

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R M.1851 建议书

(06/2009)

**用于干扰分析的无线电定位雷达
系统天线方向图的数学模型**

M系列

**移动、无线电定位、业余
和相关卫星业务**



ITU 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
BO	卫星传送
BR	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和频率标准发射
V	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
2010年，日内瓦

© ITU 2010

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 M.1851建议书

用于干扰分析的无线电定位雷达系统
天线方向图的数学模型

(2009年)

范围

本建议书描述了用于单入和集总干扰分析的无线电定位雷达系统天线方向图。如天线3 dB波束宽度和第一峰值旁瓣电平已知，则可选择适用于方位角和仰角方向图的一组适当的公式。单个干扰源的峰值方向图和多个干扰源的平均方向图均被定义。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) ITU-R建议书中没有确定用于干扰评估的无线电定位雷达系统的天线方向图公式；
- b) 在没有无线电定位雷达系统具体方向图的情况下，需要一个通用的天线方向图的数学模型用于干扰分析，

做出建议

- 1 如ITU-R有关无线电定位雷达系统特性的其它建议书中提供了对此处研究的雷达适用的天线方向图和/或方向图公式，则应使用那些天线方向图或方向图公式；
- 2 在没有所涉及的无线电定位雷达系统天线方向图的具体信息时，附件1中所述的数学参考天线模型可用于干扰分析。

附件 1用于干扰分析的无线电定位雷达系统
天线方向图的数学模型**1 引言**

当ITU-R建议书中没有相关分析所涉及的无线电定位雷达系统适用的方向图的定义时，则需确定无线电定位雷达系统天线方向图的通用数学模型。通用天线方向图模型可用于涉及单个和多个干扰源情况的分析，如来自其它雷达和无线电系统的干扰源。

本文描述了建议使用的天线方向图。如波束宽度和第一峰值旁瓣电平已知，即可选择方位角和仰角方向图适用的公式。

ITU-R建议书天线参数范围的调查结果见表1。

表 1
调查的天线参数限值

天线参数	描述	最小值	最大值
发射和接收频率 (MHz)		420	33 400
天线极化类别	水平、垂直、 圆极化		
天线类型	全向、八木元素阵列、 抛物面反射器、 相控阵		
最常见的波束类型	扇形、笔形、余割平方波束		
发射和接收增益 (dBi)		25.6	54
仰角波束宽度 (度)	笔形波束	0.25	5.75
	余割平方 (CSC ²)	3.6 CSC ² 至20	3.6 CSC ² 至44
方位角波束宽度 (度)	笔形波束	0.4	5.75
仰角扫描角限值 (度)		-60	+90
方位角扫描角限值 (度)		30扇形	360
低于主瓣峰值的第一旁瓣电平 (dB)		-35	-15.6

表1用于指导研究所建议的天线类型和方向图。

2 建议的公式

为简化分析，将天线电流分布作为仰角或方位角坐标的函数。一特定分布的方向性图 $F(\mu)$ 可通过有限的傅立叶变换表示：

$$F(\mu) = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} f(x) \cdot e^{j\mu x} dx$$

