

文章编号:1672-058X(2012)07-0057-05

# TD-SCDMA 系统中阵列天线的校正算法 \*

王 丽

(淮南师范学院 电气信息工程系,安徽 淮南 232038)

**摘要:**针对 TD-SCDMA 系统中阵列天线通道幅度和相位不一致会影响天线系统的性能这一现象,提出了一种在加入参考信号下,结合 J. C. liberti 算法对阵列天线通道不一致性的校正. 算法通过计算参考信号的波达方向角估计值来校正阵列天线中各参数的不一致性,并通过波束形成算法,得到通道校正后的和差波束. 仿真结果表明,算法一方面提高了波达方向估计值的准确性,另一方面改善了单脉冲和差波束的瞄准精度.

**关键词:**TD-SCDMA; 阵列天线; 通道不一致性; 波达方向; 和差波束

**中图分类号:**TN911.22

**文献标志码:**A

随着 TD-SCDMA 通信系统的发展,其技术日趋成熟,应用更加广泛,阵列天线在 TD-SCDMA 系统中也更加重要,阵列天线信号的性能影响着整个通信系统<sup>[1]</sup>. 常见的 DOA 算法及波束形成算法在实际测向系统中很难实现,由于阵列天线各通道的阵元增益、相位及幅度等参数影响着雷达系统的跟踪精度,因此,需要通过研究尽可能校正阵列天线的不一致性. 目前已有很多研究者提出了各种校正算法<sup>[2,3]</sup>,但都有一定的缺陷需要改进. 此处提出的校正算法通过改善阵列天线通道的不一致性,提高了波达方向估计值的准确性和单脉冲和差波束的瞄准精度.

## 1 阵列天线信号模型

考虑一个  $M$  阵元的直线阵天线,假设各阵元的接收性能不存在方向性差异. 若有  $L$  个 ( $L < M$ ) 个窄带信号源平面波辐射到线阵上,信源方向分别为  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_L$ , 在第  $k$  次快拍阵列的输出信号向量可表示为<sup>[4]</sup>:

$$X(k) = \mu AS(k) + Q(k), k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式(1)中  $X(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T$  为  $M$  个阵元的输出信号向量,  $\mu = \text{diag}(1, \gamma_2, \dots, \gamma_L)$  为通道不一致性矩阵, 其  $\gamma_i$  是相对第一通道归一化后获得的第  $i$  个通道传输系数,  $A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_L)]$ ,  $a(\theta_i) = [1, e^{-j(2\pi d/\lambda)\sin(\theta_i)}, \dots, e^{-j(M-1)(2\pi d/\lambda)\sin(\theta_i)}]^T$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$ ,  $\lambda$  是载波的波长,  $d$  是阵元之间的距离.  $S(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_L(k)]^T$  是  $L$  个平面波的复振幅矩阵.  $Q(k) = [q_1(k), q_2(k), \dots, q_M(k)]^T$  是均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  白噪声矩阵, 且与信号源不相关,  $N$  为快拍次数. 信号源的协方差为:

$$R = E[S(k)S^H(k)] \quad (2)$$

收稿日期:2011-12-06;修回日期:2012-02-21.

\* 基金项目:安徽高校省级自然科学研究项目(KJ2011Z347);淮南师范学院科研基金资助项目(2010QNL09).

作者简介:王丽(1983-),女,陕西人,助教,从事无线通信系统研究.

阵列天线输出信号的协方差为:

$$R_{XX} = E[X(k)X^H(k)] = \mu A R A^H \mu^H + \sigma^2 I_M \quad (3)$$

当通道不一致性矩阵  $\mu$  不存在时,对式(3)进行特征分解后,即:

$$R_{XX} = V_S \Sigma_S V_S^H + V_N \Sigma_N V_N^H \quad (4)$$

式中的  $V_S$  是信号子空间,  $V_N$  是噪声子空间,  $\Sigma_S$  是信号特征值对角阵,  $\Sigma_N$  是噪声特征值对角阵. 其中  $V_S$  与  $V_N$  正交,即:

$$a^H(\theta) V_N = 0 \quad (5)$$

MUSIC 算法的空间谱函数为:

$$P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) V_N V_N^H a(\theta)} \quad (6)$$

