

3.天线技术基础

射频电子电路技术及天线技术 -

天线技术基础

孙长果
Sunchangguo@datangmobile.cn
Tel:6541

3.天线技术基础

- 电磁场方程及其解
- 天线的分类和基本电参数
- 天线阵理论
- TD-SCDMA系统中的天线问题
- 天线测量

DATANG MOBILE COMMUNICATIONS EQUIPMENT CO., LTD

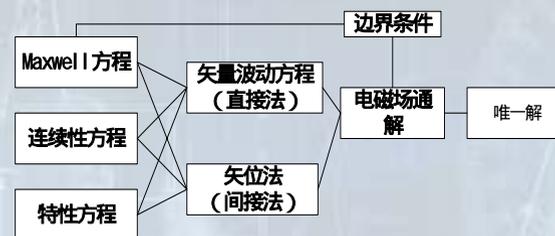
3.天线技术基础

✓ 电磁场方程及其解

- 天线的分类和基本电参数
- 天线阵理论
- TD-SCDMA系统中的天线问题
- 天线测量

DATANG MOBILE COMMUNICATIONS EQUIPMENT CO., LTD

3.天线技术基础 - 电磁场方程及其解



DATANG MOBILE COMMUNICATIONS EQUIPMENT CO., LTD



Maxwell方程微分形式：

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{cases}$$



Maxwell方程积分形式：

$$\begin{cases} \oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \cdot d\mathbf{s} \\ \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \\ \oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \\ \oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q \end{cases}$$



连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$



媒质特性方程

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_0 \end{cases}$$

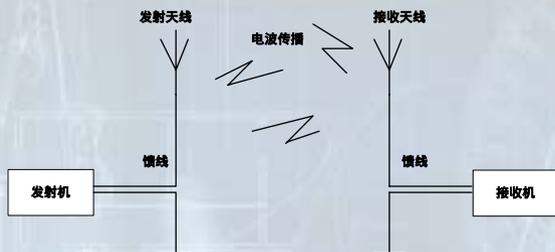


边界条件

$$\begin{cases} \hat{n} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{J}_s \\ \hat{n} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = 0 \\ \hat{n} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0 \\ \hat{n} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \rho_s \end{cases}$$



- 电磁场方程及其解
- ✓ 天线及其电参数
- 天线阵理论
- TD-SCDMA系统中的天线问题
- 天线测量



分类

用途分类：

特性分类：方向性、极化特性、频带特性等

工作模式：馈电方式、电流方式等

波段分类：

天线外形：



线天线和面天线：

一种普遍的分类方式将大部分天线按照结构形式分为两类，一类是由半径远小于波长的金属导线构成的线状天线称为线天线；另一类由尺寸大于波长的金属或者介质面构成的面状天线称为面天线。

天线和天线阵：



线天线和面天线：

一种普遍的分类方式将大部分天线按照结构形式分为两类，一类是由半径远小于波长的技术导线构成的线状天线称为线天线；另一类由尺寸大于波长的金属或者介质面构成的面状天线称为面天线。

天线和天线阵：



方向图

假设天线的辐射场强为

$$\mathbf{E}(\theta, \phi)$$

场强方向函数如下,其中 A_0 是与方向无关的常数

$$f(\theta, \phi) = \frac{|E(\theta, \phi)|}{A_0}$$

归一化场强方向函数

$$F(\theta, \phi) = \frac{|E(\theta, \phi)|}{|E_M|} = \frac{f(\theta, \phi)}{f_M}$$

归一化功率方向函数

$$P(\theta, \phi) = F^2(\theta, \phi)$$

相位方向函数

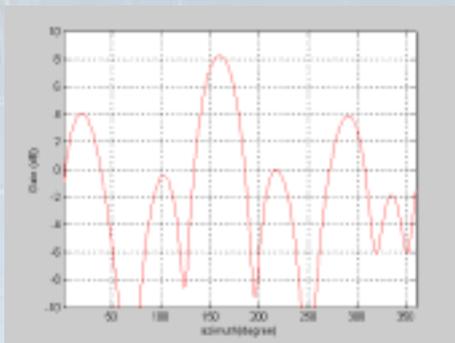
$$ph(\theta, \phi) = \arg(E(\theta, \phi))$$

3. 天线技术基础 - 天线及其电参数



方向图

主瓣/副瓣/后瓣/半功率波瓣宽度 (HPBW)



3. 天线技术基础 - 天线及其电参数

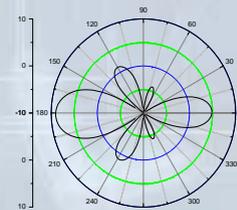


方向图

副瓣电平 (SLL) 和前后辐射比 (FBR)

$$\xi_1 = 10 \lg \frac{P(\theta_1, \varphi_1)}{P_{\max}}$$

$$\xi_b = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P(\theta_b, \varphi_b)}$$