其中：

$f(x)$: 场分布的相对形状，见表2和图1

μ : 在下表中给出 = $\pi \left(\frac{l}{\lambda} \right) \sin(\alpha)$

l : 口径总长度

λ : 波长

ω : 波束仰角或方位角指向（扫描）角

α : 相对于标称孔径的角

θ : 相对于标称孔径和指向角的 $(\alpha - \omega)$ 角

x : 沿孔径的归一化距离 $-1 \leq x \leq 1$

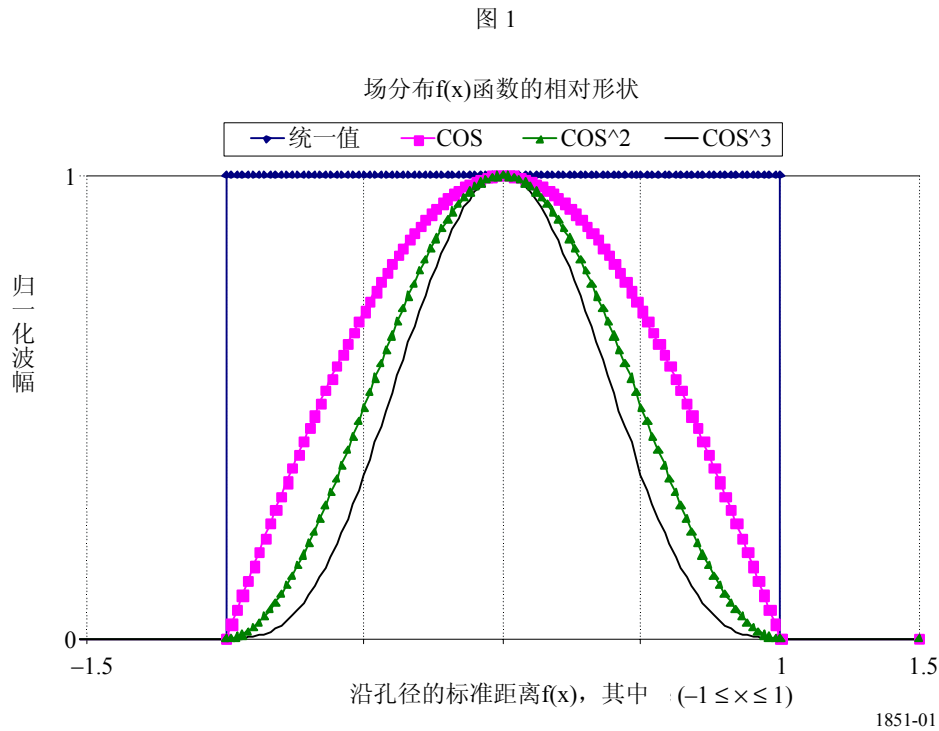
j : 复合数字符号。

建议的理论天线方向图见表2。这些方向图在天线中心的波束扫描角成 $\pm 90^\circ$ 时有效。假定此角左右各 90° 以外的值在后瓣，则此区域天线掩模下限适用。表2中（及随后在相关表3和各图中）介绍的用于确定天线方向性图（ADP）的参数和公式仅在天线孔径边缘的场幅度等于0且在ADP的主瓣和前两个旁瓣的范围内时才是正确的。当天线孔径边缘的场幅值不同时，ADP的形式及其参数则可能与本建议书中介绍的理论方向图有很大不同。如存在实际的雷达天线方向图，则应将这些方向图进行数字化并加以使用。

表 2
天线方向性参数

场分布的相对形状 $f(x)$, 其中 $-1 \leq x \leq 1$	方向性图 $F(\mu)$	θ_3 半功率波束宽度 (度)	作为 θ_3 函数的 μ	低于主瓣峰值的第一旁瓣电平 (dB)	建议的掩膜下限电平 (dB)	公式编号
1 的统一值	$\frac{\sin(\mu)}{\mu}$	$50.8 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 50.8 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-13.2	-30	(1)
$\text{COS}(\pi \cdot x/2)$	$\frac{\pi}{2} \left[\frac{\cos(\mu)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$68.8 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 68.8 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-23	-50	(2)
$\text{COS}(\pi \cdot x/2)^2$	$\frac{\pi^2}{2 \cdot \mu} \left[\frac{\sin(\mu)}{\pi^2 - \mu^2} \right]$	$83.2 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 83.2 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-32	-60	(3)
$\text{COS}(\pi \cdot x/2)^3$	$\frac{3 \cdot \pi \cdot \cos(\mu)}{8} \left[\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left(\frac{3 \cdot \pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$95 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 95 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-40	-70	(4)

其中 θ_3 是3 dB天线半功率波束宽度（度）。表2中所确定的场分布函数 $f(x)$ 的相对形状如图1所示。

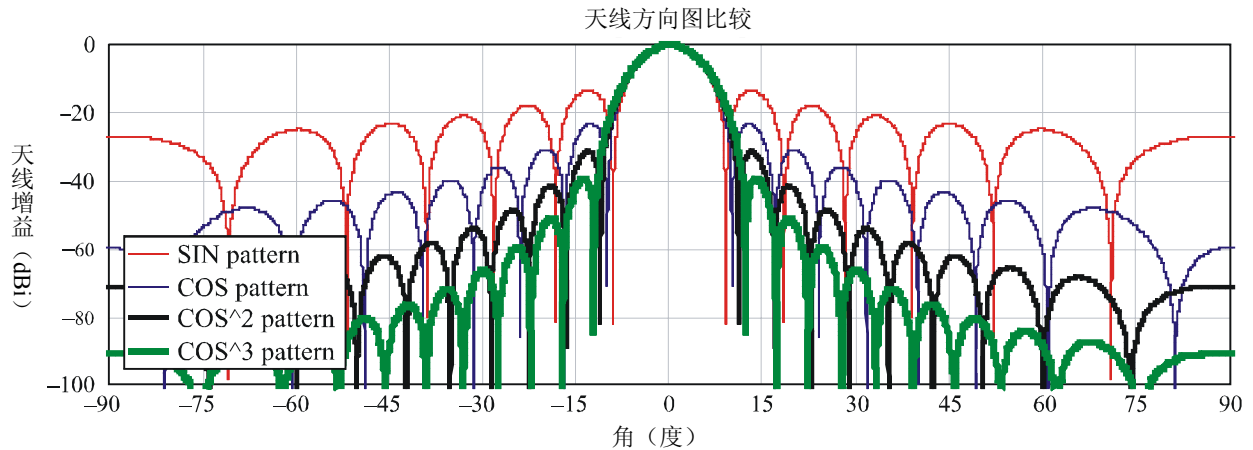


假设已给出半功率波束宽度 θ_3 ， μ 的值可重新定义为半功率天线波束宽度的函数。做法是将 $\mu = \pi \left(\frac{l}{\lambda} \right) \sin(\alpha)$ 中的量 $\left(\frac{l}{\lambda} \right)$ 替换为一个由场分布相对形状决定的常数；除以半功率波束宽度 θ_3 ，如表2所示。通过设定 $F(\mu)$ 等于-3 dB的等式，并求 θ 角的价值，即可得到表2中的常数值50.8、68.8、83.2和95。

图2表示余弦(COS)、余弦平方(COS²)和余弦立方(COS³)分布函数的天线方向图。

图 2

天线方向图比较, 3 dB波束宽度为8.0°



利用上述图2, 通过使用符合天线峰值旁瓣电平的曲线推导出掩膜公式。比较理论掩膜方向图和推荐的掩膜方向图积分发现, 在一个主平面截图中, 峰值功率和平均功率之间的差约为4 dB。下列定义适用:

- 使用 $20 \cdot \log(\text{abs}(\text{方向性图}))$ 将公式(1)至(4)转换为用dB表示;
- 使天线方向图增益归一化。统一的方向图并不需要归一化, 对于余弦方向图减去-3.92 dB, 对于余弦平方方向图, 减去-6.02 dB, 对余弦立方方向图, 减去-7.44 dB;
- 绘制掩膜图时, 使用表2中的理论方向性图, 如前两步中所示, 根据需要一直绘到峰值天线方向图或平均天线方向图的中断点。在中断点之后, 表3中表示的掩膜方向图适用;
- 峰值方向图掩膜是跨过旁瓣峰值的天线方向图。仅用于单入干扰源的情况;
- 平均方向图掩膜是近似理论方向图积分值的天线方向图。用于集总多干扰源的情况;
- 峰值方向图掩膜拐点是方向图幅度(dB)低于最大增益的点, 此时方向图的形状偏离理论方向图, 转向峰值掩膜方向图, 如表3所示;
- 平均方向图掩膜拐点是方向图幅值(dB)低于最大增益的点, 此时方向图形状偏离理论方向图, 转向平均掩膜方向图, 如表3所示;
- θ_3 是3 dB天线波束宽度(度);
- θ 是仰角(垂直)或方位角(水平)主平面截图的角(度);
- 平均掩膜是峰值掩膜减去约4 dB。请注意, 峰值方向图的拐点与平均方向图不同。

表3列出了在计算中使用的公式。

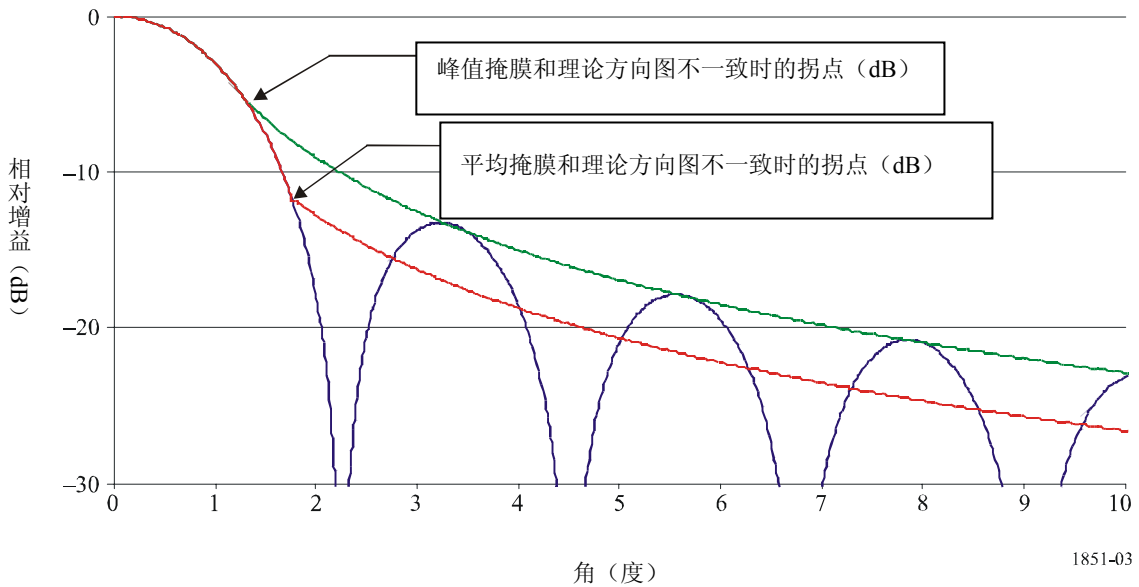
表 3

峰值掩膜方向图和平均掩膜方向图公式

方向图类型	当掩膜和理论方向图出现不一致后，超出方向图拐点的掩膜公式 (dB)	当掩膜和理论方向图出现不一致后的峰值方向图拐点 (dB)	当掩膜和理论方向图出现不一致后的平均方向图拐点 (dB)	在峰值方向图中增加常数，将其转换为平均掩膜 (dB)	公式编号
SIN	$-8.584 \cdot \ln \left(2.876 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-5.75	-12.16	-3.72	(5)
COS	$-17.51 \cdot \ln \left(2.33 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-14.4	-20.6	-4.32	(6)
COS ²	$-26.882 \cdot \ln \left(1.962 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-22.3	-29.0	-4.6	(7)
COS ³	$-35.84 \cdot \ln \left(1.756 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-31.5	-37.6	-4.2	(8)

函数ln()是自然对数函数。拐点示例见图3。

图 3
拐点示例



余割平方方向图是一种特殊情况。通过以下获得：

$$G(\theta) = G(\theta_1) \cdot \left(\frac{\text{CSC}(\theta)}{\text{CSC}(\theta_1)} \right)^2 \tag{9}$$

