应答着陆系统天线阵列设置研究

杨益欢， 赵修斌， 张建安
（空军工程大学电讯工程学院，西安 710077）

摘 要：采用基于MUSIC算法的空间平滑技术代替了应答着陆系统传统的相位干涉式测角算法。重点研究了新算法下应答着陆系统线性非均匀接收天线阵列的设计方法。通过计算机仿真对比分析了设计阵列与同等条件下的均匀阵列的可行性、有效性、分辨力以及精度等性能，有力地验证了设计阵列的可用性和可靠性。

关键词：应答着陆系统；测角算法；阵列设置；阵列性能
中图分类号：V271.4；TN966 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-637X(2012)03-0082-04

Study on TLS Antenna Array Design

YANG Yihuan， ZHAO Xiubin， ZHANG Jian'an
(Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The spatial smoothing technique based on MUSIC algorithm was used to replace the traditional phase interferometer angle measurement algorithm of Transponder Landing System (TLS). The design of non-uniformly spaced linear receiving arrays based on the new algorithm was studied. The feasibility, validity, resolution and precision of the designed array were compared with that of the uniform array under the same condition by computer simulation, which verified the applicability and reliability of the designed array.

Key words: Transponder Landing System (TLS); angle measurement algorithm; array design; array capability

0 引言

为了满足复杂场地条件的机场和军方机动性的需要，美国ANPC公司于1991年设计研发了应答着陆系统[1-2]（Transponder Landing System，TLS）。TLS是以应答机为基础的I类精密进近导航系统，通过测量飞机应答信号的载波相位和到达时间确定飞机的空间位置，为进近着陆的飞机提供精确着陆引导信息，弥补了仪表着陆系统（ILS）安装场地要求严格、设备机动性差等缺点。可只加装地面设备，利用飞机现有的ILS接收机和二次雷达机载设备，不对飞机进行任何改动，在复杂场地条件和临时机场实现精密进近着陆。

随着空中交通容量不断增加以及战场环境的复杂变化，传统的相位干涉式测角算法已经不能完全满足TLS对多目标的分辨、宽范围测角等需要；加之机场附近障碍物等影响，应答信号容易产生反射、散射现象，在接收阵列形成高度相关的多条多径和直达信号。同时，着陆飞机应答信号格式相同，多架飞机同时进场时的接收信号也同样存在高度的相关性。根据空间谱估计的理论，采用基于高精度、超分辨MUSIC算法的空间平滑技术可以很好地解决上述问题[3-5]。

基于MUSIC算法的空间平滑技术对天线阵列的设计有较高的要求。根据TLS特点，采用一维非均匀线阵来分别测量方位和仰角比较合理。

1 TLS测角新算法

如图1所示，假设TLS接收天线阵列阵元数为N，接收信号数为P，且$P<N$。

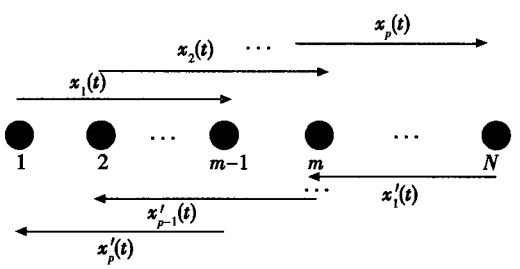

图1 TLS测角新算法原理

Fig. 1 New angle measurement algorithm principle of TLS

将N阵元的天线阵列划分成p个子阵，且每个子

收稿日期：2011-04-10 **修回日期**：2011-05-11
基金项目：空军工程大学电讯工程学院研究生创新基金（DYCX1001）
作者简介：杨益欢（1987—），男，四川绵阳人，硕士生，研究方向为军用无线电导航。

