

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R BS.1195-1 建议书

(01/2013)

**甚高频 (VHF) 和特高频 (UHF)
频率的发射天线特性**

BS 系列

广播业务(声音)



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
2013年，日内瓦

© 国际电联 2013

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 BS.1195-1 建议书

甚高频（VHF）和特高频（UHF）频率的发射天线特性

（ITU-R第30/6号课题）

（1995-2013年）

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 前国际无线电咨询委员会（CCIR）通过第76-1号决议决定，由无线电通信第10研究组开展的研究结果和相关天线图应包含在将单独出版的ITU-R建议书之中；
- b) 进行频率规划时，需要全面了解有关VHF和UHF频率的发射和接收天线系统特性的信息；
- c) 需要采用基于计算机的程序，以便以标准形式给出发射和接收天线系统的增益和方向辐射图；
- d) 通过测量核实天线系统各组成部分的辐射方向图和整体系统的辐射方向图至关重要；
- e) 需要通过标准测量方法核实上述考虑到d)所述的天线辐射方向图；
- f) 由于VHF和UHF天线的实际情况，预计理论和测得性能之间会出现差异，

建议

- 1 应采用附件1第1部分所含的公式和附件1第3部分所述的相关计算机程序评估频率规划所要求的VHF和UHF天线系统性能；
- 2 应采用附件1第2部分所述的测量方法核实天线系统各成分的实际性能和天线整体系统的实际性能。

附件1

第1部分

VHF和UHF频率发射天线方向图的计算

目录

	页码
1 引言	4
1.1 参考系	4
2 天线辐射方向图的几何表述	5
3 辐射方向图和增益计算	6
4 辐射成分	7
4.1 点源	7
4.2 点源阵列	9
4.2.1 方向图的倍增	9
4.2.2 矢量方向图加法	9
4.3 VHF和UHF基本辐射器	10
5 极化	11
5.1 椭圆极化	11
5.2 水平和垂直极化	12
5.3 倾斜极化	12
5.4 圆形极化	12
6 天线阵列	13
6.1 宽边阵列	13
6.1.1 带有寄生成分的线性天线阵列	16
6.2 幅度和相位辐射方向图	18
6.3 天线阵列辐射方向图的计算	20
6.4 VHF和UHF天线阵列	21
6.4.1 平板类型天线	21
6.4.2 八木天线	24
6.4.3 其它类型天线阵列	24
7 天线系统	24

	页码
7.1 天线系统方向图	25
7.1.1 零值填充.....	25
7.1.2 波束倾斜.....	28
7.2 天线系统辐射方向图	29
7.3 天线系统方向图示例	32
7.3.1 偶极子天线系统.....	32
7.3.2 八木天线系统.....	33
7.3.3 平板天线系统.....	34

附件1

第1部分

VHF和UHF频率发射天线方向图的计算

1 引言

本部分概要介绍VHF和UHF天线的基本理论原理以及由若干单个辐射器实现的天线系统的总体特性。

本部分还通过一些示例具体说明上述天线的性能，并引导用户选择使用最适合其要求的配置。

特别应当指出，第6.4和7.2段介绍一种旨在计算天线系统总体辐射方向图的分析程序。本节的主要目的是提供一种推荐使用的统一方法，以评估理想状况下的天线系统性能。

然而，不应忘记，在实践中，所得结果可能会与按照上述程序计算出的辐射图之间存在偏差（如第2部分所述）。

1.1 参考系

在《无线电规则》中，天线“波束”的水平角（“波束倾斜”）被确定为相对于平面的角度，向下倾斜为负角。波束方位角为从正北按顺时针方向测得的角度。为制定相关规则，使用共同参考系（如上述定义所体现的参考系）至关重要，以确保在涉及计划使用另一个服务区时，一个天线波束的影响得到适当考虑。然而，本建议书仅关注天线本身的特性以及在下列条件下相关数学公式是否更加易于驾驭和简便：

- 与天线本身有关的参考系得到使用；
- 所有角度都以弧度而非度数表示。

在本建议书中，酌情使用了极坐标和笛卡尔坐标。极坐标使用：

r – 与源头之间的距离； θ – 仰角； φ – 方位角

笛卡尔坐标使用：

x – 任意水平轴； y – 任意水平轴（与 x 呈正交）； z – 垂直轴

“ x ”轴通常是天线主波束的轴。当这些坐标系“重叠”时，共同参考系（ $r, \theta = 0, \varphi = 0$ ）则为 x 轴。

应当指出，在考虑天线服务区及其对其他方面的服务区具有的潜在影响时，必须将波束方向重新调回正北方向。

2 天线辐射方向图的几何表述

天线可仅由单一成分组成，也可由一系列辐射成分组成。可用三维点的轨迹表述天线的空间辐射分布，或方向图。基于天线电中心部位的球面和半径（与天线的物理和电气规格相比很大），点的轨迹上的每一点均有一个波动势值（c.m.f.）*。

球面一点的c.m.f.在低于最大c.m.f.时，以dB表示，标为负-0 dB。

三维辐射方向图以图1所示参考坐标系为基础。

下列参数得到确定：

θ ：与水平面形成的仰角（ $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ ），负数角度表示波束向下倾斜；

φ ：与一个x轴形成的方位角（ $0 < \varphi < 2\pi$ ）；

r ：源点与观测点之间的距离；

Q：观测点。

x、y和z轴是一套正交笛卡尔坐标，有时在此之上叠加极坐标，以帮助以数学形式表述天线的特定特性。“z”轴始终为垂直轴，而“x”和“y”轴则被选来最好地表述天线及其特性。

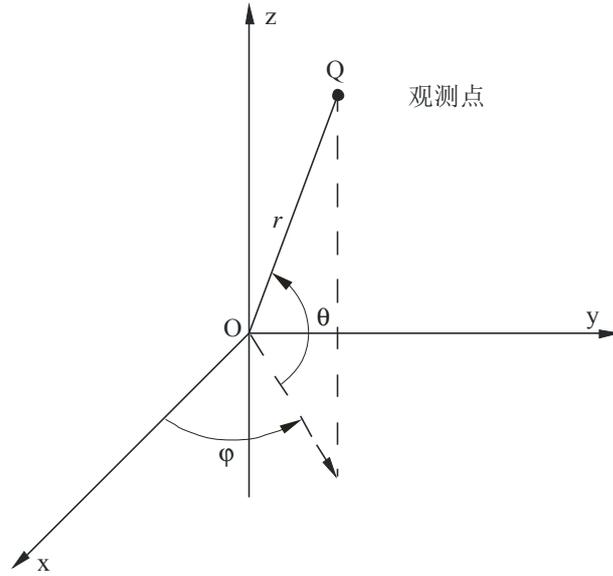
* 波动势和特定波动势定义（见ITU-R BS.561建议书）。

空间特定点上的波动势是天线在该点产生的电场强与该点到天线之间距离的乘积。距离必须足够大，这样场强的反射成分才可被忽略不计。

c.m.f. (V) 在1公里的距离时在数字上等于电场强 (mV/m)。

空间一点的特定波动势为天线辐射功率是1 kW时该点的c.m.f.。

图1
参考坐标系



BS.1195-01

3 辐射方向图和增益计算

在图1的参考坐标系中，由天线贡献的电场幅度由下列公式表示：

$$|E(\theta, \varphi)| = k |f(\theta, \varphi)| \quad (1)$$

其中：

$|E(\theta, \varphi)|$ ： 电场幅度；

$|f(\theta, \varphi)|$ ： 辐射方向图函数；

k ： 设置 $|E(\theta, \varphi)|_{max} = 1$ 的归一化因素，即 0 dB。

以球形坐标系表示构成成分总电场则得出：

$$|E(\theta, \varphi)| = \left[|E_{\theta}(\theta, \varphi)|^2 + |E_{\varphi}(\theta, \varphi)|^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

辐射源方向性 D 被定义为最大辐射强度（或功率通量密度）与辐射相同总功率的各向同性源辐射强度之间的比，可由下列公式表示：

$$D = \frac{4\pi |E(\theta, \varphi)|_{max}^2}{\int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |E(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta \, d\theta \, d\varphi} \quad (3)$$

如采用等式(1)，则 D 可以源点归一化辐射方向图函数表示， $|f(\theta, \varphi)|$ ：

$$D = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)|_{max}^2}{\int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |f(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta \, d\theta \, d\varphi} \quad (4)$$

以上方向性定义仅是源辐射方向图形状的函数。

为考虑到天线效率，有必要定义其增益 G ，以其最大辐射强度与具有相同输入功率的参考天线最大辐射强度之比表示。

如果将无损耗的各向同性天线作为推荐参考天线，则以下列公式表示增益 G_i ：

$$G_i = 10 \log_{10} D \quad \text{dB} \quad (5)$$

实践中使用的另一个公式是相对于半波偶极子的增益 G_d ：

$$G_d = G_i - 2.15 \quad \text{dB} \quad (6)$$

4 辐射成分

4.1 点源

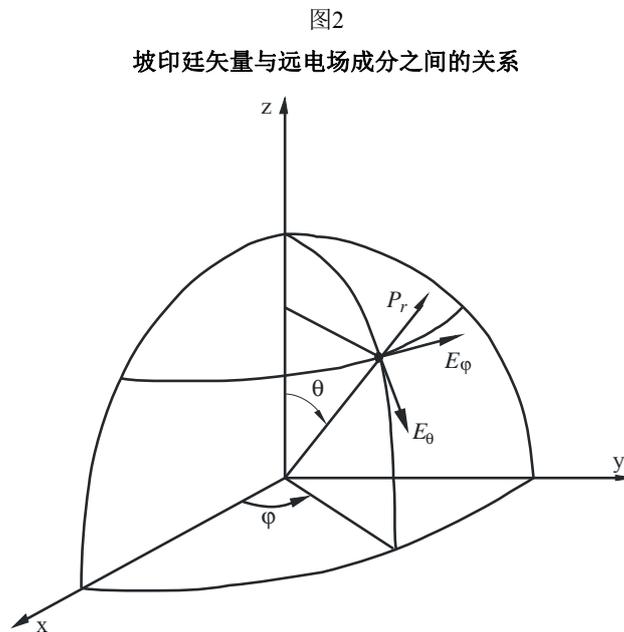
当天线辐射在远场（夫琅禾费区）时，即，距天线的距离使电磁场能被视为与传播方向呈正交，则天线可被视为点源。

在VHF和UHF频率上，该距离通常甚小，特别在服务区，使得任何辐射成分都可被视作点源，无论其规模和复杂性如何。

此外，作为典型VHF和UHF辐射成分近似值的这些点源的辐射方向图通常是定向的。

在远场情况下，源自点源的功率通量始终为径向（radial）。

因此，如图2所示，坡印廷矢量仅源自两个横向的电场成分 E_θ 和 E_ϕ 。



当球形波阵面距离足够大、可被视为一个面时，则可由下列公式得出平均坡印廷矢量（仅为径向成分） P_r ：

$$P_r = \frac{E^2}{2Z_0} \quad (7)$$

其中：

$$E^2 = E_\theta^2 + E_\phi^2 \quad (8)$$

及：

Z_0 ：自由空间的固有阻抗

E ：总电场强度。

假设恒定半径范围的总电场强发生变化，则所得方向图为 θ 和 ϕ 的函数。将辐射图数值针对其最大值（假设在最大辐射方向）进行归一化，则得出的方向图称作相对幅度辐射方向图。

下列公式给出辐射功率 P_{is} 的各向同性源在 r 距离上产生的电场强 E （亦见ITU-R P.525建议书）：

$$E = \left[30 P_{is} / r^2 \right]^{1/2} \quad \text{V/m} \quad (9)$$

其中：

P_{is} ：各向同性功率（W）

r ：距离（m）

上述关系亦称作自由空间传播条件。

将各向同性辐射功率 P_{is} 归入半波偶极子辐射功率 P ，即， $P_{is} = 1.64 P$ ，则电场强公式变为：

$$E = 7.014 \sqrt{P} / r \quad \text{V/m} \quad (10)$$

以mV/m表示 E 并以m表示 r ：

$$E = 7.014 \times 10^3 \sqrt{P} / r \quad \text{V/m} \quad (11)$$

或以dB(μ V/m)表示 E ：

$$E = 20 \log_{10} \left(\sqrt{P} / r \right) + 136.9 \quad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \quad (12)$$

现在考虑各向异性点源，辐射到不同方向的电场强 E_{ni} 将受到辐射方向图的影响，因此

$$E_{ni} = f(\theta, \phi) \cdot E_{is} \quad (13)$$

其中：

E_{ni} ：由辐射功率 P 的各向异性点源在观测点Q（ r, θ, ϕ ）上产生的电场强

$f(\theta, \phi)$ ：各向异性点源的相对幅度辐射方向图函数

E_{is} ：由辐射相同功率 P 的各向同性点源在观测点Q产生的电场强

4.2 点源阵列

在考虑点源阵列（如通常在VHF和UHF频率上遇到，此时常常需要复杂的天线系统），首先考虑以下两种情况：

- a) 各向异性阵列，类似点源；
- b) 各向异性阵列，非类似点源。

情况a)所述阵列的成分在相同方向上具有相等相对幅度辐射方向图（同样形状）。纵向堆栈面板天线阵列通常属该种情况（见第6.4.1段），其波束指向相同方向。

情况b)最为常见，阵列源相对幅度辐射方向图之间不存在相互关系，可呈任意方向。

4.2.1 方向图的倍增

对各向异性、但点源相似的阵列（第4.2段所述情况a)），可适用方向图倍增原理。按照该原理，各向异性但点源类似阵列的辐射方向图的相对幅度是单个源与各向同性点源阵列幅度方向图的乘积，而总相位方向图为单个源方向图与各向同性点源阵列相位方向图之和。

可以下列公式表示：

$$E(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) \cdot F(\theta, \varphi) \quad \angle \left(f_p(\theta, \varphi) + F_p(\theta, \varphi) \right) \quad (14)$$

按照图1所示坐标系，其中：

- E : 电磁场强矢量
- $f(\theta, \varphi)$: 单个点源相对幅度辐射方向图函数
- $f_p(\theta, \varphi)$: 单个点源相位辐射方向图函数
- $F(\theta, \varphi)$: 各向同性点源阵列的相对幅度辐射方向图函数（也称作阵列因子）
- $F_p(\theta, \varphi)$: 各向同性点源阵列的相位辐射方向图函数。

4.2.2 矢量方向图加法

当考虑更为常用的各向异性、非类似点源阵列情况（即，各向异性点源具有不同辐射方向图和/或不同最大辐射方向，第4.2段所述情况b)）时，则不再适用方向图倍增原理。

这是VHF和UHF天线系统的典型情况，在此，辐射成分（平板、八木等）被视作朝向不同方向的具有类似或非类似辐射方向图的点源。

在这种情况下，最后辐射方向图 $E(\theta, \varphi)$ 通过任何特定角度各单个点源辐射（幅度和相位）的矢量加法得出，具体如下：

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n E_i(\theta, \varphi) \quad (15)$$

其中:

$E_i(\theta, \varphi)$: 第*i*个源的辐射电场

$E(\theta, \varphi)$: 所得场强。

4.3 VHF和UHF基本辐射器

虽然VHF和UHF广播较少使用基本辐射器, 但通过简短调查可以发现大多数VHF和UHF天线系统最常用的基本天线辐射器。

这些基本天线辐射器为: 偶极子、环路、插槽和螺旋形。

VHF和UHF最常用的基本辐射器是偶极子。

在图3的坐标系中, 由长度 l (带有正弦电流分布) 偶极子产生的场强组成部分 E_θ 和 E_φ 为:

$$E_\theta = -60 j I_0 \frac{e^{-j r \beta}}{r} \cdot \frac{\cos(\beta l \sin \varphi \cos \theta) / 2 - \cos \beta l / 2}{1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \theta} \cdot \sin \varphi \sin \theta$$

$$E_\varphi = 60 j I_0 \frac{e^{-j r \beta}}{r} \cdot \frac{\cos(\beta l \sin \varphi \cos \theta) / 2 - \cos \beta l / 2}{1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \theta} \cdot \cos \varphi \quad (16)$$

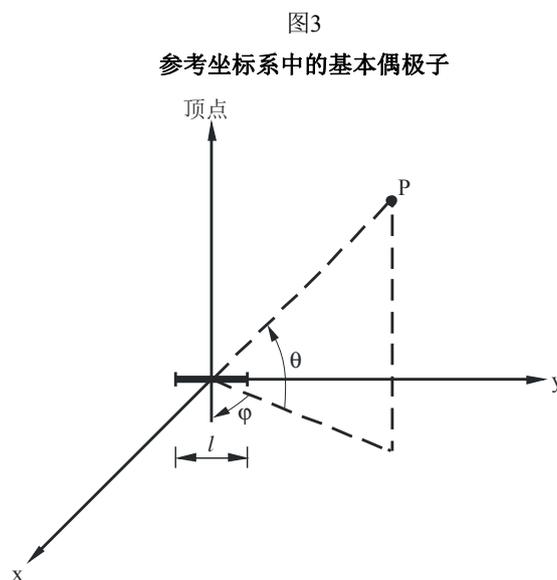
其中:

I_0 : 馈电电流

$\beta = 2\pi/\lambda$

r : 计算的Q点距离。

以上等式简化了 $l = 0.5\lambda$ (亦见CCIR天线图, 1984年版)。



BS.1195-03

在此情况下, 偶极子在其共振频率上产生 72Ω 阻抗, 并可被认为等同于串联谐振电路。

加大构成偶极子臂的导体直径，可提高容量或降低等效串联谐振电路中的电感应。由于电路的Q由此降低，因此，偶极子可在很大频率范围内工作。

5 极化

传统上，调频（FM）广播使用水平极化，电视广播或使用水平极化或使用垂直极化。

近年来，由于带有内置天线的FM收音机和汽车FM无线电收音机得到广泛使用，因此，也随之产生了其他形式的极化，如圆形和倾斜极化。

目前该技术正在被用于电视传输，特别是UHF的电视传输。在此，圆形极化在降低城区“模糊图像”方面具有更好的性能。

ITU-R BS.464号报告给出了根据具体情况选择最适合于任何新的FM业务极化的必要信息。

以下简要概述各种不同形式的极化，以方便读者更好地评估其之间的差异。

5.1 椭圆极化

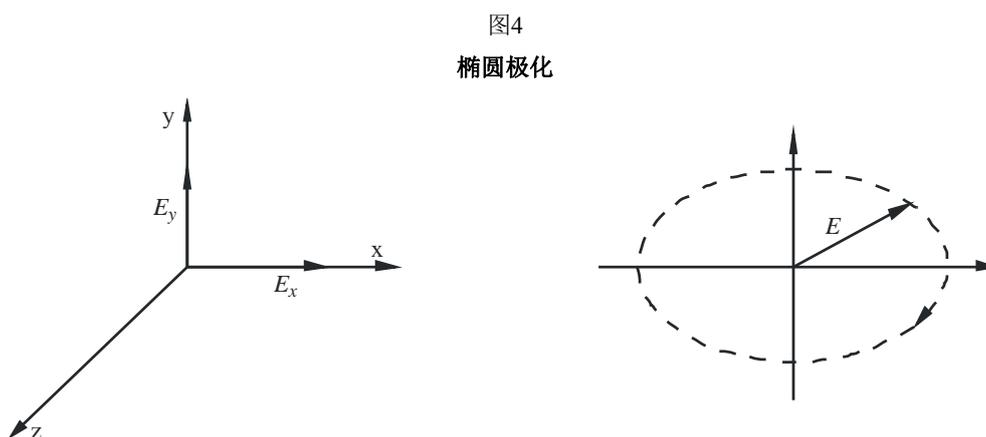
可将不同形式的波形极化视作更为普通的椭圆极化的特殊情况。

如图4所示，椭圆极化波可由两个相互垂直的线性波表示，这两个线性波沿z轴传播，并分别具有由以下公式表示的电场：

$$E_x = E_1 \sin \omega t$$

$$E_y = E_2 \sin (\omega t + \varphi) \quad (17)$$

其中 φ 是两波之间的相位差。当椭圆波沿z轴传播时，所得E矢量描述的椭圆半轴由 E_1 和 E_2 表示。



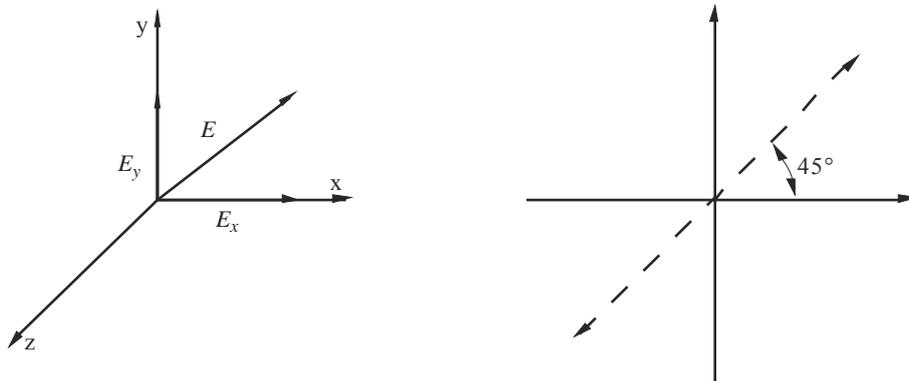
5.2 水平和垂直极化

当等式 (17) 为 $E_y = 0$ (水平极化) 或 $E_x = 0$ (垂直极化) 时, 会出现这两种情况。

5.3 倾斜极化

当等式 (17) 中 $E_1 = E_2$ 和 $\varphi = 0$ 时, 出现 45° 角的倾斜极化。

图5
倾斜极化



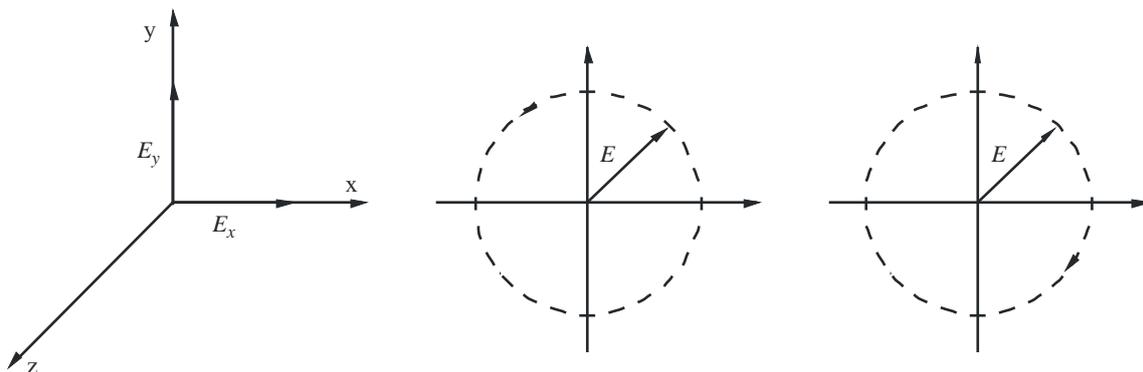
BS.1195-05

5.4 圆形极化

当等式 (17) 中 $E_y = E \sin \omega t$ 和 $E_x = \pm E \cos \omega t$ 时, 出现圆形极化。当符号为正时, 波形在正 z 轴方向沿顺时针方向旋转 (右侧圆形极化)。

当符号为负时, 出现左侧圆形极化:

图6
圆形极化



BS.1195-06

可通过使用两个线性极化天线 (分别在上述给出的适当相位关系中辐射垂直和水平极化) 产生圆形或倾斜极化。

6 天线阵列

如第4.3段所述，在VHF和UHF频率上，极少单独使用基本辐射器，通常它们被集体用于天线阵列，以实现：

- 更高的增益；
- 单向方向图。

最常用的阵列为基本辐射器线性阵列。这些阵列由厂商组装，并以多种不同形式提供给设计工程师，如，偶极子、八木、平板天线等，然后被用来形成更为复杂的天线系统（即，阵列中的阵列）。

在多数情况下，这些阵列具有由使用反射器而获得的单向方向图，前者根据具体情况可能反射金属表面，或适当的寄生表面，或有源成分。

以下各节阐述特定线性阵列的基本特性，非常方便天线系统设计人员使用，如，宽边天线阵列和直排天线阵列，以及带有寄生成分的线性阵列。

6.1 宽边阵列

通过馈送线性阵列成分（其电流具有相同幅度和相位）可以轻而易举地实现宽边阵列，所得方向图拥有与阵列线垂直（或与包含辐射源的面垂直）的最大值（或极限（如果不提供反射器的话））。

在VHF和UHF频率上，设计人员最为感兴趣的两类宽边阵列是：水平偶极子垂直阵列和垂直偶极子全向直排阵列。

水平偶极子垂直阵列

水平偶极子垂直阵列具有重复性结构（见图7），包含间隔相等的水平偶极子（通常为 0.5λ ）（由具有相同幅度和相位的电流馈送）的垂直堆栈。

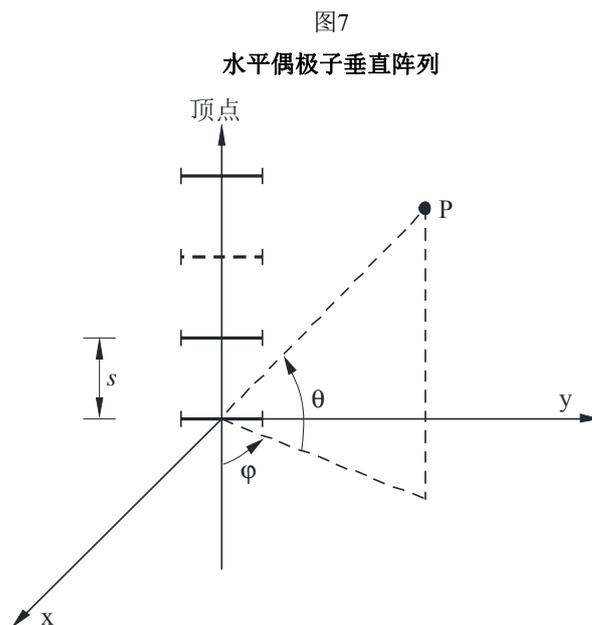
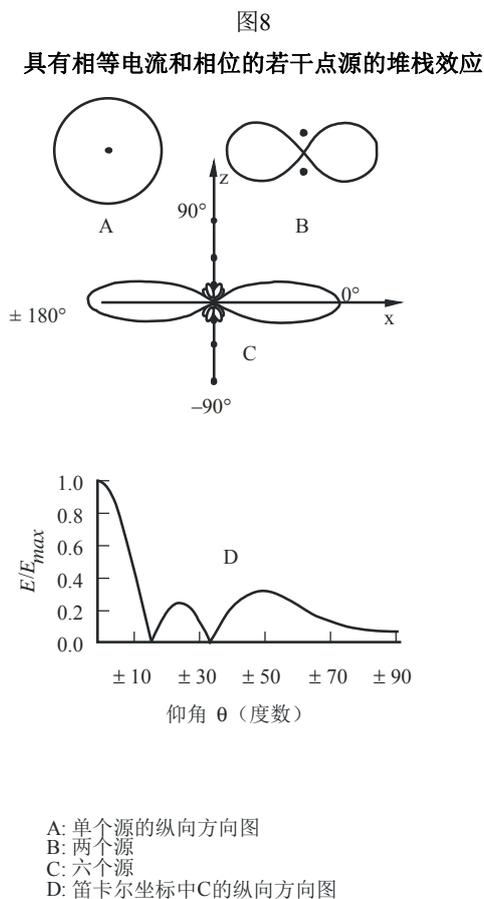


图8给出这类阵列的典型方向图（x-z面）。



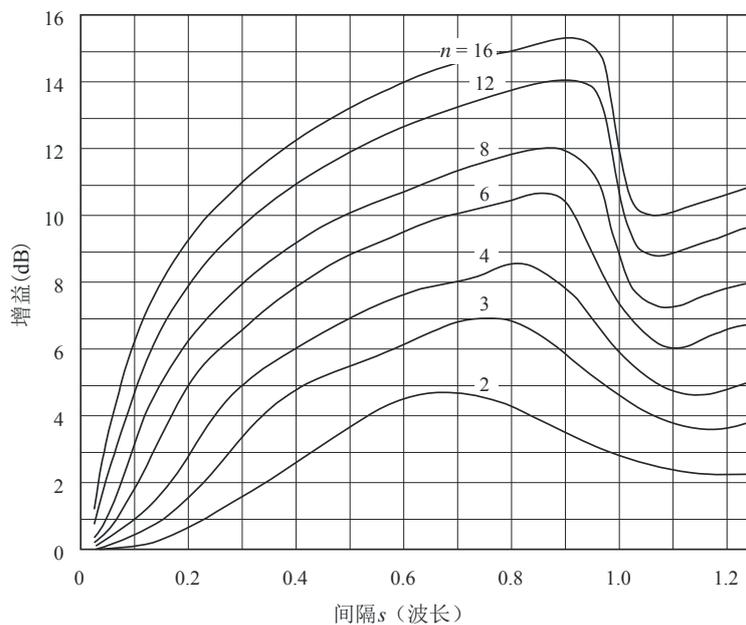
BS.1195-08

值得注意的是，阵列增益是若干成分及其间隔（由此也是阵列长度）的函数。

图9给出了该关系，从中可以看出，根据 n 值情况，最佳间隔范围为 $0.65-0.95 \lambda$ 。应强调说明，该最佳间隔取决于频率，当天线系统设计用于宽带（或相邻信道）操作时，应给出安全边际，以避免当间隔值超出最佳值时出现的增益急剧下降。对于拥有 n 到4个成分的单级平板天线阵列而言，通常的间隔值在 0.5λ 范围内。

图9

作为 n 个成分及其间隔 s 函数的水平偶极子垂直阵列
(无反射器)的增益。该增益归入单个成分增益



BS.1195-09

然而，在组装单个辐射器（偶极子）阵列时，设计人员可选择接近最佳的数值。

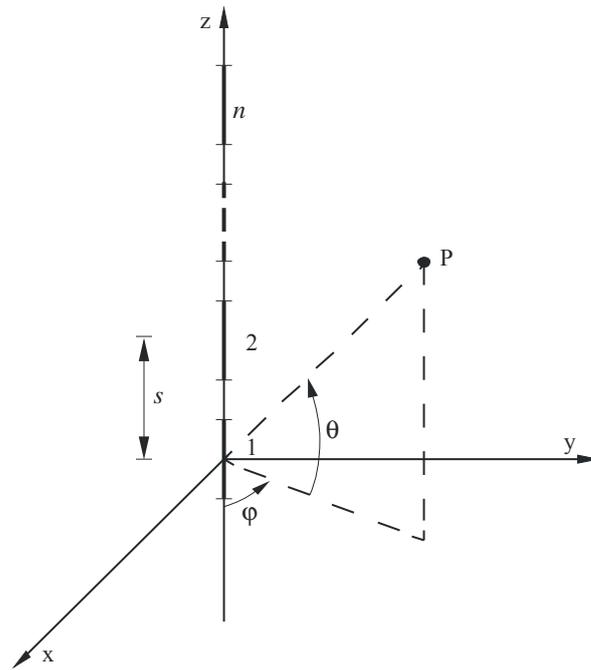
全向直排阵列

全向直排阵列包含间隔相等的垂直偶极子（由具有相同幅度和相位的电流馈送）的垂直堆栈（见图10）。

该配置给出全向方位角方向图和定向纵向方向图。总增益是 n 个成分与其间隔之间的函数，见图11。

VHF频率上广泛使用这类辐射结构，特别是FM广播的全向天线系统（亦见第7.3.1段）。通常在设计时将不同源（经常为折叠偶极子）进行组装，应特别谨慎选择最佳间隔。留有足够边际可方便多信道操作。

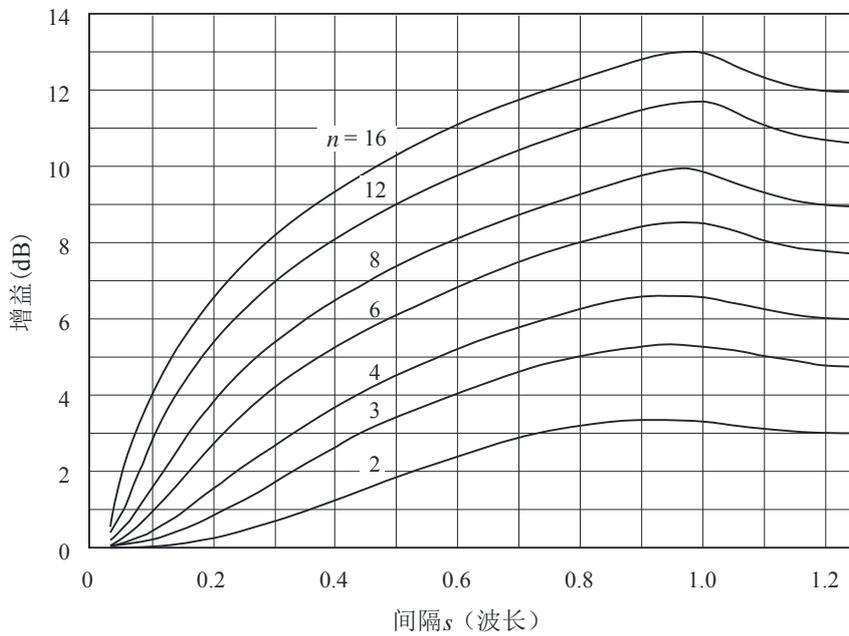
图10
全向直排阵列



BS.1195-10

图11

作为 n 个成分及其间隔 s 函数的垂直直排阵列的增益。该增益归入单个成分增益



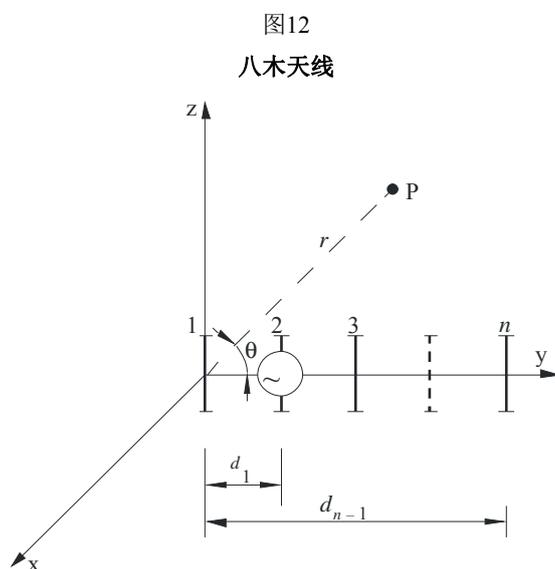
BS.1195-11

6.1.1 带有寄生成分的线性天线阵列

在带有寄生成分的线性天线阵列中，由被驱动成分辐射的电磁场诱导流过寄生成分的电的出现。

在VHF和UHF频率上，带有寄生成分阵列天线的最重要的应用由八木天线代表，图12给出了具体图形。

八木天线包含一个被驱动成分、一个反射器和一个或多个导向器（directors）。总增益随着所用导向器的增多而增加。



BS.1195-12

注1 – 可对方向图进行量化计算，方法是假设图12所示纵向极化八木天线的第*i*个成分方向图函数在z-y纵向平面内：

$$f_i = \frac{\cos(\beta h_i \cos \theta) - \cos(\beta h_i)}{\sin \theta} \quad (18)$$

其中：

θ ： 仰角

h_i ： *i*成分的半长

$\beta = 2\pi/\lambda$

由于八木天线每一个成分的方向图都不同，因此，不可使用方向图倍增原理（见第4.2.1段），且有必要做矢量加法（亦见第4.2.2段）。

方向图可由下列公式得出：

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n I_i \cdot f_i(\theta) \cdot e^{j\beta d_{i-1} \cos \theta} \quad (19)$$

其中：

n ： 偶极子总数

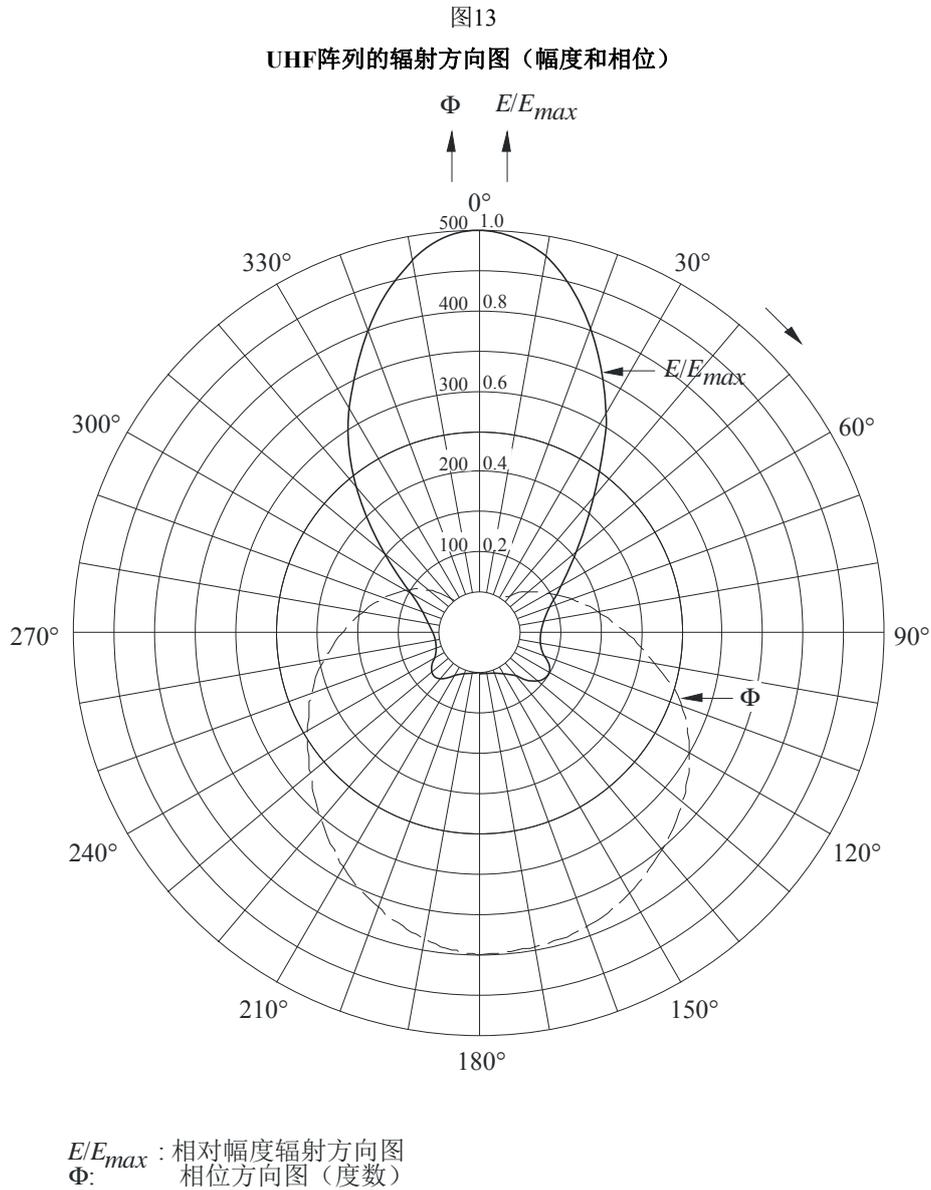
I_i ： *i*成分的电

d_{i-1} ： 从反射器到*i*成分的距离（ $d_0 = 0$ ）。

6.2 幅度和相位辐射方向图

如考虑单点源，则完全由相对幅度辐射方向图确定收到信号的空间分布，即，相关相位方向图不能提供更多有用信息。

如果在阵列中使用有限规模的各向异性源，则所得辐射方向图必须通过使用相对幅度辐射方向图和相关相位方向图来加以确定（见图13）。



BS.1195-13

如前所述，为评估总体天线方向图，我们需要最大辐射方向中的幅度和相位这两种辐射方向图。通常，这些方向图由制造商提供，或用户按照第2部分所述程序测量，且应按照第7.2段所示，使用二者来计算天线系统的方向图。

然而，有时现有使用单个天线的系统不具备充分的技术规范，需要予以重新设计，或总体而言，仅已知相对幅度方向图，则可能需要使用以下精确度较低的方式。

在这种情况下，辐射参考点，即，相对幅度辐射方向图的来源可能需要被适当地植入所谓的“相位中心”或“电中心”点中，其中的相位方向图表明最大非完整圆部分的最小变化，即，针对被辐射波阵面的实际几何中心。

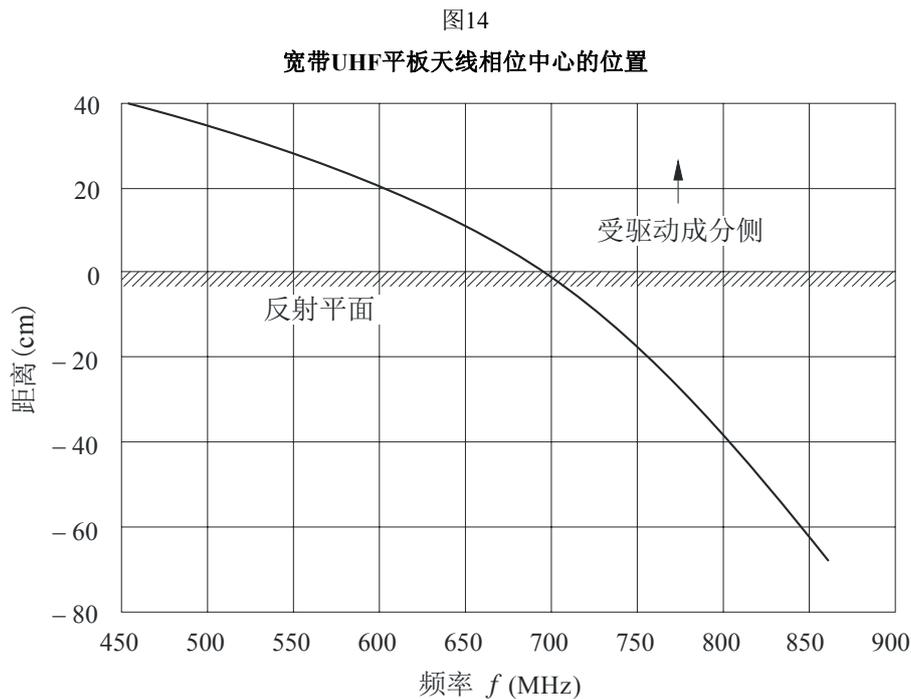
在该非完整圆部分中，阵列可被视作是各向异性点源，位于相位中心，其辐射方向图可完全仅通过使用幅度辐射方向图确定。

在使用偶极子和反射器的阵列中，相位中心通常处于偶极子输入终端和反射屏幕之间的区内，且一般接近偶极子终端。

在平板天线阵列中（见第6.4.1段），根据测量情况，相位中心的确切位置通常由制造商规定。

由于在VHF和UHF频率上，多数单个天线可在相对较大带宽范围内操作（见第6.4.1段），因此，制造商进行测量，并在工作频段内找出不同频率的相位中心。根据这些测量，得出一条曲线，该曲线显示相位中心与频率之间的几何位置变化（见图14）。

从图14中还可看出，如在所涉方向上相位中心的几何位置变化很大，则相位中心方式在计算辐射方向图时具有局限性。在计算多个天线合并辐射效应的点上，这种不准确性尤为突出，因此，可被认为改变了考虑到最小值和旁瓣的所得辐射方向图。



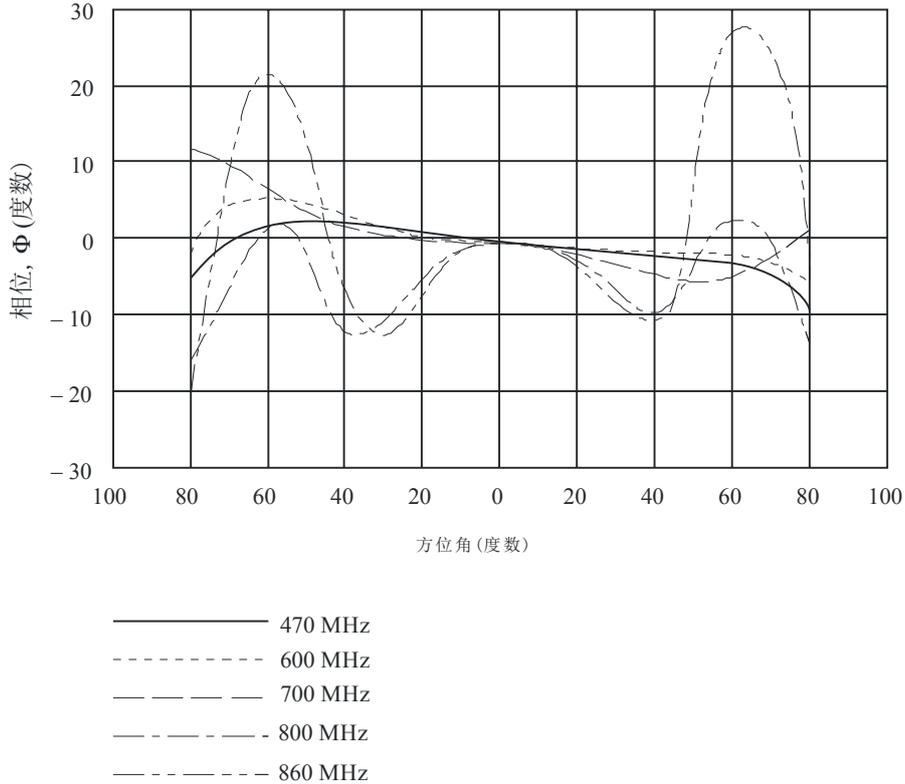
BS.1195-14

此外，制造商通常还提供一系列给出在各不同频率得出的相位方向图曲线。这些曲线对于评估所述频段内可作为点源位置使用的相位中心的假设是否有效（见图15）。

注1 – 在相位中心位置未知的情况下，如，重新得到设计以便在不同于最初设计频率上工作的旧天线系统（辐射器等未充分明确），通常在天线系统设计时使用经验法则，其中包括将相位中心置于辐射偶极子的馈送终端。这种假设给出总方向图的更为保守结果，也可将其用于其它类型辐射成分，如，八木天线。