其中：

$G(\theta)$: 角 θ_1 和 θ_{Max} 之间的余割平方方向图

$G(\theta_1)$: θ_1 处的方向图增益

θ_1 : 余割平方方向图起始= θ_3 ，该处的半功率波束宽度

θ_{Max} : 余割平方方向图终止处的最大角

θ : 仰角

θ_3 : 半功率天线波束宽度。

对于余割平方方向图，不考虑平均天线方向图增益。该增益应用于单个和多个干扰源的情况。余割方向图的应用如下所示：

表 4

平方根余割天线方向图公式

平方根余割公式	条件	公式编号
$\frac{\sin(\mu)}{\mu}$; $\mu = (\pi \cdot 50.8 \cdot \sin(\theta))/\theta_3$	$-\theta_3 \leq \theta \leq +\theta_3$	(10)
$G(\theta_1) \cdot \left(\frac{\text{CSC}(\theta)}{\text{CSC}(\theta_1)} \right)^2$	$+\theta_3 \leq \theta \leq \theta_{Max}$	(11)
余割最低限值 (如 = -55 dB)	$\theta_{Max} \leq \theta \leq \theta_{90}$	(12)
$G(\theta_1) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot 50.8 \cdot \sin(\theta_1)}{\theta_3}\right)}{\frac{\pi \cdot 50.8 \cdot \sin(\theta_1)}{\theta_3}}$	$\theta_1 = \theta_3$	(12a)

方向图的图形描述如下图所示。

图 4

搜索雷达的平方根余割波束覆盖

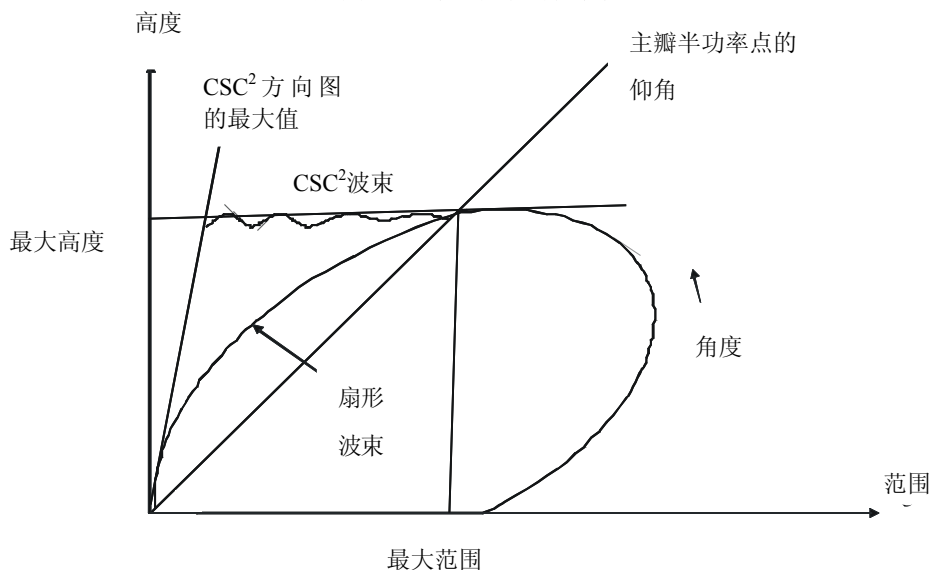
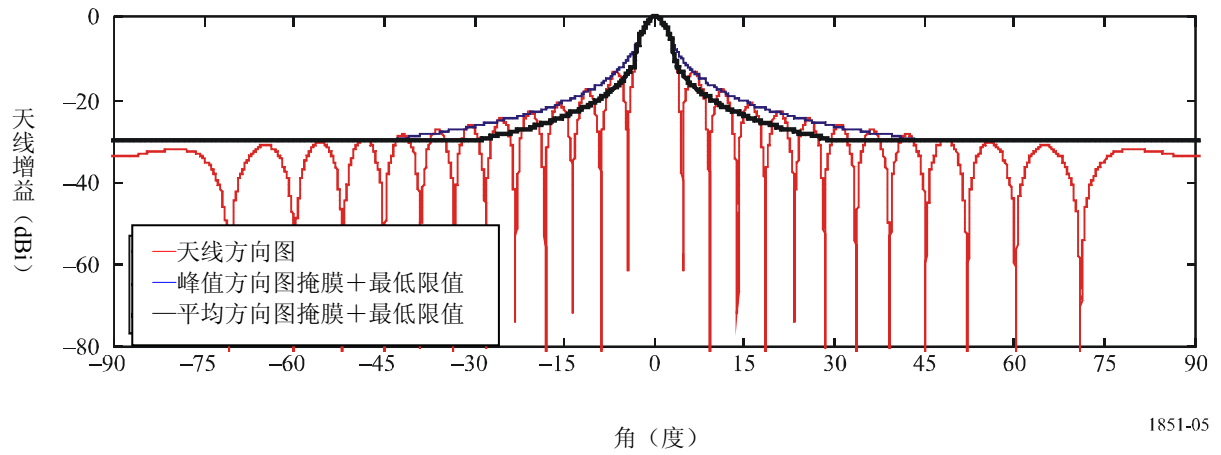


