



# 天线在移动通信网络中的应用

**摘要：**在移动通信网络中，空间无线信号的发射和接收都是依靠天线来实现的。因此，天线对于移动通信网络来说，起着举足轻重的作用。如果天线选择不好，或者天线的参数设置不当，都会直接影响到整个移动通信网络的运行质量。本文从天线基础参数出发，对移动通信网络中的常用天线进行了分析，讨论天线在不同的应用环境中的选择，以及天线在安装中的注意事项和安装过程中天线参数的调整，最后给出结论。

**关键词：**移动通信网络；天线的安装；天线参数调整

**中图分类号：**TN820.1<sup>+7</sup>

**文献标识码：**B

**文章编号：**1009-9336(2004)05-0001-11

李 威

(北京市电话通信设计院，北京 100050)

站设备的重要组成部分。从基站天线到用户手机天线，或从用户手机天线到基站天线的无线连接中，天线的运行质量在整个网络运行质量中发挥重要的作用，占基站系统可靠性的 30%~50%。如果天线的选择（类型、位置）不好，或者天线的参数设置不当，都会直接影响整个移动通信网络的运行质量。尤其在基站数量多、站距小、载频数量多的高话务量地区，天线选择及参数设置是否合适，对移动通信网络的干扰、覆盖率、接通率及全网服务质量都有很大影响。不同的地理环境、不同服务要求需要选用不同类型和规格的天线。天线的调整在移动通信网络优化工作中发挥很大的作用。

## 2 天线的结构（对称振子和天线阵）

天线的作用是有效地将传输线送来的高频传导电流转换成空间电磁波，或将空间的电磁波转换成传输线中的功率信号反变换。天线是发射或接收电磁波的一个导体或多个导体的组合，从结构上可分





图1 常用线天线外观图

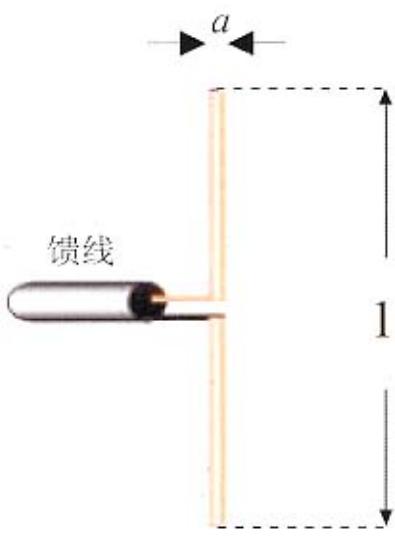


图2 对称振子示意图

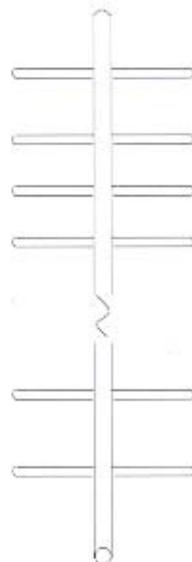


图3 内部天线阵示意图

为线天线、面天线、喇叭天线、透镜天线等。

目前移动通信网络中主要使用线天线（见图1）。线天线的基础是对称振子（见图2），即天线辐射体的长度远大于其直径。当通过导线的高频电流变化的频率所确定的波长远大于该导线的长度时，可以认为该导线上电流的振幅和相位是相同的，只是它的数值随时间t的变化作正弦变化，这种短导线被称为电流元或赫兹偶极子，它可以作为独立的天线或成为复杂天线的组成单元。复杂天线在空间的电磁场可以看作是许多电流元产生的电磁场迭加的结果。

为了增强天线的方向性、提高天线的增益系数、得到所需的辐射特性，可以把若干个相同的天线单元按一定的规律排列起来，并适当激励，这样组成的天线系统称为天线阵（见图3）。将多个对称振子组合起来就构成对称振子的天线阵。按照对称振子的排列方式，其天线阵可以分为直线阵、平面阵和立体阵，不同的排列有不同的阵因子。根据方向性相乘原理，采用同样的对称振子作为天线阵的单元天线，只要改变排列位置或馈电相位，就可以得到不同的方向特性。移动通信中基站高增益全向天线就是把振子作共轴排列，压缩垂直面的波束宽度，而把辐射能量集中于与振子相垂直的方向上，以提高天线的增益。

### 3 天线的几个重要参数

选择合适的天线对于整个移动网络的质量是至关重要的。在选择时，必须掌握天线的几个重要参数，如表征天线性能的主要参数有方向图、增益、输入阻抗、驻波比、极化、双极化天线的隔离度及3级互调等。

#### 3.1 方向图

天线方向图是表征天线辐射特性空间角度关系的图形。以发射天线为例，从不同角度不同方向辐射出去的功率或场强形成的图形。一般情况，用包括最大辐射方向的两个相互垂直的平面方向图来表示天线的立体方向图，分为水平面方向图和垂直面方向图。平行于地面在波束最大场强最大位置剖开的图形叫水平面方向图；垂直于地面在波束场强最大位置剖开的图形叫垂直面方向图（图4、图5分别是半功率角为 $60^\circ$ 的定向天线的水平、垂直面的方向图）。