图15

各不同操作频率上的宽带UHF平板天线的相位方向图



BS.1195-15

6.3 天线阵列辐射方向图的计算

在设计辐射器由制造商提供的天线系统（简单偶极子、平板或八木天线等）时，制造商提供的辐射方向图通常为三维幅度和/或相位方向图的垂直和水平部分，其中包含最大辐射方向。假设 $f_A(\theta, \varphi)$ 是辐射器的幅度方向图函数，可分别由下列等式得出水平和垂直辐射方向图：

$$f_{AH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}} \quad \text{和} \quad f_{AV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}} \quad (20)$$

其中 θ_{max} 和 φ_{max} 分别为出现最大辐射时的仰角和方位角。

在实践中， θ_{max} 和 φ_{max} 角通常在制造商的数据中设为零。通过下列关系可找出 $\theta \neq \theta_{max}$ 和 $\varphi \neq \varphi_{max}$ 角的幅度辐射方向图实际值：

$$f_A(\theta, \varphi) = f_{AH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}} \cdot f_{AV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}} \quad (21)$$

同样，相位方向图函数 $f_P(\theta, \varphi)$ 可表示为：

$$f_P(\theta, \varphi) = f_{PH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}} + f_{PV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}} \quad (22)$$

其中 $f_{PH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}}$ 和 $f_{PV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}}$ 分别为辐射器的水平和垂直相位方向图函数。

该公式所用的假设已在实践中得到证实，方向图的任何其它垂直或水平部分都将具有与垂直或水平部分相似的形状，其中包含最大辐射方向。

6.4 VHF和UHF天线阵列

6.4.1 平板类型天线

在VHF、特别是UHF频率上，基本辐射器的规格足够小，方便使用制造商作为完整产品提供的成分设计完整天线系统。

被称作平板的这些成分由制造商通过将基本辐射器组装为较为复杂的阵列而制造。之后，设计工程师可将这些平板作为“组装件”来构建最终天线系统。

该技术被广泛用于现代VHF和UHF天线系统的设计之中，因为它便于更好地控制和优化天线系统方向图，进而在设计完整系统过程中，提高频谱效率并带来节约。

平板可包含单一一个简单的半波偶极子（安装在离反射面的一个确定距离上），或对于更复杂的阵列而言，包含4（或更多）窄带或宽带线性或圆形极化基本辐射器。

制造商针对下列方面对平板进行优化：

- 增益，
- 辐射方向图，
- 返回损耗，
- 阻抗，
- 操作频段。

优化中使用的参数为：

- 基本辐射器的物理结构，
- 基本辐射器的相互间隔，
- 辐射器与反射器之间的距离（以及反射器的形状（有些情况下）），
- 馈送系统。

现代平板天线的一个主要设计特点是宽带操作能力。同一天线系统经常需要同时发射一个以上节目，发射台站通常如此，它们构成广播网的组成部分，必须为特定区域提供两种或三种节目服务（通常通过频率间隔很大的信道实施）。

对于II波段的FM声音广播而言，这一限制可能并非如此严格，因为此间所需带宽仅为中心频率的 $\pm 10\%$ ，但这在很大程度上影响到了充分涵盖IV和V波段（470-960 MHz）的平板天线的设计。

在这种情况下，需要仔细设计基本辐射器，以降低其等效电路的Q值。通常使用具有较大表面或横断面区域的辐射成分实现这种降低。

图16所示为典型VHF平板天线的设计，其中包含形成两个纵向堆栈的、由中心馈送的全波长偶极子。图17所示为相应垂直和水平辐射方向图。

I波段平板的典型增益数值（通常称为半波偶极子）在5至7 dB之间，而II波段平板天线的上限（最高操作频率）为8 dB。III波段平板天线能够在174-230 MHz的全带宽范围内操作，其增益在10至14 dB之间（垂直极化时略有下降）。

在UHF频率上，辐射成分的更小规模方便建造具有定向辐射方向图的平板天线。在这些频率上，尽管宽带操作要求带来了一些限制，但堆栈式、中心馈送的全波长偶极子技术依然得到广泛使用。

图16

典型I波段或II波段偶极子平板天线

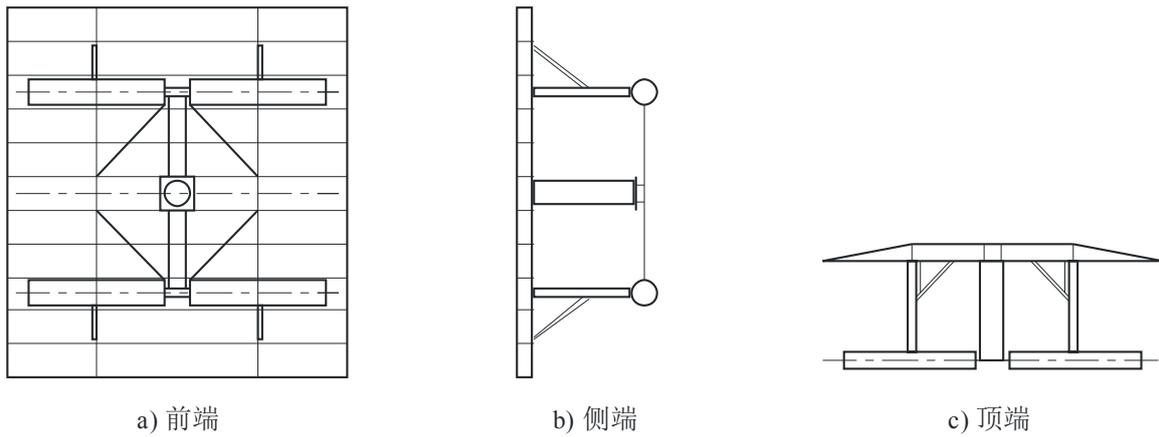
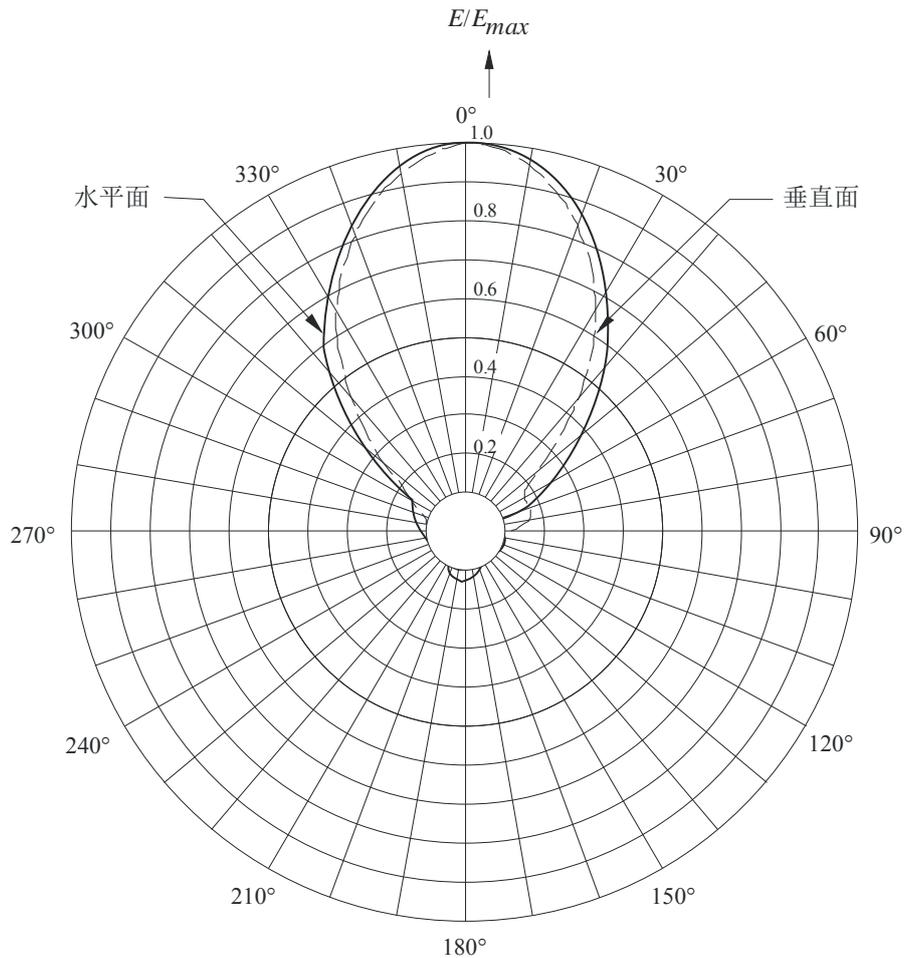


图17

图16所示偶极子平板的垂直和水平辐射方向图



BS.1195-17

宽带操作要求还对平板天线的阻抗、增益和相位中心地点具有影响，因此应由制造商给出其频率变化。典型增益数值在10至12 dB之间，平板输出端的VSWR数值不超过-1.10。

人们对圆形极化电视节目发射的需求刺激了圆形极化平板天线的发展，以满足下列要求：

- 可将偶极子用作基本辐射器，以简化建造工作；
- 在诸多频率带宽范围内提供类似的垂直和水平方向图；
- 降低相邻平板之间的相互耦合，以降低设计的复杂程度；
- 亦提供适合实现全向方向图（带有最低波纹）的辐射图形状。

优选方式依然是使用由交叉偶极子构成的平板天线，尽管由于存在不同的垂直和水平辐射方向图，该解决方案具有一定局限性。

6.4.2 八木天线

进行广播传输的八木天线通常由受驱动成分（一般为0.5波长偶极子）以及使方向图成为单向的反射器和一个或多个导向器（增加增益）组成。

尽管从第6.4.1段所述的考虑方面讲，八木天线不能严格被定义为宽带天线，但可通过设计使其在很宽的频率范围内（从 ± 5 至 $\pm 10\%$ ）操作。

八木天线的现有设计能够完全覆盖II波段或用单一天线覆盖III波段的两个相邻电视信道，根据导向器的数量（1至3个），增益值在4至5 dB范围内。

图18a)和18b)所示为典型FM广播的八木天线及其相关辐射方向图。

八木天线的另一个优势是可对其进行轻而易举的调整，以便通过安排交叉成分而使用圆形极化。

八木天线同平板天线一样，可用作辐射成分，以构成更复杂的天线系统。可以堆栈方式或海湾形式安排天线阵列，其总体方向图可符合具体要求。可按照第4.2段计算所得方向图，其中系统中的八木天线被视作位于其各自相位中心的同性异向点源（通常假设位于受驱动成分的输入端）。

6.4.3 其它类型天线阵列

在VHF广播天线系统中使用的天线阵列还包括对数周期天线（用于变调系统中，既作为接收天线使用，也作为发射天线使用）。

对数周期天线固有的宽带操作能力方便实现可轻而易举在整个广播频段上操作的相关装置。

典型对数周期天线的总体性能可与垂直堆栈双八木天线性能比肩。

7 天线系统

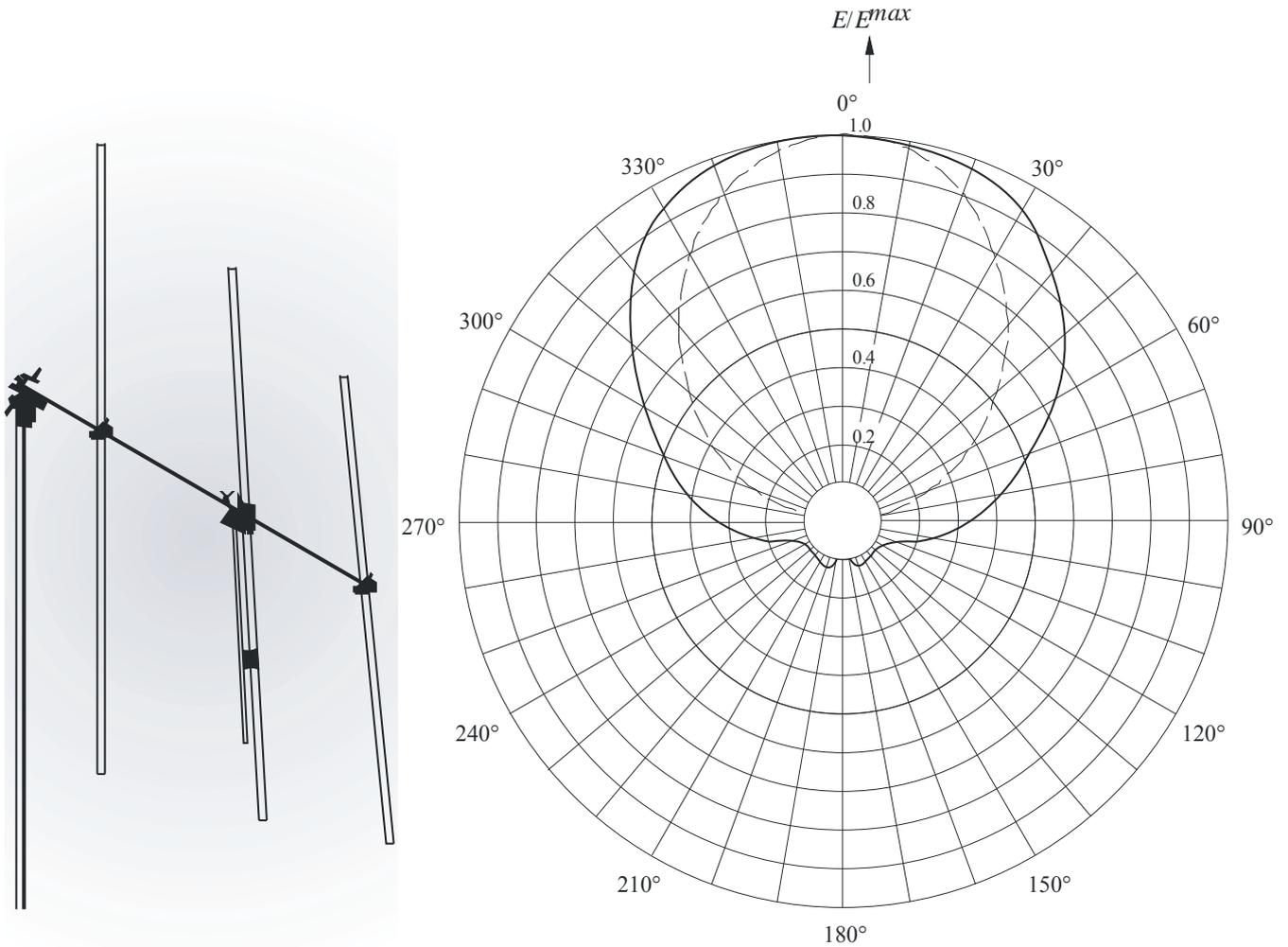
VHF和UHF天线系统从设计上是使用辐射成分阵列的，以便实现优化辐射方向图。

显而易见，由于天线系统辐射的信号首先以视距形式传播，因此，在包含天线的上空水平面辐射的所有能量都被损耗。可以通过缩减天线系统的垂直辐射方向图并将波束向下倾斜降低该损耗。

同样，可能还需控制方位方向图，因为该图应符合服务区要求，并为其它同信道或相邻信道发射台站提供必要保护。

控制上述两种辐射方向图的最有效解决方案是合理安排诸如平板和八木天线等辐射成分的数量，使其在所要求的方位方向进行分布和/或面向这一方向。

图18



a) 进行II波段全覆盖的典型八木天线

b) 典型辐射方向图

—— 与偶极子形成正交的平面方向图
 - - - - 偶极子平面方向图

BS.1195-18

以下各节旨在说明目前在设计优化天线系统中最常得到使用的技术的调查。

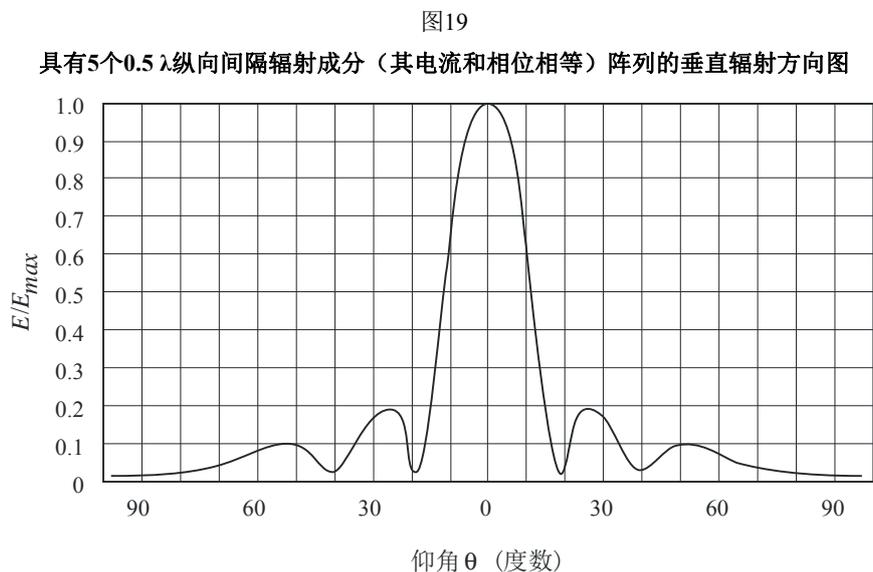
虽然将具体谈到平板天线系统，但以下所述的各项考虑也总体适用于使用辐射成分的技术，这些成分的相互几何位置和馈送特性可由设计人员加以改变，以实现所需的总体方向图。

7.1 天线系统方向图

7.1.1 零值填充

在对应所需服务区的非完整圆部分内，纵向辐射方向图不应包含任何零值，因为零值的出现将导致在与零值出现的三角重合的地点发生理论上的零信号强度。实践中，收到的信号强度将大大低于所需强度，因为该信号源自未得到控制的零值区以外的反射。

图19所示为典型间隔相等的辐射成分（由等同幅度和相位电流馈送（即宽边阵列，见第6.1段））形成垂直堆栈的垂直辐射方向图。从该图可以看出，零值可影响到对应所需服务区的非完整圆部分的很大区域。



BS.1195-19

下列近似公式给出零值出现的角度：

$$\theta = \arctan \frac{\pm k}{n d} \quad (23)$$

其中：

- k ： 零值数（1、2…）
- n ： 形成堆栈的成分数量
- d ： 以波长表示的成分间隔。

目前已开发了多种不同“零值填充”技术，以获得上述接近理想形状的纵向方向图。

最简单和使用最广泛的解决方案包括用非等同幅度电流馈送各种堆栈成分，即，采用适当的功率分配手段。

一种众所周知的功率分配技术是所谓的“二项分布”技术，馈送电流幅度被设为与二项级数系数成正比。

按照上述分布定律，具有3至6个堆栈成分的阵列，可由下列表达式得出馈送电流的相对幅度：

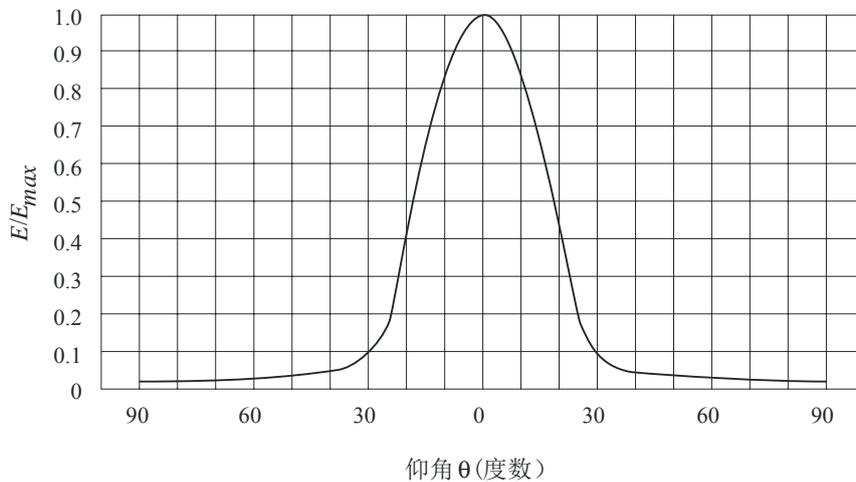
n	相对幅度
3	1, 2, 1
4	1, 3, 3, 1
5	1, 4, 6, 4, 1
6	1, 5, 10, 10, 5, 1

图20所示为使用二项分布的图19所示阵列的垂直方向图。

虽然二项分布消除了零值和副瓣，但阵列波束宽度及方向性也被降低。此外，大型阵列所需的电流幅度变化可能很大，这将在实现和保持必要的不同功率电平方面带来困难。

图20

使用二项幅度分配的图19所示阵列的垂直辐射方向图



BS.1195-20

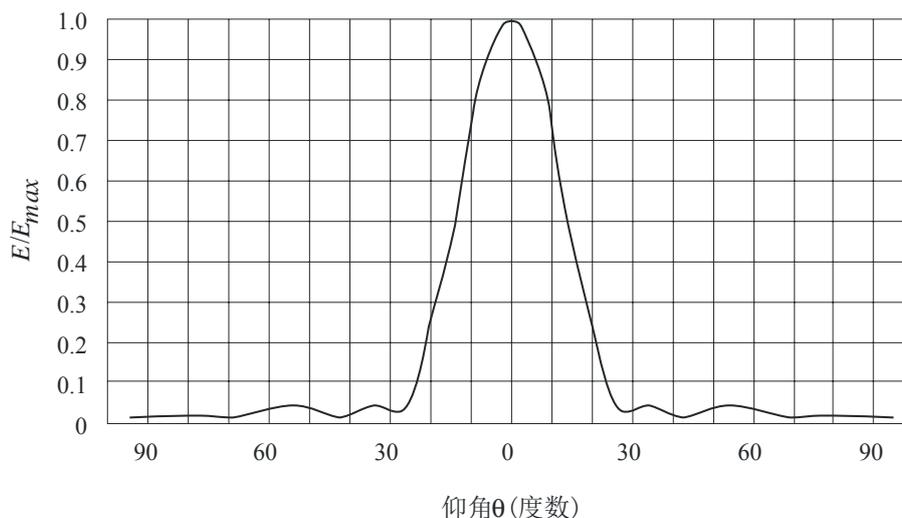
另一种可克服上述缺点的功率分布技术是多尔夫-切比雪夫分布技术。

使用该分布技术时，有必要具体明确所需最大旁瓣电平（如果需要实现首零值之间波束宽度最小化的话），或反过来，具体规定首零值之间的波束宽度，以实现旁瓣电平的最小化。

图21所示为使用1、1.6、1.9、1.6、1多尔夫-切比雪夫幅度分布（对应具体规定的27 dB最大旁瓣消除）的图19所示阵列的垂直方向图。

图21

使用多尔夫-切比雪夫幅度分布的图19所示阵列的垂直辐射方向图



BS.1195-21

该种分布的最佳成分间隔约为 0.5λ ，尽管也适用更大的间隔。

应当指出，所用的任何零值填充技术都将使统一分布的增益降低。

通常这种增益降低一般称作“分布损耗”。

可通过适当的方向图合成技术使这种损耗最小化，通过该技术零值填充功率取自位于地平线上方的方向图部分，或源自主波束的波纹补偿。

其它更复杂的零值填充技术将适当相位分布与必要幅度分布相结合。

在这种更为普通的分布中，统一功率和同等相位分布情况下出现的增益损耗通常称作“补偿损耗”。

7.1.2 波束倾斜

不仅在降低水平面上方辐射功率数量方面需要进行波束倾斜，而且还需要利用该技术将最大功率调向地球表面。

事实上，由于地球的曲度，没有任何波束倾斜的天线阵列的最大辐射将永远无法到达地球表面。

位于地球表面上空300米的天线波束应倾斜 0.5° 以上，以方便最大辐射通达地球表面。

小的波束倾角（ 1° 至 3° ）可轻而易举地通过将辐射成分面进行机械倾斜而实现。较大机械倾斜角并不常用，因为它牵扯到一些相关的机械和环境困难。

还可以通过适当控制电流相位馈送堆栈中的成分来实现波束倾斜，其控制方法有两种，一种是馈送堆栈成分下半部（相对于馈送上半部的电流具有固定相位滞后电流），另一种在每一个相邻辐射成分电流内引入递增相移。

