 \leq x \\ F_{ref}(x) &= 10 \log(0.9 \sin^2(0.75\pi x) + 0.1) \end{aligned}$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\tan \theta}{\sin \varphi} \right)$$

$$\psi_{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\theta_3}\right)^2}}$$

$$= \varphi_3 \cdot \theta_3 \sqrt{\frac{(\sin \theta)^2 + (\sin \varphi \cdot \cos \theta)^2}{(\varphi_3 \cdot \sin \theta)^2 + (\theta_3 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta)^2}} \quad \text{度}$$

$$\psi = \arccos(\cos \varphi \cdot \cos \theta) \quad \text{度}$$

$$x = \psi / \psi_{\alpha}$$

其中所有变量和参数都按照正文的建议 3.1 中的定义。

注 1 — 在包含其方位面中的 3 dB 射束宽度小于 120° 左右的扇区天线的情况下，在最大增益与方位面及俯仰面中的 3 dB 射束宽度之间的关系暂定用下式表示（见附件 3）：

$$\theta_3 = \frac{31\,000 \times 10^{-0.1G_0}}{\varphi_3}$$

其中所有参数都按照正文建议 3.1 中的定义。

附 件 6

用于导出 1 GHz 和约 6 GHz 之间的扇区天线的 峰值和平均辐射图公式的基本原理

1 开发在 1 GHz 和 6 GHz 之间的扇区天线的公式

1.1 开发的基本原理

为了在 2 GHz 附近的频率上适当地建立实测的天线辐射图的模型，引入了一个参数 k ，以便将旁瓣电平性能计入用于扇区天线的公式，同样计入用于全向天线的公式。

曾经发现，当使用全向天线的公式时，参数 k 大于 0 的扇区天线辐射图与第 1 旁瓣电平未很好估计的实测的天线辐射图相一致。

公式 (45) 适用于扇区天线的峰值辐射图：

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12x^2 \quad \text{对于 } 0 \leq x < 1$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1.5} + k) \quad \text{对于 } 1 \leq x \quad (45)$$

所有参数的定义与本建议书正文（建议 3.1）中的定义相同。

请注意，在公式 (45) 中，在 $x = 1$ 上有小的不连续性。

例如，当 $k = 0.7$ 时，下面的公式变为 $G_{ref}(x) = G_0 - 9.7$ ，而上面的公式仍然是 $G_{ref}(x) = G_0 - 12$ （约相差 2 dB）。 k 值越小，不连续性越小。

为了更精确地规定这两个公式的转折点，发现用一些误差不大的近似（ $k \ll 1$ 和转折点 x_k 接近于 1）：

$$\begin{aligned} G_{ref}(x_k) &= G_0 - 12 + 10 \log(x_k^{-1.5} + k) = G_0 - 12x_k^2 \\ \Rightarrow -12x_k^2 &= -12 + \frac{10}{\ln(10)} \ln(x_k^{-1.5} + k) \approx -12 + \frac{10}{\ln(10)} k \\ \Rightarrow x_k &\approx \sqrt{1 - \frac{5k}{6 \ln 10}} \end{aligned}$$

所以，转折点“1”可以用一个浮动的转折点 x_k 来代替。

在那种情况下，公式（45）变成下面的形式：

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{对于 } 0 \leq x < x_k \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1.5} + k) && \text{对于 } x_k \leq x \end{aligned} \quad (46)$$