图 5

正弦天线方向图，峰值和平均包络



1851-05

图 6

正弦极坐标天线方向图，峰值和平均包络

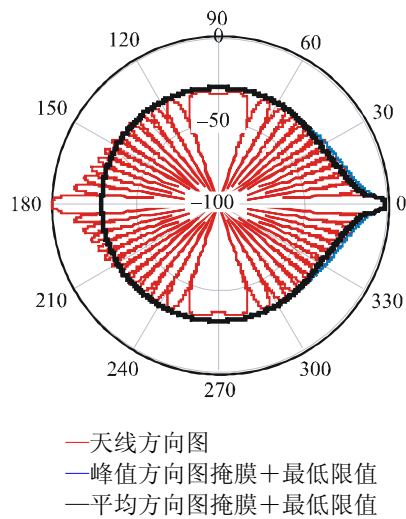
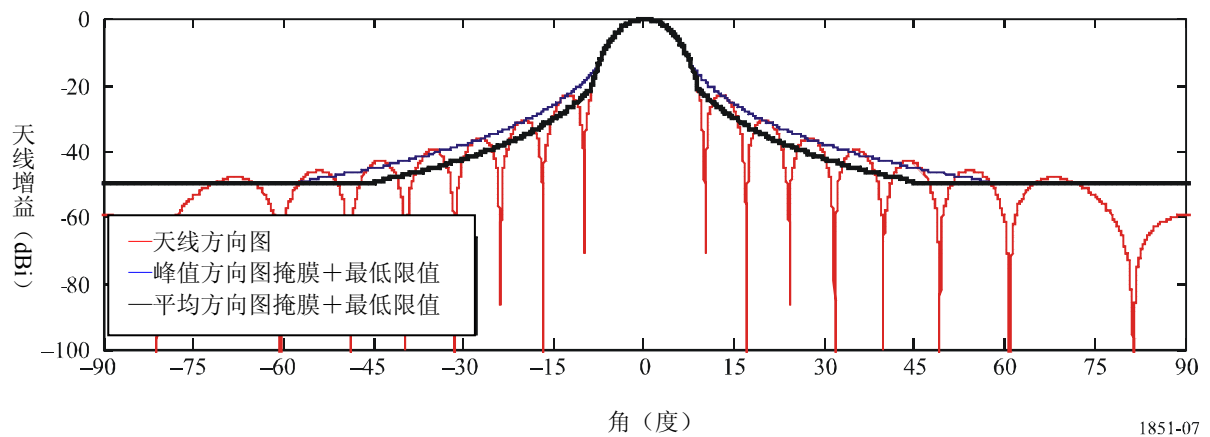


图 7

余弦天线方向图，峰值和平均包络



1851-07

图 8
余弦极坐标天线方向图，峰值和平均包络

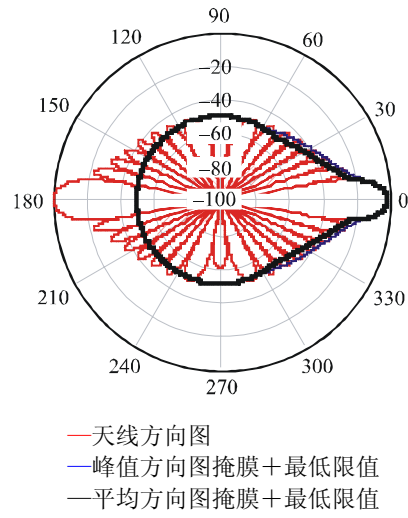


图 9
 COS^2 天线方向图，峰值和平均包络

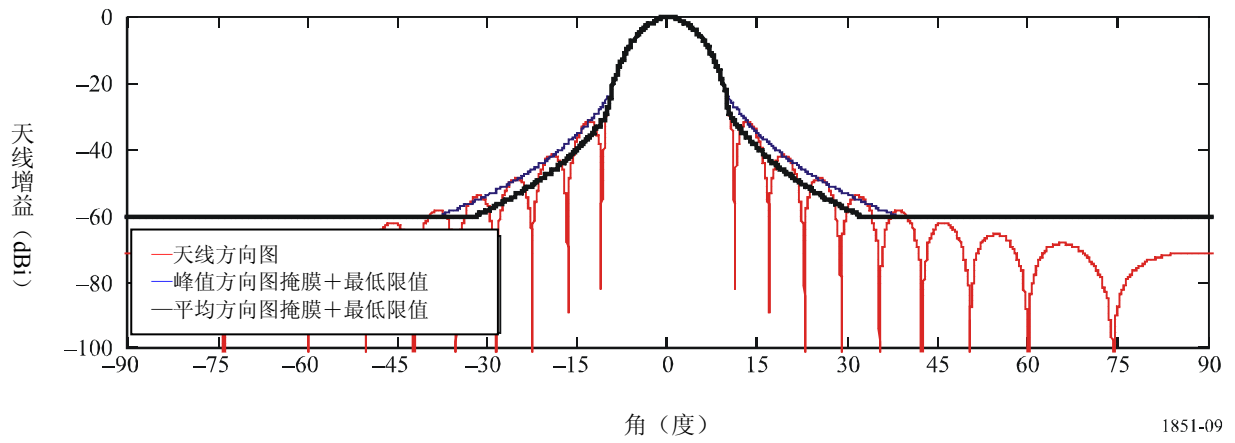
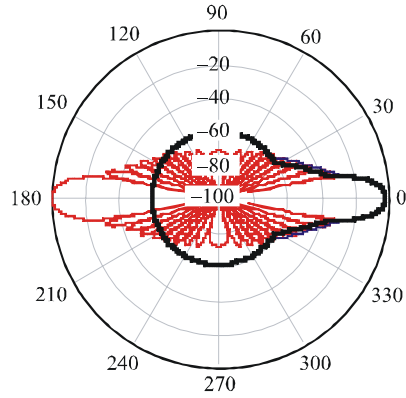