最大的倾斜角通常通过机械和电器倾斜的适当结合实现。应当指出，在成分中引入非相等相位分布将导致使用统一功率（和相等相位）分布时出现“补偿”损耗。

7.2 天线系统辐射方向图

如第6.3和6.4段所述，构成天线系统的辐射成分可被视作是位于其相位中心的各向异性点源。在这种情况下，应如第4.2段所述，利用矢量加法（考虑到了单个辐射方向图）计算所得辐射方向图。

在已知每一成分馈送电流的幅度和相位时，可将上述矢量加法简化为纯几何问题算法。

首先，采用两个各向同性辐射源任意置于一个三维空间的情况，以找出作为其相互位置，馈送电流相位和频率函数被辐射的场之间的相位差。

之后，将所得结果扩展至更为普通的各向异性源情况。在图22中，未给出特定坐标系，因此，源1将被作为基准，并由此得出源2的相位差（用以计算与特定方向对应的P点的所得场）。

在图22中，1'将是源1在包含源2的水平面上的投射。在该面上，显示了穿过1'的北(N)方向。

图22使用了下列参数：

- d : 源2与源1在水平面的投射1'之间的距离
- h : 源1与其投射1'之间的垂直距离
- γ : 水平面上 d 与北向方向之间的角度
- α_H : 水平面上北向方向与水平面计算方向投射之间的角度
- α_V : 垂直面上计算方向与其在水平面投射之间的角度。

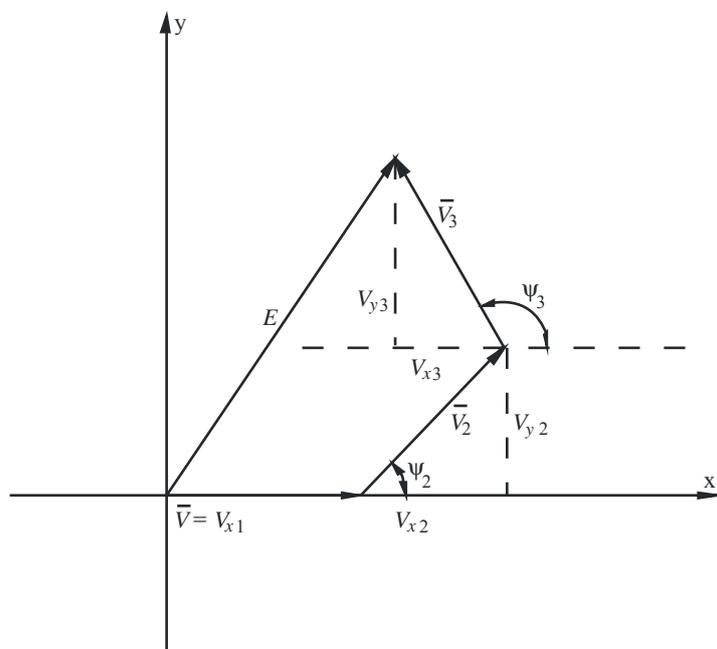
$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n V_i(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n K_i \cdot f_i(\theta, \varphi) \cdot e^{j\psi_i(\theta, \varphi)} \quad (27)$$

其中：

- V_i : 单个场矢量
- K_i : 考虑到源输入功率差的常数
- f_i : 单个源的相对幅度辐射方向图
- $\psi_i(\theta, \varphi)$: 相对于源1和*i*源相位差1 ($\psi_1(\theta, \varphi) = \psi_{p1}(\theta, \varphi)$)。

如图23所示，对于 $n = 3$ ，可能可以很方便地在x-y矢量平面内进行矢量加法。

图23
 $n = 3$ 的x-y平面的矢量加法



BS.1195-23

所得矢量 $E(\theta, \varphi)$ 将拥有下列成分：

$$E_x(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n V_{xi}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot f_i(\theta, \varphi) \cdot \cos \psi_i \quad (28)$$

$$E_y(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n V_{yi}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot f_i(\theta, \varphi) \cdot \sin \psi_i \quad (29)$$

因此：

$$|E(\theta, \varphi)| = \left[|E_x(\theta, \varphi)|^2 + |E_y(\theta, \varphi)|^2 \right]^{1/2} \quad (30)$$

及

$$\psi(\theta, \varphi) = \arctan \left[E_y(\theta, \varphi) / E_x(\theta, \varphi) \right] \quad (31)$$

在实践中, $f_i(\theta, \varphi)$ 将按照第6.3段得到计算(以制造商提供的数据为基础), 而 k_i 将由馈送到系统中的功率确定, ψ_i 则将按照天线系统和相位方向图的几何加以计算。

由于最初未选择具体坐标系, 因此在计算相位差 ψ_i 时, 常见的做法是将所有水平角度归入北向并将所有垂直角度归入水平面。

7.3 天线系统方向图示例

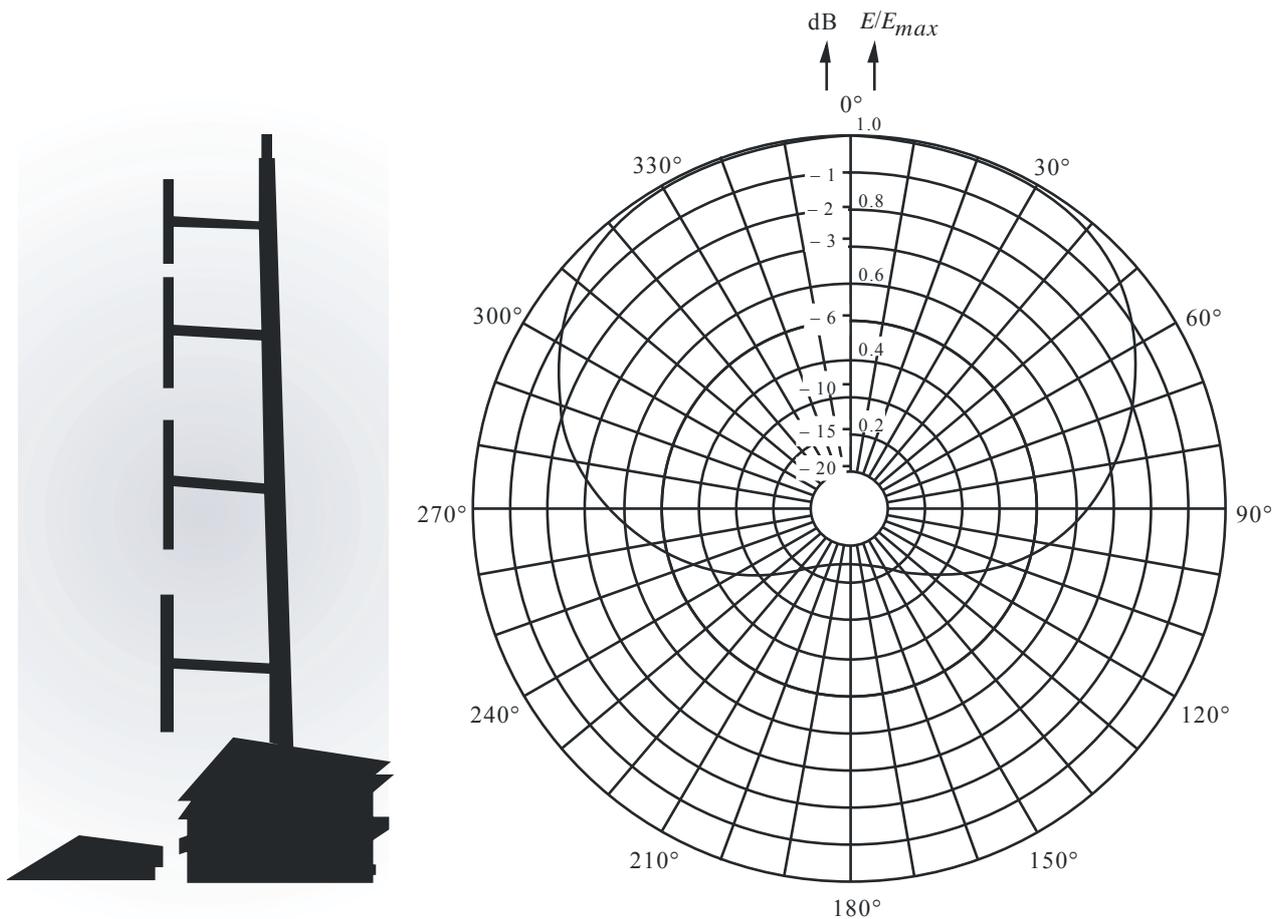
7.3.1 偶极子天线系统

偶极子天线系统在II波段广播中得到广泛使用, 通常包含直排阵列(由具有相同幅度和相位的电流进行馈送的间隔相等纵向偶极子堆栈方式实现)。

图24所示为纵向极化偶极子天线系统及其相关水平辐射方向图。

图24

垂直极化II波段偶极子天线



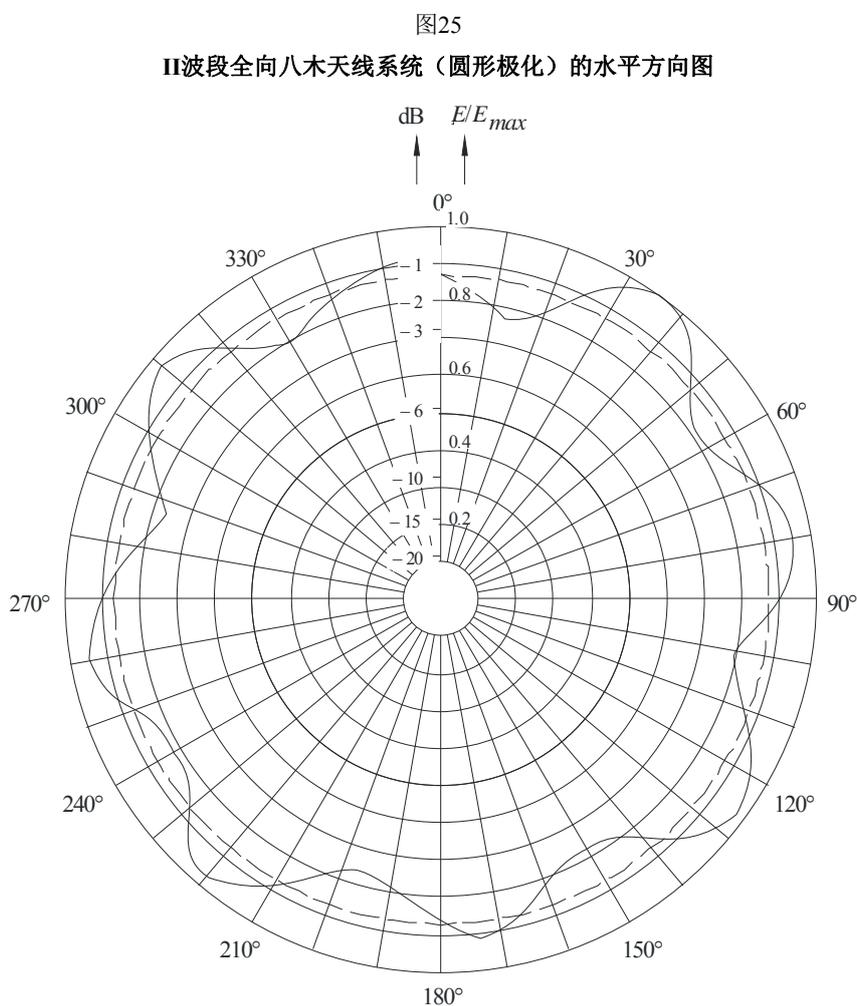
7.3.2 八木天线系统

与平板天线相同，八木天线可用作辐射成分，以形成更复杂的天线系统。可将其安排为堆栈或海湾形式，以形成总体方向图符合具体要求的阵列。所得方向图可按照第4.2段进行计算，在此，系统中的八木天线被视为位于其各自相位中心的各向异性点源，通常假设位于受驱动成分的输入端。

从图18中可以轻而易举地看出，对于水平极化辐射而言，纵向平面的方向性极差。因此，实践中的常见做法是形成八木天线堆栈。

可通过将八木天线进行组合而轻而易举地实现带有单向或全向方向图的天线系统。

图25所示为II波段内4个八木天线系统实现的全向方位辐射方向图。在该情况下，还使用了适当技术对水平方向图最小值做出补偿，具体为在辐射结构中增加4个无源垂直成分（置于交叉方向的适当位置上（见图26））。



BS.1195-25

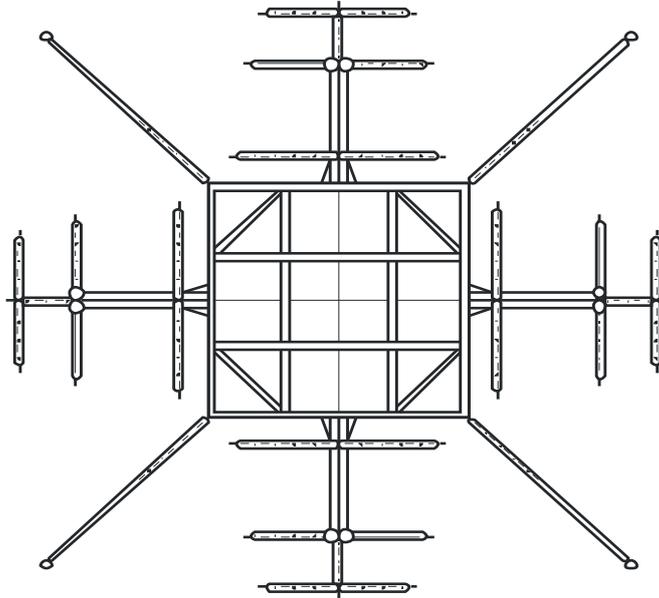
图27所示为II波段中2个八木天线系统的定向方位方向图。

7.3.3 平板天线系统

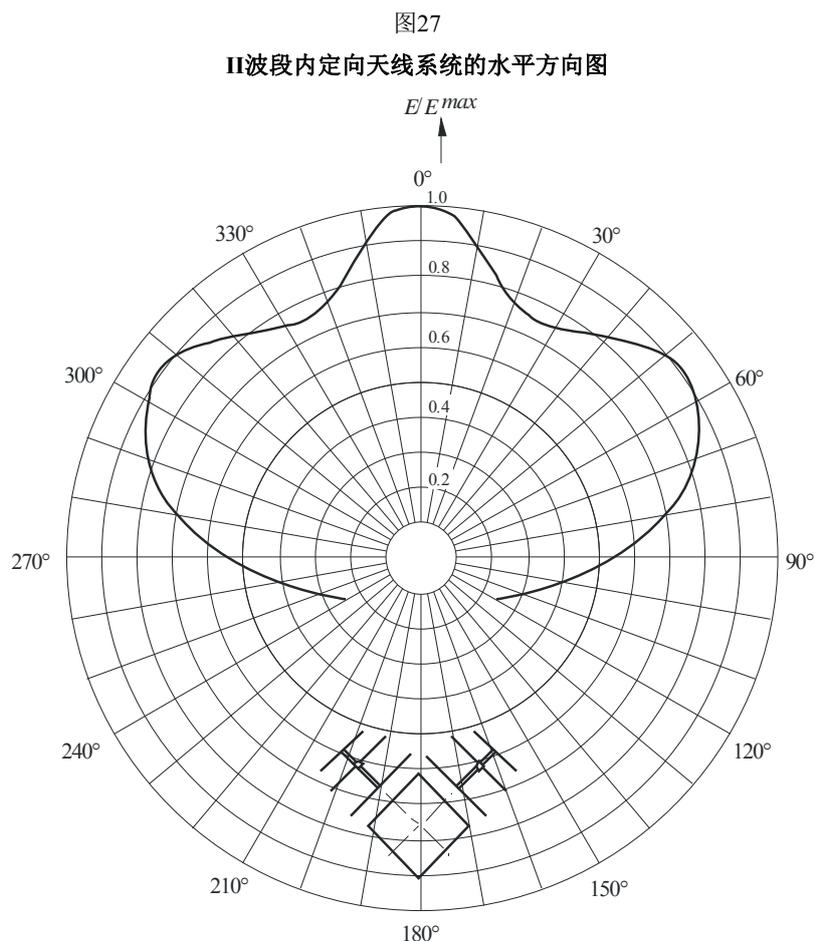
设计得当的平板天线具有单向方向图，主波束与反射器表面呈正交。安装在塔架上的6 dB波束宽度平板天线的方形或三角部分应在需要得到全向方向图时分别呈 90° 或 120° 。

图26

提供图25给出的水平方向图的全向八木天线系统



BS.1195-26



BS.1195-27

因此，当平板天线由交叉方向相位同等的电流馈送时，两个相邻的、安装在侧面的平板合并辐射对单个平板的增益降低做出补偿。

7.3.3.1 全向平板天线系统

因此，可通过为阵列每一个水平部分的平板馈送等同功率获得全向天线系统方向图，各平板安装在塔架侧面的中心。

然而，所得方位方向图（见图28）将拥有“波纹”，其幅度与塔侧长度成正比（以波长表示）。

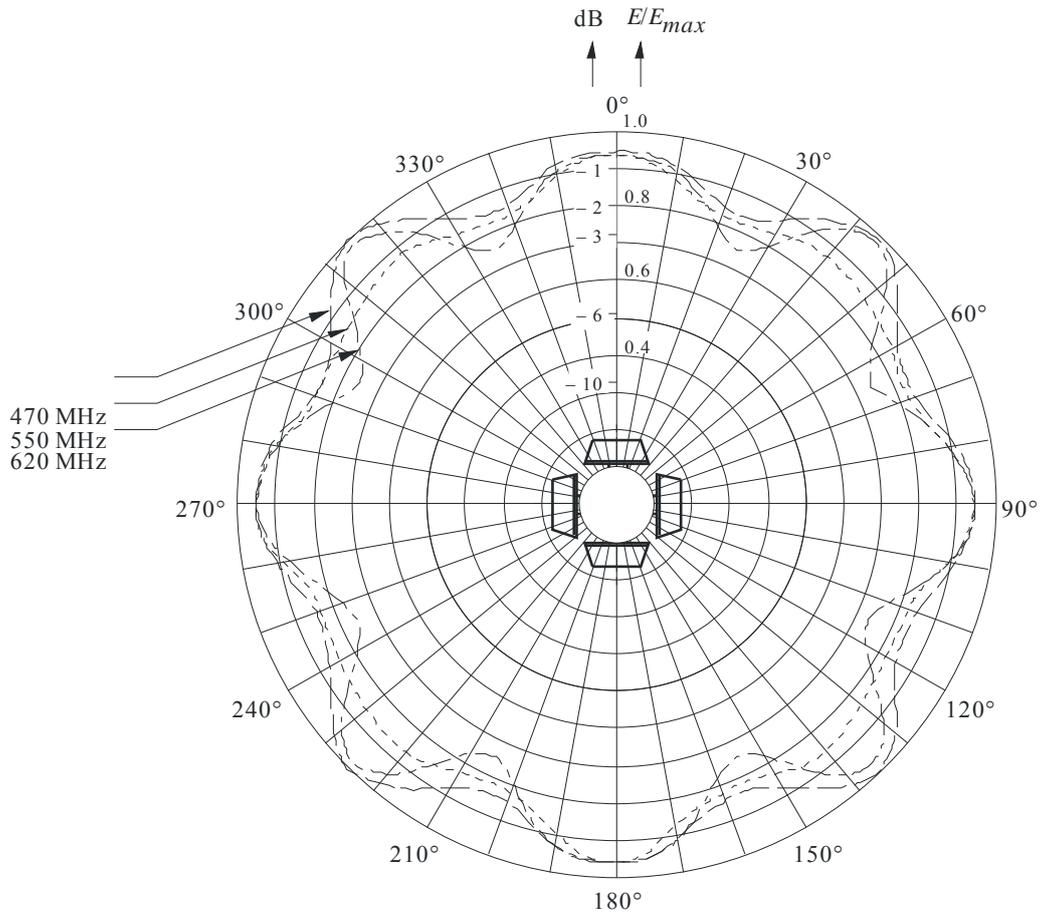
在设计具有全向方位方向图平板天线系统时须满足两个主要条件：

- 应将四个平板（或由塔架决定的三个平板）产生的方位方向图不规则性保持在限定范围内（如， ± 1.5 dB）；
- 每一平板输入端的VSWR应得到最小化，因为分支馈送连接的任何不匹配都将导致不同平板间功率份额不等，使所得方向图不再呈圆形。

从图28中可以看出，在交叉方向的每一侧都会出现方向图最小值，在这些地方，相邻平板的辐射相互发生相对相移，使所得矢量幅度降低。

图28

在470、550和620 MHz测得的宽带水平极化UHF天线系统的方位方向图



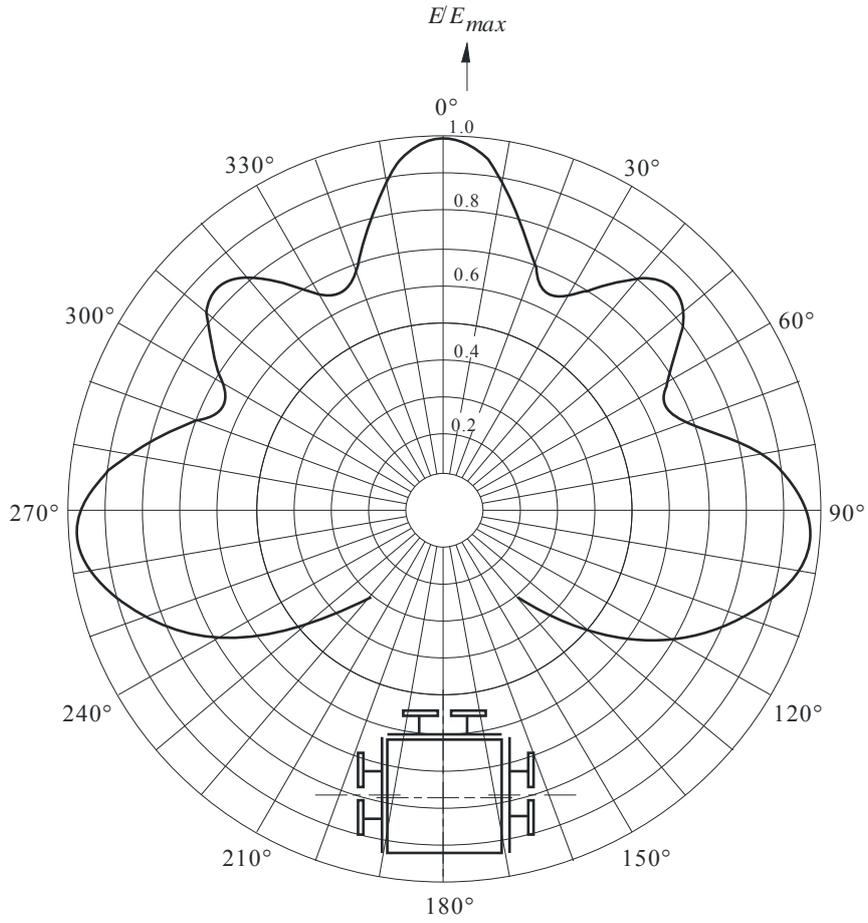
BS.1195-28

7.3.3.2 定向平板天线系统

通过改变塔架每一侧平板的数量、馈送至每一平板的功率数量以及平板的相互朝向或合并使用这些手段，可以获得定向方位方向图。图29所示为VHF频率上拥有3个平板的天线系统的定向方位方向图。