其中：

$$x_k = \sqrt{1 - 0.36k}$$

1.2 确定这些公式成立的范围

根据对实测的天线辐射图的估计，曾经确定对于在 1 GHz 到约 6 GHz 频率范围内工作的天线，需要不同的公式。

1.3 关于参数 k 的值的研究

表 3 综合了关于参数 k 和实测的天线辐射图的分析结果，该表也显示了在 10 年周期内，旁瓣电平性能得到改善的趋势。

1.4 参数 k 对扇区天线辐射图的影响

总起来说，可以看出，在大多数情况（典型旁瓣电平情况）下，具有典型值 $k = 0.7$ 的天线峰值辐射图（见本附件§2）是适用的。

请注意， $k = 0$ 使这些天线辐射图能够与具有改善了旁瓣性能的扇区天线的辐射图相吻合。

表 3
本建议书中参数 k 的值

ITU-R F.1336 建议书		1997	2000	2006 在本建议书中所使用
全向天线	典型的旁瓣	1-3 GHz	$k = 1.5$	$k = 0.7$
		3-70 GHz	$k = 1.5$	$k = 0$
	改善的旁瓣	1-70 GHz	$k = 0$	$k = 0$
扇区天线	典型的旁瓣	1-3 GHz	—	峰值: $k = 0.7$
		3-6 GHz	—	平均: $k = 0.2$
		6-70 GHz	—	$k = 0$
	改善的旁瓣	1-70 GHz	—	$k = 0$

注 1 — 对扇区天线, 使用公式 (46)。

对扇区天线的峰值辐射图, 应该使用公式 (47):

$$\begin{aligned}
 G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{对于 } 0 \leq x < x_k \\
 G_{ref}(x) &= G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1.5} + k) && \text{对于 } x_k \leq x < 4 \\
 G_{ref}(x) &= G_0 - \lambda_k - 15 \log(x) && \text{对于 } x \geq 4
 \end{aligned} \tag{47}$$

其中 $\lambda_k = 12 - 10 \log(1+8k)$ 和 $x_k = \sqrt{1-0.36k}$

和

x_k : 保证主瓣和第一旁瓣之间连续性的转折点

λ_k : 为保证 $x = 4$ 时旁瓣和背瓣之间连续性所需要的低于天线增益的衰减因子。

在建议 3.1.1 和 3.2.1 中使用公式 (47)。

2 关于在 1-6 GHz 频率范围内扇区天线的参数 k 的考虑

为了估计出适当的 k 值, 对几个国家所提供的有关固定和移动应用的实测天线辐射图和参考辐射图之间的总的差值进行了计算。这些实测的辐射图提供了许多仰角值上的增益。

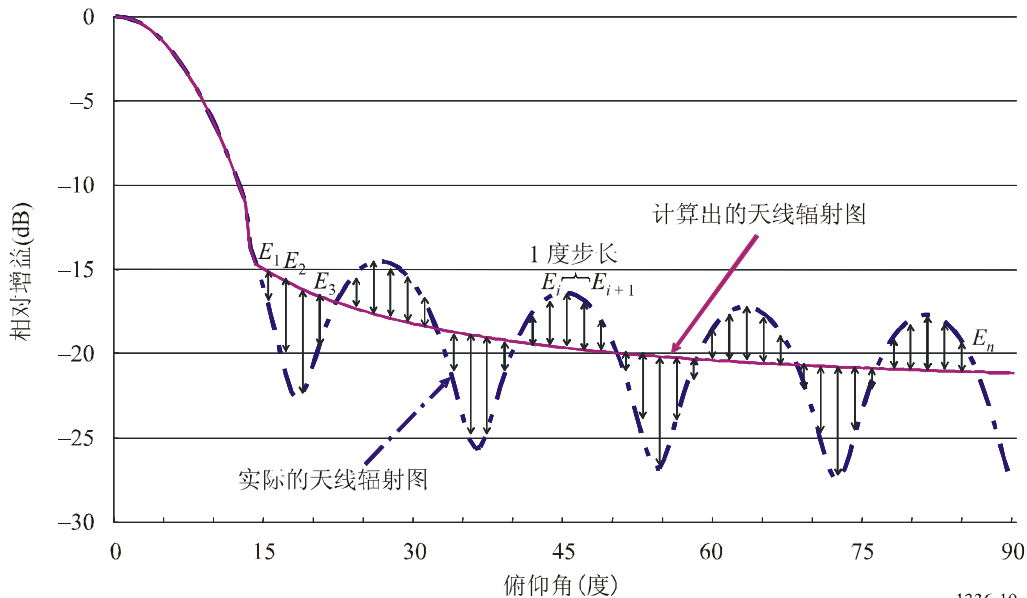
对峰值辐射图, 将实验数据直接与公式 (47) 在 k 因子等于 0.7 的情况下进行比较。