当通道不一致矩阵  $\mu$  存在时,  $V_S$  与  $V_N$  不能完全正交,即其空间谱函数需修改为:

$$P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) \mu^H V_N V_N^H \mu a(\theta)} \quad (7)$$

## 2 阵列天线通道不一致性的校正算法

算法的步骤:

(1) 考虑到实际接收已知来波方向角的基准信号源,来计算实际初始 DOA 估计值. 计算基准信号的协方差矩阵最大似然估计为:

$$\hat{R}_{XX} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X(i) X(i)^H \quad (8)$$

对  $\hat{R}_{XX}$  进行特征值分解,得到实际 DOA 估计值,它是以最小优化搜索实现的,即为:

$$\theta_{\text{MUSIC}} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} a^H(\theta) \mu^H \hat{V}_N^H \hat{V}_N \mu a(\theta) \quad (9)$$

根据波束形成算法<sup>[5,6]</sup>,阵元  $M$  归一化接收信号为:

$$x_M(t) = \exp\left[-j \frac{(n-1)2\pi d \sin\theta}{\lambda}\right] \quad (10)$$

阵元  $M$  加权因子为:

$$w_M = \omega_M \exp(j\alpha_M)$$

产生和波束:

$$B(\theta, \alpha_n) = \sum_{n=1}^M \omega_n \exp\left\{j[\alpha_n + (j \frac{(n-1)2\pi d \sin\theta}{\lambda})]\right\} \quad (11)$$

为使其方向对准  $\Theta$ ,  $\Theta = [0, 2\pi]$  是波大方向 (DOA)  $\theta$  所有可能取值的集合,应使  $\alpha_n = -\frac{(n-1)2\pi d \sin\theta}{\lambda}$ .

产生两个方位差波束:

$$B(\theta, \alpha_L) = \sum_{n=1}^M \omega_n \exp\left\{j[\alpha_n + (j \frac{(n-1)2\pi d \sin\theta}{\lambda})]\right\} \quad (12)$$

为使其方向对准  $(\Theta - \Delta\Theta)$ ,应使  $\alpha_{ln} = -\frac{(n-1)2\pi d \sin(\Theta - \Delta\Theta)}{\lambda}$ . 将式(8)和(9)带入式(11)和(12)即

得到通道校正前的单脉冲和差波束.

(2) 利用 J. C. liberti 算法计算不一致性矩阵  $\mu$  的估计值<sup>[7]</sup>.

利用第一步得到的 DOA 估计值, 以及 J. C. liberti 算法的解优化问题计算  $\Gamma$  的估计值  $\hat{\Gamma}$ :

$$\min_{\xi} \sum_{l=1}^M a(\theta_l)^H \hat{\mu}^H V_N V_N^H \hat{\mu} a(\theta_l) = \xi^H \left[ \sum_{l=1}^M Q^H(l) V_N V_N^H Q(l) \right] \xi \quad (13)$$

由于注入的参考信号是归一化信号源, 因此约束条件为:  $\xi^H P = 1, P = [1, 0, 0, \dots, 0]^T$ . 最优解为:

$$\xi_{\text{opt}} = \left[ \sum_{l=1}^M Q^H(l) V_N V_N^H Q(l) \right]^{-1} P \{ P^T \left[ \sum_{l=1}^M Q^H(l) V_N V_N^H Q(l) \right]^{-1} P \}^{-1} \quad (14)$$

因此

$$\hat{\mu} = \text{diag}(\xi_{\text{opt}}) \quad (15)$$

$(\hat{\mu})^{-1}$  就是不一致性矩阵  $\mu$  的估计值.

(3) 利用得到的校正矩阵  $(\hat{\mu})^{-1}$  对接收到的信号的协方差矩阵进行校正, 即得到:

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (\hat{\mu})^{-1} X(i) ((\hat{\mu})^{-1})^H X(i)^H \quad (16)$$

将校正后的  $\hat{R}_{xx}$  代入式(11)和(12)得到通道校正后的和差波束.