万方数据

阵阵元数为 $m-1$。对于前向平滑，以每个子阵的第 1 个阵元为参考阵元，则第 k 个子阵的数据模型为

$$\boldsymbol{x}_k(t)=[x_k \quad x_{k+1} \quad \cdots \quad x_{k+m-1}]=\boldsymbol{A}(\theta)\boldsymbol{D}^{(k-1)}\boldsymbol{s}(t)+n_k(t) \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{A}(\theta)=[\boldsymbol{a}(\theta_1),\boldsymbol{a}(\theta_2),\cdots,\boldsymbol{a}(\theta_P)]$ 为阵列的方向矩阵；$\boldsymbol{a}(\theta_k)$ 为阵列的导向矢量；$\boldsymbol{x}_k(t)$ 为阵列输出向量；$\boldsymbol{s}(t)$ 为入射到阵列的空间来波信号向量；$n_k(t)$ 为阵列输出的均值为 0、方差为 σ^2 的加性白噪声。

并且

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} e^{(j2\pi d/\lambda)\sin\theta_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & e^{(j2\pi d/\lambda)\sin\theta_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & e^{(j2\pi d/\lambda)\sin\theta_P} \end{bmatrix} \tag{2}$$

则每个子阵的协方差矩阵为

$$\boldsymbol{R}_k=A\boldsymbol{D}^{(k-1)}R_S(\boldsymbol{D}^{(k-1)})^{\mathrm{H}}A^{\mathrm{H}}+\sigma^2 I \tag{3}$$

对所有子阵协方差矩阵求均值便可得到前向平滑的修正协方差矩阵为

$$\boldsymbol{R}^f=\frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p}R_k=\boldsymbol{A}(\theta)\left(\frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p}\boldsymbol{D}^{(k-1)}\cdot \boldsymbol{R}_S(\boldsymbol{D}^{(k-1)})^{\mathrm{H}}\right)\boldsymbol{A}^{\mathrm{H}}(\theta)+\sigma^2 I \tag{4}$$

同理，后向平滑的修正协方差矩阵为

$$\boldsymbol{R}^b=\frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p}\boldsymbol{R}_{p-k+1}=\boldsymbol{A}(\theta)\left(\frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p}\boldsymbol{D}^{-(m+k-2)}\cdot \boldsymbol{R}_S^*\boldsymbol{D}^{(m+k-2)}\right)\boldsymbol{A}^{\mathrm{H}}(\theta)+\sigma^2 I \tag{5}$$

因此，前/后向平滑的修正协方差矩阵[6-7]为

$$\boldsymbol{R}^{fb}=(\boldsymbol{R}^f+\boldsymbol{R}^b)/2 \tag{6}$$

协方差矩阵 $\boldsymbol{R}^{fb}$ 的特征分解为

$$\boldsymbol{R}^{fb}=U_S\Sigma_S U_S^{\mathrm{H}}+U_N\Sigma_N U_N^{\mathrm{H}} \tag{7}$$

对 $\boldsymbol{R}^{fb}$ 进行特征分解可得到由 P 个大特征值及对应的特征向量组成的信号子空间 U_S 和 $m-1-P$ 个小特征值及对应的特征向量组成的噪声子空间 U_N，并且两者互相正交。由此可以构造接收信号的 MUSIC 空间谱表达式为

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{TLS_MUSIC}}(\theta)=[\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)U_N U_N^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta)]^{-1} \tag{8}$$

只要对式(8)进行谱峰搜索，找出峰值点对应的角度就是信号的入射方向的估计值，也就是所求的飞机方位或仰角。

2　TLS 天线阵列设计

2.1　测向模糊问题[8-9]

基于 MUSIC 算法的空间平滑技术虽然具有高分辨和解相关的能力，但是由于空间采样定理的限制，只有当相邻阵元之间的基线 d_i 满足 $d_i \leqslant \lambda/2$ 时，才不会出现测向模糊的现象。因为在该算法中使用的导向矢量 $\boldsymbol{a}(\theta)$ 利用了相邻阵元之间的相位差信息 $\varphi=2\pi d\sin\theta/\lambda$，对于一维线阵，如果基线的取值大于半波长的话，相位差信息将会出现周期模糊，导致角度测量的模糊。图 2 所示为不模糊角度与归一化基线(d/λ)之间的关系。