图29

III波段内具有3个平板的天线系统的定向方位方向图



BS.1195-29

附件1

第2部分

VHF和UHF天线的实用信息

目录

	页码
1 引言	40
2 天线系统特性的测量	40
2.1 测量站点的考虑	40
2.2 需测量的参数	40
2.3 测量方法	41
2.3.1 频域测量 (FDM) 方法	41
2.3.2 时域测量 (TDM) 方法	41
2.4 测量设备	44
2.5 测量程序	45
2.6 数据表述	45
3 天线系统特性的现场测量	46
3.1 测量方法	47
3.1.1 垂直测深方法	49
3.1.2 机载方法	50
3.1.3 参考天线方法	52
3.2 测量设备	53
3.2.1 垂直测深测量设备	53
3.2.2 机载测量设备	53
3.2.3 参考天线测量设备	53
3.3 测量程序	54
3.3.1 垂直测深测量程序	54
3.3.2 机载方法测量程序	57
3.3.3 参考天线测量程序	61
3.4 数据表述	63
4 计算得出和现场测量的VHF和UHF天线性能差异	63

	页码
4.1 影响单个天线和总体天线系统性能的因素	63
4.1.1 支撑结构	63
4.1.2 接近天线塔的重要结构	63
4.1.3 气候因素	64
4.2 计算和测量天线参数和辐射图比较	64

附件1

第2部分

VHF和UHF天线的实用信息

1 引言

这部分的目的是描述测量单个天线和天线系统辐射图的现代方法。采用时域方法可能是最准确和有效的方式。

第2部分还描述了实际辐射图与按照第1部分所示程序计算得出的结果之间的差异。

这部分还考虑到诸如支撑结构、其它辐射系统的邻近等诸多因素对整体辐射图的影响。

2 天线系统特性的测量

在现场安装前，需要按照设计数据为评定单个天线的实际性能进行测量。

此外，当单个天线以不同方位角方向组合为更复杂的天线系统时，性能评估非常重要。

2.1 测量站点的考虑

应认真挑选测量站点，因为这将影响到测量的准确性和可重复性，尤其应符合以下条件：

- 无干扰源；
- 在测试天线和参考天线之间应允许适当的距离，以避免电感耦合以及由此产生的相位和幅度畸变；
- 应允许天线杆具有适当的高度，以便天线的适当定位；
- 测量现场应足够平坦，以便在理想的状态下反射或吸收表面；
- 清除造成多反射的障碍。

2.2 需测量的参数

这些参数通常包括：

- 幅度图，
- 相位图，
- 增益，
- 阻抗匹配。

2.3 测量方法

测量天线性能使用两种基本方式：FDM（频域测量）和TDM（时域测量）。

现在使用的是FDM，因为该方法不需要昂贵的测量设备。然而，最近开发的TDM方法在增加设备成本的同时可以实现更好的性能。

2.3.1 频域测量（FDM）方法

该方法使用具有已知相关射频发生器特性的发射天线。测试天线接收可在方位角平面上旋转360°的发射信号。比较在不同方位角收到的信号可获得幅度和相位图（见第1部分第6.2节）。

测试天线收到的信号包括直接射线和若干反射射线，这与站址特性、频率、参考天线位置、辐射图旁瓣等相关。

确定真正的辐射图应仅考虑直接射线。实际上，反射射线影响单个天线辐射图的测量结果，因此，当这些结果用来计算更复杂的天线系统时，计算和测量得出的天线系统辐射图之间必定存在巨大差异。在评估极小值和旁瓣时这些差异尤其明显。

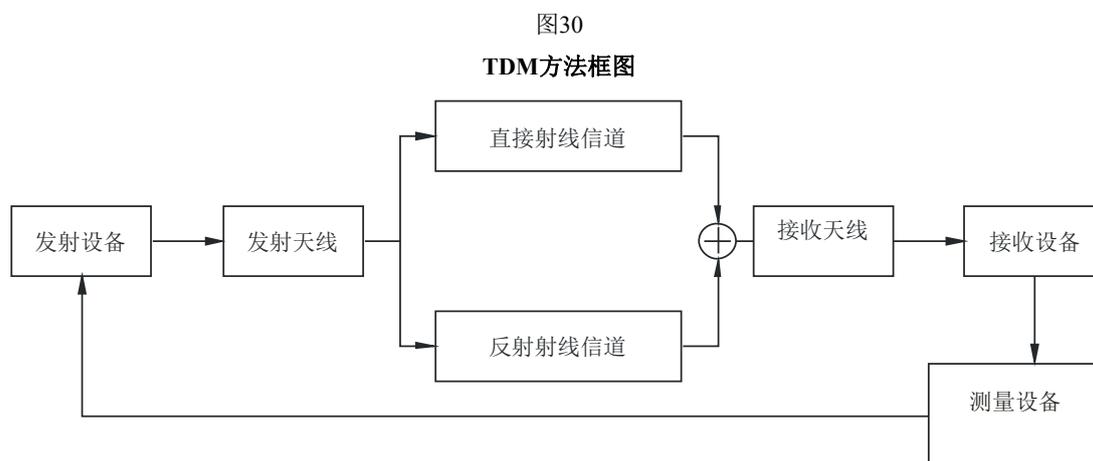
增益通常采用绝对方法测量，特别注意认真控制反射射线的影响。

2.3.2 时域测量（TDM）方法

使用TDM方法测量幅度和相位图定能提高准确度，因为，反射射线的影响在测量程序中几乎消失殆尽。

这种完善基于与分析门控程序相关的直接和反向傅里叶变换的使用。

完整系统布局（包括测量设备和天线）见图30。



由于根据定义，脉冲输入电压的时域电压输出是系统转换函数的傅里叶变换，系统的频率响应（在存在两个传播路径时）可使用频谱分析仪或类似仪器予以确定。

在对频率响应进行反向傅里叶变换时，可以获得包含直接和反射路径成分的时域响应。这些影响可按照其不同路径长度分在时域中。输入脉冲宽度应按照每个测试天线的类型进行优化，须牢记的是，脉冲越短，鉴别越准确。

分析门控程序通过消除无用时域响应改善鉴别。可对不同时域成分实施，从而获得直接或反射路径成分的频率响应。

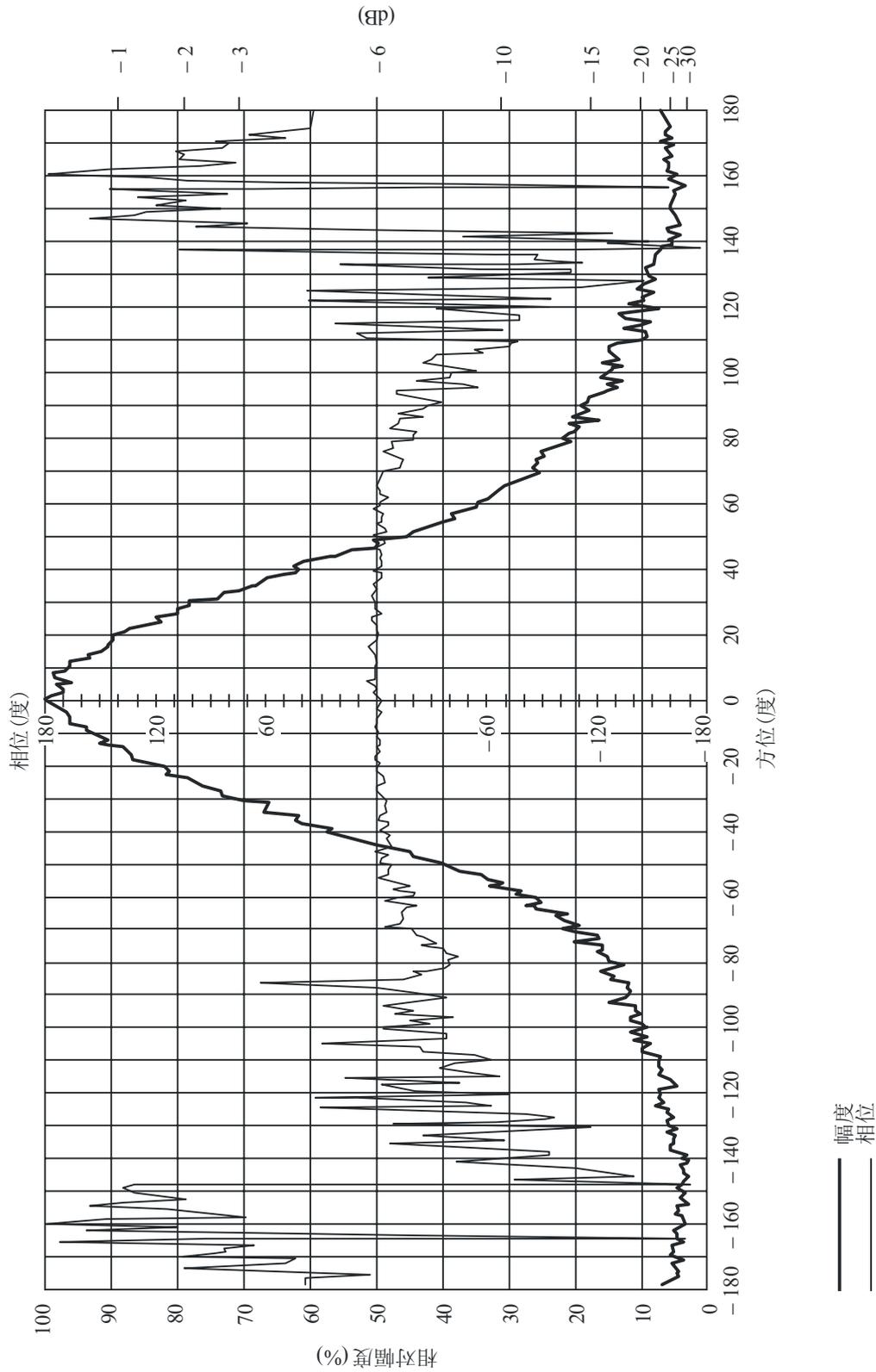
由于信道特性为线性，两个路径成分频率响应的不同对于幅度响应而言只表现为衰减因数，而对于相位响应而言则表现为线性移相。

然而，由于发射机及其天线之间以及接收机及其天线之间的不匹配造成的反射必须使用高质量线缆和接插件保持在可接受的水平。应避免使用旋转接头。

图31和32显示出使用或不使用时域方法产生的幅度和相位图实例。

图31

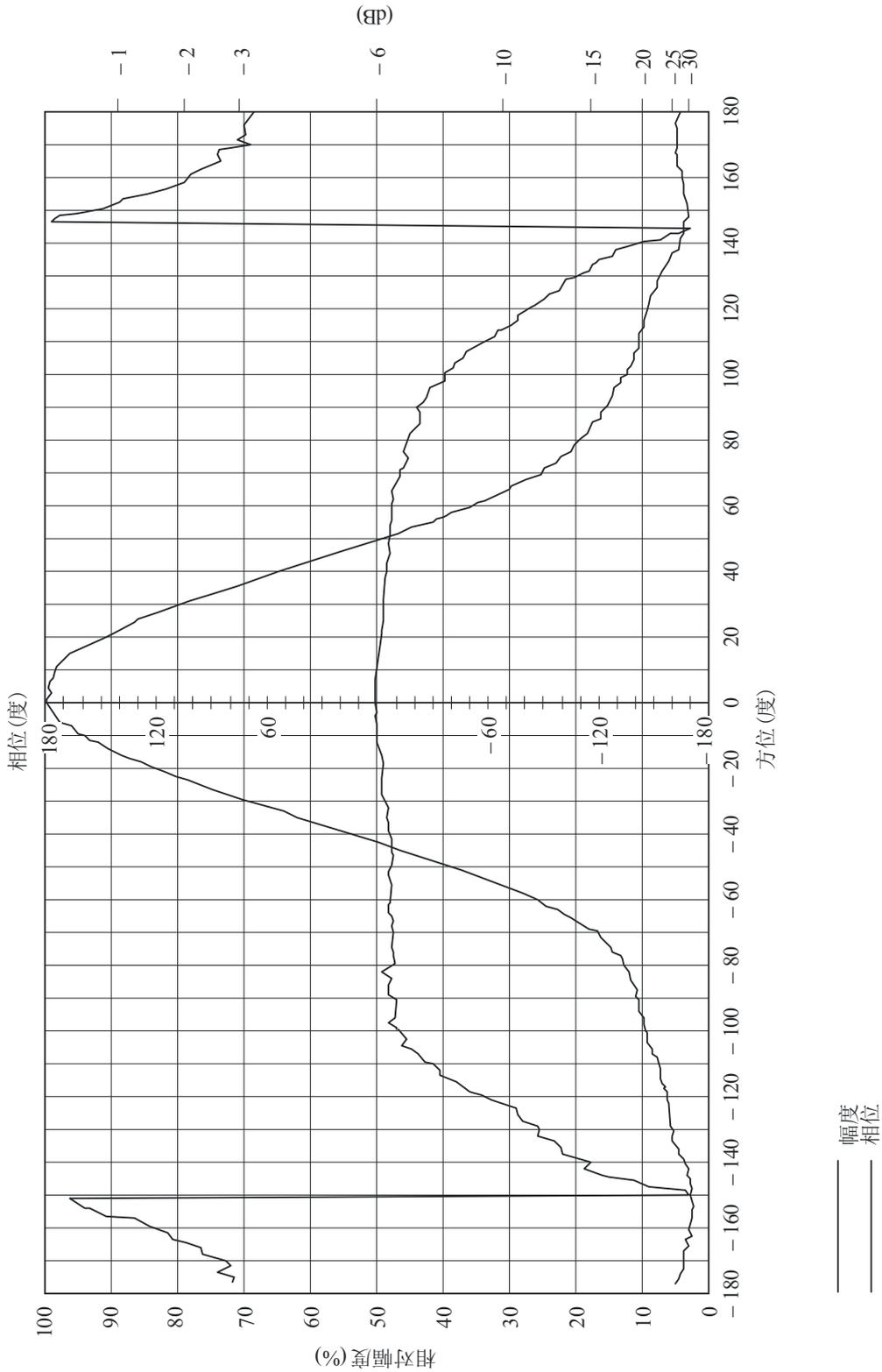
不使用时域测量的幅度和相位图



BS.1195-31

图32

使用时域测量的幅度和相位图



BS.1195-32

2.4 测量设备

测量设备包括电平足以提供适当的信号/噪声 (S/N) 比的功率射频发生器、场强表和确定相位中心的矢量电量计。建议使用更高级的计算机控制测量工具，如频谱分析仪或网络分析仪。

2.5 测量程序

测量程序根据将测量的参数以及可用仪器可能相差甚远。不论在哪种情况下，都需满足以下条件：

- 天线之间的电感耦合应减少到最低水平，即天线之间的距离 R 应大于 10λ 。这将确保近场和远场幅度比至少为36 dB；
- 入射波束平面的相位畸变亦尽可能减小，以便实现良好的起码鉴别。因此，相位畸变不应超过 $\pi/8$ 或 $R > 2 D^2/\lambda$ ；
- 发射天线波束宽度应允许测量天线方向的发射波前具有低于0.25 dB的幅度差；
- 应选择天线高度，从而尽量减少发射天线主瓣对测量站址地面的截获。反射射线的幅度可因此降低。建议采用的做法是选择天线高度，从而确定天线塔基站发射天线垂直图的第1个零值。

在进行阻抗匹配测量时，天线应适当选择位置，以避免电感耦合和由障碍物产生的反射。一般情况下，天线主瓣应向上指，以便更加方便地测量有效反射和发射功率。

在FDM方法中，使用正弦测试信号，其频率在天线运行频率范围内。之后，可在不同频率上采用预先确定的角度步进对接收天线信号进行一系列测量。测量得出的幅度值之后通过最大归一以获取用dB表示的衰减值。测量得出的相位值则用与参考角的相位差表示。在TDM方法中，使用具有适当时长的脉冲测试信号。使用在整个角扇区内“清洁的”脉冲信号的频率响应获取的值便可获得辐射图。

辐射图计算使用的幅度和相位图按正常方式确定。

天线增益是使用作为发射和接收天线的两个相同设备进行的，两个设备置于相同高度并面向最大功率转换条件。在此情况中，当使用FDM模式的垂直声音方法时，应在每个测试频率上选择适当的共用天线高度，以便方便确定直接射线。

在TDM中两个天线同样面向最大功率转换条件。由于反射射线可取消，不必要像FDM一样改变天线位置。阻抗匹配是通过定向耦合作为发射和反射功率比进行测量的。

现有先进的测量系统可以在天线输入端传送参考平面，避免因测量设备造成的误差。使用TDM方法可以确定测量设备的任何不匹配情况。

2.6 数据表述

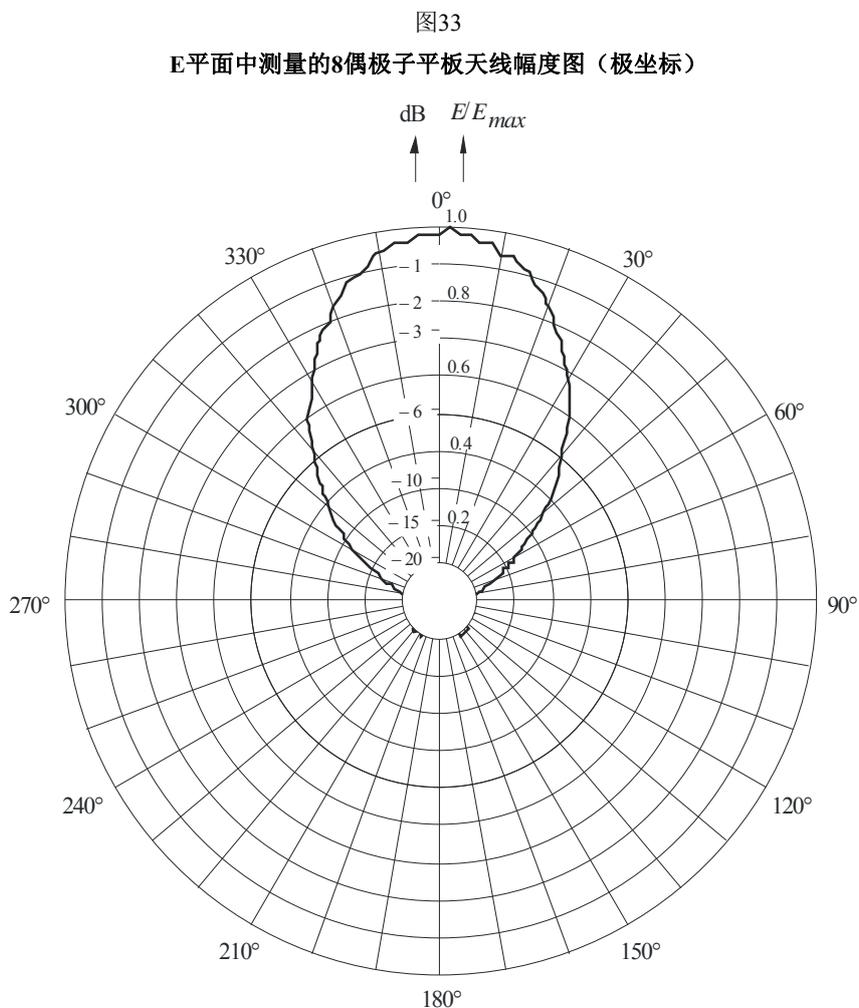
包含天线各元素的平面被视为表述天线辐射图的参考平面。

参考平面和相应正交平面中的幅度图应采用笛卡儿和极化形式表示。相位图由应只用笛卡儿形式表示。

增益和阻抗匹配数据应用笛卡儿形式表示。

图33至38用极化和笛卡儿形式给出了两个平面产生的幅度和相位图。

线性尺度使用百分比和dB两种数值表示。



BS.1195-33

3 天线系统特性的现场测量

由于无线电系统的效率主要取决于其天线，辐射图和增益需要以足够的准确度予以确定。当复杂天线系统的辐射图受到其操作环境中若干无法控制的因素影响时，辐射图只能通过现场测量予以确定。

3.1 测量方法

现场测量天线特性有三种主要方法。尽管原则上可以使用任何方法，实际的选择取决于系统的经济性、设置的复杂性、必要的设备和测量时间。举例而言，机载方法比其它方法昂贵，但可以在短时间内对同一天线塔或位置相近的若干天线系统进行测量。相反，更具经济性的地面方法通常需要更多的时间才能产生同样的结果，有时，由于环境的限制，甚至无法进行可靠的测量。

图34

E平面中测量的8偶极子平板天线幅度图 (笛卡尔坐标)