在方向图中描述天线辐射特性的另一重要参数——半功率角，在天线辐射功率分布在主瓣最大值的两侧（如图4、图5所示），功率强度下降到最大值的一半（场强下降到最大值的0.707倍，3dB衰耗）的两个方向的夹角，表征了天线在指定方向上辐射功率的集中程度。天线垂直的波瓣宽度会影响

该天线所对应方向上的覆盖半径。因此，在一定范围内通过对天线垂直度（俯仰角）的调节，可以达到改善小区覆盖质量的目的，这也是在网络优化中经常采用的一种手段。天线的波瓣宽度主要涉及2个方面：水平平面波瓣宽度和垂直平面波瓣宽度。

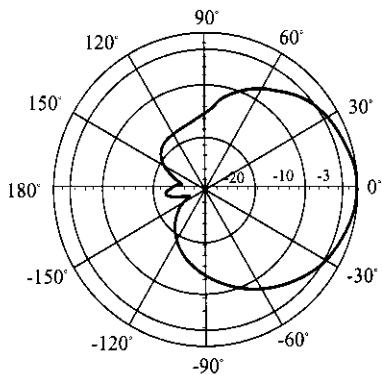


图4 水平面方向图

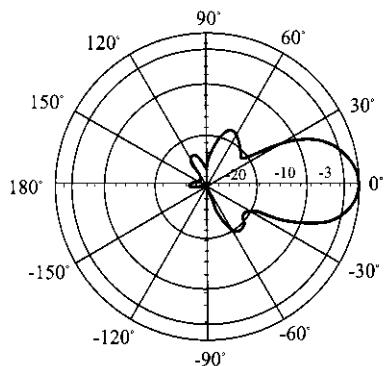


图5 垂直面方向图

(1) 水平面的半功率角 (H-Plane Half Power beamwidth) ( $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  等): 定义了天线水平平面的波瓣宽度。角度越大，在扇区交界处的覆盖越好，但当提高天线倾角时，也越容易发生波束畸变，形成越区覆盖；角度越小，在扇区交界处覆盖越差。提高天线倾角可以在移动程度上改善扇区交界处的覆盖，且相对而言，不容易产生对其他小区的越区覆盖。市中心基站由于站距小、天线倾角大，应当采用水平平面的半功率角小的天

线，郊区选用水平平面的半功率角大的天线。

(2) 垂直平面的半功率角 (V-Plane Half Power beamwidth) ( $48^\circ$ 、 $33^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $8^\circ$ ): 定义了天线垂直平面的波瓣宽度。垂直平面的半功率角越小，偏离主波束方向时信号衰减越快，越容易通过调整天线倾角准确控制覆盖范围。

根据以往经验，城区内GSM三扇区定向基站水平面半功率波瓣宽度为 $65^\circ$ ，在 $120^\circ$ 的小区边沿，天线辐射功率要比最大辐射方向上低 $9\sim10$  dB。

(3) 副瓣电平是指副瓣最大值与主瓣最大值之比。

(4) 前后比是指主瓣最大值与后瓣最大值之比，表明了天线对后瓣抑制的好坏。选用前后比低的天线，天线的后瓣有可能产生越区覆盖，导致切换关系混乱，产生掉话。一般在 $25\sim30$  dB之间，应优先选用前后比为 $30$  dB的天线。

### 3.2 方向性系数

不同的天线有不同的方向图，为表示它们集中辐射的程度和方向图的尖锐程度，我们引入方向性系数。理想的点源天线辐射没有方向性，在各方向上辐射强度相等，方向是个球体。我们以理想的点源天线作为标准与实际天线进行比较，在相同的辐射功率某天线产生于某点的电场强度平方 $E^2$ 与理想的点源天线在同一点产生的电场强度的平方 $E_0^2$ 的比值称为该点的方向性系数，即 $D = E^2 / E_0^2$ 。

### 3.3 天线增益

天线增益是用来衡量天线向一个特定方向收发信号的能力，它是选择基站天线最重要的参数之一。增益和方向性系数同是表征辐射功率集中程度的参数，但两者又不尽相同。增益是在同一输出功率条件下加以讨论的，方向性系数是在同一辐射功率条件下加以讨论的。由于天线各方向的辐射强度并不相等，天线的方向性系数和增益随着观察点的变化而变化，但其变化趋势是一致的。在实际应用中，取最大辐射方向的方向性系数和增益作为天线的方向性系数和增益。

天线增益的提高主要依靠减小垂直面向辐射的波瓣宽度，而在水平面上保持全向的辐射性能。天线增益对移动通信网络的运行质量极为重要，因为

它决定蜂窝边缘的信号电平。增加增益就可以在确定方向上增大网络的覆盖范围，或者在确定范围内提高增益余量。任何移动通信网络都是一个双向过程，增加天线的增益能同时减少双向系统增益预算余量。