图 10
 COS²极坐标天线方向图，峰值和平均包络



- 天线方向图
- 峰值方向图掩膜+最低限值
- 平均方向图掩膜+最低限值

图 11
 COS³天线方向图，峰值和平均包络

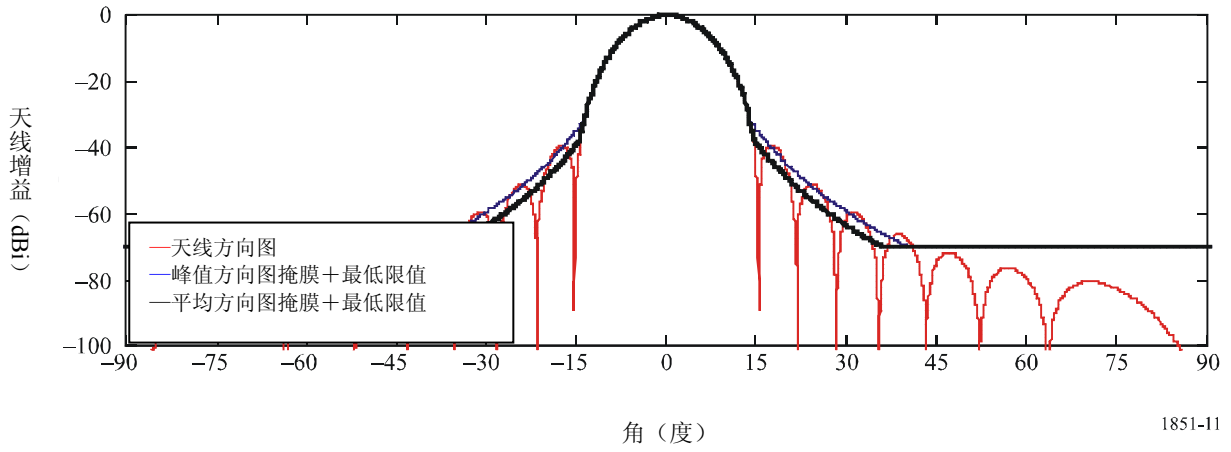
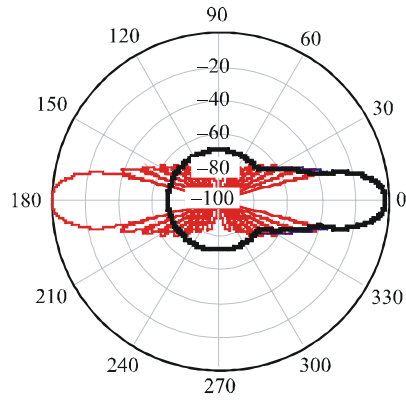
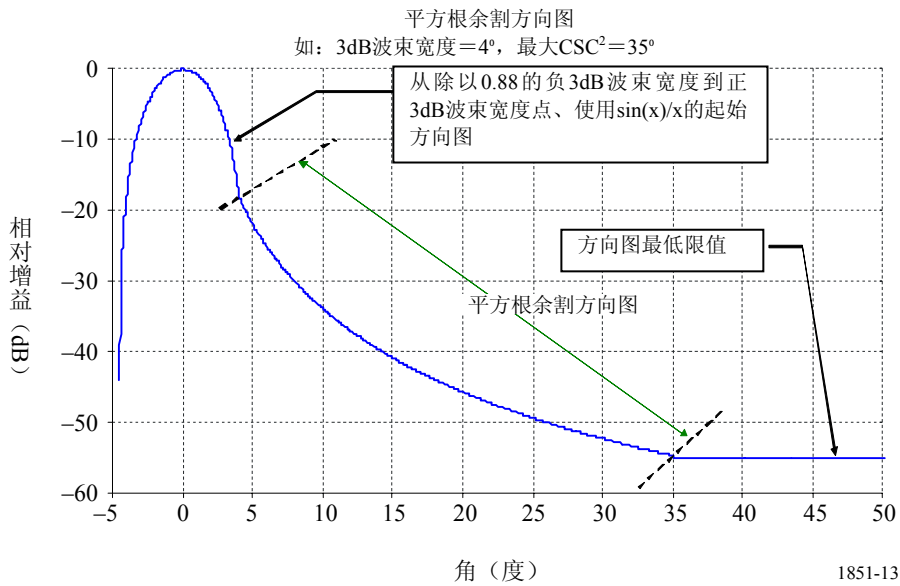