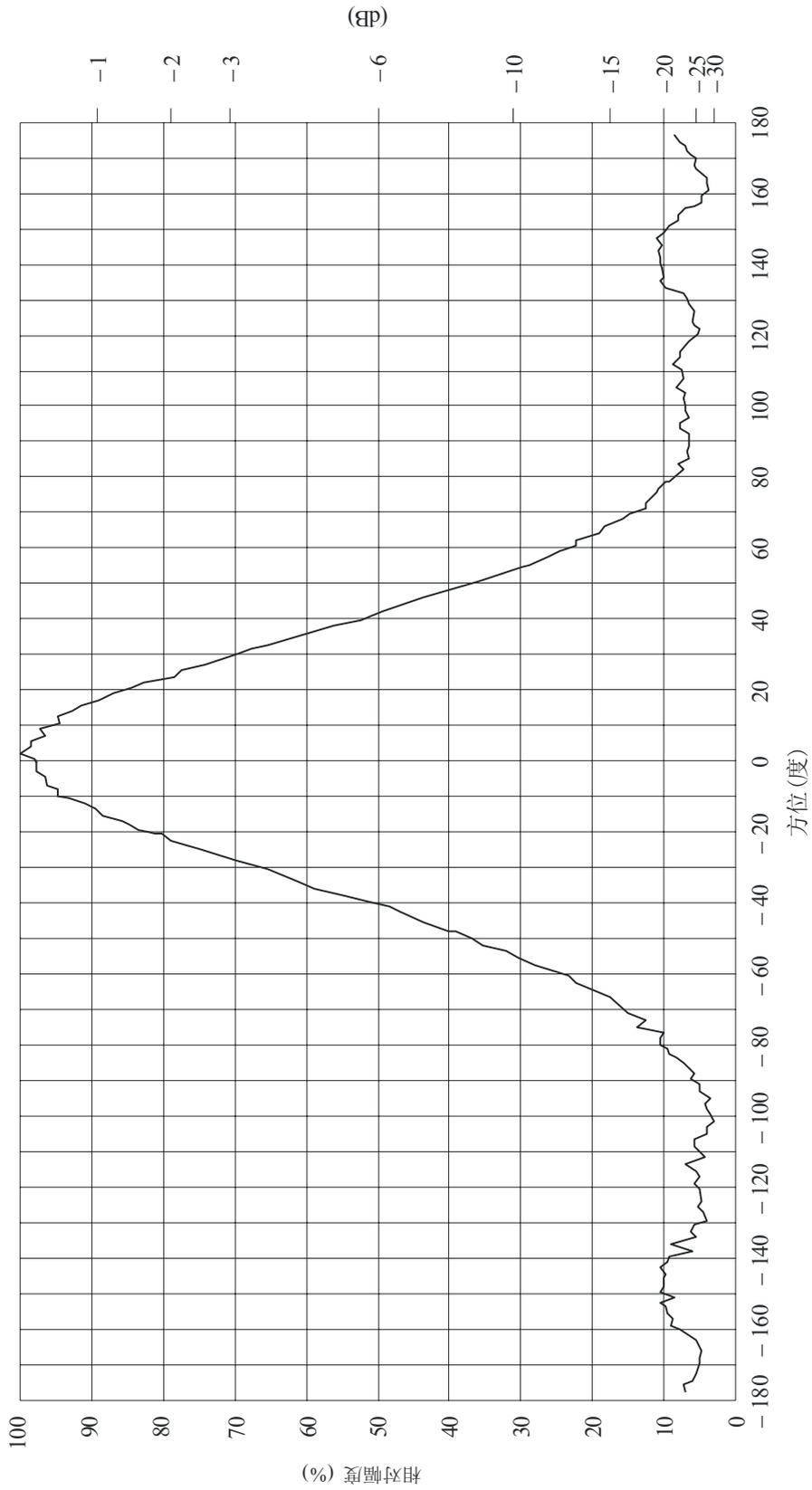
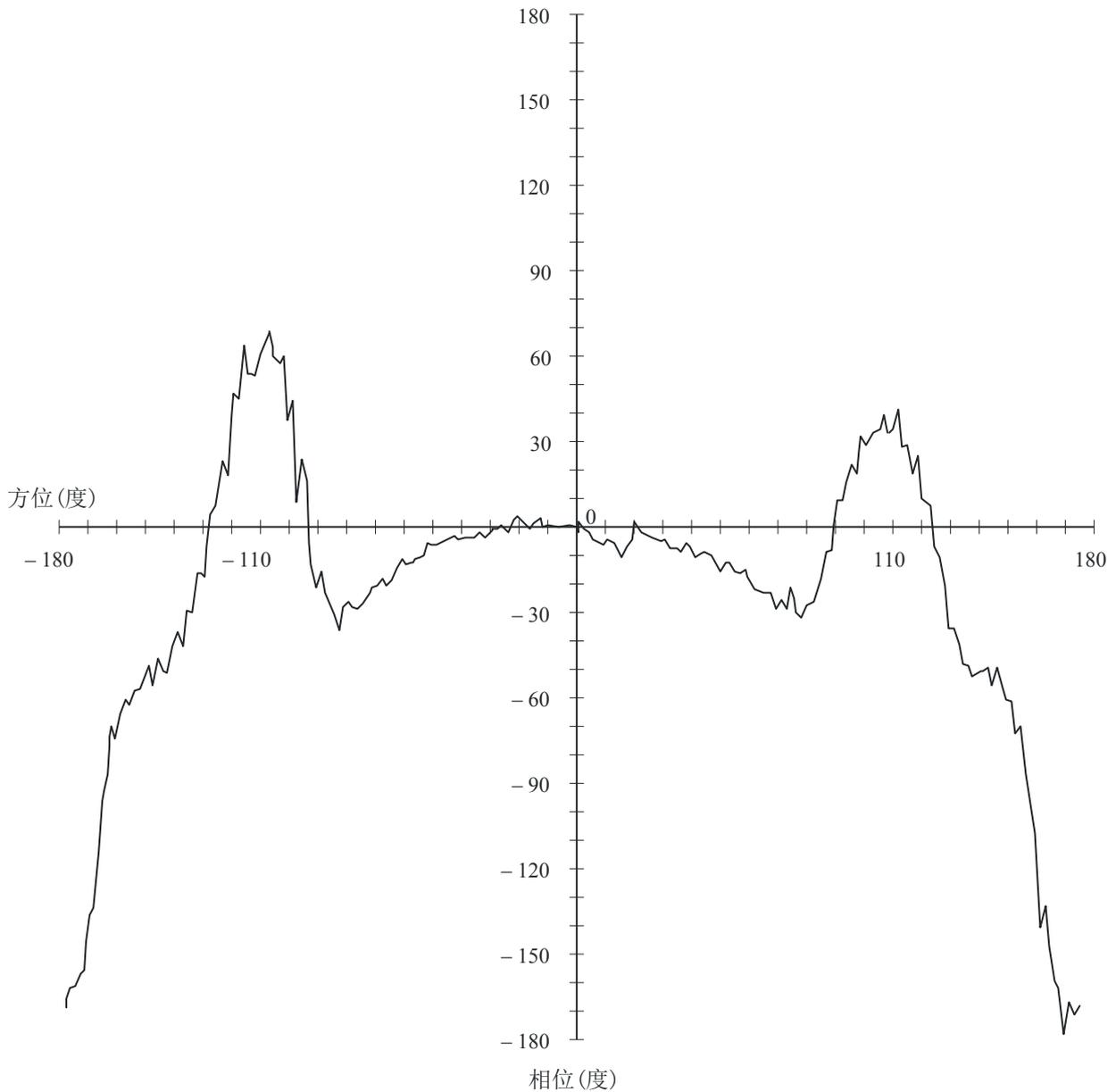


图35

E平面中测量的8偶极子平板天线相位图（极坐标）



BS.1195-35

3.1.1 垂直测深方法

该方法需要配备具有能在测量点垂直提升的天线杆的特殊车辆以评估作为地面高度函数的电磁场差。

这种测量将提供因直接和反射射线组合产生的干扰图。当只有一条反射射线时，该图用余弦函数表示，其第一个最大值出现在高度 $h = \lambda d / 4H$ 时，其中：

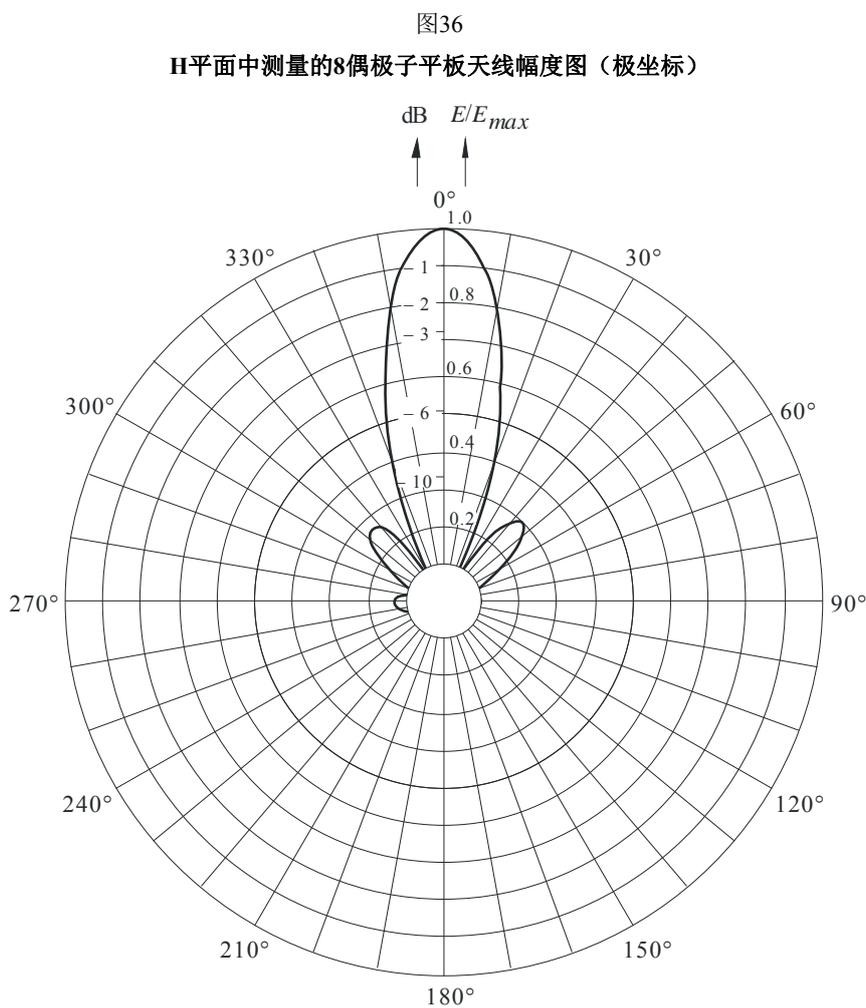
λ : 波长

d : 发射机和接收机之间的距离

H : 发射天线与测量点的相对高度。

在这些条件中，自由空间传播条件下的电磁场可轻而易举地测定，然后，可将该数值与相应的理论数值（按照ITU-R P.525建议书计算得出）相比较以评定天线的总体性能。一般

情况下，显示干扰图与理论函数相距甚远的测量点应放弃。然而，如因环境限制无法找到适当的测量点，可考虑采用其它方法。



BS.1195-36

3.1.2 机载方法

该方法基于机载测量设备，被视为评估天线增益以及水平和垂直辐射图最准确和最可靠的方式。在此方法中，测量接收机安装在直升机上（这些测量多使用的机型），而测试天线则置于发射模式。在一些情况下，特别是在测量图显示为零值时，可能需要较高的发射功率，以确保在接收机一端具有充足的信噪比。

图37

H平面中测量的8偶极子平板天线幅度图 (笛卡尔坐标)

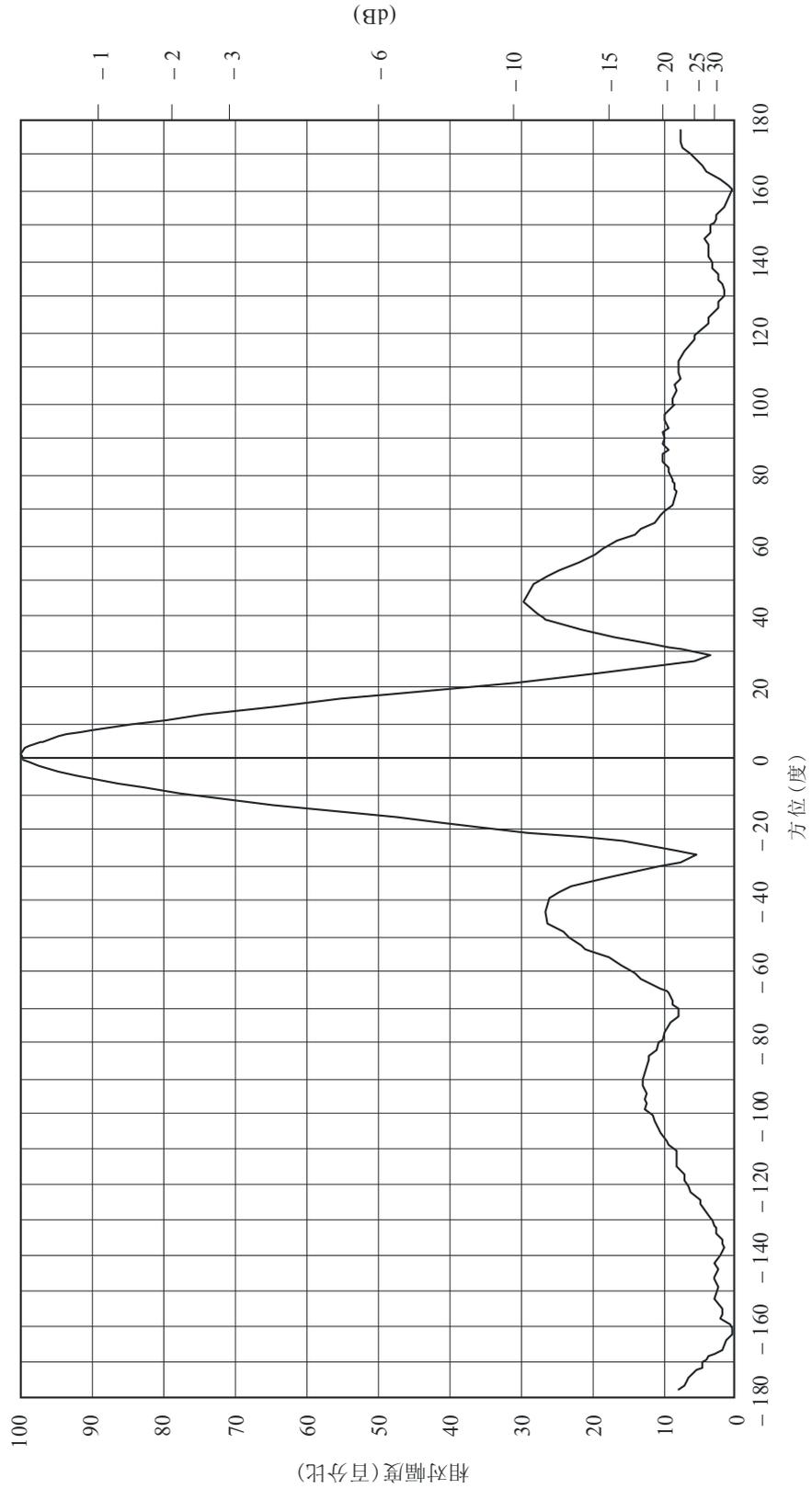
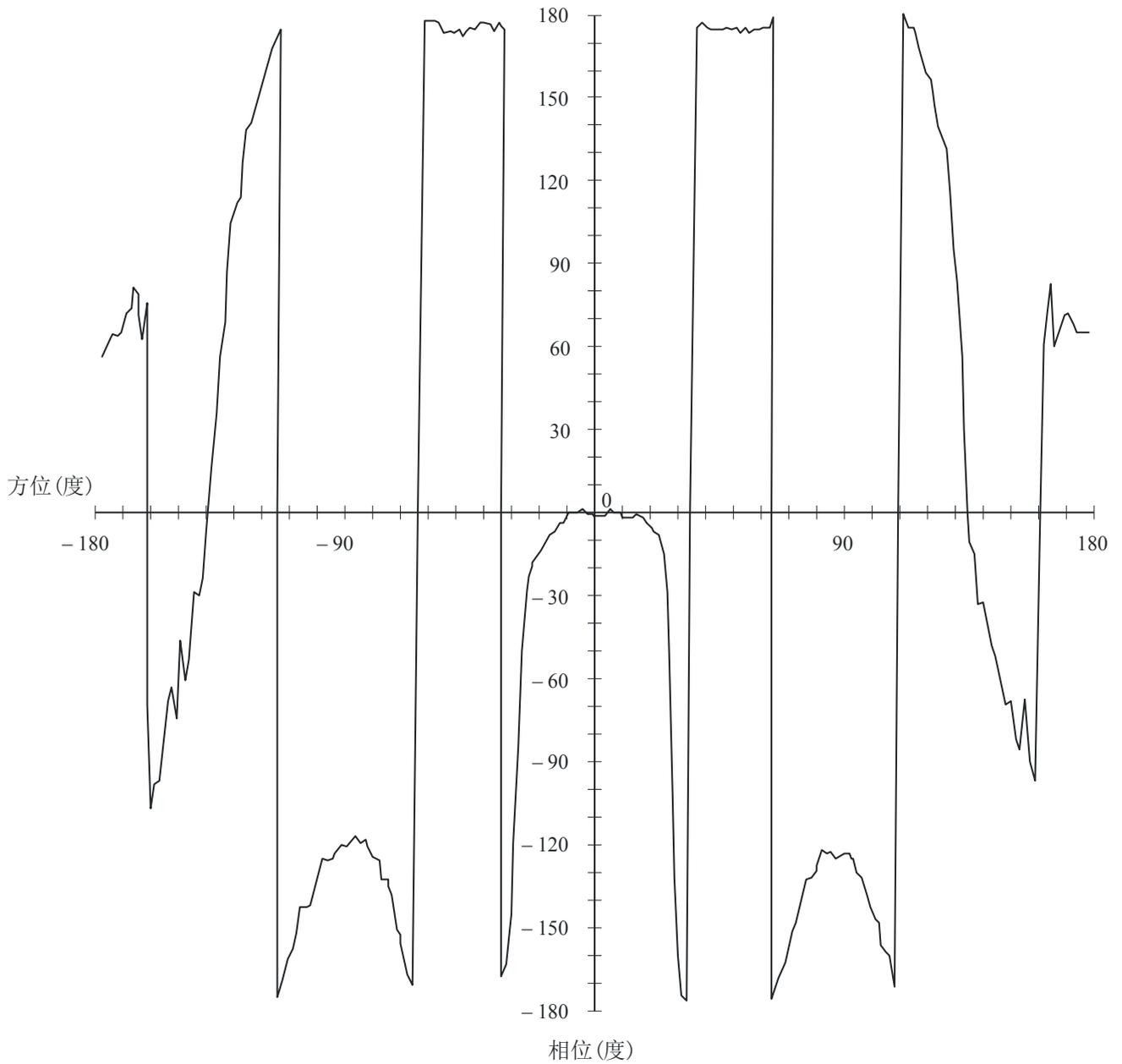


图38

H平面中测量的8偶极子平板天线相位图（极坐标）



BS.1195-38

3.1.3 参考天线方法

该方法基于使用已知特性的参考天线。参考天线安装在尽可能靠近测试天线的地方，并在可能的情况下馈电具有相同操作频率的信号。通过比较相同点两个天线产生的场强测量值，就可确定测试天线的辐射图，因此，消除了地形对接收场强的影响。

3.2 测量设备

3.2.1 垂直测深测量设备

以下设备安装在专门配备的车辆上，采用独立的供电发生器：

- 使用合适接口与计算机相连的可伸缩天线杆可以通过提升截获场强密度第一最大值（亦见第3.3.1节）捕获杆上接收天线的仰角和方位角；
- 适当测试接收机具备：
 - 高动态范围，
 - 良好的电磁兼容性，
 - 耐用性和稳定性（面临震动和温度变化时），
- 安装在线杆上的接受天线，
- 定位系统，如全球定位系统（GPS），
- 用来处理测量数据的、与定位系统和线杆接口相连接的控制计算机

3.2.2 机载测量设备

辐射图测量系统可能包含以下组成部分：

- 配备以下内容的测试接收机（在扫描模式下可得到控制）：
 - 高动态范围，
 - 良好的电磁兼容性（EMC），
 - 高耐用性和稳定性（面对直升机的震动和温度变化时），
- 接收天线（测试探针）的安装使直升机对接收天线辐射图的影响降至最低水平。这可以通过比直升机低至少3米的线杆加以实现，
- 使用机载和地面接收机的定位系统以及准确的高度仪，
- 具有外围数据处理设备的机载控制计算机。

图41显示了设备的简化框图。

地面参考（GPS）接受机用来使GPS在高准确性方面与众不同。然而，尽管GPS是在飞行中确定位置的最先进系统。其它提供适当准确性的系统也可使用。

数据处理设备包括一个计算机和绘图外围设备。

在发射端，需要具备稳定和校准输出功率电频的信号源。该来源可以为正常的发射机。

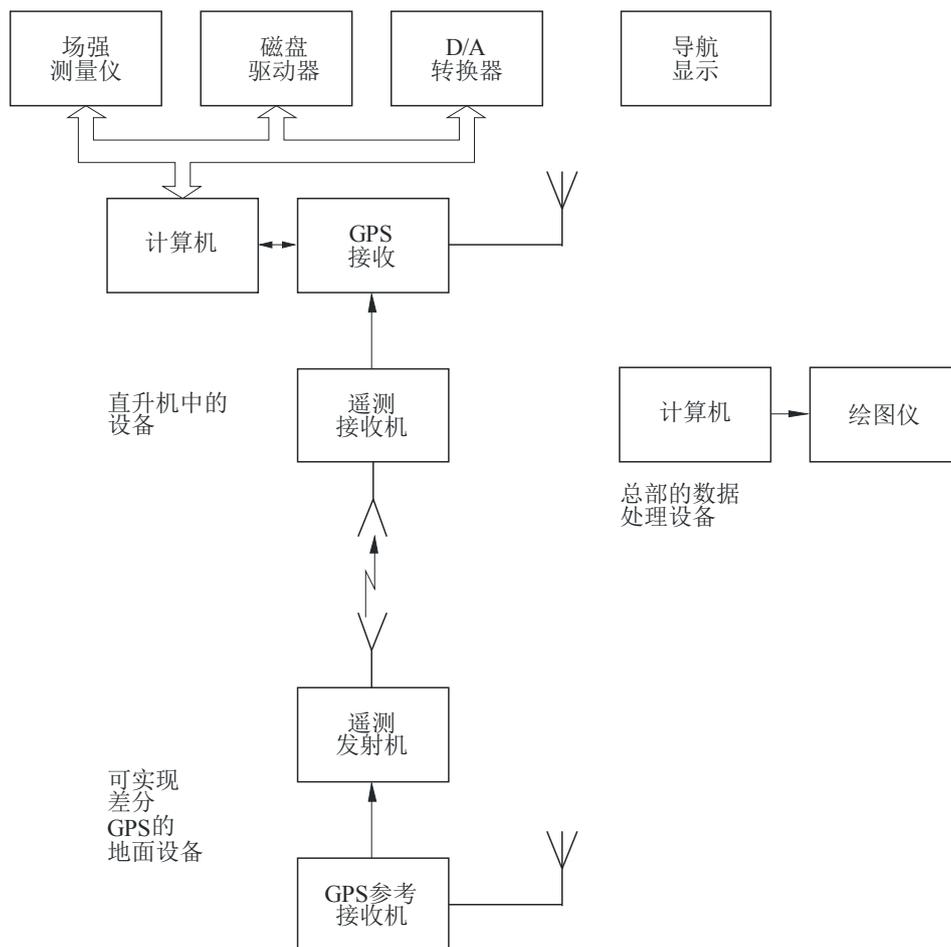
3.2.3 参考天线测量设备

该设备可包含以下组成部分：

- 具有以下特点的一个或两个接收机（取决于所需要的测量程序）：
 - 高动态范围，
 - 良好的电磁兼容性（EMC），

- 高耐用性和稳定性（以应对车辆震动和温度变化），
- 安装在车顶上的接收天线（由所选程序确定的对数周期或绕杆式天线），
- 安装在车辆中具有外围数据处理设备的控制计算机，
- 定位系统，
- 具有校准辐射图的参考天线，
- 便携式电池供电的场强测量仪。

