

国 际 电 信 联 盟

# ITU-R

国际电联无线电通信部门

**ITU-R F.1336-4 建议书**  
(02/2014)

**在400 MHz到约70 GHz频率范围内  
用于共用研究的固定和移动系统的  
全向、扇形和其它天线的  
参考辐射图**

**F系列  
固定业务**

**15**   
1865-2015



国际电信联盟

## 前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

## 知识产权政策 (IPR)

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议的附件1中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

### ITU-R 系列建议书

(也可在线查询 <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

系列	标题
<b>BO</b>	卫星传送
<b>BR</b>	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
<b>BS</b>	广播业务（声音）
<b>BT</b>	广播业务（电视）
<b>F</b>	<b>固定业务</b>
<b>M</b>	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
<b>P</b>	无线电波传播
<b>RA</b>	射电天文
<b>RS</b>	遥感系统
<b>S</b>	卫星固定业务
<b>SA</b>	空间应用和气象
<b>SF</b>	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
<b>SM</b>	频谱管理
<b>SNG</b>	卫星新闻采集
<b>TF</b>	时间信号和频率标准发射
<b>V</b>	词汇和相关问题

**说明：** 该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版  
2015年，日内瓦

© 国际电联 2015

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

## ITU-R F.1336-4 建议书\*

**在400 MHz到约70 GHz频率范围内用于共用研究的  
固定和移动系统的全向、扇形和其它天线的  
参考辐射图**

(ITU-R242/5号研究课题)

(1997-2000-2007-2012-2014)

**范围**

本建议书给出了在固定业务和移动业务中所使用天线的参考模型。它给出了频率范围400 MHz到约70 GHz内的全向和扇区天线以及1 GHz到约3 GHz频率范围内低增益方向性天线的峰值和平均辐射图，用于相关频率范围内共用研究。

**关键词**

固定业务、陆地移动业务、参考辐射方向图、扇区天线、全向天线、峰值旁瓣辐射图、平均旁瓣辐射图

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）或陆地移动业务（LMS）之中的系统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或LMS基站天线的参考辐射图；
- 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或LMS基站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或LMS基站的综合干扰；
  - 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或LMS基站的干扰；
  - 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) 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；

---

\* 应提请无线电通信第4、6和7研究组注意本建议书。

f) 在距离主射束大的角距离，因为本地的地面反射，辐射图增益可能不能充分表达天线的辐射，

注意到

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 建议书分别给出了在协调研究和干扰估计中要使用的方向性天线的峰值和平均参考辐射图，

建议

1 在缺乏有关所涉及的P-MP FWS或LMS基站天线的辐射图的详细资料的情况下（见注 1），如下面所描述的参考辐射图应该被用于下列场合：

1.1 视距（LoS）P-MP FWS或LMS基站之间的干扰估计；

1.2 在P-MP LoS FWS或LMS基站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400 MHz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 $-90^\circ$ 到 $90^\circ$ 范围内时，应该使用下面的公式（见附件1）：

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

其中：

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

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

式中：

$G(\theta)$ ：相对于全向天线的增益（dBi）

$G_0$ ：在方位平面中的最大增益（dBi）

$\theta$ ：相对于最大增益角的俯仰角（度）（ $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ）

$\theta_3$ ：在俯仰平面内的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 $-90^\circ$ 到 $90^\circ$ 范围内时，应该使用下面的公式（见附件1和附件4）：

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

其中：

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

这里 $\theta$ 、 $\theta_3$ 、 $G_0$ 和 $k$ 按照建议2.1中的定义和表示方法；

**2.3** 在包含在400 MHz到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400 MHz到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；

**2.5** 在建议2.1到2.2中的天线采用一个向下电调倾角工作的情况下，在这些建议中的所有公式对以下变量的定义有效（见附件5中的§3）：

$\theta_e$ : 用来采用建议2.1和2.2中的公式计算倾斜辐射图的俯仰角（度）

$\theta_h$ : 从天线位置的水平面上测量到的俯仰角（度）（ $-90^\circ \leq \theta_h \leq 90^\circ$ ：此处， $90^\circ$ 是天顶点，而 $-90^\circ$ 是天底点）

$\beta$ : 向下倾斜角，主射束轴低于在天线位置处的水平面的正角度（度）。

这些参数相关如下：

$$\theta_e = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 + \beta} \quad \text{对于 } \theta_h + \beta \geq 0 \quad (1e)$$

$$\theta_e = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 - \beta} \quad \text{对于 } \theta_h + \beta < 0$$

角度为 $\theta_h$ 的一个电调倾斜辐射增益是采用公式（1e）的 $\theta_e$ 来计算的，分别代替建议2.1和2.2中公式的 $\theta$ ；

**3** 在频率范围400 MHz到约70 GHz内，在包含使用扇区天线基站的情况下，应该使用下面的参考辐射图；

**3.1** 在频率范围400 MHz到约6 GHz内（见附件7）：

**3.1.1** 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 $-90^\circ$ 到 $90^\circ$ 和方位角从 $-180^\circ$ 到 $180^\circ$ 的范围内，应该使用下面的公式：

$$G(\varphi, \theta) = G_0 + G_{hr}(x_h) + R \cdot G_{vr}(x_v) \quad (\text{dBi}) \quad (2a1)$$

其中：

$G_{hr}(x_h)$ : 在  $(x_h, 0)$  的标准方向上方位平面中的相对参考天线增益 (dB)

$$x_h = |\varphi|/\varphi_3$$

$\varphi$ : 在水平面中相对于最大增益角的方位角 (度)

$\varphi_3$ : 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)。

$G_{vr}(x_v)$ : 在  $(0, x_v)$  的标准方向上俯仰平面中的相对参考天线增益 (dB)

$$x_v = |\theta|/\theta_3$$

$R$ : 随着方位角被从 $0^\circ$ 移到 $\varphi$ 时的水平增益压缩比，如下所示：

$$R = \frac{G_{hr}(x_h) - G_{hr}(180^\circ/\varphi_3)}{G_{hr}(0) - G_{hr}(180^\circ/\varphi_3)} \quad (2a2)$$

其它变量和参数按照建议 2.1 中的定义。

**3.1.1.1** 相对最小增益 $G_{180}$ 可以如下计算：

$$G_{180} = -12 + 10 \log(1 + 8k_p) - 15 \log\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right) \quad (2b1)$$

其中：

$k_p$ : 达到峰值旁瓣辐射图的相对最小增益的参数；

**3.1.1.1.1** 在包含典型天线的情况下，参数 $k_p$ 应该为0.7 (见注2)；

**3.1.1.1.2** 在包含改善了旁瓣性能的天线的情况下，参数 $k_p$ 应该为0.7，这也适用于IMT基站天线 (见注2)；

**3.1.1.2** 在方位平面中的相对参考天线增益；

$$G_{hr}(x_h) = -12x_h^2 \quad \text{对于} \quad x_h \leq 0.5$$

$$G_{hr}(x_h) = -12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{kh} \quad \text{对于} \quad 0.5 < x_h \quad (2b2)$$

$$G_{hr}(x_h) \geq G_{180}$$

其中：

$k_h$ : 基于泄露功率的方位辐射图调整因子 ( $0 \leq k_h \leq 1$ )

$$\lambda_{kh} = 3(1 - 0.5^{-k_h});$$

**3.1.1.2.1** 在包含了典型天线的情况下，参数 $k_h$ 应该为0.8 (见注2)；

**3.1.1.2.2** 在包含改善了旁瓣性能的天线的情况下，参数  $k_h$  应该为 0.7，这也适用于 IMT 基站天线（见注 2）；

**3.1.1.3** 在俯仰平面中的相对参考天线增益：

$$\begin{aligned}
 G_{vr}(x_v) &= -12x_v^2 && \text{对于 } x_v < x_k \\
 G_{vr}(x_v) &= -12 + 10\log(x_v^{-1.5} + k_v) && \text{对于 } x_k \leq x_v < 4 \\
 G_{vr}(x_v) &= -\lambda_{kv} - C\log(x_v) && \text{对于 } 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\
 G_{vr}(x_v) &= G_{180} && \text{对于 } x_v = 90^\circ/\theta_3
 \end{aligned} \tag{2b3}$$

其中：

$k_v$ : 基于泄露功率的俯仰辐射图调整因子 ( $0 \leq k_v \leq 1$ )

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

$$\lambda_{kv} = 12 - C\log(4) - 10\log(4^{-1.5} + k_v)$$

衰减斜率因子  $C$  表示如下：

$$C = \frac{10\log\left(\frac{\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right)^{1.5} \cdot (4^{-1.5} + k_v)}{1 + 8k_p}\right)}{\log\left(\frac{22.5^\circ}{\theta_3}\right)}$$

**3.1.1.3.1** 在包含了典型天线的情况下，参数  $k_v$  应该为 0.7（见注 2）；

**3.1.1.3.2** 在包含改善了旁瓣性能的天线的情况下，参数  $k_v$  应该为 0.3，这也适用于 IMT 基站天线（见注 2）；

**3.1.2** 在考虑到  $c$ ) 中参照的平均旁瓣辐射图的情况下，用于静态干扰估算中，应该将以下公式用于俯仰角为  $-90^\circ$  到  $90^\circ$  和方位角  $-180^\circ$  到  $180^\circ$  的范围内：

$$G(\varphi, \theta) = G_0 + G_{hr}(x_h) + R \cdot G_{vr}(x_v) \quad (\text{dBi})$$

**3.1.2.1** 相对最小增益  $G_{180}$  计算如下：

$$G_{180} = -15 + 10\log(1 + 8k_a) - 15\log\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right) \tag{2c1}$$

其中：

$k_a$ : 达到平均旁瓣辐射图相对最小增益的参数；

**3.1.2.1.1** 在包含了典型天线的情况下，参数  $k_a$  应该为 0.7（见注 2）；

**3.1.2.1.2** 在包含改善了旁瓣性能的天线的情况下，参数  $k_a$  也应该为 0.7，这也适用于 IMT 基站天线（见注 2）；

**3.1.2.2** 在方位平面中的相对参考天线增益:

$$\begin{aligned} G_{hr}(x_h) &= -12x_h^2 && \text{对于 } x_h \leq 0.5 \\ G_{hr}(x_h) &= -12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{kh} && \text{对于 } 0.5 < x_h \end{aligned} \quad (2c2)$$

$$G_{hr}(x_h) \geq G_{180}$$

其中:

$$\lambda_{kh} = 3(1 - 0.5^{-k_h}).$$

**3.1.2.2.1** 在包含了典型天线的情况下, 参数 $k_h$ 应该为0.8 (见注2);

**3.1.2.2.2** 在包含改善了旁瓣性能的天线的情况下, 参数 $k_h$ 应该为0.7, 这也适用于IMT基站天线 (见注2);

**3.1.2.3** 在俯仰平面中的相对参考天线增益:

$$\begin{aligned} G_{vr}(x_v) &= -12x_v^2 && \text{对于 } x_v < x_k \\ G_{vr}(x_v) &= -15 + 10\log(x_v^{-1.5} + k_v) && \text{对于 } x_k \leq x_v < 4 \\ G_{vr}(x_v) &= -\lambda_{kv} - 3 - C\log(x_v) && \text{对于 } 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\ G_{vr}(x_v) &= G_{180} && \text{对于 } x_v = 90^\circ/\theta_3 \end{aligned} \quad (2c3)$$

其中:

$$x_k = \sqrt{1.33 - 0.33k_v}$$

$$\lambda_{kv} = 12 - C\log(4) - 10\log(4^{-1.5} + k_v);$$

衰减斜率因子  $C$  表示如下:

$$C = \frac{10\log\left(\frac{\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right)^{1.5} \cdot (4^{-1.5} + k_v)}{1 + 8k_a}\right)}{\log\left(\frac{22.5^\circ}{\theta_3}\right)}.$$

**3.1.2.3.1** 在包含了典型天线的情况下, 参数 $k_v$ 应该为0.7 (见注2);

**3.1.2.3.2** 在包含改善了旁瓣性能的天线的情况下, 参数 $k_v$ 应该为0.3, 这也适用于IMT基站天线 (见注2);

**3.2** 在6 GHz到约70 GHz频率范围内 (见附件6):

**3.2.1** 在考虑到b)中所参照的峰值旁瓣辐射图的情况下, 以下公式应该被用于俯仰角为 $-90^\circ$ 到 $90^\circ$ 和方位角为 $-180^\circ$ 到 $180^\circ$ 的范围内:

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x) \quad (2d1)$$



$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tan \theta}{\sin \varphi}\right) \quad -90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (2d2)$$

$$\psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{对于} \quad 0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ \quad (2d3)$$

$$\psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \theta}{\varphi_{3m}}\right)^2 + \left(\frac{\sin \theta}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{对于} \quad 90^\circ < \psi \leq 180^\circ$$

$$\psi = \arccos(\cos \varphi \cos \theta), \quad 0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \quad (2d4)$$

$$x = \psi / \psi_\alpha \quad (2d5)$$

其中:

$\varphi_{3m}$ : 在水平增益调整方位平面中的等效3 dB射束宽度 (度);

$$\varphi_{3m} = \varphi_3 \quad \text{对于} \quad 0^\circ \leq |\varphi| \leq \varphi_{th} \quad (2d6)$$

$$\varphi_{3m} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{对于} \quad \varphi_{th} < |\varphi| \leq 180^\circ \quad (2d7)$$

$\varphi_{th}$ : 边界方位角 (度)

$$\varphi_{th} = \varphi_3$$

其他变量和参数如建议2.1和3.1.1中所规定;

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

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12 - 15 \log(x) \quad \text{对于} \quad 1 \leq x$$

**3.2.2** 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 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ 和方位角为 $-180^\circ$ 到 $180^\circ$ 的范围内, 用于干扰统计估算时, 应该使用下面的公式 (见注3):