3. 天线技术基础 - 天线及其电参数



方向系数

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi F^2(\theta, \varphi)}{\iint F^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}$$

$$D = \frac{4\pi}{\iint F^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}$$

$$D \approx \frac{\pi}{\varphi_{HP} \theta_{HP}}$$

$$D \approx \frac{1}{2} \left(\frac{1}{D_E} + \frac{1}{D_H} \right)$$

3. 天线技术基础 - 天线及其电参数



阻抗匹配

反射系数：反射电压比入射电压

回波损耗：反射系数绝对值的倒数

行波系数：驻波比的倒数

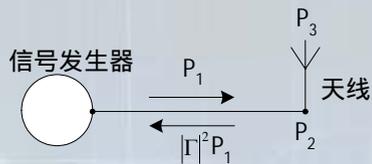
驻波比：

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

3. 天线技术基础 - 天线及其电参数



效率和增益



$$P_2 = (1 - |\Gamma|^2) P_1$$

$$P_3 = \eta P_2$$

3. 天线技术基础 - 天线及其电参数



效率和增益

$$\begin{cases} G_3(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) & \text{方向性增益} \\ G_2(\theta, \varphi) = \eta G_3(\theta, \varphi) & \text{天线本身增益} \\ G_1(\theta, \varphi) = (1 - |\Gamma|^2) G_2(\theta, \varphi) & \text{系统增益} \end{cases}$$

增益的单位

dBi dBd

$$\text{dBi} = \text{dBd} + 2.15 \text{dB}$$

3. 天线技术基础 - 天线及其电参数



天线的极化

电磁波的极化：

$$\xi(z, t) = \text{Re} \left\{ (a_x e^{j\delta_x} \hat{x} + a_y e^{j\delta_y} \hat{y}) e^{j(\omega t + kz)} \right\}$$

1、线极化情况

$$\delta_x - \delta_y = n\pi$$

2、圆极化情况

$$a_x = a_y \text{ 且 } \delta_x - \delta_y = 2n\pi \pm \frac{1}{2}\pi$$

3、其他为椭圆极化情况

3. 天线技术基础 - 天线及其电参数



天线的极化

线天线的极化（电场与地面的关系）：

垂直极化

水平极化

交叉极化（两种形式）

3.天线技术基础 - 天线及其电参数



天线的其他电参数

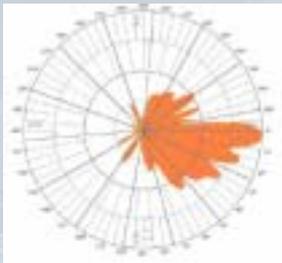
天线的输入阻抗

天线带宽

零点填充

干扰抑制

下倾



3.天线技术基础 - 天线及其电参数



一个天线参数的例子

Electrical	parameters
Frequency band	2020-2025MHz
Gain	10dB
Polarization	Vertical
Input VSWR	1.3
Input impedance	50ohm
Azimuth HPBW	20°
Elevation HPBW	10°
Electrical Center	0°
Front to Back Ratio	20dB
Mechanical	
Width	60mm
Length	111mm
Thickness	67mm
Shape	Planar
Operating temperature	-40 to 50 degree C
Operating humidity	100%
Wind speed	200km/hr
Storage temperature	-45 to 55 degree C
Storage humidity	20 to 80%
Weight	20kg

3.天线技术基础



- 电磁场方程及其解
- 天线及其电参数
- ✓ 天线阵理论
- TD-SCDMA系统中的天线问题
- 天线测量

3.天线技术基础 - 天线阵理论



天线阵概念：

天线阵辐射特性：

- 单元个数及其空间分布；
- 单元辐射特性；
- 各单元的激励。



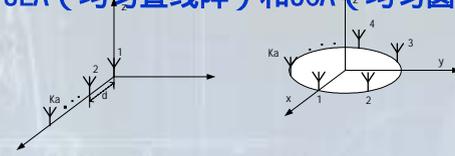
方向图叠加原理：

$$f(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N w_n f_n(\theta, \varphi) \exp(jk \mathbf{r}_n \cdot \hat{\mathbf{e}}(\theta, \varphi))$$

$$f(\theta, \varphi) = \mathbf{w}^T \mathbf{a}(\theta, \varphi)$$



ULA (均匀直线阵) 和UCA (均匀圆阵)