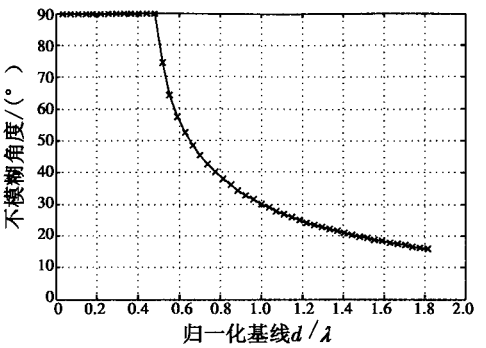

图 2　归一化基线与不模糊角的关系

Fig. 2　The relationship between normalized baseline and un-ambiguity angle

天线阵列的分辨能力随着阵列孔径(或基线)的增大而增强。但由图 2 可知，随着孔径的增大，阵列测角的多值性越来越严重，只有当基线在应答信号半波长内取值才能实现在 ±90°内无模糊测角。因此，在天线阵列设置时应当充分考虑测角模糊问题的影响。

2.2　TLS 天线阵列的设计

飞机应答信号波长仅为 0.2752 m，如果采用半波长基线，天线阵元空间位置受限，而且极易产生阵元间的互耦效应。实际工作中，由于一些自然因素或人为破坏等原因，不可能将阵列设置成基线等于半波长的均匀阵列，反而采用非均匀天线阵列更具实用价值。不但可以利用非均匀阵列的大孔径、高分辨的优势，还能够满足系统的高精度。但是，在设计非均匀阵列时必须避免测角模糊的现象。

在阵列设置时，假设阵元位置以 0.5λ 为单位，且阵元位置矢量为 $\boldsymbol{\Phi}=(d_1,d_2,\cdots,d_N)$，则有 $\boldsymbol{\Phi}=0.5\lambda[n_1,n_2,\cdots,n_N]$，阵列以 n_1 为参考点(即 $n_1=0$)，并假设 n_i 均为非负整数。

根据导向矢量的定义，如果存在阵列模糊，则有

$$e^{-j2\pi d_n\sin\theta_i/\lambda}=e^{-j2\pi d_n\sin\theta_{i'}/\lambda} \tag{9}$$

对式(9)求对数并化简得到

$$(\sin\theta_i-\sin\theta_{i'})n_i=2k_i \tag{10}$$

式中，n_i,k_i 为相互对应的正整数。

令 $\beta_i=\sin\theta_i-\sin\theta_{i'}$，则 $\beta_i=2k_i/n_i$。对于线性阵列，测角范围为($-90°,90°$)，一定有 $|\beta_i|<2$，$k_i<n_i$，对于 $n_i(i=2,3,\cdots,N)$ 有如下关系

$$\beta_i=(-2k_i/n_i,+2k_i/n_i) \tag{11}$$

万方数据

由式(11)可知,当 n_i 互质时,下式一定成立

$$\beta=\{\beta_1\cap\beta_2\cap\cdots\cap\beta_N\}=\{0\} \tag{12}$$

式(12)说明,采用上述非均匀阵列设置,在 n_i 互质时,参数 β 只存在一个0元素满足式(12),也就是说 $\theta_i=\theta_{i'}$,此时阵列便不存在测角模糊问题。

因此,可以采用间距组合思想[10]来实现系统天线阵列的排布。

如果用阵列 $\boldsymbol{\Phi}_i=\{d_1,d_2,\cdots,d_{q-1}\}$ 表示构成整个TLS接收天线阵列的第 i 个子阵,$i=1,2,\cdots,\left[\frac{N-1}{q-1}\right]$,[·]表示取整。则TLS接收阵列可以表示为

$$\boldsymbol{\Phi}=\{\boldsymbol{\Phi}_1,\boldsymbol{\Phi}_2,\cdots,\boldsymbol{\Phi}_{[(N-1)/(q-1)]},d_1,d_2,\cdots,d_j\} \tag{13}$$