表示天线增益的参数有dB<sub>d</sub>和dB<sub>i</sub>。dB<sub>i</sub>相对于点源天线的增益，在各方向的辐射是均匀的；dB<sub>d</sub>相对于对称振子天线的增益，dB<sub>i</sub>=dB<sub>d</sub>+2.15。相同的条件下，增益越高，电波传播的距离越远。一般情况，GSM定向基站的天线增益为13~18 dB<sub>i</sub>，全向基站的天线增益为11~15 dB<sub>i</sub>。

### 3.4 输入阻抗

天线的输入阻抗是天线馈电端输入电压与输入电流的比值。其最佳效果是天线输入阻抗是纯电阻且等于馈线的特性阻抗，馈线终端没有功率反射，馈线上没有驻波，天线的输入阻抗随频率的变化比较平缓。天线的匹配工作就是消除天线输入阻抗中的电抗分量，使电阻分量尽可能地接近馈线的特性阻抗。天线输入阻抗可用矢量网络测试分析仪测量，其直流阻抗为0 Ω。一般移动通信天线的输入阻抗为50 Ω。匹配的优劣一般用4个参数来衡量，即反射系数、行波系数、驻波比和回波损耗，4个参数之间有固定的数值关系。在日常维护中，用的较多的是驻波比和回波损耗。

### 3.5 驻波比

由于天线的输入阻抗与馈线的特性阻抗不可能完全一致，这就会产生部分的信号反射，反射波和入射波在馈线上叠加形成驻波，其相邻的电压最大值与最小值的比即为电压驻波比(VSWR)。假定天线的输入功率P<sub>1</sub>，反射功率为P<sub>2</sub>，则：

$$\text{天线的驻波比: } VSWR = \frac{\sqrt{P_1} + \sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1} - \sqrt{P_2}}$$

天线驻波比的值在1~∞之间。驻波比为1，表示完全匹配；驻波比为∞表示全反射，完全失配。一般情况，移动通信天线的电压驻波比应小于1.5，但实际应用中VSWR应小于1.4。过大的驻波比会减小基站的覆盖并造成系统内干扰加大，影响基站的服务性能。

### 3.6 天线极化

所谓天线的极化，就是指天线辐射时形成的电场强度方向。根据天线在最大辐射（或接收）方向上电场矢量的取向，天线极化方式可分为线极化、圆极化和椭圆极化。线极化又分为水平极化、垂直极化和±45°极化。当电场强度方向垂直于地面时，此电波就称为垂直极化波；当电场强度方向平行于地面时，此电波就称为水平极化波。电波的特性决定了水平极化传播的信号，在贴近地面时会在大地表面产生极化电流，极化电流因受大地阻抗影响产生热能而使电场信号迅速衰减，而垂直极化方式则不易产生极化电流，从而避免了能量的大幅衰减，保证了信号的有效传播。发射天线和接收天线应具有相同的极化方式，一般在移动通信中多采用垂直极化或±45°双极化方式（见图6）。



图6 天线极化方式示意图

双极化天线的引入，加速了天线技术的革命。其设计思路是把天线分为垂直与水平极化和±45°极化2种方式。性能上一般后者优于前者，因此目前大部分采用的是±45°极化方式。双极化天线组合了+45°和-45°两极化方向相互正交的天线，并同时工作在收发双工模式下，大大节省了每个小区的天线数量；同时由于±45°为正交极化，有效保证了分集接收的良好效果（其极化分集增益约为5 dB）。

### 3.7 双极化天线隔离度

双极化天线有两个信号输入端口，从一个端口

输入功率信号  $P_1$ ，从另一端口接收到同一信号的功率  $P_2$ ，两者之差称为隔离度，即  $P_1 \sim P_2$ 。

移动通信基站要求在工作频段内极化隔离度大于  $28 \text{ dB} \pm 4.5^\circ$  双极化天线利用极化正交原理，将两副天线集成在一起，再通过特殊措施，使天线隔离度大于  $30 \text{ dB}$ 。

#### 4 移动通信网络中常用天线分析及选择

移动通信天线的技术发展很快，分类越来越精细。按照水平方向图可分为定向型和全向型；按照工作方式可分为单极化和双极化；为了便于工程建设和维护，按照天线下倾角度改变方式可分为机调天线和电调天线。目前移动通信网络中使用的各种天线的使用频率、增益和前后比等指标差别不大，因此它们都符合网络指标要求。以下重点从移动天线下倾角度改变对天线方向图及无线网络的影响方面，对上述几种天线进行比较分析。

##### 4.1 移动通信网络中常用的天线

###### (1) 机调天线

所谓机调天线，即使用机械调整下倾角度的移动天线。机调天线与地面垂直安装好后，因网络优化的要求，需要调整天线背面支架的位置改变天线的倾角来实现。在调整过程中，虽然天线主瓣方向的覆盖距离明显变化，但天线垂直分量和水平分量的幅值不变，所以天线方向图容易变形。实践证明：机调天线的最佳下倾角度为  $1^\circ \sim 5^\circ$ ；当下倾角度在  $5^\circ \sim 10^\circ$  变化时，其天线方向图稍有变形但变化不大；当下倾角度在  $10^\circ \sim 15^\circ$  变化时，其天线方向图变化较大；当机调天线下倾  $15^\circ$  后，天线方向图形状改变很大，从没有下倾时的鸭梨形变为纺锤形，这时虽然主瓣方向覆盖距离明显缩短，但是整个天线方向图不是都在本基站扇区内，在相邻基站扇区内也会收到该基站的信号，从而造成严重的系统内部干扰。