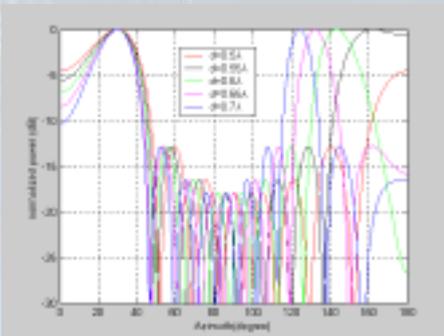


$$a_n(\varphi) = e^{jk(n-1)d \cos(\varphi)} \quad n=1, 2, \dots, N$$

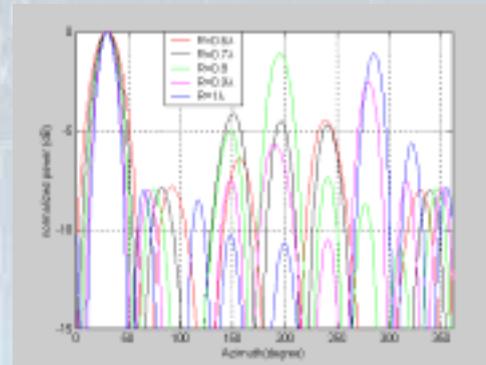
$$a_n(\varphi) = \exp(jkR \cos(\varphi - 2\pi \frac{n-1}{N})) \quad n=1, 2, \dots, N$$



栅瓣的概念：



UCA情况：



3.天线技术基础 - 天线阵理论



互耦的概念：

等效网络模型：

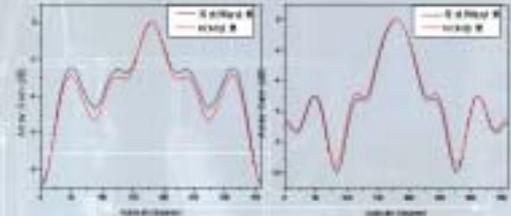
互耦矩阵求解：

- 1) EMF
- 2) MOM
- 3) 空间特性参数估计
- 4) 测量

3.天线技术基础 - 天线阵理论



阵中方向图：



Receive

transmit

3.天线技术基础



- 电磁场方程及其解
- 天线及其电参数
- 天线阵理论
- ✓ TD-SCDMA系统中的天线问题
- 天线测量

3.天线技术基础 -

TD-SCDMA系统中的天线问题



- 智能天线和波束赋形技术
- 空间谱估计
- 扇区化智能天线
- MIMO技术
- 阵列天线的校准
- 结合智能天线的DCA技术

3. 天线技术基础 -

TD-SCDMA系统的天线问题

智能天线和波束赋形技术：

最大径赋形

$$\mathbf{w} = \frac{(\mathbf{H}_{w_{\max}})^H}{\sqrt{P_{w_{\max}}}}$$

固定波束赋形

$$\mathbf{w} = \arg \max_{\mathbf{w}=\mathbf{a}(\phi_l)} (\mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w}), l=1 \cdots L$$

特征波束赋形

$$\mathbf{w} = \arg \max_{\|\mathbf{w}^{(k)}\|=1} (\mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w})$$

3. 天线技术基础 -

TD-SCDMA系统的天线问题

空间谱 (DOA) 估计：

Bartlett Spectrum

$$P_{\text{Bartlett}}(\varphi) = \frac{\mathbf{a}^H(\varphi) \mathbf{R} \mathbf{a}(\varphi)}{\mathbf{a}^H(\varphi) \mathbf{a}(\varphi)}$$

Main Eigen-Space Spectrum

$$P_{\text{Main_eig}}(\varphi) = \frac{\mathbf{a}^H(\varphi) \mathbf{R}_{\text{Main_eig}} \mathbf{a}(\varphi)}{\mathbf{a}^H(\varphi) \mathbf{a}(\varphi)}$$

3. 天线技术基础 -

TD-SCDMA系统的天线问题

扇区化智能天线：

- 阵列形式和间距
- 单元天线
- 全向信道的扇区覆盖
- 业务信道的波束赋形

MIMO技术

结合TD-SCDMA的空时编码和空间复用技术

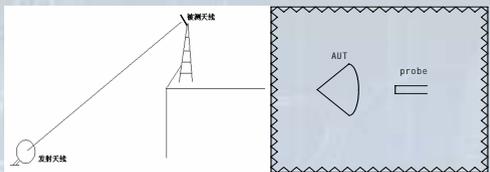
MIMO与智能天线的兼容

3. 天线技术基础

- 电磁场方程及其解
- 天线及其电参数
- 天线阵理论
- TD-SCDMA系统中的天线问题
- ✓ 天线测量



天线测量方法：



远场测量示意图

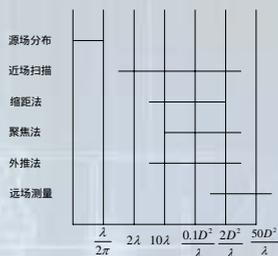
平面近场测量示意图



近场测试环境



探头天线与待测天线的距离 - 场地要求：



不同测量方法对场地的要求

最小测试距离：

要精确测量天线辐射特性，需要以均匀平面波照射待测天线。实际中因为发射天线与待测天线的距离是有限的，照射波只能是近似平面波。因此可以根据测量精度要求确定最小的测试距离。