图39
测量设备框图



BS.1195-39

3.3 测量程序

3.3.1 垂直测深测量程序

在实际测量之前需要完成初步发射和接受天线数据输入程序。

需要输入以下发射天线数据：

- 发射电台的名称和站址，
- 地理坐标，

- 发射频率和极化，
- 最大e.r.p.(dBK)，
- 天线海拔高度，
- 理论垂直框图（可根据测量情况进行可能的修正）。

需输入接收天线数据包括：

- 增益，
- 线缆衰减。

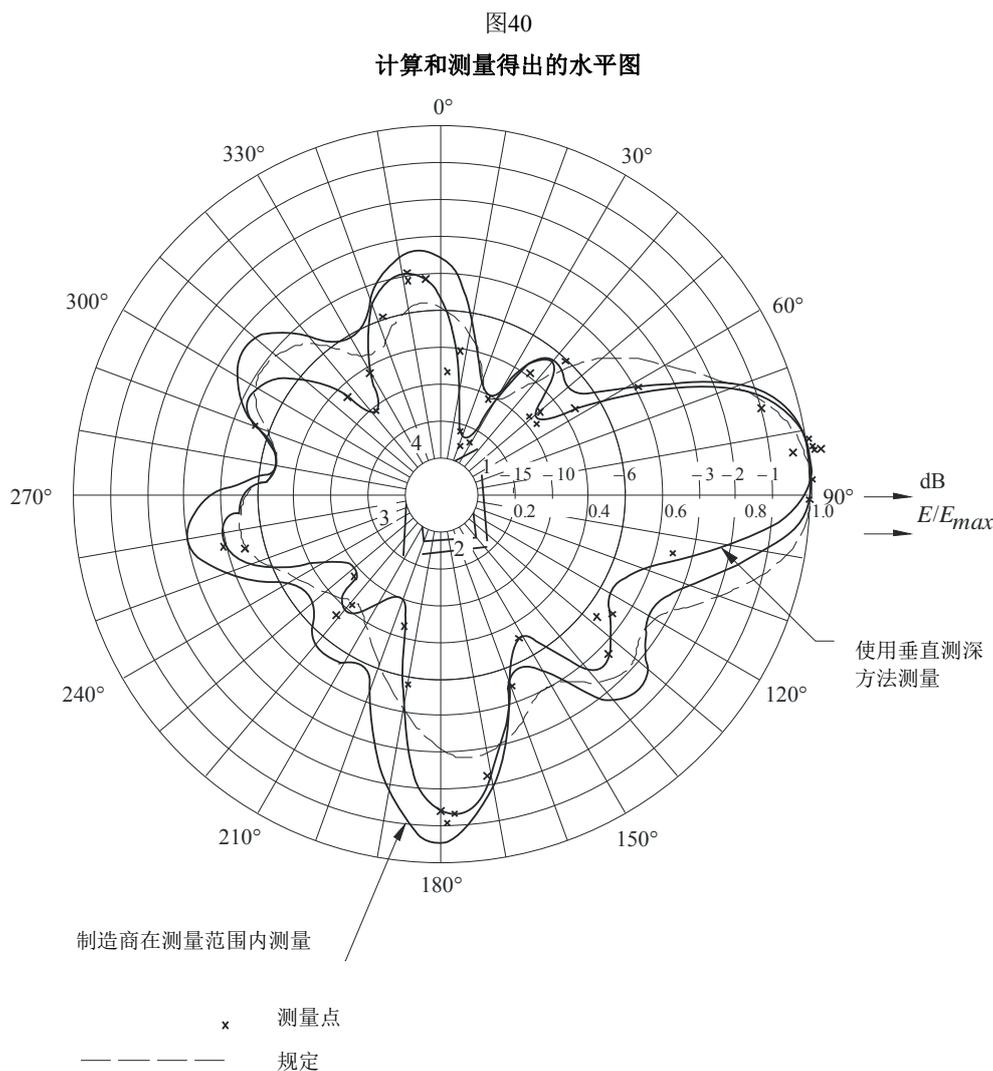
在选择了适当的测量点后需输入相关地理数据，如站址名称、海拔高度和（GPS可能需要的）相关坐标。

上述数据经过适当处理可获取为发射机挑选的测量点的距离、方位角和顶角以及相关幅度垂直辐射图的理论数值。

当接收天线准确面对发射机方向时，线杆提升，然后规则地在每个仰角步进（通常为每20厘米）获得接收电压样本。然后，将所有电压数据适当存储并处理以便获取典型的干扰图。该图之后经过分析用来计算直接场强。

3.3.1.1 数据处理

在完成适当的输入数据认证程序后，可接受的数值经过进一步处理得出一系列相对值 E/E_{max} ，其中 E_{max} 是对应于主瓣的最大值。这些数据之后绘入极化框图并与理论垂直图相比较（见图40）。



BS.1195-40

3.3.1.2 实际采用垂直测深方法的考虑

在进行实际测量之前，应对测试天线附件的环境进行适当分析，同时牢记，所有测量点必须在测试车可达到的道路旁选择。

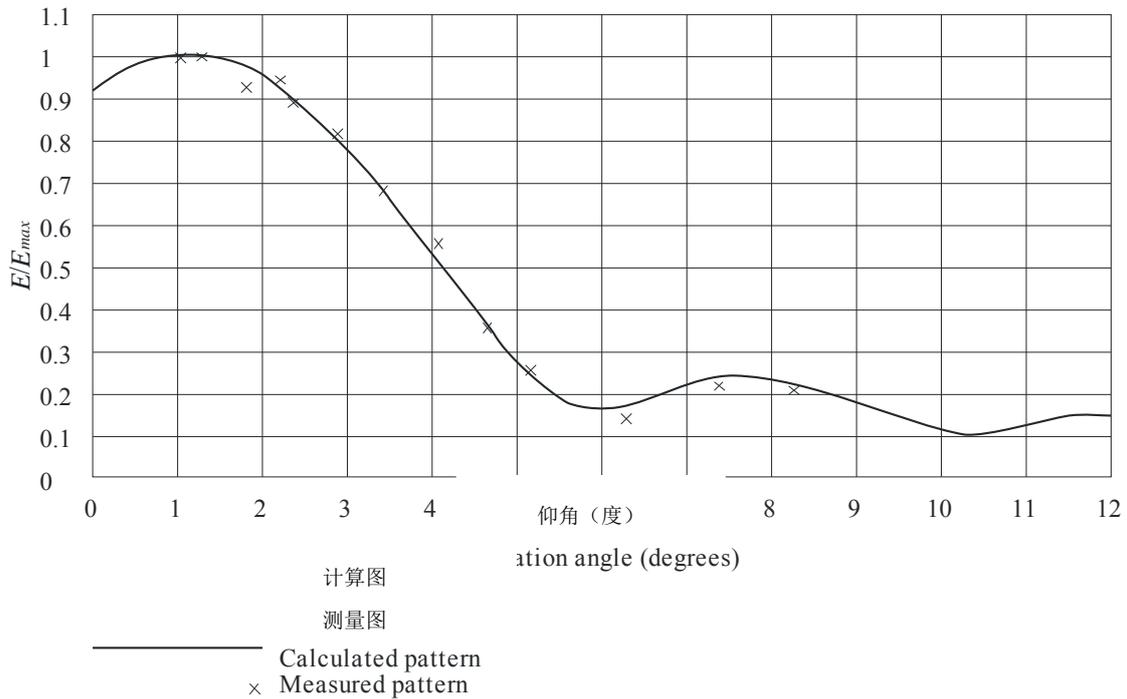
建议采用具有适当软件程序的数字化地形图（DTM），用来获取从天线站址到测量点之间的地形概况。实际上，有了地形概况，可以更方便的评估所挑选的发射天线测量点的视距传播条件。

鉴于所测量的水平图值将与测量得出的最大垂直图值相比较，因此，必须首先确定后者。

典型的情况是矩形结构的天线系统各侧安装了不同的单个天线。这种安排需要在单个天线所覆盖的每个角挑选不同测量点。在此情况下，在相关扇区首先选择一个试量点。垂直图测量由此开始，以便获得显示最大值e.m.场强的相关变异。图41中的框图显示出将发射天线安装在服务区山顶的一种典型情况。

图41

计算和测量得出的垂直图



BS.1195-41

获得垂直图之后进行水平辐射图的测量。由于在干扰图中，接收场强的第一最大值高度是由 $h = \lambda d / 4H$ 得出的（见第3.1.1段），线杆的伸缩高度 h 必须认真选择。实际值应是机械考虑确定的最大值和由倾斜角确定的最小值之间的适当折衷。倾斜角可影响到垂直图相关值所参考的最大值。

在VHF，可能很难获得良好的折衷值，因为垂直图变异会严重影响水平图的测量。

此外，在所测量值源于两个具有不同垂直辐射图的单个天线方向中（就像在交叉方向中），主要力量无法方便确定。在这些情况下，一种可能的解决方案包括在 d 距离范围内选择测量点，使俯角产生两个垂直辐射图数值相等的结果。在任何情况下，直接e.m.方面的最终评估掌握在负责审查干扰图的运营商手中，他们必须放弃与理论函数差异巨大的测量值。

3.3.2 机载方法测量程序

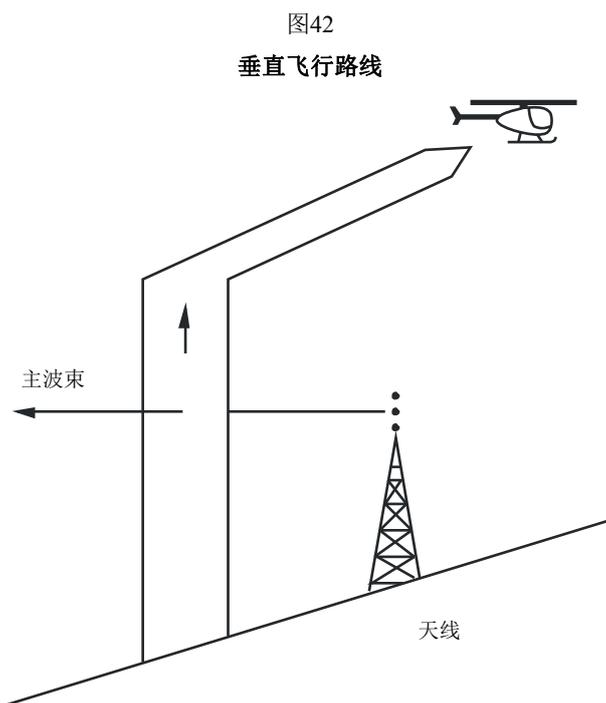
一套测量辐射图通常包括最大辐射仰角测量的水平辐射图（HRP）和某个方向 -15° 至 $+3^\circ$ 之间各频率仰角测量得出的五个垂直辐射图（VRP）。

在进行实际测量前，需要认真做好准备。机载和地面设备必须经过检查以便确认工作正常。向测试天线馈入测试信号的发生器（或普通发射机）设置到经校准的功率值。

飞机起飞后，检查定位设备（GPS）的运作（如必要的话），确定测试天线坐标并向计算机输入所测量的起始坐标系统。

在测量飞行中，直升机应按下文所述预设航线飞行。经过计算机适当处理的GPS输出将用来记录实际飞行路线，给出相对于测试天线的直升机实际位置。该直升机位置信息还将实时传送给飞行员，以帮助保持正确的飞行路线。

垂直测量是通过爬高和近场飞行的结合进行的。直升机根据测试天线类型在接近地面适当距离时开始测量。然后，将爬行至所需要的最大仰角高度。如到方位角的完整垂直图有用，直升机将在接近约1000 m (20°)的高度后在天线之上进行近场飞行（见图42）。



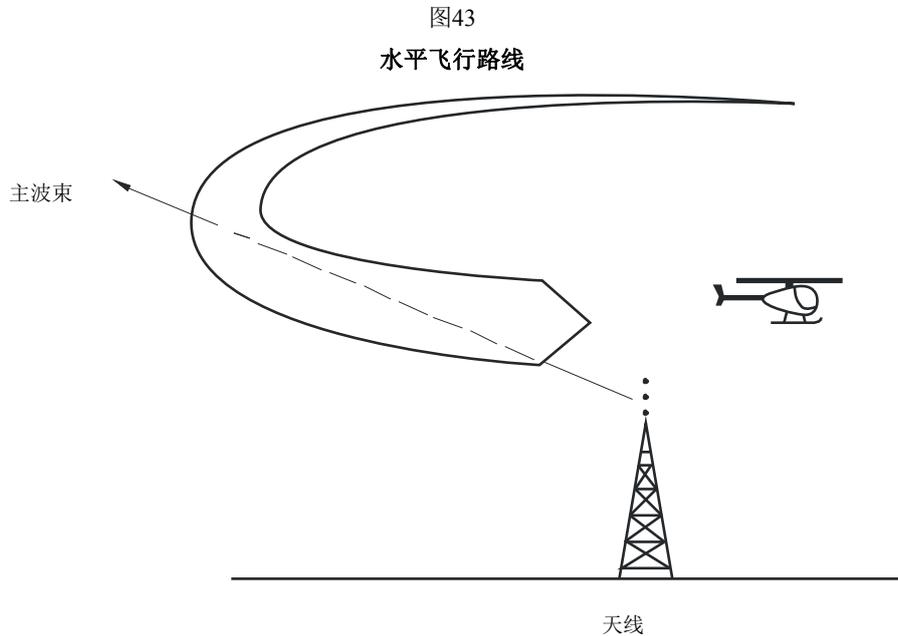
BS.1195-42

垂直测量结果包括应测量的水平框图最大增益仰角值。在此仰角下，直升机围绕天线以根据测试天线类型确定的半径飞行（见图43）。对于该飞行路线，重要的是必须精确保持正确仰角，因为任何偏差的补偿都难以实现。

VRP和HRP测量之间的距离应在每次测量前确定（见第3.3.2.2段）。

接收场强密度是通过机载测试接收机（或场强仪）测量的。与此同时，机载计算机从GPS获得最新位置信息。之后，这些位置数据把用来将测量到的输入信号电平转化为正常距离场强值，同时考虑到接收天线的特性。

测试接收机应以正常模式进行测量，各信号电平样本将包含每100毫秒间隔内的平均接收信号，从而消除调制效应。测试接收机应能在扫描模式下工作，以便方便在相同测量飞行路线下至少三个频率的测量。此外，测量系统应允许在水平平面上每度至少抽取两个样本，而在垂直平面上每度至少抽取五个样本。这些样本连同其相应的位置数据一起存储起来。



BS.1195-43

测量值将以天线图的形式显示在屏幕上，以便使机上工作人员在飞行中确认测量系统是否操作正常。

3.3.2.1 测量数据的处理

在完成机载测量后，分析测量数据并计算和绘制测量图。在此分析中，信号电平样本将转化为正常距离的场强值，兼顾接收天线特性和位置信息。显然，所有明显的错误样本将被丢弃。

之后，用场强计算得出给定方向的e.r.p.及其相应距离。通常，绘制框图显示为最大辐射方向与e.r.p.相关的信息。

天线增益计算为以下比：

$$G_d = \frac{e.r.p.}{P_{in}}$$

其中 P_{in} 是馈入天线的功率。

3.3.2.2 使用机载（直升机）方法的考虑

在测量VHF/UHF天线时，地面效应应控制在最低水平。

图44显示出如何选择测量距离，以便尽可能减少在给定天线高度情况下的反射。距离越短，反射点的角度则越宽，这样将减少反射能力。因此，应尽量选择短距离，但又要足以达到远场条件。此外，接收天线应为定向可调天线，从而不断指向测试天线。

通常用来准确计算达到远场条件最小测量距离的算式如下：

$$d = \frac{2h^2}{\lambda}$$

其中：

d ：测量距离（m）

h ：天线孔径（m）

λ ：波长（m）

在实际测量中，通常使用的测量距离为2000-2500米。

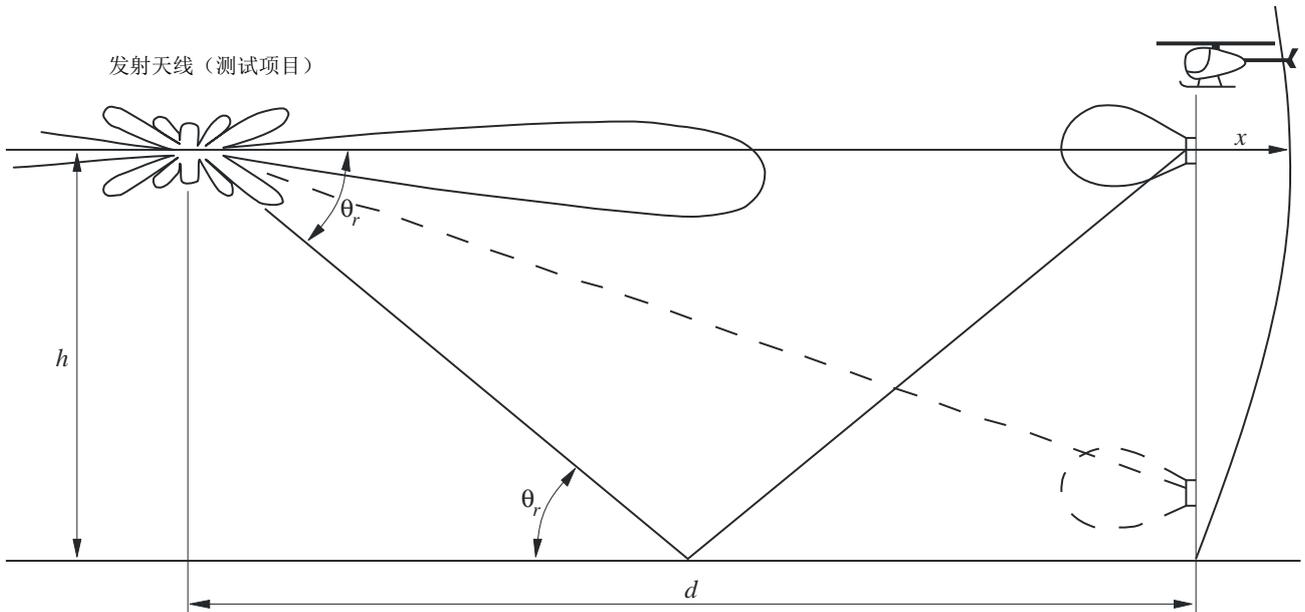
结果的准确性取决于用来测量场强和位置的设备性能。因此，必须认真考虑以下因素：

- 接收天线特性及其在直升机上的安装；
- 最佳接收机（场强仪），包括线缆；
- 用来获取真正三维坐标并有助于飞行员的定位系统。

使用GPS时，所记录的直升机二维位置误差在5 m范围内。该误差将导致0.5 dB以下的位置误差。

在水平飞行路线中保持正确高度是问题的关键。在测量高增益UHF天线时，0.3°的垂直角偏差（从测试天线上看）可能导致0.5 dB的误差。因此，距离越短，越难以保持正确的高度。为保持水平飞行路线测量的可靠性，至少应对HRP测量两次，以便获得有意义的结果。

图44
飞行路线显示



BS.1195-44

3.3.3 参考天线测量程序

使用参考天线进行的垂直图测量应始于水平图极大值。水平图的测量只能始于垂直图极大值。诸如茂密森林和植被等众多环境因素可影响到通过普通场强测量仪进行的测量，因为这些因素将导致测量场强的时间浮动。为获得有意义的结果，测量数据在可能的情况下应每隔几分钟整合一次。

可采用两种不同的测量程序：

- 使用置于地面以上50厘米的场强仪和对数周期测量天线进行的点对点场强测量；
- 使用两个与测试车中适当记录仪相连接的场强仪对两个场强进行的同步持续记录。通常，使用安装在车顶和地面以上3.2米的0.7米绕杆式天线。

使用参考天线对场强进行连续记录的端对端测量通常提供良好的结果，即使发射机不在视距范围内。

距离测量需要一定的时间，以便将记录的场强值转化为所选择的坐标系（以确定作为到发射机距离和海拔高度函数的仰角）。此外，现实中，可能在测试车可达到的道路上运行，无法在发射机辐射方向保持 $\pm 3^\circ$ 的容限。

虽然点对点测量不太复杂，但所提供的结果可与端对端测量相比，前提是只能在视距传播和地形清爽的条件下。在这些条件下，通过简单的便携式、电池供电场强测量仪便可以在不依靠现有和可用道路的情况下在测量区内自由移动。

由于较小仰角辐射功率不到达地面，通常可以选择形成“清洁”模式的测量点距离。虽然一些测量点因不良地形条件不得不放弃（植被或无法进入的地形），一般情况下都可以准确地确定位置和深度极小值。

3.3.3.1 测量数据的处理

测量图曲线可以根据连续/点对点记录的场强予以绘制。

所绘制的测量图为绝对框图，在参考辐射仪的辐射功率已知的情况下，显示作为仰角函数的有效辐射功率e.r.p.。

在使用端对端测量技术时，当分辨距离为200米并根据滑行平均值确定三项式等式时。随机浮动将被取消，垂直辐射图的实际形态将显现出来。由于测量数据量大，较小仰角的精确度超过大仰角。因此， $\pm 3^\circ$ 仰角的测量应在 ± 200 米分辨距离内，以便获得充足的测试点。

测试车进行的端对端测量表明，使用参考天线进行的可靠辐射图测量需要大量测量值，以便进行适当的统计数据评估，从而获得平滑的辐射图。

由于严重反射，差异将异常明显，从而无法获取稳定的中间值，测试点则无法发挥作用。这些测试点是通过来自不同于发射机方向的反射信号确定的。

各仰角的每个测试点根据本地条件可采用从几米甚至到100米的距离，因此，应以小于 $\pm 0.05^\circ$ 的容限和 $\pm 2.5^\circ$ 的方位角确定仰角。

测量结果的评估，即相应仰角中间值的确定以及辐射图的绘制需要在相关测试位置进行。只有这样才能评估测试值是否可以用来绘制辐射图或是否需要更多测试点。

3.3.3.2 使用参考天线方法的考虑

通过距离和相对高度确定测试点的仰角时建议采取谨慎态度。当距离发射机的位置可以从地图上准确确定时，海拔高度通常无法准确确定，特别是在山区。在距离发射机很短的范围内，可以出现严重的角度误差。使用测高仪可改善状况。在发射机可见时，仰角可以直接用经纬仪测量。

通过使用参考天线进行的测量程序成果可用来提供更多信息，因为人们不仅关注自由空间条件下的辐射特性，还关注在使用定向发射天线时接收场强的改善情况。

当所使用的天线方向性高于参考天线时，有时被称为操作增益的增强增益造成接收位置收到能量的提高。操作损耗中间值显示为相对于自由空间增益1 dB的不同和与非正常地形2 dB的不同。安装在山上、具有较低中央高度的天线的操作增益比自由空间低2 dB以上。

因此采用参考辐射仪进行的测量提供了发射天线系统的辐射特性，同时考虑到服务区的地面特性。与直升机测量不同的是，可以测量自由空间辐射图。

3.4 数据表述

对方位角和顶角平面，建议用极化形式显示水平幅度图和用笛卡尔形式显示垂直幅度图。

4 计算得出和现场测量的VHF和UHF天线性能差异

计算得出和测量得出的辐射图比较突出显示了计算中未考虑到因素的影响。一些重要的因素见下文。

4.1 影响单个天线和总体天线系统性能的因素

4.1.1 支撑结构

以下因素将影响天线系统的性能：

- 单个天线之间的相互耦合将修改其馈电电流的幅度和相位。因此，所产生的辐射图与计算结果不同；
- 特别当尺度接近谐振时，支撑结构的金属格通常作为无源隙缝天线发挥作用；
- 有关匹配，使用单侧补偿有利于获得稳定的性能。然而，当补偿导致邻近单个天线屏蔽时，应受到限制；
- 由于多数定向单个天线的反射器尺寸有限，单个天线的支撑结构在一定程度下将作为次要反射器。