此外，在日常维护中，如果要调整机调天线下倾角度，需要关闭整个系统，不能在调整天线倾角的同时进行监测。机调天线调整天线下倾角度非常麻烦，一般需要维护人员到天线安放处进行调整，机调天线的下倾角度是通过计算机模拟分析软件计算的理论值，同实际最佳下倾角度有一定的偏差，

机械天线调整倾角的步进精度为  $1^\circ$ ，阶互调指标为  $-120 \text{ dBc}$ 。

###### (2) 电调天线

所谓电调天线，即使用电子调整下倾角度的移动天线。电子下倾的原理是通过改变共线阵天线振子的相位，改变垂直分量和水平分量的幅值大小，改变合成分量场强强度，从而使天线的垂直方向性图下倾。由于天线各方向的场强强度同时增大和减小，保证在改变倾角后天线方向图变化不大，使主瓣方向覆盖距离缩短，同时又使整个方向性图在服务小区扇区内减小覆盖面积但又不产生干扰。实践证明：电调天线下倾角度在  $1^\circ \sim 5^\circ$  变化时，其天线方向图与机调天线的大致相同；当下倾角度在  $5^\circ \sim 10^\circ$  变化时，其天线方向图较机调天线的稍有改善；当下倾角度在  $10^\circ \sim 15^\circ$  变化时，其天线方向图较机调天线的变化较大；当机调天线下倾  $15^\circ$  后，其天线方向图较机调天线的明显不同，这时天线方向图形状改变不大，主瓣方向覆盖距离明显缩短，整个天线方向图都在本基站扇区内，增加下倾角度，可以使扇区覆盖面积缩小，但不产生干扰，因此采用电调天线能够降低呼损，减小干扰。

此外，电调天线允许系统在不停机的情况下对



垂直方向性图下倾角进行调整，实时监测调整的效果，调整倾角的步进精度也达到 $0.1^\circ$ ，因此可以对网络实现精细调整。电调天线的3阶互调指标为 $-150\text{ dBc}$ ，比机调天线相差 $30\text{ dBc}$ ，有利于消除邻频干扰和杂散干扰。

### (3) 双极化天线

双极化天线分集原理采用的是极化分集。极化分集是分别接收相互垂直的两个极化方向的电磁波，而构成的一种分集方法。电磁波的电场只是在一条直线上变化，这样的极化方式叫直线极化。如果两个电磁波的直线极化方向互相垂直，那么在不同的极化方向接收时，就可以得到两路衰落特性互不相关的信号。

组合了 $+45^\circ$  和  $-45^\circ$  两副极化方向相互正交的天线并同时工作在收发双工模式下，其最突出的优点是节省单个定向基站的天线数量。一般GSM数字移动通信网的定向基站（3扇区）要使用9根天

表1 常规GSM天线参数表

65° 16 dBi增益 双极化天线	
技术参数	性能指标
增益	16 dBi
频率范围	870~960 MHz
双极化	$\pm 45^\circ$
端口隔离度	$>30\text{ dB}$
水平平面-3 dB功率角	$65^\circ \pm 5^\circ$
垂直平面-3 dB功率角	$8^\circ \pm 1^\circ$
阻抗	$50\Omega$
输入	$<1.4$
前后比	25 dB
端口最大输入功率	150 W
电子下倾角	$1^\circ \sim 15^\circ$
下倾角的精度	$\pm 0.5^\circ$
高度	2 258 mm
宽度	300 mm
深度	139 mm
额定风速度	200 km/hr
重量（除安装支架）	16 kg

线，每个扇形使用3根天线（空间分集，一发两收）。如果使用双极化天线，每个扇形只需要1~2根天线。同时由于在双极化天线中， $\pm 45^\circ$ 的极化正交性可以保证 $+45^\circ$ 和 $-45^\circ$ 两副天线之间的隔离度满足互调对天线间隔离度的要求（ $\geq 30\text{ dB}$ ），因此双极化天线之间的空间间隔仅需 $20\sim 30\text{ cm}$ 。

此外，双极化天线具有电调天线的优点，在移动通信网络中使用双极化天线，可以降低呼损，减小干扰，提高全网的服务质量。由于双极化天线间的隔离度不大，给工程实施创造了很大的便利条件，从而节省基建投资，同时使基站布局更加合理，基站址的选定更加容易。