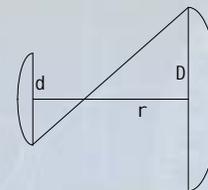


最小测试距离：

相位条件：

$$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r_{\max} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{r^2 + \left(\frac{d+D}{2}\right)^2} - r$$

$$r \approx \frac{\pi(d+D)^2}{4\lambda\Delta\varphi_{\max}}$$



测量示意图

幅度条件：

一般要求发射天线对接收天线不同方向的增益差小于某一特定精度。

$$\Delta G = \frac{\max(G(\varphi))}{\min(G(\varphi))}, \quad \varphi \in \pm \arctg\left(\frac{D}{2r}\right)$$

3.天线技术基础 - 天线测量

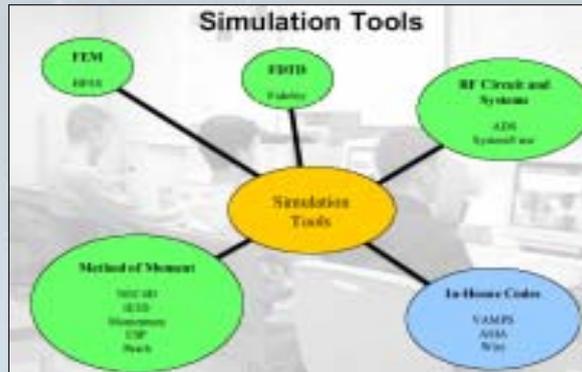


天线测量参数：

- 方向图测量：
- 增益测量：
- 天线效率：
- 阻抗测量：

3.天线技术基础 -

一种简单有效的仿真工具 - NEC



3.天线技术基础 -

一种简单有效的仿真工具 - NEC



NEC (Numerical Electro) 2的仿真步骤：

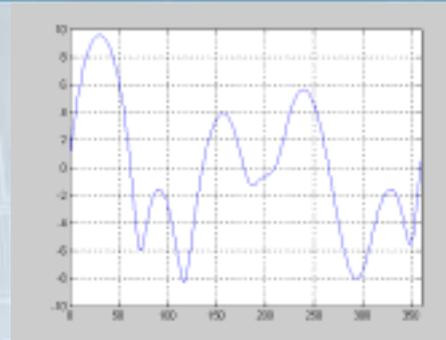
1. 构造输入文件，该文件描述天线说明、结构、馈电以及输出要求等；
2. 运行NEC，输入输入文件的名称、给出输出文件的名称；
3. 观看输出结构并画图或者提取方向图、电流分布、阻抗等信息。

```
CE EXAMPLE 1. Dipole
GW 0,7,0,0,-,25,0,0,,25,.005
GE
EX 0,0,4,1,1
XQ
RP 0,1,360,0000,90,0,0,1,,
EN
```

天线说明：半波振子
天线结构：分7段、位于圆点、线半径0.005m
天线结构描述结束标志
馈电，在中间（第4段），馈入单位电压
执行
输出远场
结束

3.天线技术基础 -

一种简单有效的仿真工具 - NEC



NEC计算8个dipole单元构成的半径为0.6波长的UCA的波束赋形方向图。

3.天线技术基础 -

一种简单有效的仿真工具 - NEC



Homework1 : 用NEC计算下面天线的水平面方向图

8单元半波振子组成的UCA，半径是0.618wavelength，频率300MHz（缺省），等幅同相加权；

Homework2 : 用NEC计算下面天线的水平面方向图

8单元半波振子组成的UCA，半径是0.618wavelength，频率300MHz（缺省），8单元的加权为：

-0.9756 + 0.2194i、 0.5361 - 0.8442i、 -0.3623 + 0.9321i、 -0.8202 - 0.5721i
-0.9756 - 0.2194i、 0.5361 + 0.8442i、 -0.3623 - 0.9321i、 -0.8202 + 0.5721i

3.天线技术基础 - 参考文献



天线理论和设计参考书：

- [1] Y. T. Lo, S. W. Lee, 'Antenna Handbook' : Theory, Applications and Design', 1988.
- [2] 魏文元等, '天线原理', 1985.
- [3] 汪茂光等, '阵列天线分析与综合', 1989.
- [4] IEEE Trans on Antennas and Propagation, from 1988-2000 including some special issues on Adaptive Antennas
- [5] 毛乃宏, 张进民, '天线测量手册'
- [6] Handbook of Antennas in wireless communications

有关NEC仿真工具和参考资料将放在公共文件夹。



WinRAR 压缩文件

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(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。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



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,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

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



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并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
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,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>