式中:$d_1,d_2,\cdots,d_{q-1}$ 表示子阵的基线长度,且两两互素;$j=(N-1)\bmod p$,p 为子阵阵元数,N 为TLS接收阵列阵元数。

为了保证系统结构简单和较好的机动、灵活性,考虑到系统的精度,可以采用子阵阵元为2,总阵元为6的一维非均匀线阵。因此,式(13)表示的天线阵列即为

$$\boldsymbol{\Phi}=\{\boldsymbol{\Phi}_1\quad\boldsymbol{\Phi}_2\quad d_1\} \tag{14}$$

如果取 $d_1=3,d_2=2$,阵列(14)可以写为 $\boldsymbol{\Phi}=\{3\quad 2\quad 3\quad 2\quad 3\}$,阵元的位置矢量为

$$\boldsymbol{X}=0.5\lambda[0\quad 3\quad 5\quad 8\quad 10\quad 13] \tag{15}$$

为了减少运算复杂度和工程实现难度,对于式(15)所示的非均匀阵列只需要采取补零[11-12]的方法就可以将其转化成均匀阵列以更好地满足TLS系统测角新算法的运用。这样就可以将 $N=6$ 阵元的非均匀阵列转化为如图3的 $N=14$ 阵元的虚拟均匀阵列。

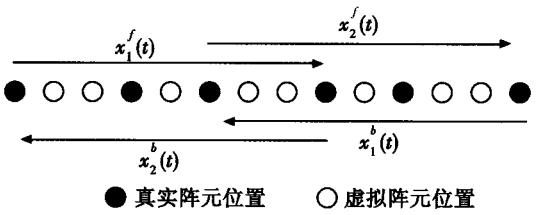

图3 TLS虚拟阵列平滑模型

Fig. 3 TLS virtual array smoothing model

此时,新阵列的导向矢量 $\boldsymbol{a}_{\mathrm{TLS}}(\theta_k)$ 为

$$\boldsymbol{a}_{\mathrm{TLS}}(\theta_k)=[1,0,0,\mathrm{e}^{-j3\beta_k},0,\mathrm{e}^{-j5\beta_k},0,0,\mathrm{e}^{-j8\beta_k},0,\mathrm{e}^{-j10\beta_k},0,0,\mathrm{e}^{-j13\beta_k}]^{\mathrm{T}} \tag{16}$$

式中,$\beta_k=\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta_k,k=1,2,\cdots,P$。

根据图3所示,将阵列分别用两个9阵元的子阵进行前/后向平滑处理,把新阵列的导向矢量 $\boldsymbol{a}_{\mathrm{TLS}}(\theta_k)$ 代入式(4)~式(6)中就可以计算出新阵列的修正协方差矩阵 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{TLS}}^{fb}$,再进行MUSIC谱估计即可得到飞机角度。

为了考察设计阵列的可行性,假设3架相距较近飞机分别在5°、10°、14°方向,信噪比 $R_{\mathrm{S,N}}=10$ dB,快拍数为256,分别利用上述TLS阵列与相同阵元数目的均匀阵列进行估计可得图4结果。

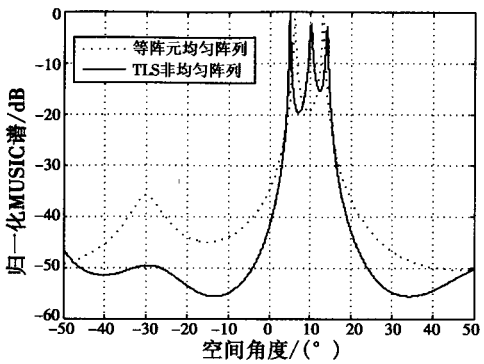

图4 不同阵列模型角度估计谱

Fig. 4 Angle spectral of different arrays

图4显示,当飞机相距较近时,TLS接收阵列能够清晰地分辨出飞机的角度,而采用相同阵元数目的均匀阵列则无法准确分辨出各飞机的角度,说明了TLS天线阵列设计的可行性。