### (4) 常规GSM天线参数的性能指标案例（见表1）

#### 4.2 移动通信网络中天线的选择

根据不同的环境，选择不同类型的天线不同性能的天线适应于不同环境，满足不同的用户需求。

##### (1) 城区内话务密集地区

在城区内话务量密集的市区，基站间的距离一般在 $300\sim 1000\text{ m}$ ，为合理覆盖基站周围 $400\text{ m}$ 左右的范围，天线高度根据周围环境不宜太高，选择一般增益的天线，同时可采用天线下倾的方式。天线下倾的倾角计算公式为：

$$\alpha = \arctg \left( \frac{h}{r/2} \right)$$

其中： $\alpha$ 为波束倾角， $h$ 为天线高度， $r$ 为站间距离。

选择内置电下倾的双极化定向天线，配合机械下倾，可以保证方向图水平半功率宽度在主瓣下倾的角度内变化较小。

a. 对话务量高密集市区，基站间距离 $300\sim 500\text{ m}$ ，可计算出天线倾角大约在 $10^\circ\sim 19^\circ$ 之间。采用具有电调下倾角的双极化天线加上机械下倾，可保证水平方向图半功率波瓣宽度在主瓣下倾角在 $10^\circ\sim 19^\circ$ 内无异常变化，同时适当降低基站发射功率，完全可以满足对话务量高密集市区覆盖且不干扰其它基站的要求。

以话务量高密集地区GSM覆盖为例，每平方

公里话务量达到800 Erl，忙时话务量按0.02 Erl/用户，用户达到4万。目前采用室内、室外相结合的多层次网覆盖方式。室外基站共32个，平均高度为35m，站间距200~400m，因此对天线的设置要求非常精确。经过优化调整，采用ADC公司FLX-M65·21型号的双极化天线（具体参数见表2），该地区基站最大下倾角达到22°（电调下倾角15°+机调下倾角7°），减少了基站间的相互干扰，满足用户需求。

表2 FLX-M65·21天线参数表

PLX-M65-21:65° 13.5 dBi增益 双极化天线	
技术参数	性能指标
增益	13.5±5 dBi
频率范围	870~960 MHz
双极化	±45°
端口隔离度	>30 dB
水平平面-3 dB功率角	65° ±7°
垂直平面-3 dB功率角	21° ±2°
阻抗	50 Ω
输入	<1.4
前后比	25 dB
端口最大输入功率	150 W
电子下倾角	2° ~ 15° 连续可调
机械下倾角	0° ~ 16° 连续可调
高度	900 mm
宽度	230 mm
深度	150 mm
额定风速度	160 km/hr
重量（除安装支架）	6.7 kg

b. 对话务量较密集市区，基站间距离大于500m，同样计算出天线倾角大约在6°~15°之间，这样电下倾加上机械下倾可变倾角将达10°，可保证水平方向图半功率波瓣宽度在主瓣下倾的6°~15°内无异常变化，可以满足对话务量较密集市区覆盖且不干扰的要求。

以话务量较密集地区GSM覆盖为例，每平方公里话务量达到400 Erl，忙时话务量按0.02 Erl/

用户，用户达到2万。室外基站共16个，平均高度为35m，站间距500~800m，采用ADC公司XM65·21·AA型号的双极化天线（具体参数见表3），该地区基站最大下倾角达到15°（电调下倾角10°+机调下倾角5°），减少了基站间的相互干扰，满足用户需求。

c. 在话务量低密集市区，基站间距离可能更大，天线倾角大约在3°~12°之间，这样电子下倾加上机械下倾可变倾角将达8°，可保证水平方向图半功率波瓣宽度在主瓣下倾的3°~12°内无异常变化，可以满足对这一区域覆盖且不干扰的要求。

以话务量低密集地区GSM覆盖为例，每平方公里话务量达到150 Erl，忙时话务量按0.02 Erl/用户，用户达到0.75万。室外基站共9个，平均高度为30m，站间距600~1000m，同样采用ADC公司XM65·21·AA型号的双极化天线（具体参数见表3），该地区基站最大下倾角达到12°（电调下

表3 XM65·21·AA天线参数表

XM65-21-AA:65° 14.5 dBi增益 双极化天线	
技术参数	性能指标
增益	14.5±5 dBi
频率范围	870~960 MHz
双极化	±45°
端口隔离度	>30 dB
水平平面-3 dB功率角	65° ±7°
垂直平面-3 dB功率角	21° ±2°
阻抗	50 Ω
输入	<1.4
前后比	25 dB
端口最大输入功率	150 W
电子下倾角	1° ~ 10° 连续可调
机械下倾角	0° ~ 15° 连续可调
高度	800 mm
宽度	190 mm
深度	120 mm
额定风速度	160 km/hr
重量（除安装支架）	5.1 kg

倾角 $8^\circ$  + 机调下倾角 $4^\circ$ ），减少了基站间的相互干扰，满足用户需求。

### (2) 在郊区或乡镇地区

在话务量不太密集的郊区和乡镇地区，信号覆盖范围要适当大一点，基站间距离较大，可以选用单极化、空间分集、增益较高的 $65^\circ$ 、 $90^\circ$ 定向天线，既考虑容量又兼顾覆盖。