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12x^2 \quad \text{对于} \quad 0 \leq x < 1.152 \quad (2f)$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - 15 - 15 \log(x) \quad \text{对于} \quad 1.152 \leq x$$

在此情况下, 如同在等式 (2d6) 和 (2d7) 中对于 $\varphi_{th}$ ,  $\varphi_{th} = 1.152\varphi_3$ 。

**3.3** 在包含其方位面内的3 dB射束宽度小于 $120^\circ$ 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2和注4和5):

$$\theta_3 = \frac{31\,000 \times 10^{-0.1G_0}}{\varphi_3} \quad (3a)$$

其中, 所有的参数都按照建议 3.1 中的定义;

**3.4** 在建议3.1到3.2中的天线采用一个向下的电调倾角工作的情况下，在这些建议中的所有公式对以下变量的定义和重新定义有效（见附件5中的§ 2）：

- $\theta$ : 从天线最大增益轴和辐射图围绕其倾斜的轴所确定平面测量到的俯仰角（度）（ $\theta_3$  也是从此平面测量得到）
- $\varphi$ : 从天线最大增益轴和辐射图围绕其倾斜的轴所确定的平面测量到的方位角（度）
- $\theta_h$ : 从天线位置处水平面测量到的俯仰角（度）（ $-90^\circ \leq \theta_h \leq 90^\circ$ ）
- $\varphi_h$ : 从最大增益方位测量到的天线位置处水平面中的方位角（度）（ $-180^\circ \leq \varphi_h \leq 180^\circ$ ）
- $\beta$ : 下倾角，主射束轴在天线位置处水平面以下的正角度（度）。

这些相关如下：

$$\theta = \arcsin(\sin \theta_h \cos \beta + \cos \theta_h \cos \varphi_h \sin \beta), \quad -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (3b)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{-\sin \theta_h \sin \beta + \cos \theta_h \cos \varphi_h \cos \beta}{\cos \theta}\right), \quad 0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \quad (\text{见附件5注1}) \quad (3c)$$

**3.5** 在建议3.1到3.2中的天线采用一个向下的电调倾角工作的情况下，在 $\theta_h$ 的一个电倾斜辐射增益也是采用建议2.5中公式（1e）的 $\theta_e$ 来计算的，分别代替建议3.1和3.2中公式的 $\theta$ ；

**4** 在1 GHz到约3 GHz频率的范围内，在包含使用对于3 dB射束宽度呈圆对称且主瓣天线增益小于20 dBi的情况下，应该使用下面的参考辐射图：

**4.1** 在鉴于考虑到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（见注6）：

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

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）
- $\theta$ : 偏轴角（度）（ $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ）
- $\varphi_3$ : 低增益天线的3 dB射束宽度（度）  
 $= \sqrt{27\,000 \times 10^{-0.1G_0}}$ （度）

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= 1.9 \varphi_3 \text{ (度)} \\ \varphi_2 &= \varphi_1 \times 10^{(G_0 - 6)/32} \text{ (度)} ;\end{aligned}$$

**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 – 在建议3.1条中参数 $k_h$ 、 $k_v$ 、 $k_a$ 和 $k_p$ 的参数值是考虑了从在700 MHz到约6 GHz频率范围内实测的很多扇区天线辐射图推导出来的统计数据。

注3 – 在约20 GHz使用的一个特别设计扇区天线的测量结果显示了与一个更加严格的参考旁瓣辐射图相符合的可能性。需要进一步研究来制定这样一个优化的辐射图。

注4 – 在包含俯仰平面中3 dB射束宽度总是已知的一个天线的情况下，建议使用已知的 $\theta_3$ 作为输入参数。

注5 – 正如在附件2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。

## 附件1

在P-MP固定无线系统中使用的  
全向天线的参考辐射图

## 1 引言

在P-MP固定无线系统的中心站上，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固定无线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 $\theta_3$ 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 $\theta_3$ ：

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

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

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 $\theta$ 角上的总电场强度

$E_e(\theta)$ : 在与该线阵的轴相垂直的 $\theta$ 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 $\theta$ 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

$\lambda$ : 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 $\theta_3$ ;
- 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 $\lfloor x \rfloor$ 的含义是不超过 $x$ 的最大整数的值。

归一化的偏轴鉴别率 $\Delta D$ 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,旁瓣电平约在主瓣电平之下15 dB或者更多,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的。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  
 $G_0 = 10 \text{ dBi}, k = 0$

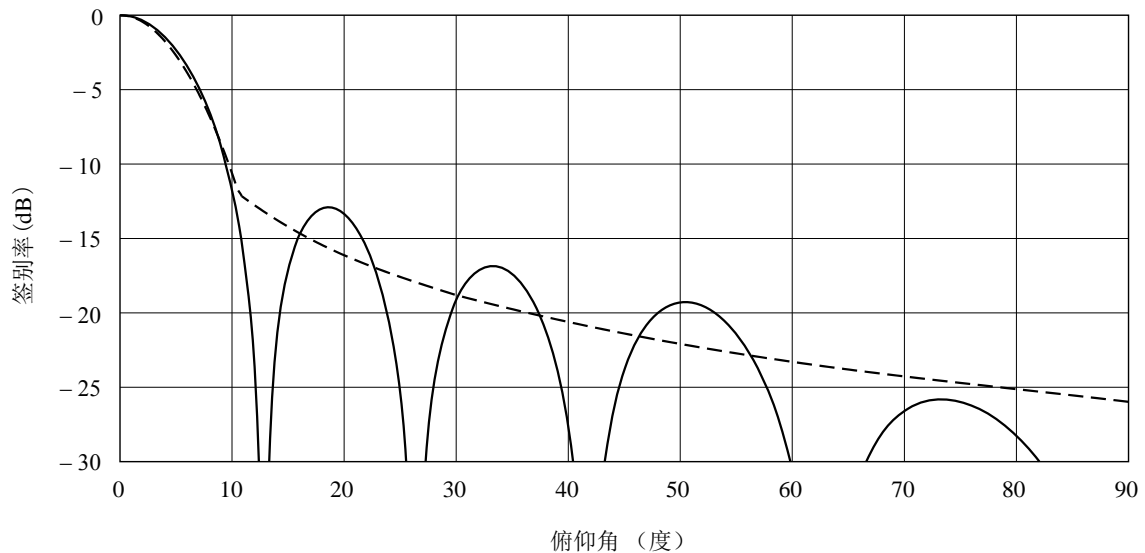
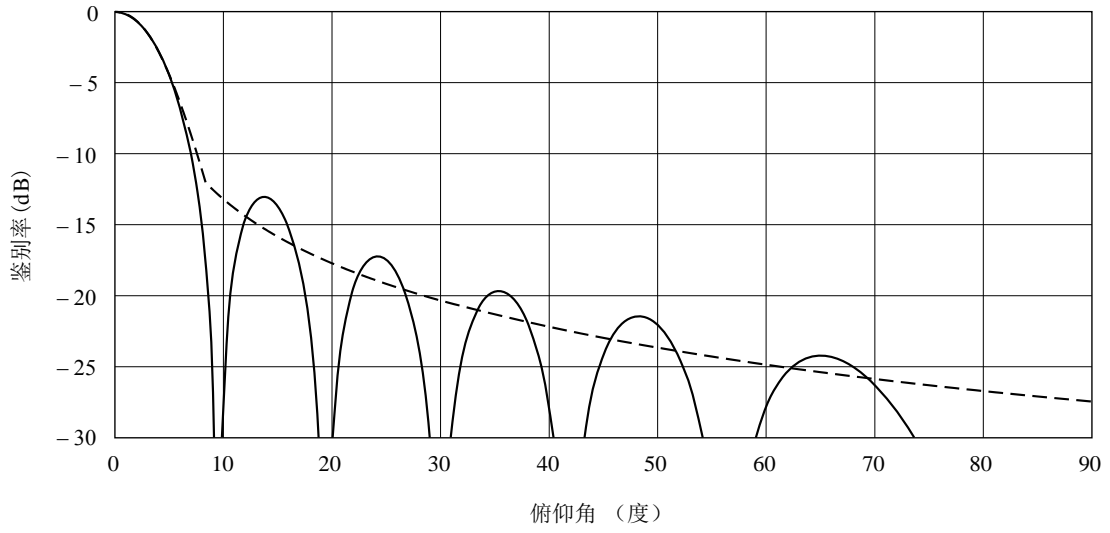




图2

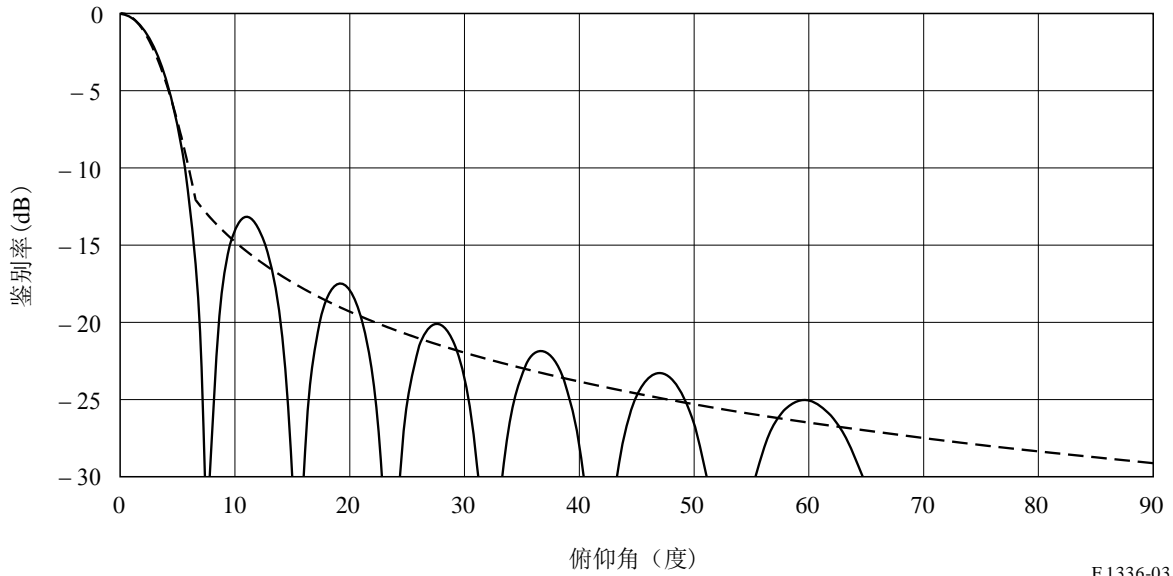
偶极子元的线阵的归一化辐射图与辐射图的近似包络比较  
 $G_0 = 11 \text{ dBi}, k = 0$



F.1336-02

图3

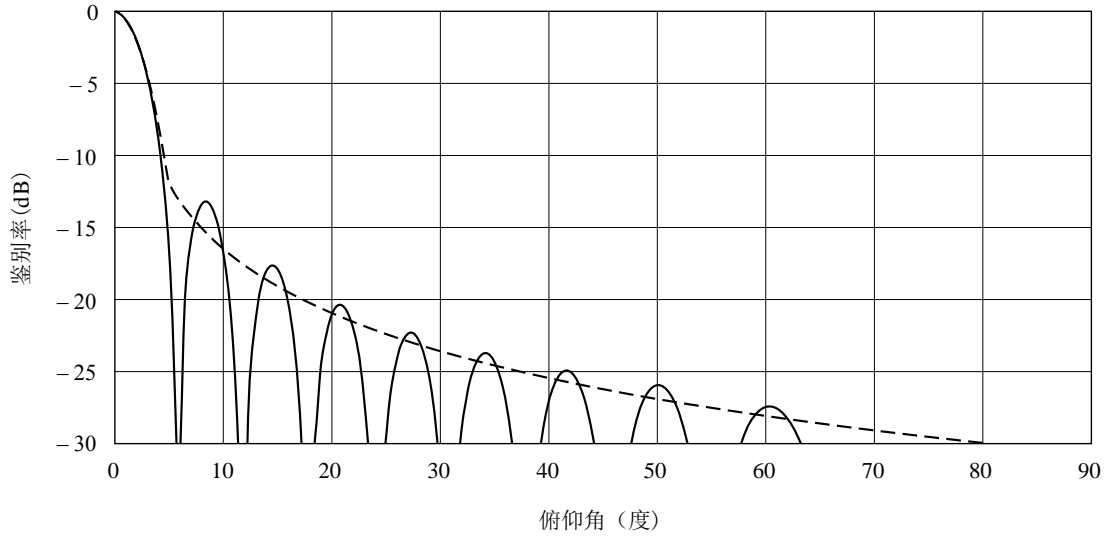
偶极子元的线阵的归一化辐射图与辐射图的近似包络比较  
 $G_0 = 12 \text{ dBi}, k = 0$



F.1336-03

图4

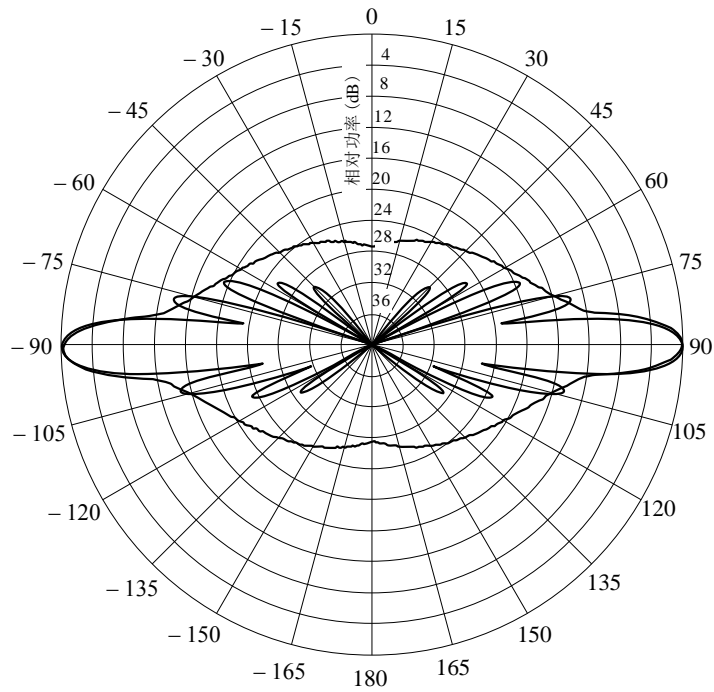
偶极子元的线阵的归一化辐射图与辐射图的近似包络比较  
 $G_0 = 13 \text{ dBi}, k = 0$