为了考察TLS接收阵列对多目标估计的有效性,假设两目标的角度分别为10°、15°,快拍数为256,根据TLS的精度设置成功估计的门限,对每个信噪比做100次Monte Carlo实验可得到TLS阵列与相同阵元数目的均匀阵列成功估计的概率如图5所示。

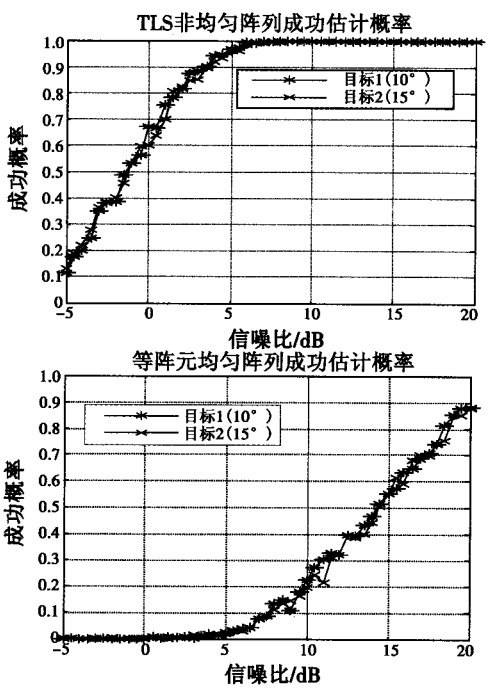

图5 不同阵列模型多目标估计的成功概率

Fig. 5 Success probability of different arrays for multi-target estimating

图5显示,在对多目标估计时,TLS阵列角度估计的有效性明显强于相同阵元数目的均匀阵列,且均匀

万方数据

飞机的角度没有关系，也进一步验证了 TLS 天线阵列设计的可行性。

3 TLS 天线阵列的性能

TLS 接收天线阵列的性能主要体现在天线阵列的分辨力、接收阵列角度测量的误差及其均方差等方面。

阵列分辨力主要为了考察接收阵列对两个相近信号的分辨能力，在实际 TLS 工作环境中，由于多径效应的影响以及多架飞机同时进场等情况的要求，TLS 接收阵列应当具有较高的分辨力。如果用 $\boldsymbol{P}(\theta)=\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)U_S U_S^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta)$ 来表示角度 θ_i 所对应的信号谱值，并作如下定义

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{peak}}=\frac{P(\theta_1)+P(\theta_2)}{2} \tag{17}$$

$$\theta_m=\frac{\theta_1+\theta_2}{2} \tag{18}$$

$$Q(\Delta)=P_{\mathrm{peak}}-P(\theta_m) \tag{19}$$

式中，$\Delta=\theta_1-\theta_2$，当 $Q(\Delta)>0$ 时，认为 $Q(\Delta)$ 是可分辨的，此时，Δ 就是接收阵列的分辨力。Δ 越小，阵列分辨力就越高。

根据阵列分辨力的定义，对于 TLS 阵列模型和同阵元数目的均匀阵列模型在每个信噪比下作 100 次 Monte Carlo 实验得到图 6 所示结果，可以清晰地看出 TLS 天线阵列的分辨力明显优于相同阵元数目的均匀阵列。理论上可以实现高精度角度测量和目标分辨。

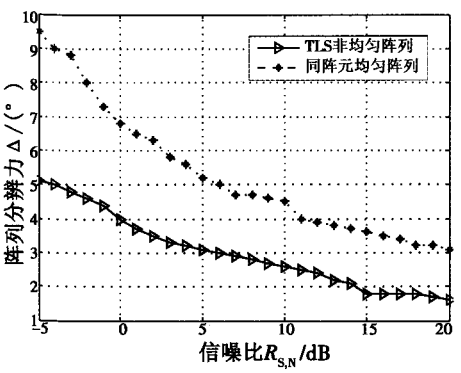

图 6　不同阵列模型的分辨力

Fig. 6　Array resolution of different models

接收阵列的误差及其均方差主要是用来考察阵列的角度测量精度及其稳定性。一般地，谱峰对应的飞机角度 $\hat{\theta}$ 并不是飞机的真实角度 θ，而是对飞机角度的最大似然估计。在一定阵列模型下，测角算法对飞机角度估计的精度可以用角度估计的误差及其均方差来衡量，如