对平均辐射图, 仅对旁瓣范围内 (不对主瓣部分) 进行了计算; 为了确定“总误差”, 将计算出的和实际的天线辐射图之间的差值每一度取一次样。

总误差定义如下。 E_i 是对实际值而不是对 dB 值计算的。

$$\text{总误差} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2}$$

图 19

估计平均辐射图的参数 k 的总误差计算

1336-19

使用在 0 和 0.3 之间的几个参数 k 的值，对每一辐射图计算总误差。结果示于图 19。我们可以将得到最小总误差的参数 k 的值看作最佳的值。基于这一分析，对天线的平均辐射图，应该使用值 $k = 0.2$ 。

要考虑的另一重要因子是“Sigma 值”，它是用在角度范围内总功率的积分来定义的。

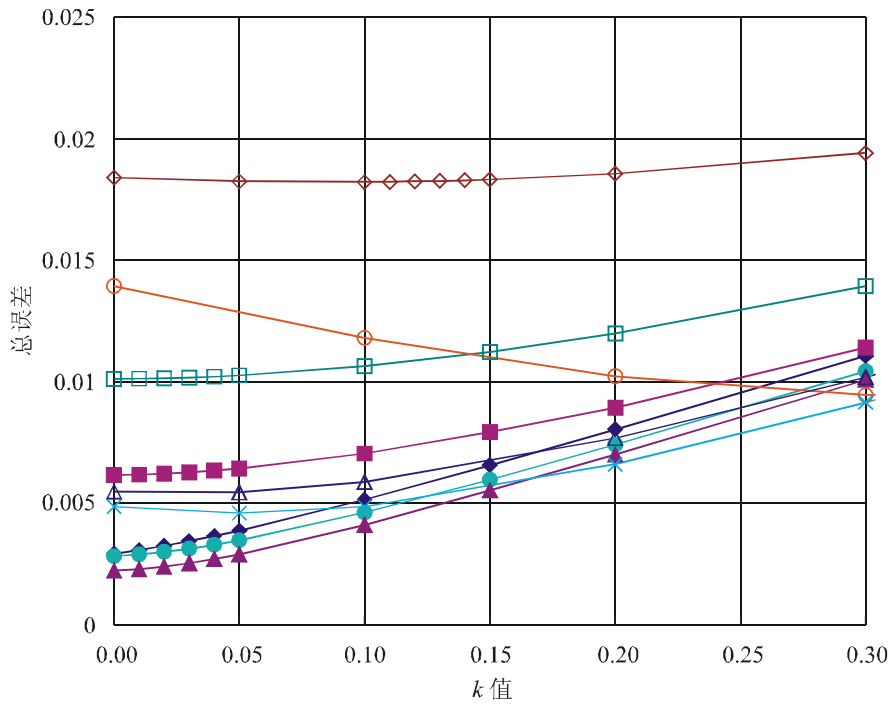
基本思想如下：

- 对峰值包络辐射图，Sigma 值应该在 2-4 dB 的范围以内；
- 对平均旁瓣辐射图，Sigma 值应该在 0-1 dB 的范围内。

表 4 给出了对有代表性的典型天线的实例所建议的公式所得到的 Sigma 值的计算结果。

对峰值包络辐射图， $k = 0.7$ 时的 Sigma 值在容许的水平以内。此外，对平均的旁瓣辐射图， $k = 0.2$ 将是一个可能的值。

图 20
对平均辐射图计算最佳 k 值的例子



新测量数据

- ◆ 天线 1 (2 GHz, 对于 MS)
- 天线 2 (2 GHz, 对于 MS)
- 天线 3 (2 GHz, 对于 FS, 60°扇区)
- ▲ 天线 4 (2 GHz, 对于 FS, 90°扇区)
- ◇ RV901704_P
- 2.0 GHz 6°/4°
- 天线 5
- △ 天线 6
- × 天线 7

1336-20

表 4
Sigma 值的计算结果

	辐射图	方程	k 参数	Sigma 值	
				16 dBi, 60° 扇区	16 dBi, 120° 扇区
在 1-6 GHz 范围内的典型天线	峰值包络	建议 3.1.1	$k = 0.7$	3.8 dB	2.55 dB
	平均旁瓣	建议 3.2.1	$k = 0.2$	0.8 dB	0.12 dB
			$k = 0.4$	1.43 dB	0.57 dB
			$k = 0.6$	1.93 dB	0.97 dB