以城乡地区GSM覆盖为例，平均话务量达到50 Erl，忙时话务量按0.025 Erl/用户，用户达到0.2万。室外基站共5个，平均高度为40m，站间距600~1200m，采用西安海天公司HTDB099015型号的单极化天线（具体参数见表4），该地区基站最大下倾角达到 $9^\circ$ （电调下倾角 $6^\circ$ +机调下倾角 $3^\circ$ ），满足用户需求。

表4 HTDB099015天线参数表

HTDB099015: 90° 15 dBi增益 单极化天线	
技术参数	性能指标
增益	15 dBi
频率范围	870~960 MHz
极化方式	单极化
端口隔离度	>30 dB
水平平面-3 dB功率角	90°
垂直平面-3 dB功率角	8.5°
阻抗	50 Ω
输入	<1.4
前后比	25 dB
端口最大输入功率	150 W
电子下倾角	0° ~ 8° 连续可调
机械下倾角	0° ~ 15° 连续可调
高度	1 935 mm
宽度	262 mm
深度	118 mm
额定风速度	160 km/hr
重量（除安装支架）	15 kg

### (3) 在空旷的农村地区

在话务量很低的农村地区，主要考虑信号覆盖，基站大多是全向站。天线可考虑采用高增益的

全向天线，天线架高可设在60~80 m之间，同时适当调大基站发射功率，以增强信号的覆盖范围，一般平原地区为-90 dBm，覆盖距离可达2~5 km。

以空旷的农村地区GSM覆盖为例，平均话务量达到10 Erl，忙时话务量按0.03 Erl/用户，用户达到0.03万。室外基站共3个，平均高度为60 m，站间距1 000~2 200 m，采用西安海天公司HTQ-09-13型号的全向天线（具体参数见表5）。

表5 HTQ-09-13天线参数表

HTQ-09-13: 13 dBi增益 全向天线	技术参数	性能指标
增益	13 dBi	
频率范围	870~960 MHz	
水平平面-3 dB功率角	360°	
垂直平面-3 dB功率角	6.5°	
阻抗	50 Ω	
输入	<1.4	
端口最大输入功率	500 W	
电子下倾角	0°、3°、5°、7°	
天线尺寸	2 988 mm×Φ50 mm	
额定风速度	241 km/hr	
重量（除安装支架）	8 kg	

### (4) 在铁路或公路沿线

在铁路或公路沿线主要考虑沿线的带状覆盖分布，可以采用双扇区型基站，每个扇区 $180^\circ$ ；天线宜采用单极化、3 dB、波瓣宽度为 $90^\circ$ 的高增益定向天线，两天线相背放置，最大辐射方向与高速路的方向一致。

另外，如果沿路方向话务量很低，既考虑覆盖又考虑设备成本，可采用全向天线变形的双向天线，双向水平波瓣宽度为 $70^\circ$ ，最大增益为14 dBi，例如，西安海天的全向天线变形的双向天线HTSX-09-14型号的天线。

### (5) 在城区内的一些室内或地下

在城区的室内或地下，如高大写字楼内、地下超市、大酒店的大堂等，信号损耗较大，但话务量很高。为满足这一区域用户的通信需求，可采用室

内微蜂窝和室内分布系统结合的覆盖方式，天线采用分布式的低增益天线，以避免信号干扰影响通信质量。

总之，对于天线的选择，应根据运营商的网络覆盖、话务量、干扰和网络服务质量等实际情况，选择适合本地区移动网络需要的移动天线：在基站密集的高话务地区，应该尽量采用双极化天线和电调天线；在边、郊等话务量不高，基站不密集地区和只要求覆盖的地区，可以使用传统的机调天线。目前的GSM网在高话务密度区的呼损较高，干扰较大，其中一个重要原因是天线过高、机调天线下倾角度过大，天线方向图严重变形。要解决高话务区的容量不足，必须缩短站距，加大天线下倾角度，但是使用机调天线，下倾角度大于5°时，天线方向图就开始变形，超过10°时，天线方向图严重变形。因此采用机调天线，很难解决用户高密度区呼损高、干扰大的问题。应该在高话务密度区采用电调天线或双极化天线替换机调天线，替换下来的机调天线可以安装在农村、郊区等话务密度低的地区。

通过实践证明，北京移动在经过3年的整网天线优化中取得了成功，目前北京移动的基站数量已达到5000多个，包括宏蜂窝、街道站、微蜂窝基站等多层网络覆盖，网络结构最复杂，但网络质量名列前茅，在整个网络中70%的基站采用双极化电调天线。

## 5 天线在应用中的注意事项

天线是无线信号与基站之间的接口，在整个无线网络中起着很重要的作用。天线的正确安装，天线参数的正确调整（包括天线高度、俯仰角、方位角），对无线网络的信号质量有着很大的影响，能够较为有效的改善系统的掉话率、接通率、阻塞率等运行质量指标，改善无线信号及无线环境。