$$\gamma_i=\hat{\theta}^i-\theta \tag{20}$$

$$R_{\mathrm{MSE}}(\theta)=\sqrt{\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}\gamma_i^2} \tag{21}$$

式中：γ_i 表示每次估计的误差；L 表示估计的次数；$\hat{\theta}^i$ 表示第 i 次估计角度。

为了验证 TLS 天线阵列角度估计精度，根据式(20)、式(21)对 TLS 阵列和相同数目的均匀阵列做如下仿真：两个目标的角度分别为 10°、15°，快拍数为 256，对每个信噪比做 100 次 Monte Carlo 实验，得到图 7、图 8 所示结果。

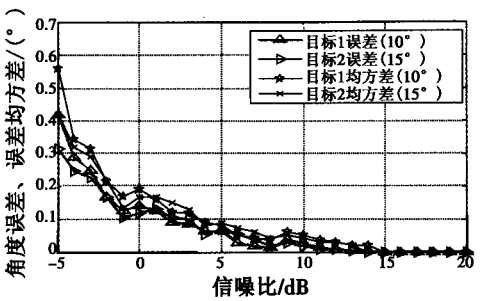

图 7　TLS 天线阵列多目标估计精度

Fig. 7　TLS arrays angle estimating accuracy for multi-target estimating

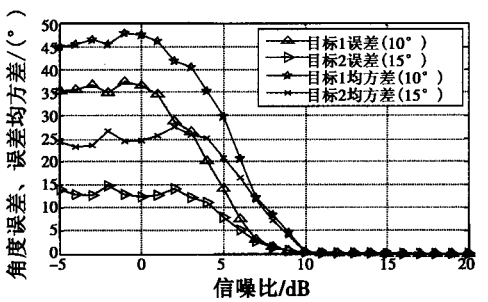

图 8　等阵元均匀阵列多目标估计精度

Fig. 8　ULA with same array element angle estimating accuracy for multi-target estimating

对比图 7、图 8 两种阵列对多目标估计的精度可以看出，上述设计的 TLS 接收天线阵列具有更加良好的精度和估计效果，估计精度与目标的角度没有多大的关系，且在较低信噪比的条件下也能比较准确地进行飞机角度估计，能够作为系统实现的良好理论。

4 结束语

文章采用基于 MUSIC 算法的空间平滑技术代替了应答着陆系统传统的相位干涉式测角法。简要介绍了新算法的原理，重点对新算法下的 TLS 接收天线阵列进行了方案设计，并通过计算机仿真从阵列角度估计的可行性、有效性、分辨力以及精度等方面与同等条件下的均匀阵列进行了对比分析，有力地证明了设计的 TLS 天线阵列模型的可用性和可靠性，为系统的设计与实现奠定了理论基础。

参考文献

（下转第 94 页）

万方数据

2）设计叠层时，在满足阻抗要求的条件下，尽量减小信号层与地平面层之间电介质层的厚度，以减小串扰噪声的幅度。

3）在布线规则允许的情况下，尽量加大线间距，减小耦合传输线的平行长度，必要时以 jog 方式走线。如图9所示，采用最大平行长度推挤的布线方式，在布线时可以间断地将间距拉开，既能节省 PCB 上紧张的布线空间又能有效地抑制串扰噪声。