图 12
COS³极坐标天线方向图，峰值和平均包络



- 天线方向图
- 峰值方向图掩膜+最低限值
- 平均方向图掩膜+最低限值

图 13
CSC² 天线方向图包络



3 天线方向图选择

有关应如何选择天线方向图的建议是根据半功率波束宽度和峰值旁瓣电平的信息提出的。见表5。

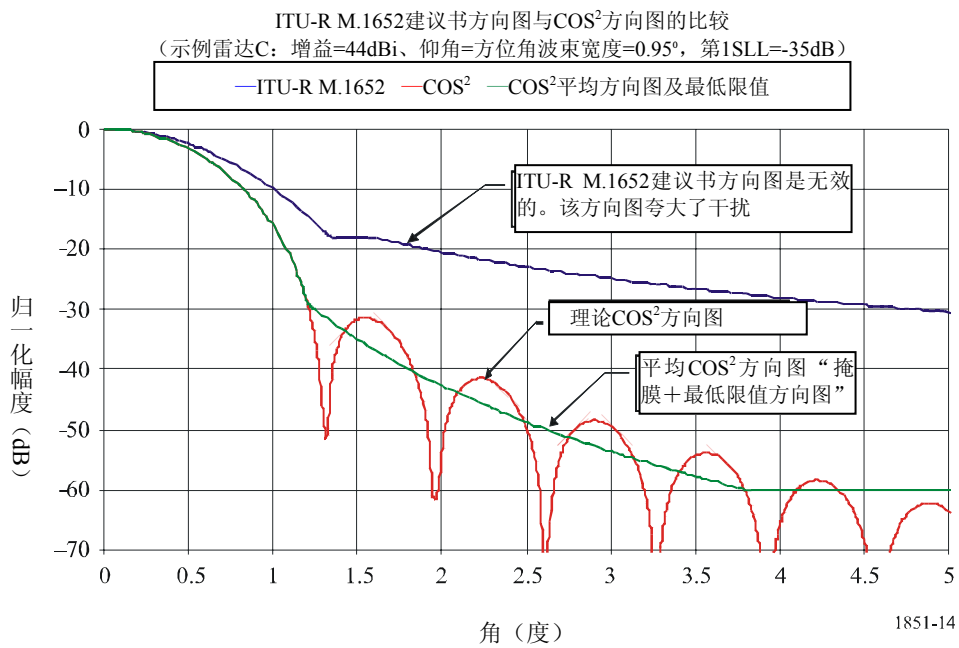
表 5
方向图选择表

低于主瓣峰值电平的第一旁瓣电平的范围 (dB)	可能的天线分布类型	方向性图 $F(\mu)$	超出掩膜开始与理论方向图不一致处拐点的掩膜公式 (dB)	掩膜与理论方向图不一致的拐点处的峰值方向图 (dB)	掩膜与理论方向图不一致的拐点处的平均方向图 (dB)	峰值方向图增加的常数, 将其转换为平均掩膜 (dB)	建议的掩膜最低限值 (dB)	公式编号
-13.2至-20 dB	单一	$\frac{\sin(\mu)}{\mu}; \mu = (\pi \cdot 50.8 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-8.584 \cdot \ln \left(2.876 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-5.75	-12.16	-3.72	-30	(13)
-20至-30 dB	COS	$\frac{\pi}{2} \left[\frac{\cos(\mu)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 68.8 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-17.51 \cdot \ln \left(2.33 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-14.4	-20.6	-4.32	-50	(14)
-30至-39 dB	COS^2	$\frac{\pi^2}{2 \cdot \mu} \left[\frac{\sin(\mu)}{\left(\pi^2 - \mu^2\right)} \right]; \mu = (\pi \cdot 83.2 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-26.882 \cdot \ln \left(1.962 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-22.3	-29.0	-4.6	-60	(15)
-39 dB或以上	COS^3	$\frac{3 \cdot \pi \cdot \cos(\mu)}{8} \left[\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left(\frac{3 \cdot \pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 95 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-35.84 \cdot \ln \left(1.756 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-31.5	-37.6	-4.2	-70	(16)

4 天线方向图的比较

ITU-R M.1652建议书中给出的已用于干扰分析的无线电定位雷达天线方向图的数学模型以天线增益的函数表示，包括用于几类方向图的公式。对本建议书中所述的模型与来自于ITU-R M.1638建议书的雷达C之间进行的比较表明，ITU-R M.1652建议书的方向图并不是最佳的方向图。如图14所示，ITU-R M.1652建议书的方向图大大高估了偏离天线视轴（0°）的天线增益。

图 14
天线方向图比较



5 3维（3-D）方向图的近似计算

等高线图的数据可用做模拟分析的工具。对3维（3-D）天线方向图进行近似计算很容易。将水平和垂直主平面的电压衰减相乘即可。为此，将垂直主平面方向图置于一个方阵的中间栏，并将其它元素设为0。将水平主平面方向图置于一个方阵的中间行，将其它元素设为0。将两个方阵相乘，并绘制图形。注意，所有的方向图必须是归一化的。

计算3维方向图的方程表示为：

$$P_{i,h} = 20 \log \left[\sum_{k=0}^N |H_{k,i} V_{h,k}| \right] \tag{17}$$

垂直和水平矩阵（单位伏）通过公式 (18) 和 (19)表示。

垂直方向图表示为：

$$\text{垂直矩阵 } (V_{h,k}) = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & El_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & El_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & 0 & El_3 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & El_{N-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & El_N & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