F.1336-04

图5

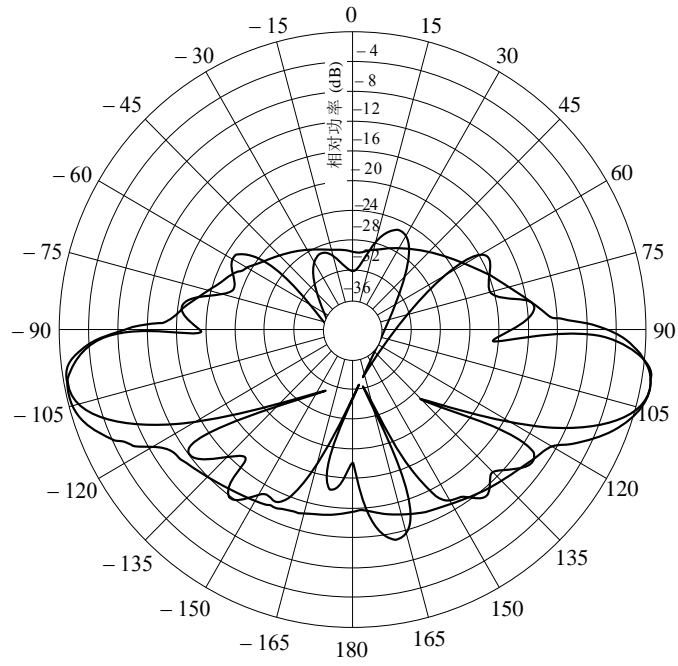
增益为11 dBi和在频带928-944 MHz中工作的 $k = 0$ 的全向天线的实测辐射图  
和参考辐射图包络的比较



F.1336-05

图6

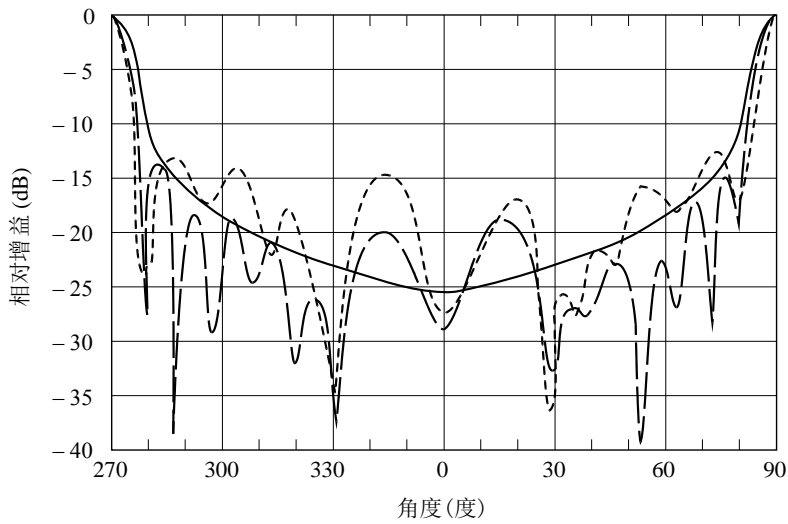
增益为8 dBi和在频带1850-1990 MHz中工作的 $k = 0$ 的全向天线的  
实测辐射图和参考辐射图包络的比较



F.1336-06

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

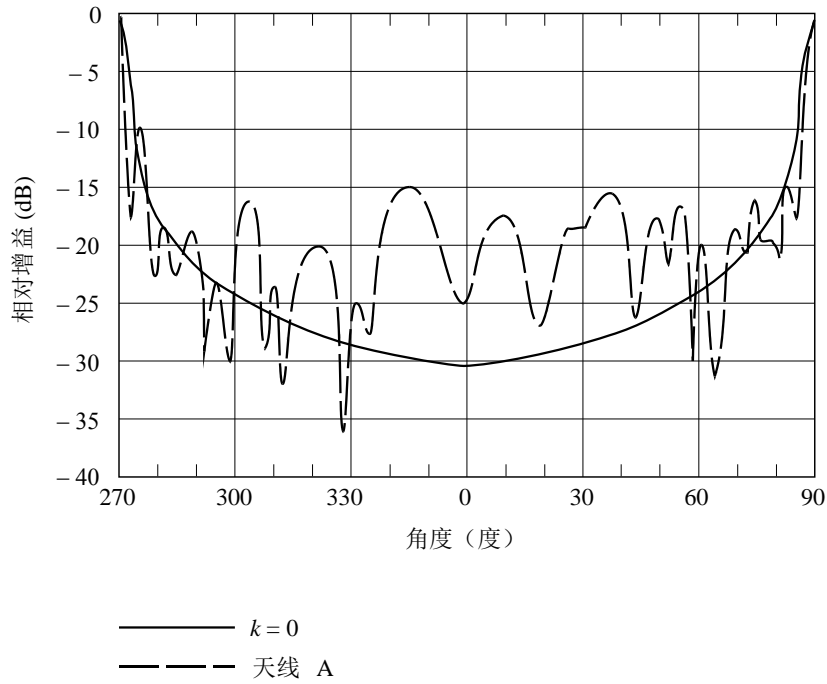


- $k = 0$
- 天线 A
- · - · 天线 B

F.1336-07

图8

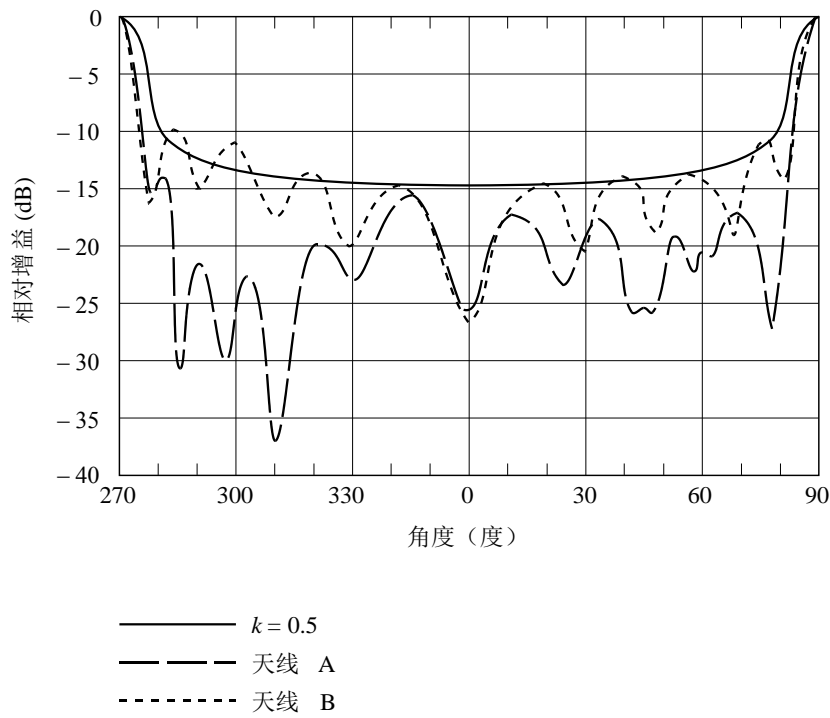
对增益13 dBi和在1.4 GHz频带中工作的全向天线的  
实测辐射图和 $k = 0$ 的参考辐射图包络的比较



F.1336-08

图9

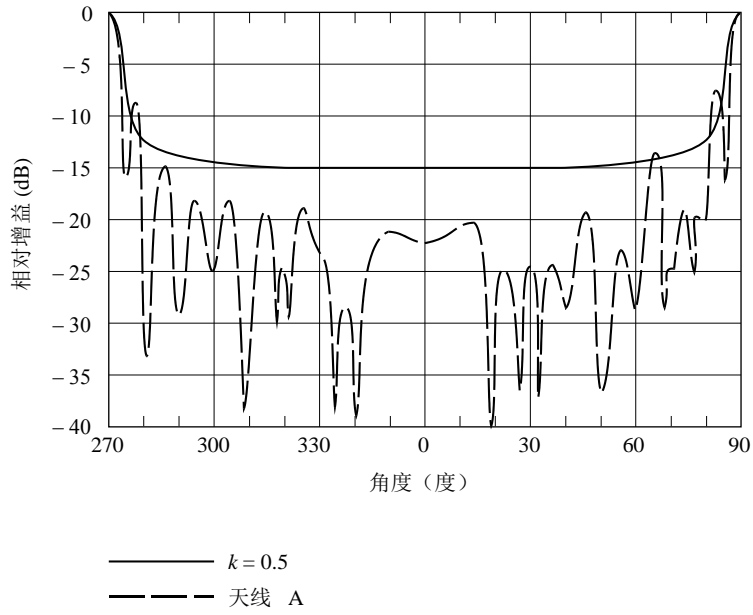
对增益10 dBi和在2.4 GHz频带中工作的全向天线的  
实测辐射图和 $k = 0.5$ 的参考辐射图包络的比较



F.1336-09

图10

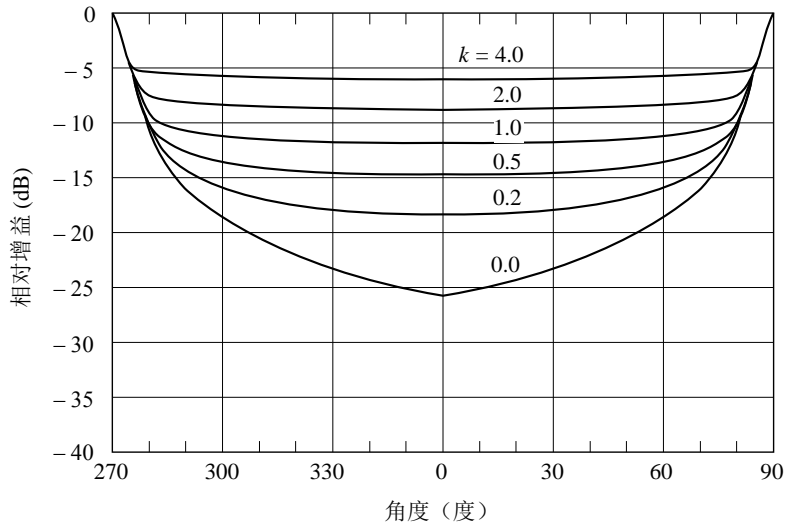
对增益13 dBi和在2.4 GHz频带中工作的全向天线的  
实测辐射图和 $k = 0.5$ 的参考辐射图包络的比较



F.1336-10

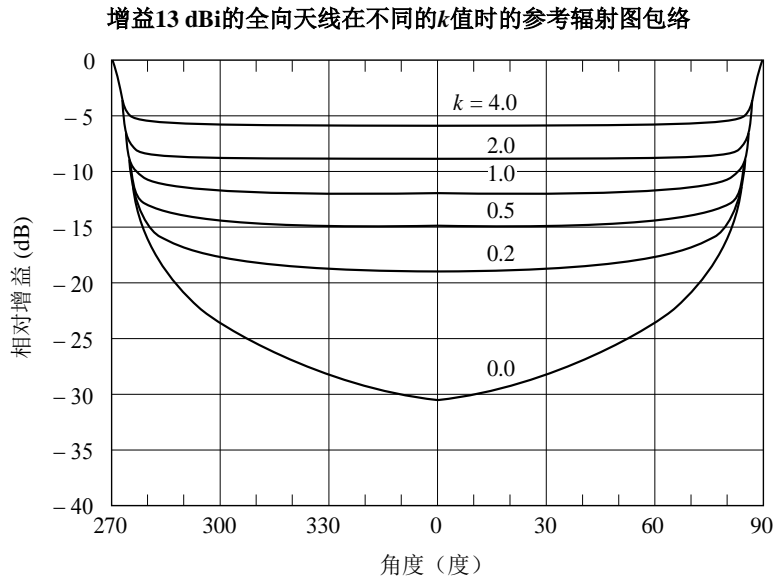
图11

增益10 dBi的全向天线在不同的 $k$ 值时的参考辐射图包络



F.1336-11

图12



F.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

### 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）的公式推导出扇形天线的方向性 $D$ ：

$$D = \frac{U_M}{U_0} \quad (12)$$

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\varphi) F(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi \quad (13)$$

式中：

- $U_M$ : 最大辐射场强
- $U_0$ : 全向点源的辐射场强
- $\varphi$ : 方位平面中的角度
- $\theta$ : 俯仰平面中的角度
- $F(\varphi)$ : 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 矩形的扇区辐射强度

假设矩形的扇区辐射强度函数 $F(\varphi)$ 用下式表示：

$$F(\varphi) = U \left( \frac{\varphi_s}{2} - |\varphi| \right) \quad (14)$$

其中：

$\varphi_s$ : 扇区的射束宽度，

$$\begin{aligned} U(x) &= 1 && \text{对于 } x \geq 0 \\ U(x) &= 0 && \text{对于 } x < 0 \end{aligned} \quad (15)$$