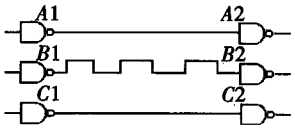

图9 jog 方式走线示意图

Fig. 9 Sketch of jog wiring

4）在确保不影响信号时序的情况下，尽量选择上升/下降沿速率较慢的器件。

5）高速信号线在满足条件的情况下，加入端接匹配可以减小或消除串扰。

4 结束语

串扰是影响信号完整性的主要噪声之一，影响系统的时序，造成信号的延迟、过冲和下冲等问题，严重影响系统的可靠性。针对高速数字电路系统 PCB 中严重的串扰问题，本文在相关文献的基础上，改进了三线串扰耦合模型，采用 hyperlynx 软件进行仿真，重点研究了差模和共模传输模式及不同传输线类型对串扰的影响，总结出了抑制串扰的相应板级措施。对高速数字电路 PCB 布线和布局设计及抗干扰研究提供了有效的指导。

参考文献

[1] 陈伟，黄秋元，周鹏. 高速电路信号完整性分析与设计[M]. 北京：电子工业出版社，2009.

[2] 闫美云. 高速数字系统设计中的串扰分析[J]. 电子质量，2007(5)：72-74.

[3] 王强，沙斐. 平行双线串扰的分析[J]. 电子测量与仪器学报，2008，22(6)：75-77.

[4] AGARWAL K，SYLVESTER D. Modeling and analysis of crosstalk noise in coupled RLC interconnect [J]. IEEE, Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems，2006，25(5)：892-901.

[5] 张海凤. HyperLynx 仿真与 PCB 设计[M]. 北京：机械工业出版社，2005.

[6] 梁晓琳. 基于 HyperLynx 的 PCB 电路信号串扰分析与仿真[J]. 河池学院学报，2007，27(2)：34-37，92.

[7] 曾爱凤，王海鹏. 板级互连线的串扰规律研究与仿真[J]. 电子测量技术，2010，33(8)：9-12.

[8] 吕飞燕，沙斐. PCB 上串扰的耦合机理和优化分析模型[J]. 电子与信息学报，2005，27(7)：1167-1170.

[9] 黄进，郭立红，李岩，等. LVDS 接口终端匹配技术研究[J]. 电光与控制，2005，12(1)：69-72.

[10] 陈思思. 信号完整性中的串扰分析[J]. 武汉理工大学学报，2005，27(5)：17-20.

（上接第85页）

[1] 于向东. 适于地形复杂机场的应答着陆系统[J]. 国际航空，2004，24(9)：52-53.

[2] WINNER K. Application of the transponder landing system to achieve airport accessibility [EB/OL]. http://www. ANPC. com.

[3] SCMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimatuion[J]. IEEE Trans. On AP-34 MAR，1986，34(3)：276-280.

[4] 张平芳，程韧. 一种空间谱估计测向系统的研究与实现[J]. 微计算机信息，2008，24(7)：200-202.

[5] 房秉毅，魏国华，吴嗣亮. 采用频率步进信号的多目标三维空间定位算法[J]. 电光与控制，2008，15(7)：20-25.

[6] CHAMBERS C，TOZER T C，SHARMAN K C，et al. Temporal and spatial sampling influence on estimates of superimposed narrowband signals：when less can mean more [J]. IEEE Trans. on Signal Processing，1996，44(12)：3085-3098.

[7] 张贤达. 现代信号处理[M]. 2版. 北京：清华大学出版社，2002.

[8] TAN K C，GOH S S，TAN E C. A study of the rank-ambiguity issues in direction of arrival estimation [J]. IEEE Trans. Signal Process，1996，44(4)：880-887.

[9] 龚享铱，袁俊泉，苏令华. 基于相位干涉仪阵列多组解模糊的波达角估计算法研究[J]. 电子与信息学报，2006，28(1)：55-59.

[10] 王永良. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京：清华大学出版社，2004.

[11] 刘德树，罗景青，张剑云. 空间谱估计及其应用[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，1997.

[12] 郭强，顾杰，赵国庆. 一种新的非均匀线阵插值测向算法的研究[J]. 中国电子科学研究院学报，2006，1(4)：324-327.

万方数据

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、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)，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