### 5.1 天线的安装

目前全国许多地区存在GSM900MHz和1800MHz网络共建。为充分利用资源、实现资源共享，这就涉及到天线的正确安装问题，即如何安装才能尽可能地减少天线之间的相互影响。在实际工程中一般用隔离度来衡量，通常要求隔离度应至少大于30dB。实践证明，采用垂直安装比水平安装能获

得更大的隔离度。

从理论上分析系统之间需要一定的隔离度，保障两系统间天线隔离度最有效的方法是采用垂直隔离，水平隔离的效果较差，且对基站条件要求较高，垂直隔离距离根据隔离度要求进行计算，一般不小于3m（图7、图8为半波耦极子天线的隔离度与天线间距的关系）。

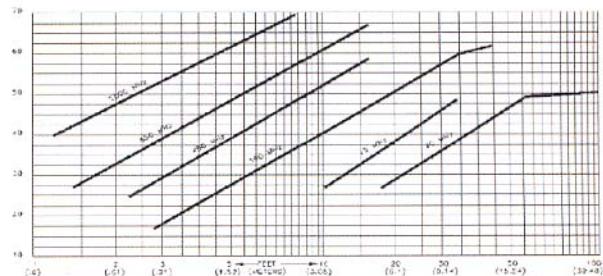


图7 垂直隔离天线的隔离度

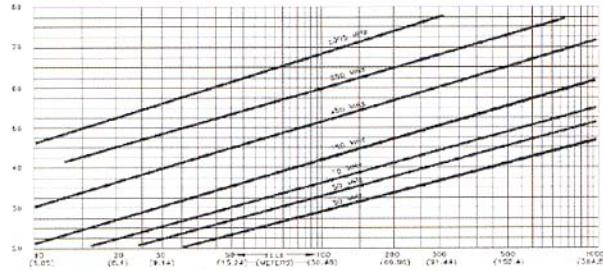


图8 水平隔离天线的隔离度

从理论上讲，为消除天线之间的互调干扰，有用的互调干扰信号电平不能超过-25dBm，也就是说，对于40~70W的基站而言，天线隔离度要求不小于25dB，考虑到其它的干扰及反射信号，建议在工程中天线隔离度要求按40dB考虑。

图中可以看出：900MHz天线之间，在天线隔离度要求为40dB时，天线的水平隔离距离大于3m，垂直隔离距离大于1m。

理论 上在900MHz和1800/1900MHz天线之间，天线隔离度要求可以减少10~15dB，即天线隔离度要求不小于25~30dB。同样900MHz和1800/1900MHz天线之间，天线隔离度要求为30dB时，天线

的水平隔离距离大于1 m，垂直隔离距离大于0.5 m。

总之，天线的安装应注意以下几个问题：

(1) 全向天线的铁塔安装：为减少天线铁塔对天线方向性图的影响，原则上天线铁塔不能成为天线的反射器。因此在安装中使天线与铁塔任一部位的最近距离大于 $\lambda$ （以900 MHz为例，约0.33 m）。

(2) 定向天线的铁塔安装：为减少天线铁塔对天线方向性图的影响，在安装时应注意定向天线的中心至铁塔的距离为 $\lambda/4$ 或 $3\lambda/4$ 时，可获得最大方向性。

(3) 多天线共塔安装：要尽量减少不同收发信天线之间的耦合作用和相互影响，设法增大天线相互之间的隔离度，最好的办法是增大相互之间的距离。

(4) 对于传统的单极化天线（垂直极化）安装：由于天线之间（RX-TX、TX-TX）的隔离度（ $\geq 30$  dB）和空间分集技术的要求，天线之间有一定的水平和垂直间隔距离，一般垂直距离约为0.5 m，水平距离约为4.5 m。而对于双极化天线（ $\pm 45^\circ$  极化），由于 $\pm 45^\circ$  的极化正交性可以保证 $+45^\circ$  和 $-45^\circ$  两副天线之间的隔离度满足互调对天线间隔距离的要求（ $\geq 30$  dB），因此双极化天线之间的垂直距离约为0.3 m 或水平距离约为1.5 m。

(5) 没有铁塔安装环境，可以采用框架安装的方式实现垂直隔离。无法满足垂直隔离条件，只能采用抱杆方式，但必须注意水平隔离度，一般水平距离约为3 m。

## 5.2 天线参数的调整

### (1) 天线高度的调整

天线高度直接与基站的覆盖范围有关。一般用



仪器测得的信号覆盖范围受两方面因素影响：一是天线发射波所能达到的最远距离；二是到达该地点的信号强度满足要求。900 MHz 移动通信天线的直射波理论上的有效直视距离（S）直接与收发信天线的高度有关，具体关系式可简化如图9所示。