对于矩形或指数形扇区辐射强度函数，假设在俯仰平面中的辐射强度由下式表示：

$$F(\theta) = e^{-a^2\theta^2} \quad (16)$$

其中：

$$a^2 = -\ln(0.5) \times \left( \frac{2}{\theta_3} \right)^2 = \frac{2.773}{\theta_3^2} \quad (17)$$

$\theta_3$ : 天线在俯仰平面中的3 dB射束宽度（度）。

将公式 (14) 和 (16) 代入公式 (13)，就得到：

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U \left( \frac{\varphi_s}{2} - |\varphi| \right) d\varphi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \quad (18)$$

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 $\varphi$ 的积分。然而，估算沿 $\theta$ 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 $\theta$ 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 $\theta$ 的积分：

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \approx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta = \frac{1}{a} \sqrt{\pi} e^{-1/4a^2} \quad (19)$$

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 (19) 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 (19) 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：

$$U_0 = \frac{\varphi_s \theta_3}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{2.773}} \times e^{-\frac{\theta_3^2}{11.09}} \quad (20)$$

表1

在计算平均辐射强度中公式 (19) 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 (14) 和 (16),  $U_M = 1$ 。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 (20) 代入公式 (12), 就得出扇区天线的方向性:

$$D = \frac{11.805}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11.09}} \quad (21)$$

式中角度以弧度来表示。当角度用度表示时, 公式 (21) 变成下式:

$$D = \frac{38750}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (22)$$

请注意, 对全向天线, 公式 (22) 简化成下式:

$$D = \frac{107.64}{\theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (23a)$$

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  $10^{0.1G_0}$  和方向性  $D$  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%。

$$10^{0.1G_0} \approx \frac{107.64}{\theta_3} \quad (23b)$$

## 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:

$$F(\varphi) = e^{-b^2 \varphi^2} \quad (24)$$

其中:

$$b^2 = -\ln(0.5) \times \left( \frac{2}{\varphi_s} \right)^2 \quad (25)$$

和  $\varphi_s$  是扇区的3 dB射束宽度。

将公式 (16) 和 (24) 代入公式 (13), 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 (12), 就得到下面的近似式:

$$D = \frac{11.09}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11.09}} \quad (26)$$

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（26）就变换成下式：

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

将公式（22）和（27）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（27）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（27），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：

$$10^{0.1G_0} \approx \frac{31000}{\varphi_s \theta_3} \quad (28a)$$

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：

$$10^{0.1G_0} \approx \frac{34000}{\varphi_s \theta_3} \quad (28b)$$

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。图的左边上画上交叉号的频带对应于从公式(24)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)

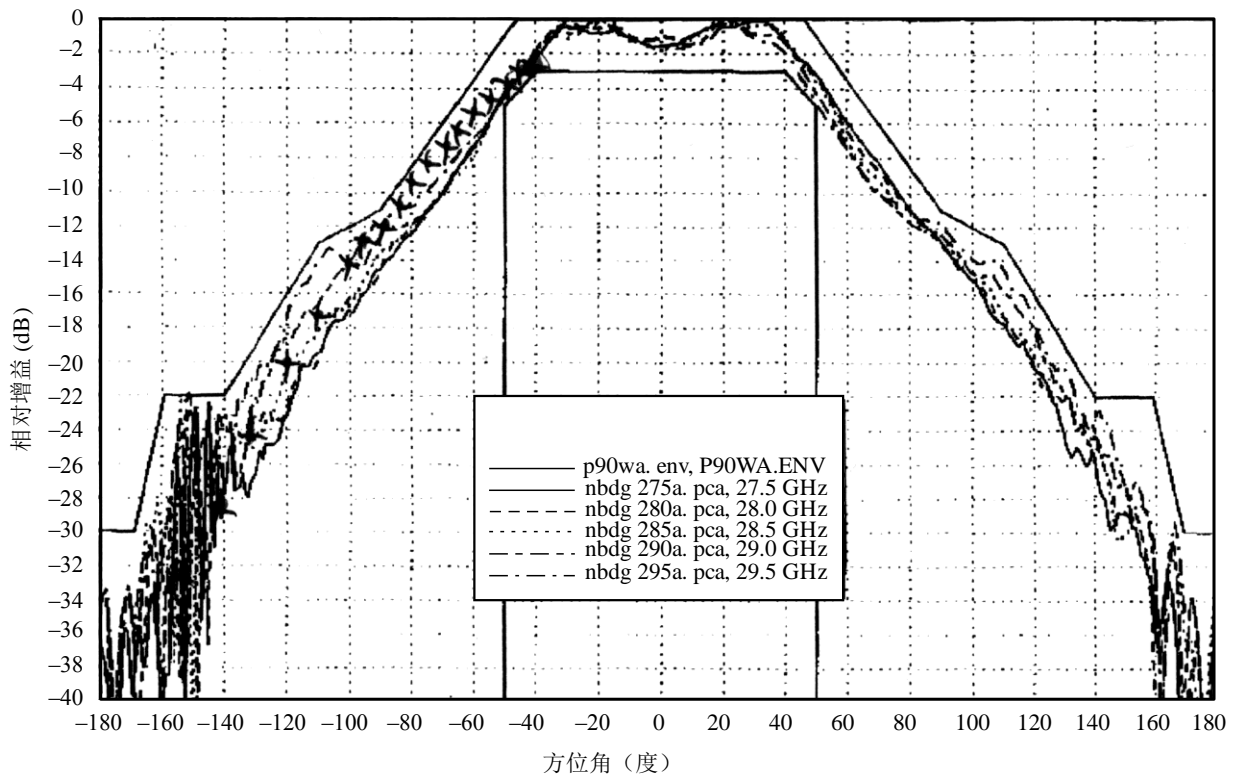
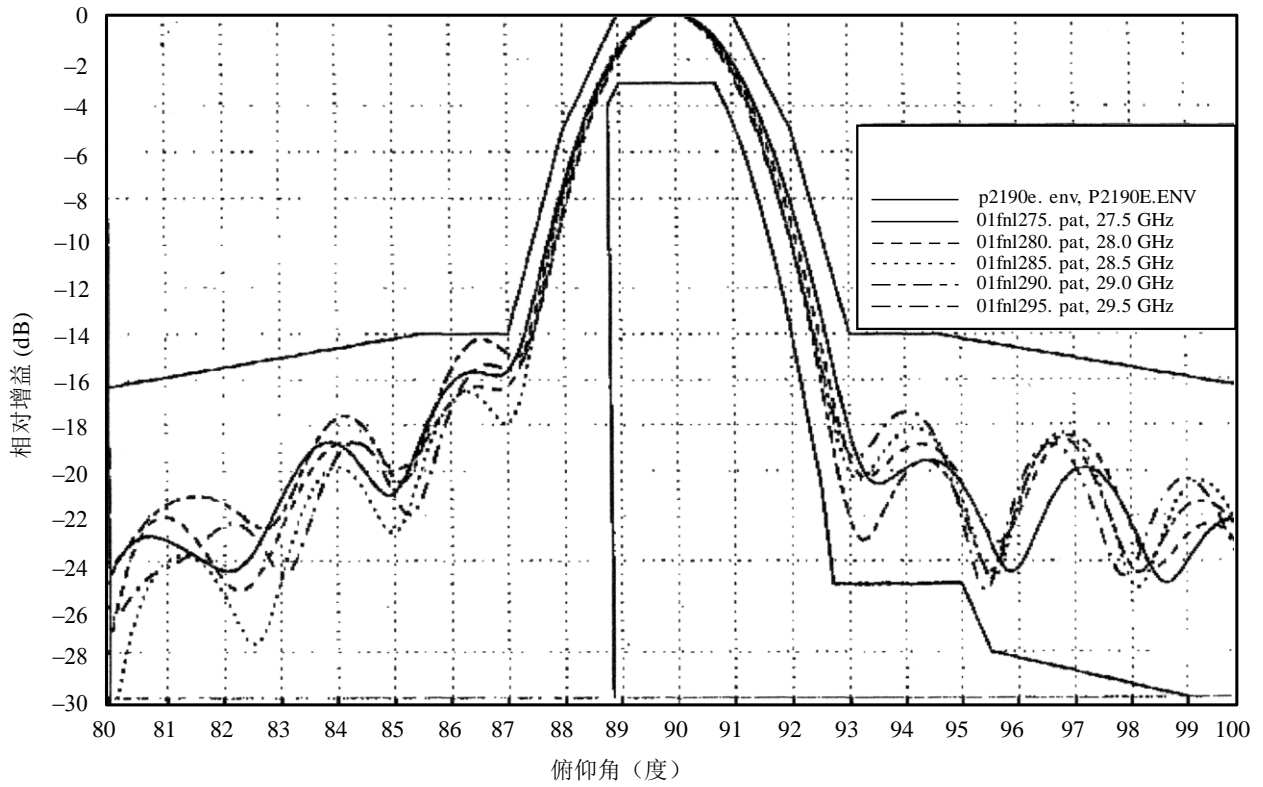


图14

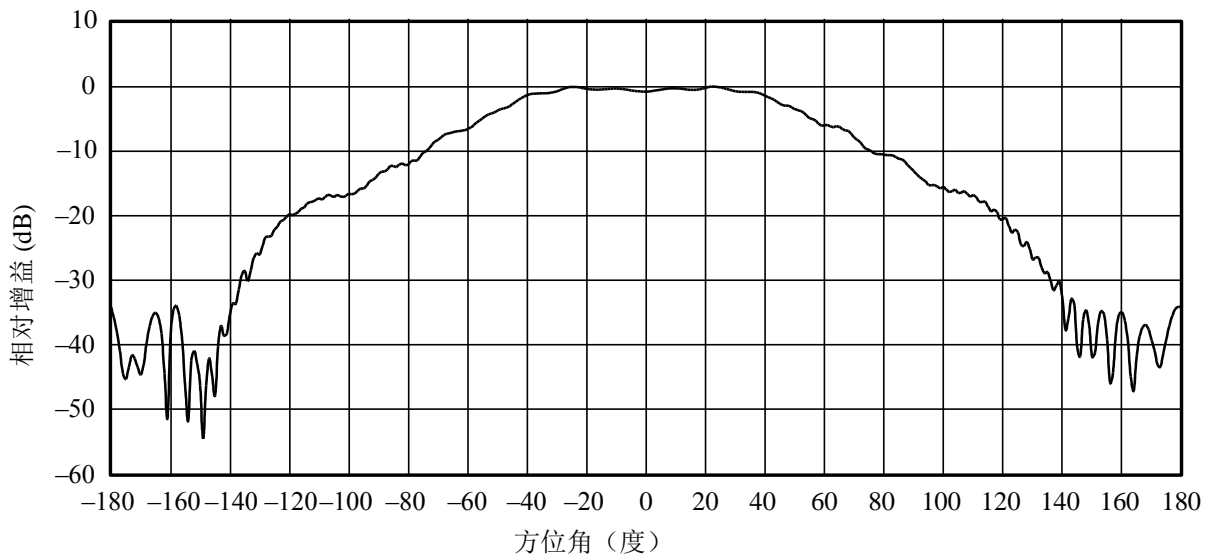
90°扇区天线方位面中的实测辐射图。在27.5 GHz到29.5 GHz频带上测得的辐射图



F.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）

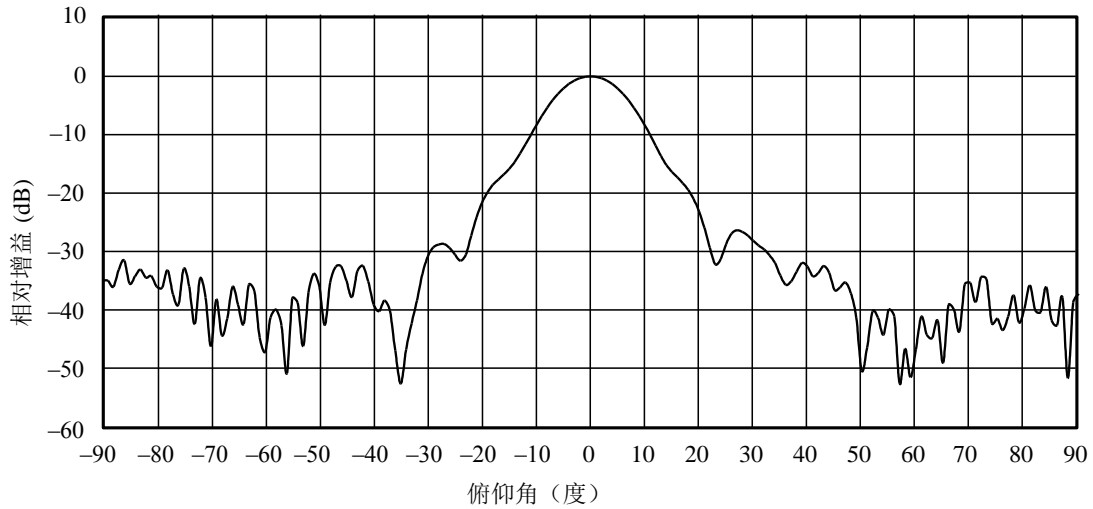


F.1336-15



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）



### 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（23）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：

$$F(\theta) = \cos^{2N} \theta \tag{29}$$

将公式（29）代入公式（13）并假设 $F(\varphi) = 1$ ，得到：

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2N}(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi \tag{30}$$

计算这一二重积分，得出：

$$U_0 = \frac{(2N)!!}{(2N+1)!!} \tag{31}$$

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

所以，方向性变成下式：

$$D = \frac{(2N+1)!!}{(2N)!!} \tag{32}$$

在俯仰平面中的3 dB射束宽度由下式给出：

$$\theta_3 = 2 \cos^{-1}(0.5^{1/2N}) \tag{33}$$

表2给出了使用公式(23)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(32)和(33)中所使用的方向性之间的比较。可以看出,用公式(23a)得到的结果似优于用公式(32)和(33)得到的结果。在所有情况下,公式(23a)比用公式(32)和(33)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(23a)计算出的全向天线的方向性和用公式(32)和(33)计算出的方向性的比较