在支撑结构一侧的补偿，该次要反射器与辐射器形成不对称性，因此辐射的弧度将出现倾斜。

安装在塔上的所有不对称情况都将出现类似效应；

- 相同塔、平台、梯子上的其它天线系统和分布馈线线缆上的不良布局也可能以不可预测的方式影响性能。

4.1.2 接近天线塔的重要结构

影响天线系统的因素可能来自于自然环境和人为结构。

环境对框图形状的影响根据站址自然特性具有长期性和一致性。

另一方面，靠近天线塔的结构将根据距离和物理特性改变辐射图，特别是方向。所产生的效应根据邻近建筑数量和规模的不同可能甚为可观。

上述因素对单个天线和更复杂的天线系统的影响各不相同。这种差异是由于耦合效应和衰减或二者的结合造成的。根据上述效应的影响，VHF和UHF频段的性能可能完全不同。

4.1.3 气候因素

太阳供热可能导致支撑结构弯曲和总体波束倾斜变异。

八木天线对结冰很敏感。这种现象在极端情况下可能导致前后比倒挂。所有天线类型的阻抗非匹配将在结冰条件下更加严重。

4.2 计算和测量天线参数和辐射图比较

计算和测量辐射图之间的差异可从十分之一dB到几十个dB。

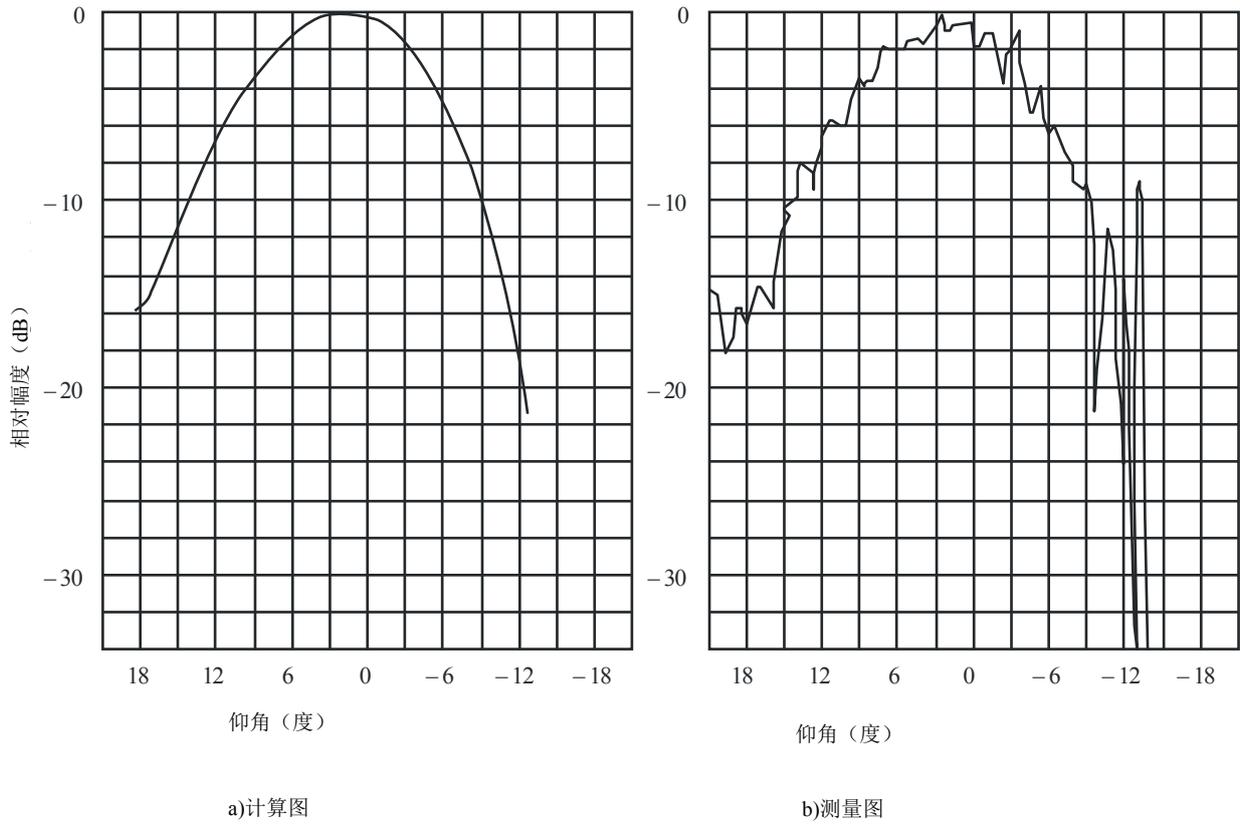
这种差异可能在接近零值辐射和旁瓣情况下更为突出。当耦合效应出现时，VHF可能比UHF具有更大的差异。相反，如出现衰减效应，UHF的差异则更大。此外，这些差异的影响还取决于天线系统的复杂性。

计算和测量性能之间的差异对于单独天线系统可能更小，因为VHF和UHF参数方便调整。

对复杂系统，差异主要是由于机械和电子组成综合效应以及周边建筑环境造成的。此外，建筑物的出现可对邻近最小值造成严重影响，如图45所示。

该图显示出工作在VHF频段的的天线系统计算和测量辐射图。当俯角为 10° 时差异明显，计算值为10 dB，而实际测量值为20 dB。地面和屋顶反射严重影响框图的形成。

图45
计算和测量垂直图



附件1

第3部分

VHF和UHF广播天线计算软件

1 引言

这部分描述了用来按照第1部分第7.2段所述算式计算天线系统辐射图的计算机程序的实际实施。

该部分附录1包含软件包中使用的基本例行程序列表。该软件包可量体裁衣以满足用户具体的频率规划、天线系统设计等需求。

硬件要求主要取决于软件应用并可能对起码的硬件实施产生不同的影响，从简单的可编程袖珍计算器到频谱管理主机应用。

2 程序架构

第1部分第7.2段所列计算天线系统辐射图的算式在应用时需要具有大量输入参数，以便适当定义计算条件。这些参数可能具有一般性：

- 图像载频（TV）或信道频率（FM）；
- 天线系统的中段操作频率；
- 构成天线系统的不同类单个天线数量；
- 塔截面和侧边长度；

对于每个单个天线，还具体包括：

- 适用发射功率百分比；
- 馈入电压相位；
- 倾斜角；
- 塔侧补偿；
- 各元素之间的垂直间隔。

在选择了构成天线系统的单个天线类型后，可检索到其幅度和相位辐射图。

这些图必须事先通过具体的输入程序存储起来，以便建立包含所选择的单个天线幅度和相位辐射图数字表示法的适当文档。该简单程序应能输入制造商提供的水平和垂直辐射图（最大增益见第6.3段）的幅度和相位值，并获得所需要的角分辨率。使用适当的内插在与抽样程序不符的方向内获得辐射图值。

经过适当的转换，所有上述参数可用来确定附录1所列基本图形计算程序所必要的输入。该途径的输出为用方位角和仰角定义的所需角度方向的e.r.p.值。

附录1

第3部分

天线图基本计算子程序

1 引言

程序中的一个可用功能是计算由人为放置在三维空间内的辐射源构成的天线系统辐射图。

本节将分析实施上述功能的理论基础和方法。

所需要的输入包括：

- 天线系统使用的各基本源的水平和垂直图，
- 天线系统的几何描述，即各基本源的位置和校准方向，
- 各来源的馈电描述。

可获得的输出包括：

- 任何仰角的水平辐射图，
- 任何方位角的垂直辐射图，
- 天线系统增益。

此外，通过图表显示，可以添加三维辐射图，以便尽快比较各向辐射图。

计算辐射图的理论基础描述见下文。该描述已译为高层编程语言。

2 理论基础

假设我们在笛卡尔坐标系统x-y-z（见图46）中有N个辐射来源，其中：

- x-y面为水平面，
- y轴是水平面的北方，
- z轴本地垂直。

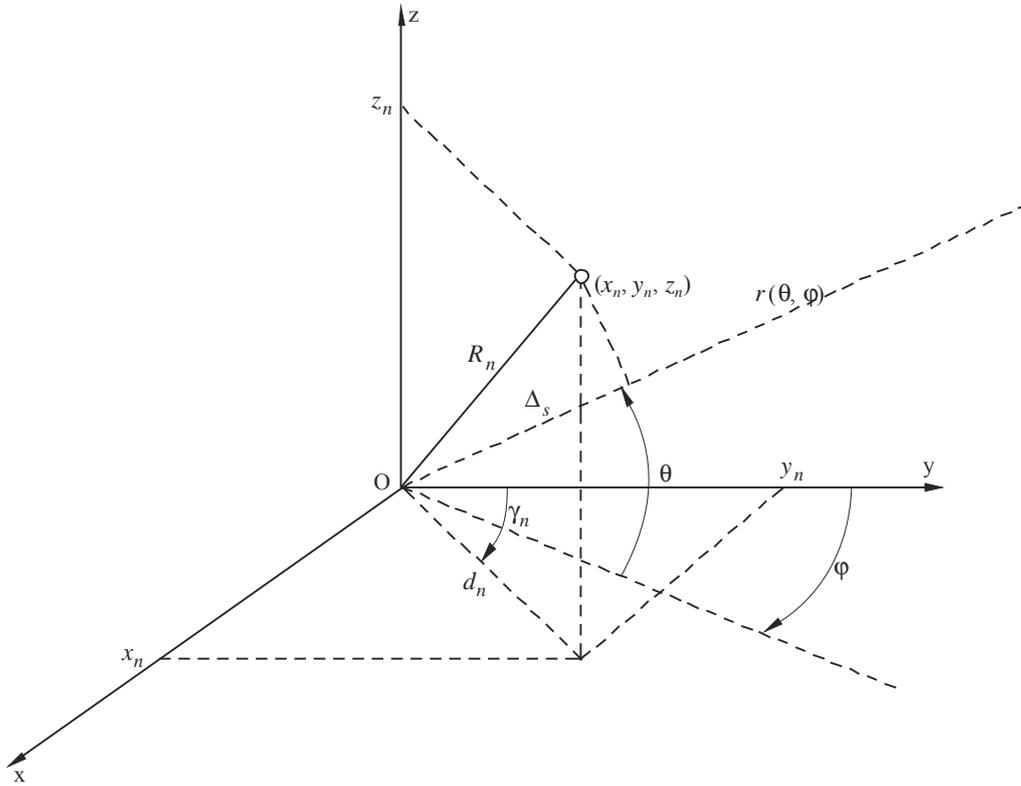
第n个辐射来源位置由笛卡尔坐标 (x_n, y_n, z_n) 给出或通过位置矢量模拟获得：

$$\mathbf{R}_n = x_n \mathbf{x}_0 + y_n \mathbf{y}_0 + z_n \mathbf{z}_0 \quad (32)$$

第n个来源位置还可以用圆柱坐标 (d_n, γ_n, h_n) 表示，与相应的笛卡尔坐标 (x_n, y_n, z_n) 通过以下关系连接（见图46）：

$$\begin{aligned}
 x_n &= d_n \sin \gamma_n \\
 y_n &= d_n \cos \gamma_n \\
 z_n &= h_n
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

图46



BS.1195-46

观测方向 (θ, φ) N 辐射源电磁场构成产生的电压增益为:

$$G_{Vtot}(\theta, \varphi) = \left| \sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\theta, \varphi) e^{j\Delta\psi_n(\theta, \varphi)} \right|
 \tag{34}$$

其中 a_n 馈入第 n 个辐射器的功率百分比, $G_{Vn}(\theta, \varphi)$ 为可从第 n 个来源水平和垂直幅度图获得的 (θ, φ) 方向电压增益, 兼顾校准方向和周围旋转。

由于涉及总和(34)中的矢量相位, 观测方向第 n 个来源弧度的总相位差可表述如下:

$$\Delta\psi_n(\theta, \varphi) = \Delta\psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) + \Delta\psi_{n\ diag}(\theta, \varphi) + \Delta\psi_{n\ el}
 \tag{35}$$

其中 $\Delta\psi_{n\ pos}(\theta, \varphi)$ 代表观测方向第 n 个来源相对于置于初始坐标系统的来源的位置相位差(rad) (见图46), 表达式如下:

$$\Delta\psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta s
 \tag{36}$$

其中:

$$\Delta s = (\mathbf{R}_n \cdot \mathbf{r})$$

\mathbf{R}_n 由(32)给出, 考虑到图46中, 坐标 θ 在办空间 $Z < 0$ 中为正向, \mathbf{r} 可表达如下:

$$\mathbf{r} = \cos \theta \sin \varphi x_0 + \cos \theta \cos \varphi y_0 - \sin \theta z_0 \quad (37)$$

通过计算数积, 可以得到第 n 个来源的位置相位差:

$$\Delta \psi_{n \text{ pos}}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\cos \theta \sin \varphi x_n + \cos \theta \cos \varphi y_n - \sin \theta z_n \right) \quad (38)$$

在圆柱坐标 (d_n, γ_n, h_n) 中标注第 n 个来源的位置 (见表达式(33)), 表达式(38)变为:

$$\Delta \psi_{n \text{ pos}}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\cos \theta \sin \varphi d_n \sin \gamma_n + \cos \theta \cos \varphi d_n \cos \gamma_n - \sin \theta h_n \right) \quad (39)$$

或:

$$\Delta \psi_{n \text{ pos}}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\cos \theta \cos(\gamma_n - \varphi) d_n - h_n \sin \theta \right] \quad (40)$$

在(35)中, $\Delta \psi_{n \text{ diag}}(\theta, \varphi)$ 代表 (θ, φ) 方向第 n 个来源的相位差(rad), 而 $\Delta \psi_{n \text{ el}}$ 代表与观测方向 (θ, φ) 无关的第 n 个来源的馈入相位差。

通过表达式(34)得出:

$$\begin{aligned} G_{V \text{ tot}}(\theta, \varphi) &= \left| \sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\theta, \varphi) \cos \Delta \psi_n(\theta, \varphi) + j \sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\varphi, \theta) \sin \Delta \psi_n(\theta, \varphi) \right| = \\ &= \sqrt{\left(\sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\theta, \varphi) \cos \Delta \psi_n(\theta, \varphi) \right)^2 + \left(\sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\varphi, \theta) \sin \Delta \psi_n(\theta, \varphi) \right)^2} \quad (41) \end{aligned}$$

3 计算软件的实现

为提高灵活性, 采用模块结构实现程序, 用C语言翻译成高层编程语言。

以下各节是有关 $G_{V \text{ tot}}(\theta, \varphi)$ 模块的报告以及所有其它相关函数, 用来计算由所有观测方向 (θ, φ) N 个辐射源构成的天线系统的总电压增益。

3.1 全面变量

下文所示模块使用的全球变量清单如下。下文还包括对各变量的简单量化描述。

NUMS:	辐射源数量
TIPO[n]:	当所有来源同属TIPO[n]=1类, 第 n 个辐射源的类型
DIAG_AMPH[]:	包含电压增益的矢量, 按照水平面 1° 步进最大值进行常规化

AMPV_FRONT[]:	包含电压增益的矢量，在垂直平面前端按照1°步进最大值进行常规化
AMPV_BACK[]:	包含电压增益的矢量，在垂直平面背面按照1°步进最大值进行常规化
GVMAX[n]:	第n个来源的最大电压增益
LAMBDA_LAV:	波长 (cm)
FI_O[n],TETA_O[n]:	第n个辐射来源校准方位角和仰角 (rad)
RIB[n]:	第n个来源相对于其校准方向的旋转角 (度)
POSX[n],POSY[n],POSZ[n]:	第n个来源位置的笛卡尔坐标 (见图46)
FASE_EL[n]:	第n个来源的相位馈入角 (rad)
A[n]:	第n个来源的功率馈入系数

3.2 计算功能

3.2.1 DIAG功能

该功能计算出NUMS辐射来源在观测方向 (FI、TETA) 的电压增益。它与理论基础中描述的 $G_{Vtot}(\varphi, \theta)$ 相对应。

浮动DIAG (fi,teta)

```
double fi ,teta;          /* 观测方向极化坐标 (方位角、仰角) ，用弧度表示在/*辐射
                           源指示*/
{
  int n;
  double fase_tot;
  double aux0,reale,imag,aux;
  float amp_rad();
  double fase_rad();
  double fase_pos();
  double faseaux;
  reale=0.0;
  imag=0.0;
  用于 (n=0; n<NUMS;n++)
  {
    fase_tot = fase_rad (fi,teta,n) + fase_pos (fi,teta,n) + fase_el [n];
    aux0 = sqrt(a[n]) * amp_rad (fi,teta,n) ;
    reale = reale + aux0 * cos(fase_tot) ;
    imag = imag + aux0 * sin(fase_tot) ;
  }
  aux = sqrt((reale*reale) + (imag*imag));
  return(aux);
}
```

3.2.2 AMP_RAD函数

此函数计算第n个来源观测方向（FI、TETA）的电压增益，考虑到其水平辐射图（DIAG_AMPH[]）、前端（AMPV_FRONT[]）和后端（AMPV_BACK[]）垂直辐射图以及方向和来源的旋转。它对应于理论基础中所描述的 $G_{Vn}(\varphi, \theta)$ 。

Float AMP_RAD (fi,teta,n)

```
double fi ,teta;          /*观测方向极化坐标（方位角、仰角），用弧度表示*/
int n;                   /* 辐射来源指示 */
{
double f2,t2;
int m;
int az,abb1,abb2;
float aux;
double abb;
float ampv1,ampv2,ampv;
m = tipo[n];
RUOTA_RIB(n,fi,teta,&f2,&t2);
az = (180./PI)*f2;
abb = (180./PI)*t2;
abb1 = abb;
如 (abb1 < 0)
    abb1 =- 1;
abb2 = abb1 + 1;
如 (az1 < 0)
    az1 += 360;
如 ((abb1==90)|| (abb1==270))
    az1 = 0;
/* 第n个来源方向(φ, θ) 的电压增益 */
如 ((az > 90) && (az < 270))
{
/*垂直幅度图后端值的内插 */
    ampv1 = ampv_back[m][abb1+90];
    ampv2 = ampv_back[m][abb2+90];
    ampv = ampv1 + (ampv2-ampv1)*(abb-abb1);
    aux = gvmax[m]*diag_amph[m][az]*ampv;
}
否则
{
/*垂直幅度图前端值的内插*/
    ampv1 = ampv_front[m][abb1+90];
    ampv2 = ampv_front[m][abb2+90];
    ampv = ampv1 + (ampv2-ampv1)*(abb-abb1);
    aux = gvmax[m]*diag_amph[m][az]*ampv;
}
return(aux);
}
```

3.2.3 FASE_RAD function

该函数计算第 n 个来源观测方向 (FI,TETA) 的相位 (rad)，考虑到其相位水平图 (DIAG_FASEH[])、相位垂直图前端 (FASEV_FRONT[]) 和后端 (FASEV_BACK[])、来源的方向和旋转。

```
double FASE_RAD(fi,teta,n)
```

```
double fi ,teta;          /* polar co-ordinates (azimuth, elevation) of the observation
                           direction, expressed in radians */
```

```
int n;                    /* radiating source indicator */
```

```
{
```

```
double f2,t2;
```

```
int m,az,abb1,abb2;
```

```
double aux,aux1,aux2,aux3,aux4;
```

```
double abb;
```

```
double fasev1,fasev2,fasev;
```

```
m = tipo[n];
```

```
/* 计算可读出第 $n$ 个来源图的方向(F2, T2)以便考虑其校准fi_o[n], teta_o[n]及其在rib[n]
   度方向周围的旋转 */
```

```
RUOTA_RIB(n,fi,teta,&f2,&t2);
```

```
az = (180./PI)*f2;
```

```
abb = (180./PI)*t2;
```

```
abb1 == abb;
```

```
如 (abb1 < 0)
```

```
    abb1 -= 1;
```

```
abb2 = abb1 + 1;
```

```
如 (az1 < 0)
```

```
    az1 += 360;
```

```
如 ((abb1==90)||(abb1==270))
```

```
    az1 = 0;
```

```
aux1 = diag_faseh[m][0];
```

```
aux2 = diag_faseh[m][180];
```

```
aux3 = fasev_front[m][90];
```

```
aux4 = fasev_back[m][90];
```

```
/*方向( $\varphi$ ,  $\theta$ ) 中第 $n$ 个来源的相位图 */
```

```
if ((az1 > 90) && (az1 < 270))
```

```
{
```

```
/* 相位垂直图后端值的内插 */
```

```
fasev1 = fasev_back[m][abb1+90];
```

```
fasev2 = fasev_back[m][abb2+90];
```

```
fasev = fasev1 + (fasev2-fasev1)*(abb-abb1);
```

```
aux = (diag_faseh[m][az]-aux2) * cos(t2) + (fasev - aux4) + aux2 - aux1 ;
```

```
}
```

```
否则
```

```
{
```

```
/*相位垂直图前端值的内插*/
```

```
fasev1 = fasev_front[m][abb1+90];
```

```
fasev2 = fasev_front[m][abb2+90];
```

```
fasev = fasev1 + (fasev2-fasev1)*(abb-abb1);
```

```

    aux = (diag_faseh[m][az]-aux2) * cos(t2) + (fasev - aux4) + aux2 - aux1 ;
  }
  aux *= (PI/180.);
  return(aux);
}
RUOTA_RIB (n,fi,teta,fout,tout)
double fi ,teta;          /* 用弧度表示的观测方向极坐标（方位角、仰角） */
int n;                   /* 辐射源标识 */
double *fout,*tout;     /* 可读出第n个来源图的方向极坐标（方位角、仰角）以便
                          考虑校准和旋转 */

{
  float aux;
  double trib,fin,tin,arg;
  double faux,taux,tgnum,tgden;
  int az1,abb1;
  /* 第n个来源的校准方向 (fi_o[n],teta_o[n]) */
  tgnum= cos(teta) *sin(fi-fi_o[n]);
  tgden= ( cos(teta)*cos(teta_o[n])*cos(fi-fi_o[n]) + sin(teta) *sin(teta_o[n]));
  fin = atan2(tgnum,tgden);
  tin = asin( -cos(teta)*sin(teta_o[n])*cos(fi-fi_o[n]) + sin(teta)*cos(teta_o[n]));
  /* 第n个来源rib[n] 的连续旋转 */
  if (rib[n] != 0)
  {
    trib = (double) (PI/180.)*rib[n];
    faux = atan2( cos(trib)*cos(tin)*sin(fin) - sin(trib)*sin(tin) , cos(tin)*cos(fin));
    arg = sin(trib)*cos(tin)*sin(fin) + cos(trib)*sin(tin);
    如 (arg >= 1)
      arg = 1.0;
    如 (arg <= -1)
      arg = -1.0;
    taux = asin(arg );
  }
  否则
  {
    faux = fin;
    taux = tin;
  }
  如 (faux>0)
    faux += 0.01;
  否则
    faux -= 0.01;
  if (taux>0)
    taux += 0.01;
  否则
    taux -= 0.01;
  (*fout) = faux;
  (*tout) = taux;
}

```

3.2.4 FASE_POS函数

该函数计算置于 (x_n, y_n, z_n) 中第 n 个辐射源观测方向的相位差异（见图46）。

```
double FASE_POS (fi,teta,n)  
double fi ,teta;          /*用弧度表示的观测方向极坐标（方位角、仰角）*/  
int n;                   /* 辐射来源标识 */  
{  
    double aux;  
    double deltas;  
    deltas = cos(teta)*sin(fi)*posx[n] + cos(teta)*cos(fi)*posy[n] - sin(teta)*posz[n];  
    aux = (2*PI/lambda_lav) * deltas;  
    return(aux);  
}
```