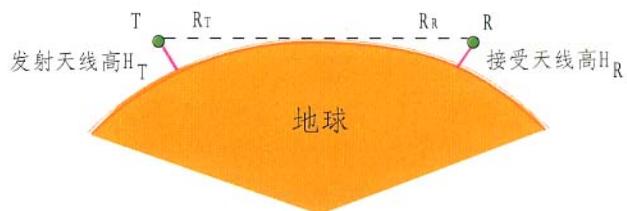


图9 简化关系式图

$$S = 4.12 \times 0.7 \times (\sqrt{H} + \sqrt{h}) \quad (\text{km})$$

其中：

4.12 ——综合考虑受地球曲率半径和大气层对电波的折射作用的影响；

0.7 ——由于电磁波的频率远低于光波的频率，电波传播的有效直视距离约为极限直视距离的70%；

H ——基站天线的中心点高度 $H_T$ ；

h ——手机或测试仪表的天线高度 $H_R$ 。

例如：H 与 h 分别为36 m 和1.7 m，则有效直视距离为 S=21 km

由此可见，基站无线信号所能达到的最远距离（即基站的覆盖范围）主要是由天线高度决定的。北京移动GSM网络在建设初期站点较少，为了保证覆盖，基站天线一般架设得都较高。随着近几年网络的发展，小区分裂，基站数量增多，在市区已经达到300 m一个基站。在这种情况下，必须减小基站的覆盖范围，降低天线的高度，否则会严重影响网络质量。其影响主要有以下几个方面：

(1) 话务分配不均衡。基站天线过高，其覆盖范围相应增大，造成该基站的话务量很高，信道拥塞严重，而与之相邻的基站由于被该基站覆盖，话务量较小，闲置信道较多，导致话务分配不均衡。

(2) 系统内部干扰。基站天线过高，会造成越站无线干扰（主要包括同频干扰及邻频干扰），引起



掉话、串话和有较大杂音等现象，从而导致整个网络质量的下降。

③产生孤岛效应。当基站覆盖在大型水面或多山地区等特殊地形时，由于水面或山峰的反射，使基站在原覆盖范围不变的基础上，在很远处出现“飞地”，而与之有切换关系的相邻基站却因地形的阻挡覆盖不到，这样就造成“飞地”与相邻基站之间没有切换关系，“飞地”因此成为一个孤岛，当手机占用上“飞地”覆盖区的信号时，很容易因没有切换关系而引起掉话。

#### (2) 天线俯仰角的调整

天线俯仰角的调整是网络优化中的一个非常重要的环节。俯仰角的调整可以克服天线抱杆与地平面的不垂直度，而使天线尽可能垂直于地平面，保证信号的有效传播。除此之外，还可以选择合适的覆盖范围，使基站实际覆盖范围与预期的设计范围相同，受干扰小区的同频及邻频干扰减至最小，同时加强本覆盖区的信号强度。天线俯仰角的大小可以由以下公式推算：

$$\theta = \arctg(h/R)$$

其中： $\theta$ 为天线的俯仰角， $h$ 为天线的高度  
 $R$ 为小区的覆盖半径。

上式是将天线的主瓣方向对准小区边缘时得出的，在实际优化工作中，一般在此基础上再上调 $1^\circ \sim 2^\circ$ ，使信号更有效地覆盖在本小区之内。

#### (3) 天线方位角的调整

天线方位角的调整对移动网络质量也非常重。一方面，准确的方位角能保证基站的实际覆盖与预期的相同，保证整个网络的运行质量；另一方面，依据话务量或网络存在的具体情况对方位角进

行适当的调整，可以更好地优化现有的移动网络，吸收有效的话务量。

在实际的GSM网络中，一方面由于地形的原因，如大楼、高山、水面等，往往引起信号的折射或反射，从而导致实际覆盖与理想计算较大的出入，造成一些区域信号较强，而另一些区域信号较弱，这时可根据网络的实际情况，对相应天线的方位角进行适当的调整，以保证信号较弱区域的信号强度，达到网络优化的目的；另一方面由于实际存在的人口密度不同，导致各天线所对应小区的话务不均衡，这时可通过调整天线的方位角，达到均衡话务量的目的。

天线在安装过程中，馈线、馈线转换头及室内外跳线的质量也影响移动通信基站的覆盖质量。大部分覆盖效果差的基站是由于馈线及连接部分的质量差引起的，可通过VSWR仪表逐级逐段测量来判定质量差的部分，及时更换以保证整个基站天馈线部分的质量，保证基站的运行质量和覆盖质量。

### 6 结论

总之，天线是移动通信中不可缺少的组成部分，在移动通信网络优化中发挥巨大的作用。本文从天线的基本参数讨论出发，结合实际工作经验对天线在移动通信网络中的应用进行了论述，结论如下：

(1) 双极化天线技术具有节省天线数量，减少基建投资，对天线安装环境要求低，并具有接收分集增益等优点；

(2) 电子下倾技术比机械下倾技术具有更高的精确度，同时可调电子下倾技术可以实时控制和调整无线网络覆盖，使无线网络趋于精细，可以有效地控制无线覆盖，加强服务小区的信号，同时减少同频干扰；

(3) 天线参数直接影响着移动网的话务量均衡分配、减少干扰等网络指标。因此在做好网络规划的同时，必须设计合理的天线参数。

#### 作者简介：

李威，1996年毕业于长春邮电学院。现任北京市电话通信设计院副院长。

收稿日期：2004-09-27

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>