2N	$\theta_3$ (度) (公式(33))	方向性 (dB) (公式(32))	方向性 (dB) (公式(23a))	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

表2 (续)

2N	$\theta_3$ (度) (公式 (33))	方向性 (dB) (公式 (32))	方向性 (dB) (公式 (23a))	相对误差 (%)	误差 (dB)
46	19.8431	7.4030	7.3906	-0.17	-0.0124
48	19.4274	7.4925	7.4806	-0.16	-0.0119
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：

$$D = \frac{k}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (34)$$

其中：

$$\begin{aligned} k &= 38750 && \text{对于 } \varphi_s > 120^\circ \\ k &= 36400 && \text{对于 } \varphi_s \leq 120^\circ \end{aligned} \quad (35)$$

而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 $\varphi_s=3$  dB射束宽度（度），而 $\theta_3$ 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 (23b)）：

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

在扇区角在 $120^\circ$ 左右或更小和俯仰平面中的3 dB射束宽度小于 $45^\circ$ 左右（见公式（28a））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：

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

为了确定怎样处理在公式（35）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3

#### 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。特别是在分析扇区天线中，重要的是要观察方位角和俯仰角的可行范围：

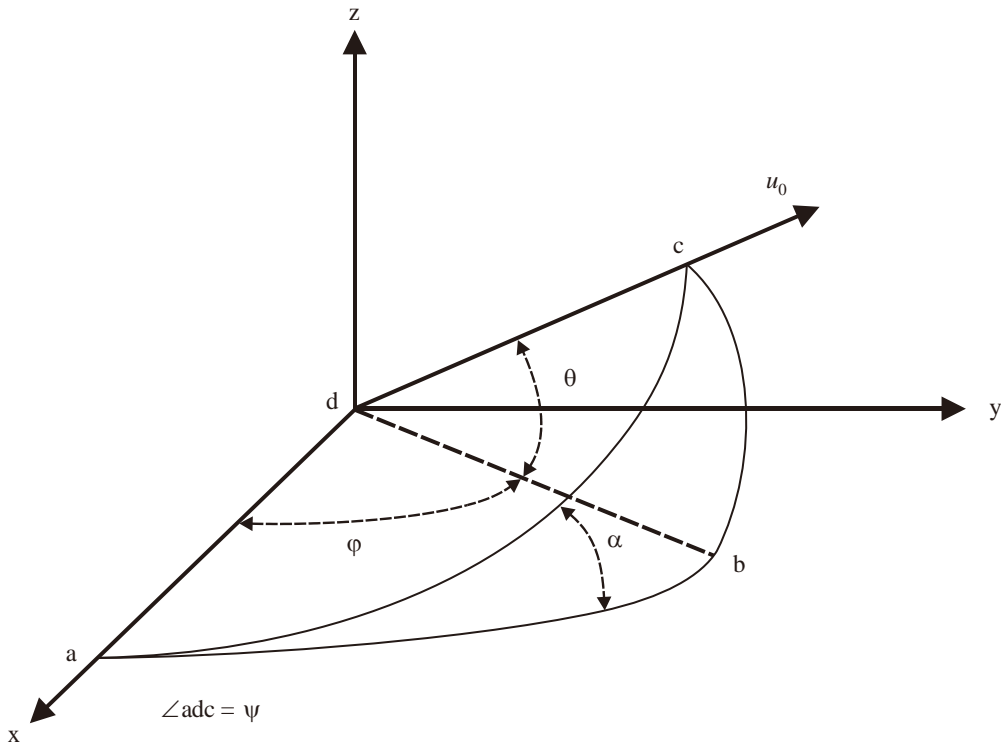
$$\begin{aligned} -180^\circ &\leq \varphi \leq +180^\circ \\ -90^\circ &\leq \theta \leq +90^\circ \end{aligned}$$

还要观察角 $\alpha$ 的可行范围是

$$-90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ$$

图17

给定了相关的方位角和俯仰角的情况下确定偏视轴角



F.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18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17）测量时得到的天线射束宽度的函数。

知道了扇区天线在方位面和俯仰面中的3 dB射束宽度（度） $\varphi_3$ 和 $\theta_3$ 以后，暂定用下式给出轴向增益的数值（见建议3.3和公式（28a））：

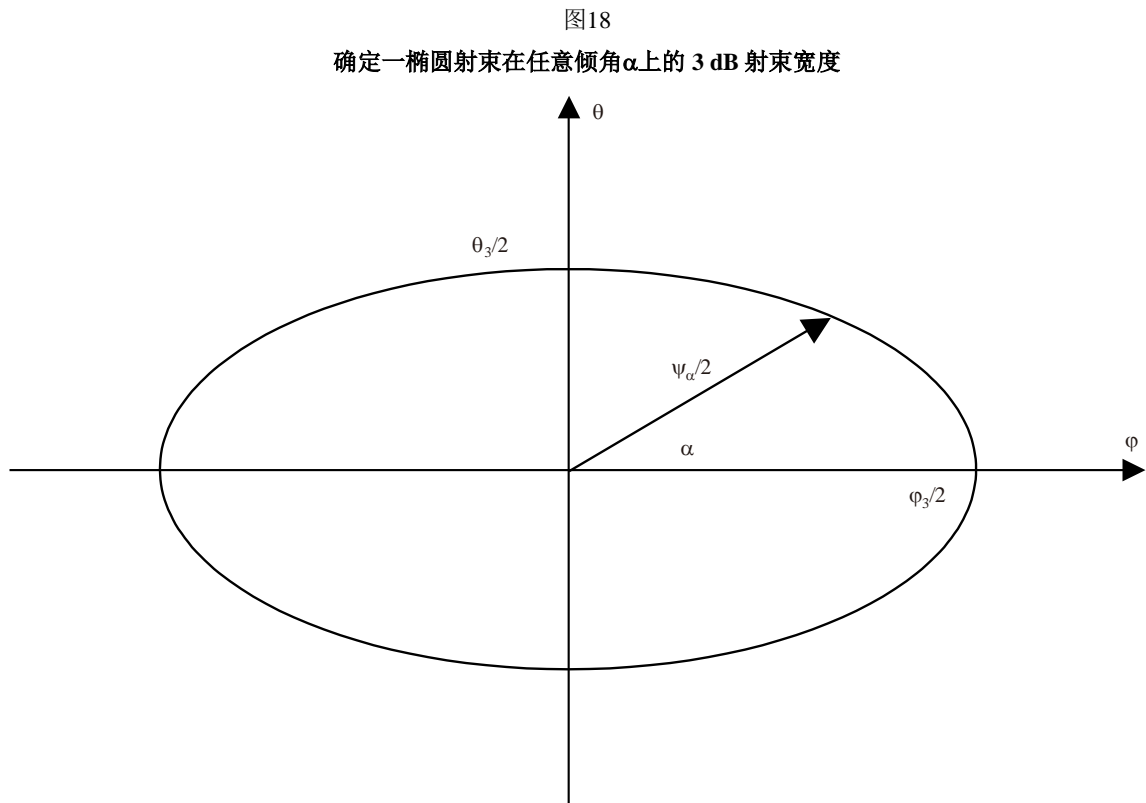
$$10^{0.1G_0} \approx \frac{31000}{\varphi_s \theta_3} \quad (36)$$

计算扇区天线在任意偏轴角 $\varphi$ 和 $\theta$ 上的增益过程中，第一步是确定 $\alpha$ 的值。参照图17和认识到abc是一正球面三角形，所以 $\alpha$ 可以由下式求出：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tan \theta}{\sin \varphi}\right), \quad -90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ \quad (37a)$$

而adc平面中的偏轴角可以由下式求出：

$$\psi = \arccos(\cos \varphi \cos \theta), \quad 0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \quad (37b)$$



F.1336-18

知道了该射束为椭圆形后，可以由下式确定扇区天线在图17的 $\alpha$ 平面中的3dB射束宽度：

$$\Psi_{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\theta_3}\right)^2}} \quad (38)$$

根据这个计算方法，替代方式（见附件6）提供了6 GHz到约70 GHz频率范围内的参考辐射图（见建议3.2）。

## 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。侧重于在一个扇区天线辐射图建模中观测方位角和俯仰角可行范围的重要性。需要进一步的研究来展示这里所用的参考增益表示（公式（2d1）-（2f）、（3a）和（36））对扇区天线可行的方位和俯仰平面上增益和射束宽度的范围。



## 附件4

在干扰统计评定中使用的P-MP FWS的全向天线的  
通用平均辐射图的数学模型

## 1 引言

本建议书的正文（在建议2.2中）给出了代表全向（在方位面内）天线的平均旁瓣电平的参考辐射图，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 $-90^\circ$ 到 $90^\circ$ 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）：

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left( \frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{对于 } 0 \leq \theta < \theta_4 \\ G_0 - 12 + 10 \log(k+1) + F(\theta) & \text{对于 } \theta_4 \leq \theta < \theta_3 \\ G_0 - 12 + 10 \log \left[ \left( \frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1.5} + k \right] + F(\theta) & \text{对于 } \theta_3 \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (39a)$$

其中：

$$F(\theta) = 10 \log \left( 0.9 \sin^2 \left( \frac{3\pi\theta}{4\theta_3} \right) + 0.1 \right) \quad (39b)$$

式中 $\theta$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 、 $G_0$ 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。

## 附件5

## 当一个天线的视轴被机械或电调向下时计算该天线 在任意偏轴角上辐射图的程序

### 1 引言

本附件介绍了计算一个以机械或电调方式向下倾斜的扇区天线辐射方向图的方法。在§ 2中介绍了对机械方式的分析，而电方式则是在§ 3中介绍。

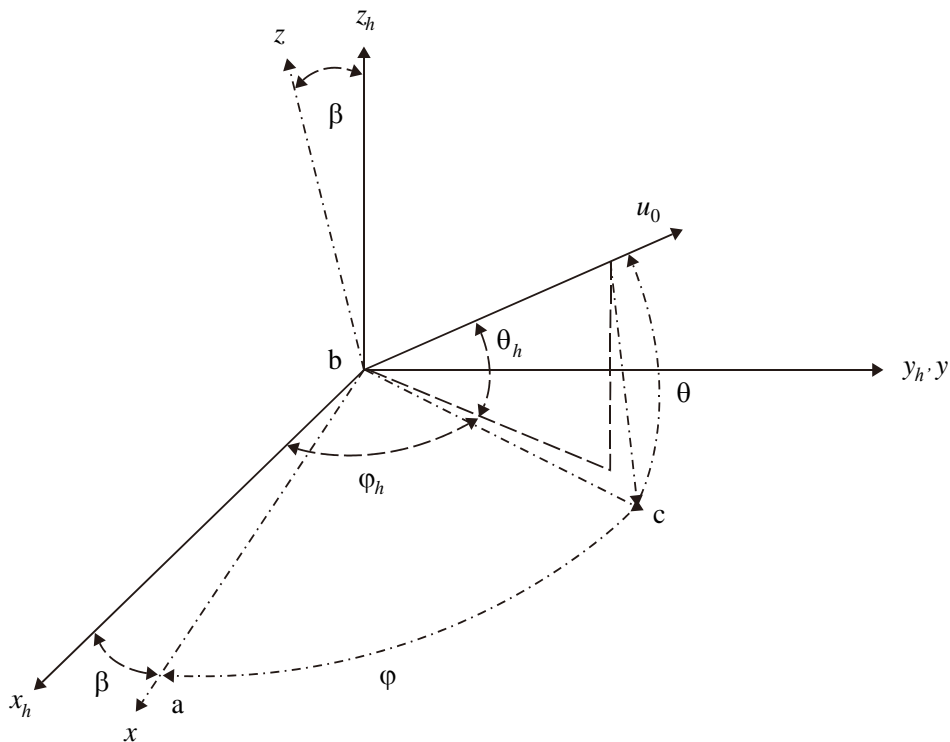
### 2 对机械下倾的分析

在图19中显示了决定处于任意离轴角的一个扇区天线增益的基本几何形状。假设该天线位于球面坐标系的中心；最大辐射方向沿着x轴。如果该天线向下倾斜，就变得有必要区分基于天线的坐标 $(\theta, \varphi)$ 和参照水平面的坐标 $(\theta_h, \varphi_h)$ 。这二个坐标系之间的关系可以通过考虑与它们相关联的直角坐标系来充分地确定。

如果通过围绕y轴旋转坐标系使该天线向下倾斜到一个指定的倾角，则x-y平面包含了该扇区天线的主射束轴，并且此平面沿着y轴横截本地的水平面。倾角 $\beta$ 被定义为在该天线位置的主射束轴低于水平面的正角度（度）。

图 19

用于考虑一个倾斜扇区天线辐射方向图的右旋坐标系



在位于天线处的一个  $x$  轴位于包含该天线最大增益的垂直面上的直角坐标系中，单位矢量的坐标给出如下：

$$\begin{aligned} z_h &= \sin \theta_h \\ x_h &= \cos \theta_h \cos \varphi_h \\ y_h &= \cos \theta_h \sin \varphi_h \end{aligned} \quad (40)$$

请注意，这是一个非标准球面坐标系，其中俯仰角的测量在  $-90^\circ$  到  $90^\circ$  的范围中。这是与建议书正文和前面各附件中所用相同的约定。

考虑图19的直角坐标系，它包含了该天线主射束轴并且绕  $x$  轴向下旋转一个  $\beta$  度的角。在此坐标系中的单位矢量具有如下给出的坐标  $x$ 、 $y$  和  $z$ ；

$$\begin{aligned} z &= z_h \cos \beta + x_h \sin \beta \\ x &= -z_h \sin \beta + x_h \cos \beta \\ y &= y_h \end{aligned} \quad (41)$$