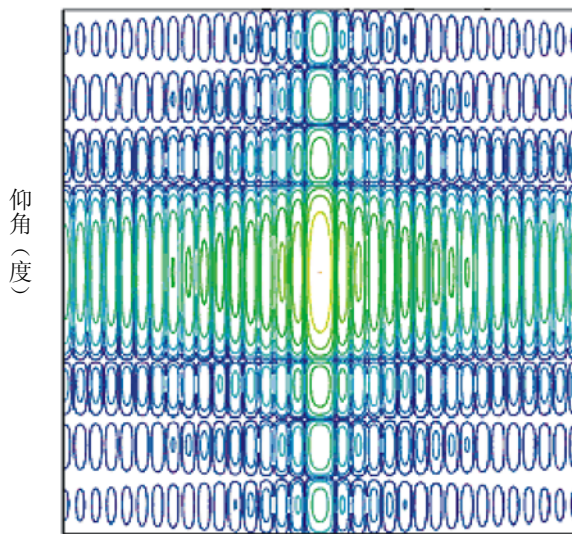
水平方向图表示为：

$$\text{水平矩阵 } (H_{k,i}) = \begin{pmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ Az_1 & Az_2 & & & Az_{N-1} & Az_N \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

图 17为3维方向图示例。

图 15

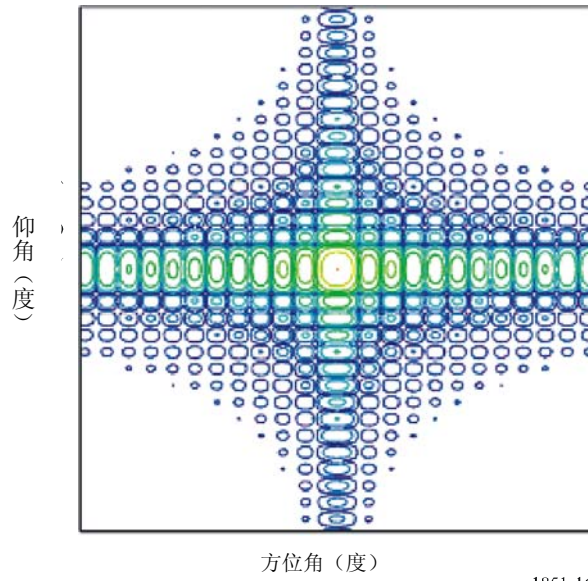
BW_H = 1.2°和BW_V = 6°的天线等高线方向图



方位角 (度)

图 16

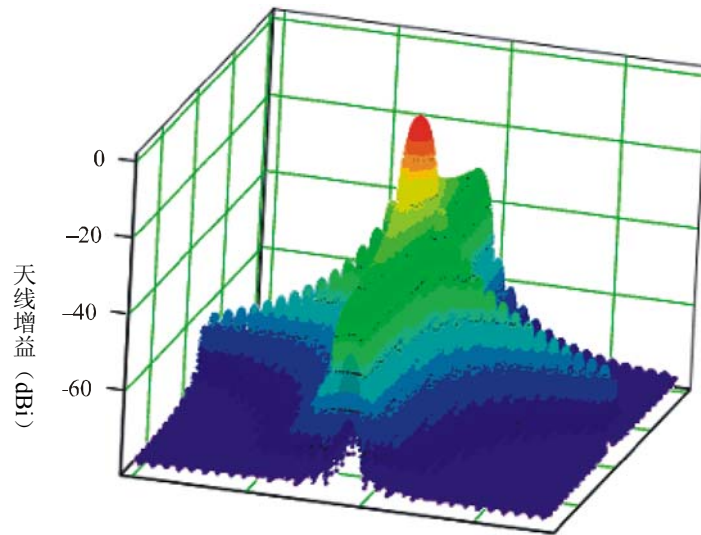
BW_H = BW_V = 1.7°的天线等高线方向图



1851-16

图 17

3维天线图示例



1851-17

6 测量方向图示例

下面是9 GHz频段雷达天线方向图测试数据的示例，表示出近似峰值旁瓣电平和方向图最低限值。

图 18
测量的天线图示例

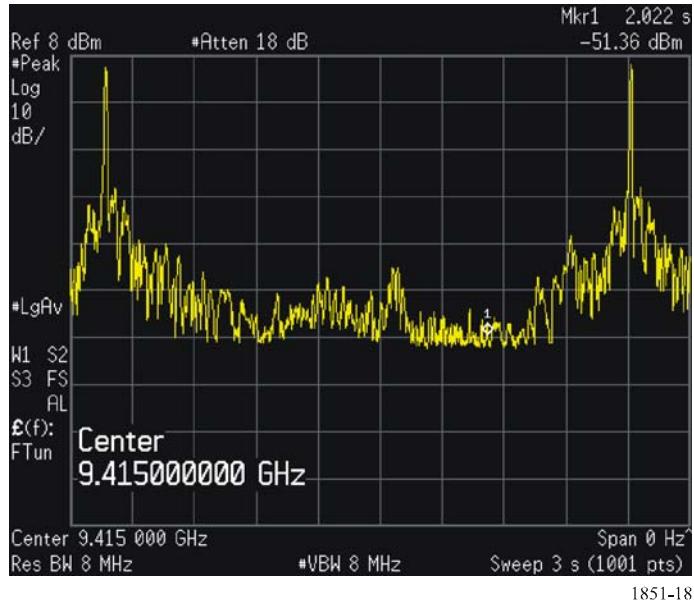


图 19
测量的天线图示例