在参照主射束轴和  $y$  轴所确定的相应球面坐标系中，球面角通过  $\sin \theta = z$  和  $\tan \varphi = y/x$  与  $x$ 、 $y$  和  $z$  相关。对介于  $-180^\circ$  到  $+180^\circ$  的  $\varphi$  值的计算由  $\arctan(y/x)$  给出，带有根据  $x$  和  $y$  的代数符号的可能修正值。

或者，利用  $x$ 、 $y$  和  $z$  的平方和是 1 的特性，可以显示出在一个限定的  $\varphi$  值范围上  $\cos \varphi = x/\cos \theta$ 。将公式 (40) 带入 (41)，然后根据关系式  $z = \sin \theta$  和  $x = \cos \theta \cos \varphi$  替代结果的  $z$  和  $x$  值，就得到以下球面坐标值得表达式（见注1）：

$$\begin{aligned} \theta &= \arcsin(z) = \arcsin(\sin \theta_h \cos \beta + \cos \theta_h \cos \varphi_h \sin \beta), & -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ \varphi &= \arccos\left(\frac{x}{\cos \theta}\right) = \arccos\left(\frac{(-\sin \theta_h \sin \beta + \cos \theta_h \cos \varphi_h \cos \beta)}{\cos \theta}\right), & 0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \end{aligned} \quad (42)$$

注1 – “arccos”函数的范围是从  $0^\circ$  到  $180^\circ$ 。但是，这并不限制此方法的适用性，因为所使用的天线辐射图相对于  $x$ - $z$  平面和  $x$ - $y$  平面显示出镜像对称。

建议3.4中的公式来自公式 (42)。

### 3 建议2.5和3.5中的辐射方向图公式对电调倾斜天线的应用

在电调倾斜的情况下，辐射图公式理论上应该是倾角  $\beta$  的一个函数，它取决于从垂直放置天线单元辐射的通量相移量。但是，考虑到  $\beta$  实际上通常是一个小的数值（例如， $15^\circ$  以内），以下假设可以用于简化。

因为在天顶点和天底点处的倾斜辐射增益必须要分别保持相同，而不管倾角  $\beta$  如何（见图20），与倾斜之前的辐射图相比，实际的辐射图在最大增益轴以上或以下略微扩展或收缩，如图20中的实线辐射图所示。

可以采用一个参数转换来用另一个辐射图的那些（在图 20 中以虚线表示）近似地表示此辐射图的增益（以实线表示）。此虚线辐射图是对从建议 2.1、2.2、3.1 和 3.2 中的公式计算出来的各情况下原始辐射图从一个理想均匀俯仰角偏移 $\beta$ 推算出来的。

因此，采用在建议（2.1、2.2、3.1和3.2）公式中的参数变换推算电调倾斜辐射图如下：  
相对于最大增益轴的俯仰角 $\theta$ 可以表示为：

$$\theta = \theta_h + \beta \quad (43)$$

其中，

$\theta_h$ : 为了倾斜辐射图从在天线位置的水平面上测量的俯仰角（度）（ $-90^\circ \leq \theta_h \leq 90^\circ$ ）

$\beta$ : 如本附件§ 2或建议2.5和3.4中所定义的电调倾角。

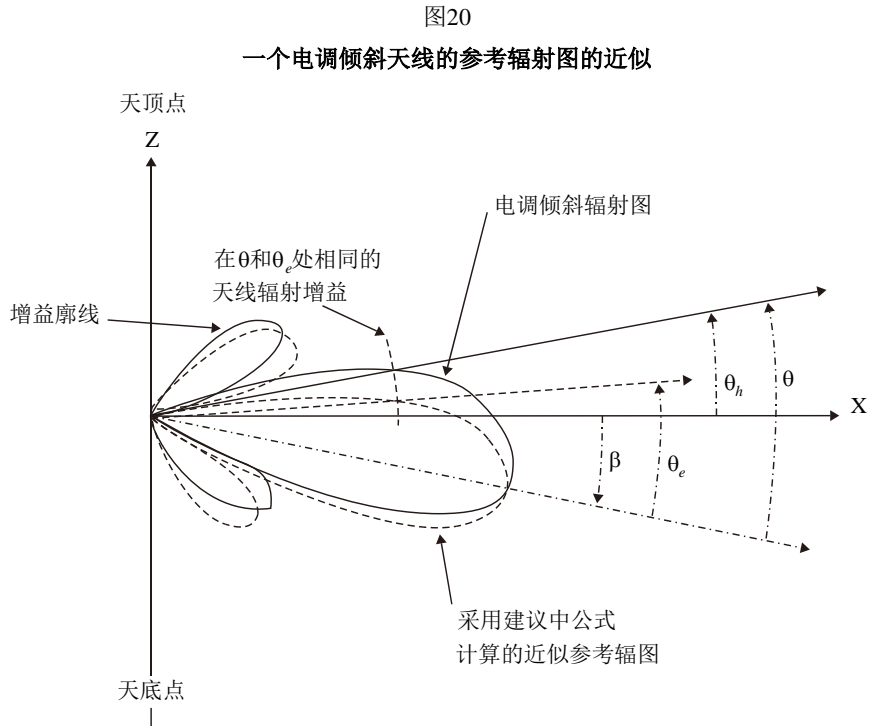
为了将建议2.1、2.2、3.1和3.2中的参考辐射图公式应用于电调倾斜天线，根据以上假设，引入了一个压缩/扩展比 $R_{CE}$ 。此压缩/扩展比 $R_{CE}$ 可以定义为：

$$R_{CE} = \frac{90}{90 \pm \beta} \quad (44)$$

用来采用建议2.1、2.2、3.1和3.2中的公式计算在 $\theta_h$ 处倾斜辐射增益的俯仰角 $\theta_e$ 可以表示如下：

$$\begin{aligned} \theta_e = \theta \cdot R_{CE} &= \frac{90 \cdot \theta}{90 + \beta} = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 + \beta} && \text{for } \theta_h + \beta \geq 0 \\ \theta_e = \theta \cdot R_{CE} &= \frac{90 \cdot \theta}{90 - \beta} = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 - \beta} && \text{for } \theta_h + \beta < 0 \end{aligned} \quad (45)$$

电调倾斜辐射图是通过采用公式（45）的 $\theta_e$ 代替建议3.1和3.2的扇区天线公式中与建议2.1和2.2的全向天线公式中的 $\theta$ 来计算的。



## 附件6

### 正文部分建议3.2中确定的计算6 GHz到约70 GHz频率范围中的 扇区天线参考辐射图的方法

#### 1 引言

本附件提供了对本建议书正文中建议3.2所指定的6 GHz到约70 GHz频率范围内用于扇区天线参考辐射图公式的参数的定义和补充解释。在本附件中提出的公式是从根据扇区天线测量数据的实际分析中得出的。

#### 2 考虑

在本建议书前一版本中指定的扇区天线参考辐射图与实测的辐射图符合不好，特别是在方位平面中的主瓣之外，尽管指定的辐射图对俯仰平面相当好地表示了对实测数据的近似。

由于在3 dB射束宽度值之间的差别，即在方位和俯仰平面中的 $\varphi_3$ 和 $\theta_3$ ，根据这些数值计算的辐射图导致在交叉点 $(\varphi, \theta) = (\pm 180, 0)$ 的不同增益，尽管在二个平面中的增益值理论上在此交叉点应该相等。

因此要注意，作为这样不一致的一个原因，在推算扇区天线辐射图的算法中所采纳的基本数学模型和相关的假设（如在附件3的图17和18中所示），可能不适用于整个三维角度。

考虑以上各点，如以下所解释的，已经采纳当前的算法来克服计算和实测辐射图之间的一致。

在 $\psi$ 大于约 $90^\circ$ 的角度范围中，建议分别将3 dB射束宽度值、 $\varphi_3$ 和 $\theta_3$ 修改为可变参数 $\varphi_{3m}$ 和 $\theta_{3m}$ ，这样来逐步得到在交叉点（ $\pm 180, 0$ ）的单一数值 $\varphi_{3(180)}$ ，因为在此点的不一致是由 $\varphi_3$ 和 $\theta_3$ 之间的差别所引起。

作为一个可能的 $\varphi_{3(180)}$ 值，可以采纳现有的常数 $\theta_3$ ，假设在俯仰和方位平面之间交叉点处不再有差别，并且，只要我们认为该交叉点被包括在俯仰平面中，这是最简单的选择。

因此，

$$\varphi_{3(180)} = \theta_3 \text{ (见注 1)} \quad (46)$$

注1 – 当可以得到一个参考天线的前后比（FBR）时，还有可能采用如下的 $\varphi_{3(180)}$ ：

$$\varphi_{3(180)} = \frac{180}{10^{(FBR-\lambda_k)/15}} \quad (47)$$

关于方位平面，因为辐射图的差别对峰值旁瓣辐射图开始在对应用于 $x = 1$ 的角度，而对平均旁瓣是在对应用于 $x = 1.152$ 的角度，在此点的方位角 $\varphi_{th}$ 表示如下：

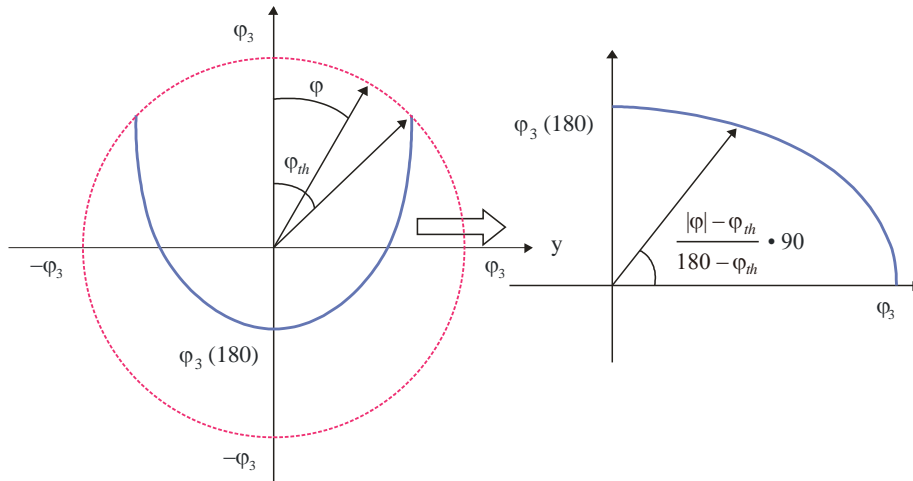
$$\varphi_{th} = \varphi_3 \quad \text{(对于峰值旁瓣辐射图)} \quad (48a)$$

$$\varphi_{th} = 1.152\varphi_3 \quad \text{(对于平均旁瓣辐射图)} \quad (48b)$$

最近定义的3 dB射束宽度变量 $\varphi_{3m}$ 逐渐从在 $\pm\varphi_{th}$ 的 $\varphi_3$ 改变为在 $\pm 180^\circ$ 方位角的 $\varphi_{3(180)}$ 。给定此改变轨迹是椭圆的一部分，方位角 $|\varphi|$ 和 $\varphi_{th}$ 之间的差别被以因子 $90/(180 - \varphi_{th})$ 压缩，如图21所示。则 $\varphi_{3m}$ 一般由下式表示，即，在正文部分中的公式（2d7）：

$$\varphi_{3m} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\varphi_{3(180)}}\right)^2}} \quad \text{对于 } \varphi_{th} < |\varphi| \leq 180^\circ \quad (49)$$

图21  
确定椭圆公式的压缩因子



F.1336-21

因为在范围  $\varphi_{th} < \varphi \leq 90^\circ$  中的  $\varphi_{3m}$  值如公式 (49) 所描述, 要求随之发生的对本建议书以前版本建议3.1中公式 (2a3) 的修改如下:

$$\psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\varphi_{3m}}\right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{对于 } 0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ \quad (50)$$

其中:

$$\varphi_{3m} = \varphi_3 \quad \text{对于 } 0^\circ \leq \psi \leq \varphi_{th}$$

此外, 在俯仰平面中  $90^\circ$  和  $180^\circ$  之间角度  $\psi$  之内 (在此情况下  $\theta = 180 - \psi$ ), 定义了以下新的变量  $\theta_{3m}$ , 它逐渐从在  $90^\circ$  的  $\theta_3$  改变为在  $180^\circ$  的  $\varphi_{3(180)}$ 。给定改变的轨迹是椭圆的一部分,  $\theta_{3m}$  通常由以下公式来表示 (注意到, 在  $\varphi_{3(180)} = \theta_3$  的情况下,  $\theta_{3m}$  是一个常数值  $\theta_3$ ):

$$\theta_{3m} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \theta}{\varphi_{3(180)}}\right)^2 + \left(\frac{\sin \theta}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{对于 } 90^\circ < \psi \leq 180^\circ \quad (51)$$

以相同的方式, 考虑公式 (51), 在范围  $\psi$  大于  $90^\circ$  的情况下,  $\psi_\alpha$  的数值不取决于  $\alpha$ , 而是取决于  $\theta$ , 而且由以下公式来表示:

$$\psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \theta}{\varphi_{3m}}\right)^2 + \left(\frac{\sin \theta}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{对于 } 90^\circ < \psi \leq 180^\circ \quad (52)$$

以上公式 (50) 和 (52) 被正文中的公式 (2d3) 引用。

## 附件7

## 计算正文部分建议3.1中规定的400 MHz到约6 GHz频率范围中的扇区天线参考辐射图的方法

### 1 引言

本附件提供了对建议3.1所指定的400 MHz到约6 GHz频率范围内扇区天线参考辐射图的公式和参数的定义和补充解释。

本建议书前一版本采纳了在方位和俯仰平面中采用相同的公式和相同的 $k$ 参数来计算参考辐射图的算法。因此，参考辐射图很难很好地适合在方位和俯仰平面中的实测数据。

为了克服这个问题，当前版本采纳了一种新的方法，其中对方位或俯仰平面中每个辐射图的计算采用了分别的公式，它们不是基于本建议书附件3中所定义的一个椭圆射束3 dB射束宽度假设。

### 2 考虑

为了引入新的参考辐射图的基本公式，对扇区天线结构进行了以下几点假设：

- 天线单元在垂直方向被布置成像全向天线一样的阵列；
- 天线单元在水平方向是扇区方向性的。

在全向天线结构的基础上，在一个阵列中辐射单元的垂直整体辐射图仅仅是俯仰角的一个函数，因为阵列的取向是完全垂直的。因此，垂直辐射图不受方位角变化的影响。对于采用双极辐射单元的全向天线，不管方位角如何，垂直天线辐射图是相同的。另一方面，对于辐射单元是方向性的扇区天线，在任意方位角 $\varphi$ 的辐射图对于在 $\varphi = 0^\circ$ 的辐射图以一个压缩因子 $R$ 被相对减少，它表示水平增益随着方位角从 $0^\circ$ 移到 $\varphi$ 的压缩程度。

同时，水平辐射图不受俯仰角变化的影响，然后，一个相对水平天线dB增益（一个负增益）在任何一个方位角都是相同的值，而无论俯仰角如何。相应地，在任意点 $G_{ar}(\varphi, \theta)$ 的一个相对水平增益表示如下：

$$G_{ar}(\varphi, \theta) = G_{ar}(\varphi, 0^\circ) \quad (\text{dB}) \quad (53)$$

$\varphi$ : 与水平面中最大增益相关的方位角（度）（ $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ ）

$\theta$ : 当最大增益在本地水平面中时，与该平面相关的俯仰角（度）（ $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ）。



因此，以上所提到的压缩比  $R$  可以被描述为：

$$R = \frac{G_{ar}(\varphi, 0^\circ) - G_{ar}(180^\circ, 0^\circ)}{G_{ar}(0^\circ, 0^\circ) - G_{ar}(180^\circ, 0^\circ)}$$

$R$ ：随着方位角从  $0^\circ$  移到  $\varphi$  的水平增益压缩比，  
而且在任意一点  $G_{er}(\varphi, \theta)$  的一个垂直相对增益表示如下：

$$G_{er}(\varphi, \theta) = R \cdot G_{er}(0^\circ, \theta) \quad (\text{dB}) \quad (54)$$

作为一个结果，在任意一点的扇区天线相对增益被描述为公式 (53) 和 (54) 的 dB 和，而作为以 3 dB 射束宽度归一化方向的一个函数的相对于一个全向天线的增益  $G(\varphi, \theta)$ ，即正文中的公式 (2a1)，显示为以下公式：

$$G(\varphi, \theta) = G_0 + G_{hr}(x_h) + R \cdot G_{vr}(x_v) \quad (\text{dBi}) \quad (55)$$

$G_0$ ：在方位平面中的最大增益 (dBi)

$G_{hr}(x_h)$ ：在归一化方向  $(x_h, 0)$  上方位平面中的相对天线增益 (dB)

$$x_h = |\varphi|/\varphi_3$$

$\varphi_3$ ：在方位平面中的 3 dB 射束宽度 (度) (通常等于扇区射束宽度)

$G_{vr}(x_v)$ ：在归一化方向  $(0, x_v)$  上俯仰平面中的相对天线增益 (dB)

$$x_v = |\theta|/\theta_3$$

$\theta_3$ ：在俯仰平面中的 3 dB 射束宽度 (度)；

在此情况下， $R$ ，即正文中的公式 (2a2) 可以描述如下：

$$R = \frac{G_{hr}(x_h) - G_{hr}\left(\frac{180^\circ}{\varphi_3}\right)}{G_{hr}(0) - G_{hr}\left(\frac{180^\circ}{\varphi_3}\right)} \quad (56)$$

此外，通过采用具有扇区方向的天线单元，在方位平面中的主瓣辐射图可以被特别显示为  $-12x_h^2$ ，单位是 dB，因为此公式已经在 3 dB 射束宽度内显示了对过去研究中在方位平面中实测天线辐射数据的一个良好近似。

此外，假设相对参考辐射增益  $G_{hr}(x_h)$  和  $G_{vr}(x_v)$  具有相对最小值。根据扇区天线的结构，此最小值在方位平面中出现在  $\pm 180^\circ$  附近，而在俯仰平面中出现在  $\pm 90^\circ$  附近，且最小增益的二个值在理论上相同。对于相对最小增益  $G_{180}$ ，选择一个采用以下公式在俯仰平面中点  $(\varphi, \theta) = (0^\circ, \pm 180^\circ)$  处计算的数值应该是合适的，因为该计算值非常好地适合了在过去研究中的很多组测量数据的俯仰辐射图：

$$G_{180} = -\lambda_k - 15 \log(180^\circ/\theta_3) \quad \text{对于峰值旁瓣辐射图} \quad (57)$$

其中：

$$\lambda_k = 12 - 10 \log(1 + 8k_p)$$

$k_p$ : 达到峰值旁瓣辐射图相对最小增益的参数;

$$G_{180} = -\lambda_k - 3 - 15 \log(180^\circ/\theta_3) \quad \text{对于平均旁瓣辐射图} \quad (58)$$

其中:

$$\lambda_k = 12 - 10 \log(1 + 8k_a)$$

$k_a$ : 达到平均旁瓣辐射图相对最小增益的参数。

### 3 参考辐射图公式的推导

在本节中, 特别给出了400 MHz到约6 GHz的频率范围内峰值旁瓣辐射图情况下的相对参考辐射增益 $G_{hr}(x_h)$ 和 $G_{vr}(x_v)$ 。另一方面, 关于平均旁瓣辐射图, 相关公式可以从以下的方法中轻易地得出:

- 公式(59)被公式(58)代替, 它相对于公式(57)减少了3 dB;
- 公式(60)相同, 而(61)几乎被原样使用, 除了在主瓣部分之外-3 dB的差别。

这些参考增益具有相对最小值 $G_{180}$ 并基于公式(57), 该数值, 即正文部分中公式(2b1), 表示为以下公式:

$$G_{180} = -12 + 10 \log(1 + 8k_p) - 15 \log\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right) \quad (59)$$

其中:

$k_p$ : 达到峰值旁瓣辐射图相对最小增益的参数。

#### 3.1 在方位平面中的相对参考天线公式

参考天线增益 $G_{hr}(x_h)$ , 即正文中的公式(2b2), 表示如下:

$$\begin{aligned} G_{hr}(x_h) &= -12x_h^2 & \text{对于 } x_h \leq 0.5 \\ G_{hr}(x_h) &= -12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{kh} & \text{对于 } 0.5 < x_h \\ G_{hr}(x_h) &\geq G_{180} \end{aligned} \quad (60)$$

其中:

$$x_h = |\varphi|/\varphi_3$$

$k_h$ : 基于泄露功率的方位平面调整因子 ( $0 \leq k_h \leq 1$ )

$$\lambda_{kh} = 3(1 - 0.5^{-k_h})。$$

#### 3.2 俯仰平面中的相对参考天线公式

相对参考天线增益的公式几乎遵循本建议书前一版本中说明的公式, 因为计算的参考辐射图几乎显示出对在过去研究中俯仰平面中第一旁瓣附近实测天线辐射数据的良好近似。但是, 相对参考增益也不小于 $G_{180}$ 和 $G_{hr}(x_h)$ , 而最小值位于点 $\theta = 90^\circ$ 。因此, 涉及在最小点附近进行计算的公式, 衰减斜率因子15被改变为 $C$ , 这样来达到最小点。

参考天线增益  $G_{vr}(x_v)$ ，即在正文中的公式 (2b3)，表示如下：

$$\begin{aligned}
 G_{vr}(x_v) &= -12x_v^2 && \text{对于 } x_v < x_k \\
 G_{vr}(x_v) &= -12 + 10\log(x_v^{-1.5} + k_v) && \text{对于 } x_k \leq x_v < 4 \\
 G_{vr}(x_v) &= -\lambda_{kv} - C\log(x_v) && \text{对于 } 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\
 G_{vr}(x_v) &= G_{180} && \text{对于 } x_v = 90^\circ/\theta_3
 \end{aligned} \tag{61}$$

其中：

$$\begin{aligned}
 x_v &= |\theta|/\theta_3 \\
 k_v &: \text{基于泄露功率的俯仰辐射图调整因子 } (0 \leq k_v \leq 1) \\
 x_k &= \sqrt{1 - 0.36k_v} \\
 \lambda_{kv} &= 12 - C\log(4) - 10\log(4^{-1.5} + k_v);
 \end{aligned}$$

衰减斜率因子  $C$  表示如下：

$$C = \frac{10\log\left(\frac{\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right)^{1.5} \cdot (4^{-1.5} + k_v)}{1 + 8k_p}\right)}{\log\left(\frac{22.5^\circ}{\theta_3}\right)}$$

#### 4 实测数据和计算参考辐射图之间的比较

为了为典型天线选择以上所提  $k_h$ 、 $k_v$ 、 $k_p$  和  $k_a$  的适当值，对峰值和平均辐射图在通过采用以上第3节中所提到公式计算的参考辐射图和实测的旁瓣辐射图之间进行了比较。通过变化倾角和传输频率对天线旁瓣辐射图进行了测量。

对这样的测量进行了统计分析，排列95%的测量被表示为峰值旁瓣实测数据，而测量的平均性能被显示为平均旁瓣实测数据。当测量期间使用了倾斜时，通过转换角坐标中的测量数据来将最大增益置于0度俯仰角对图中的这些数据进行了补偿。

在本建议书最新版本的制定期间，向ITU-R报告了很多在低至698 MHz频率范围内的扇区天线的实测数据。通过检验显示这些低至400 MHz参考辐射图适用性的计算数据，还注意到，天线特性没有物理原因将在较低频带剧烈改变。

对典型天线辐射图的比较显示在图22至25中。

实测辐射图特性显示在表3中。

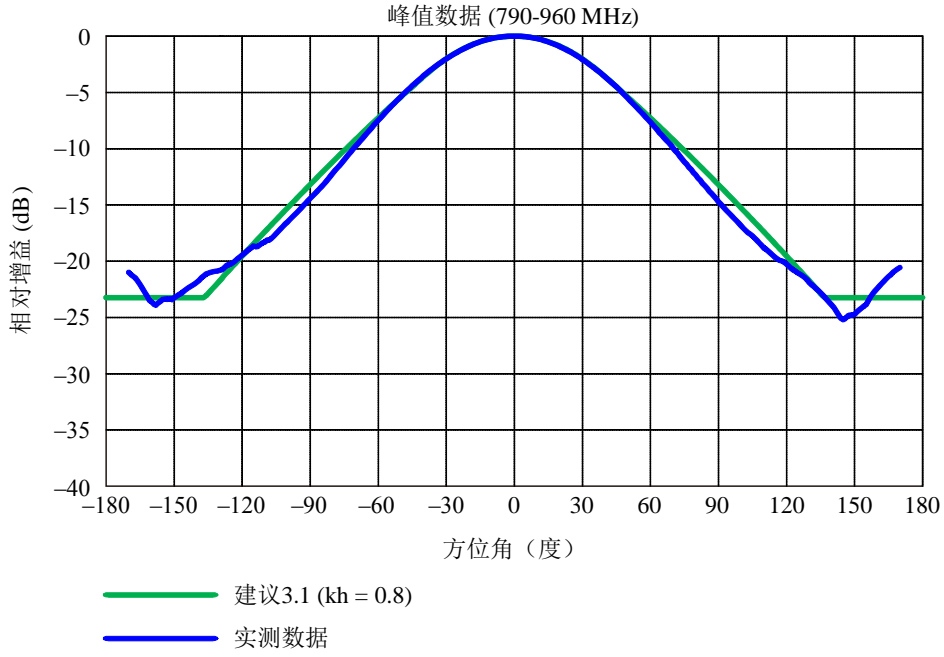
表3

实测辐射图特性

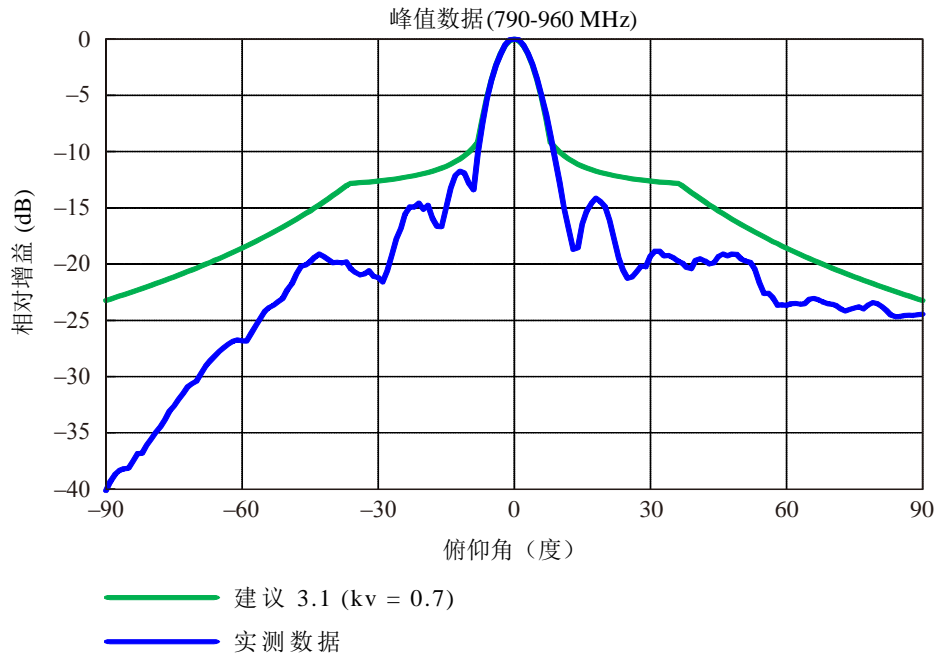
图号	辐射图类型	实测频率 $f$ (GHz)
22	峰值	0.79-0.96
23		1.71-2.7
24	平均	0.79-0.96
25		1.71-2.7

图22

统计峰值实测辐射图和计算峰值旁瓣辐射图之间的比较  
( $f: 790-960 \text{ MHz}$ )



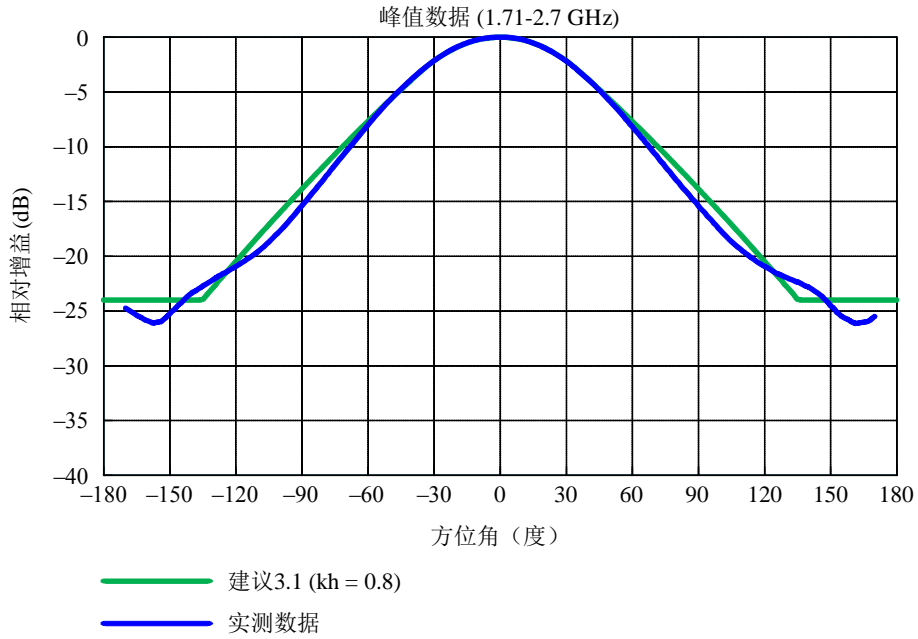
a) 方位平面



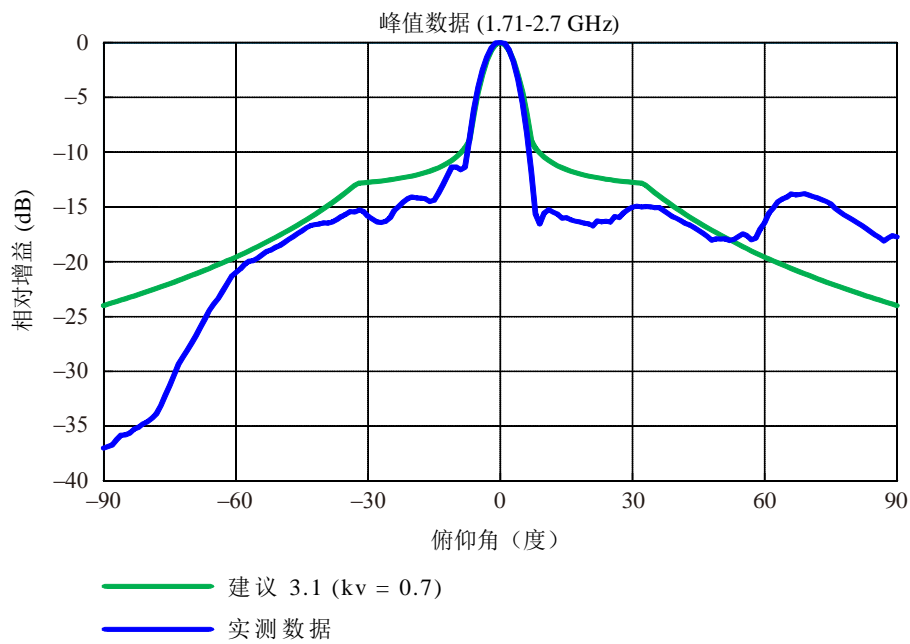
b) 俯仰平面

图23

统计峰值实测辐射图和计算峰值旁瓣辐射图之间的比较  
(f: 1.71-2.7 GHz)



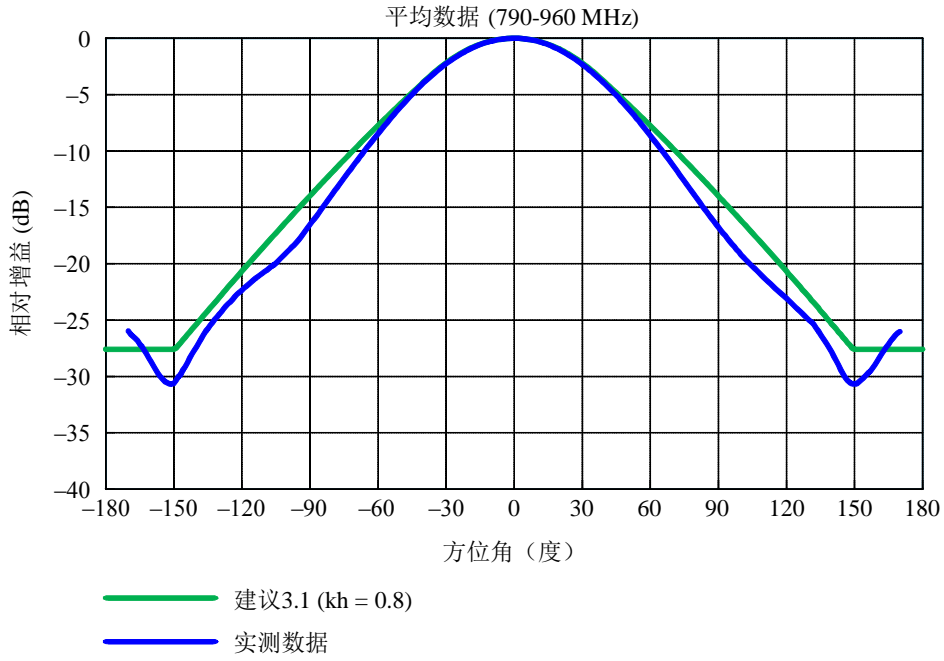
a) 方位平面



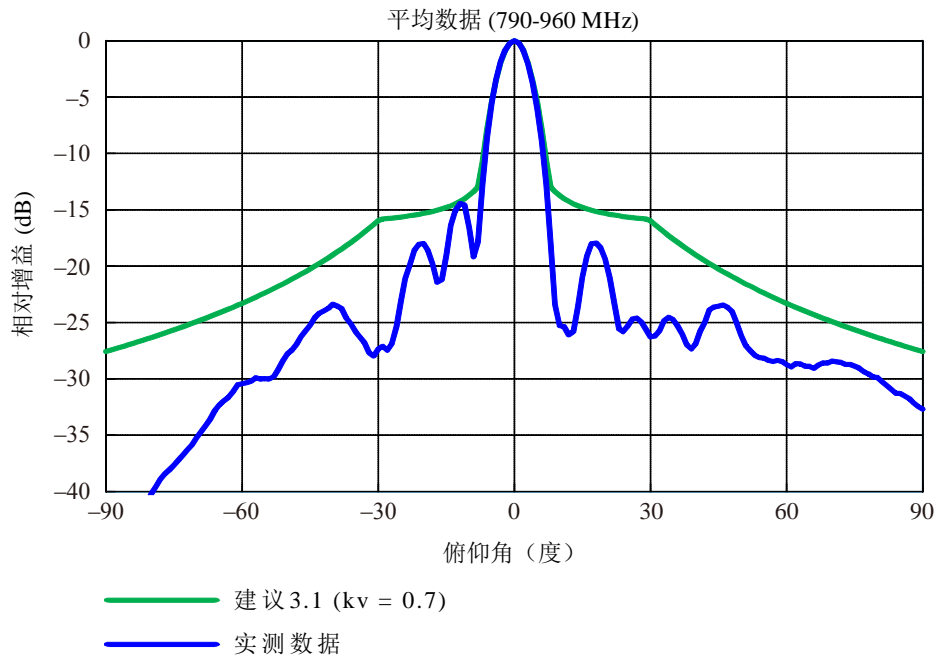
b) 俯仰平面

图 24

统计平均实测辐射图和计算平均旁瓣辐射图之间的比较  
( $f$ : 790-960 MHz)



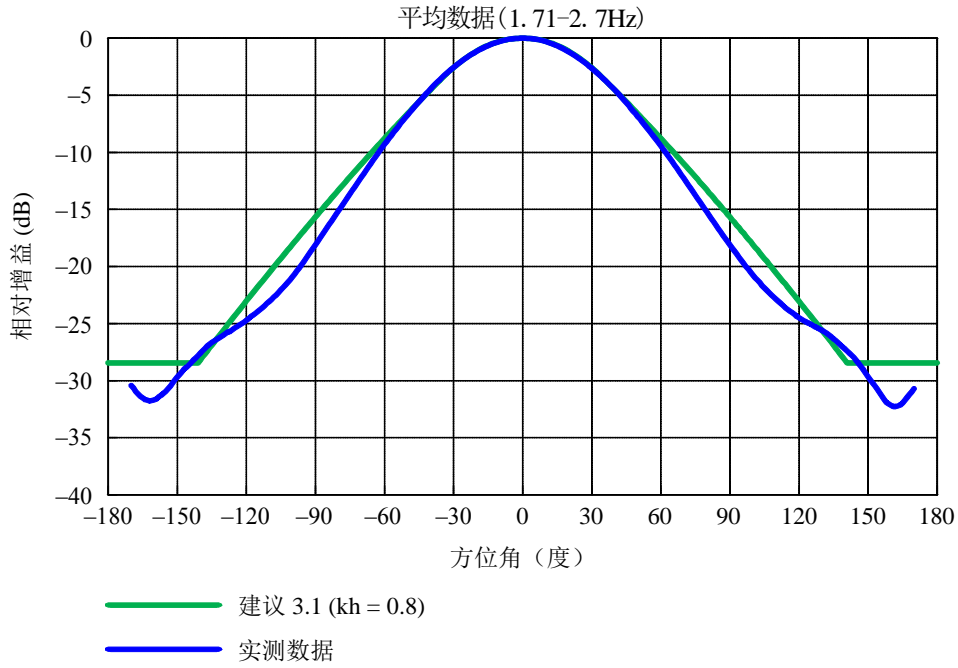
a) 方位平面



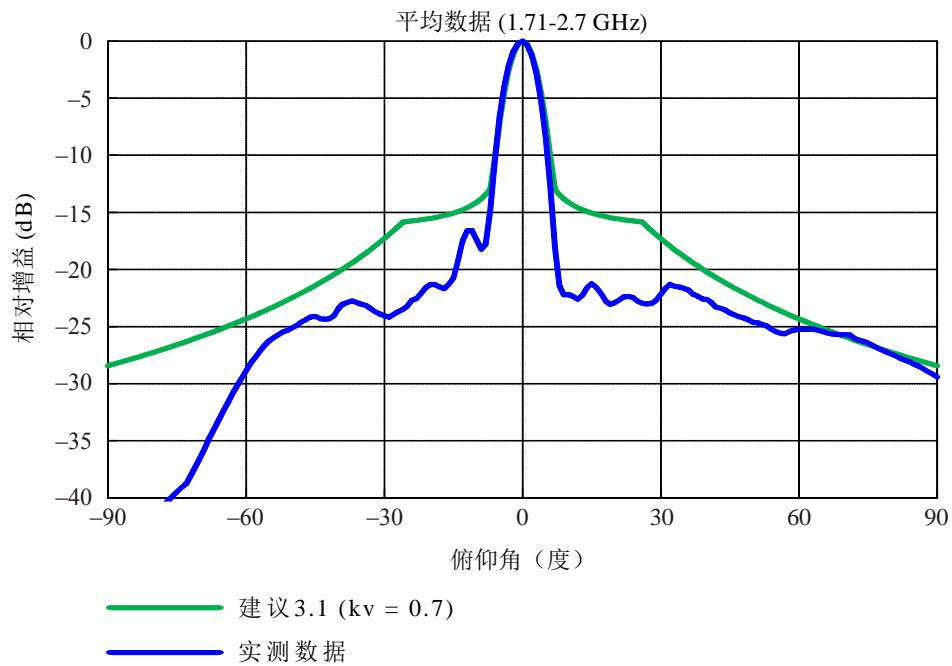
b) 俯仰平面

图 25

统计平均实测辐射图和计算平均旁瓣辐射图之间的比较  
( $f$ : 1.71-2.7 GHz)



a) 方位平面



b) 俯仰平面



## 5 各种 $k$ 参数值的汇总

选定的适当 $k_h$ 、 $k_v$ 、 $k_p$ 和 $k_a$ 参数值显示在以下表4中（见正文建议3.1.1和3.1.2中的相关部分）。

表4

参考峰值/平均旁瓣辐射图的 $k_h$ 、 $k_v$ 、 $k_p$ 和 $k_a$ 参数值

	400 MHz至约6 GHz的频率范围			
	典型类型		改进类型，也适用于 IMT基站天线	
	峰值旁瓣	平均旁瓣	峰值旁瓣	平均旁瓣
$k_h$	0.8	0.8	0.7	0.7
$k_v$	0.7	0.7	0.3	0.3
$k_p/k_a$	0.7	0.7	0.7	0.7