### 3 仿真结果与分析

仿真参数设置: 采用  $M = 8$  阵元的平行直线阵列天线系统, 阵元间距  $d = 0.5$ , 其中  $\text{gain} = [1, 5, 0.5, 2.86, 1.96, 1.21, 2.82, 1.12]$ ,  $\text{phase} = \text{jexp}([0, 43, 17, -13, 70, 15, -50, -23])$ . 并设有 2 个来波信号, 方向分别为  $0^\circ$  和  $60^\circ$ ; 噪声为高斯白噪声, 信噪比为 10 dB.

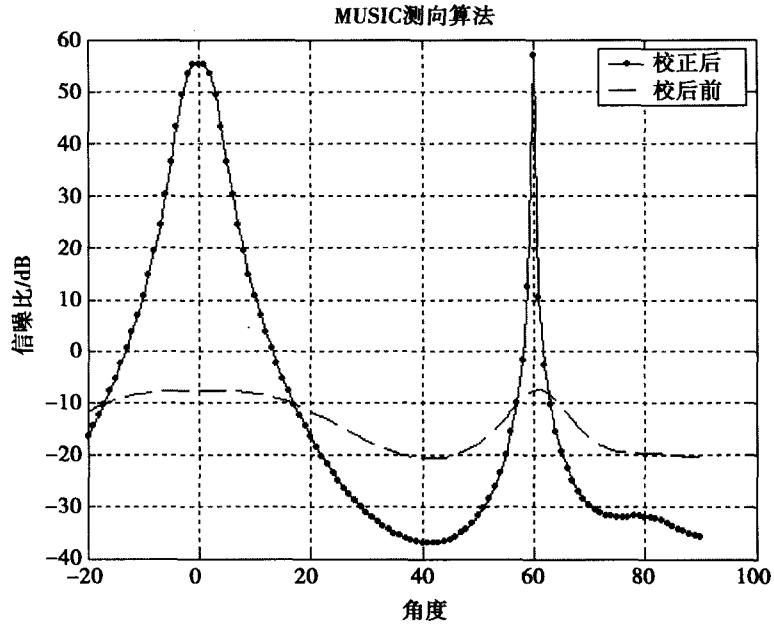


图 1  $M = 8, d = 0.5$  方向来自  $0^\circ$  和  $60^\circ$  的线形阵列方向图

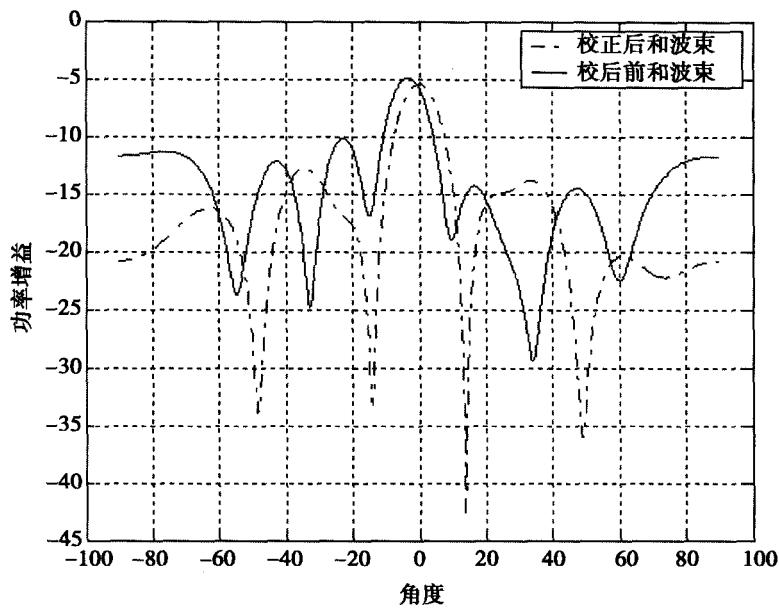


图 2 校正前和校正后的和波束空间谱

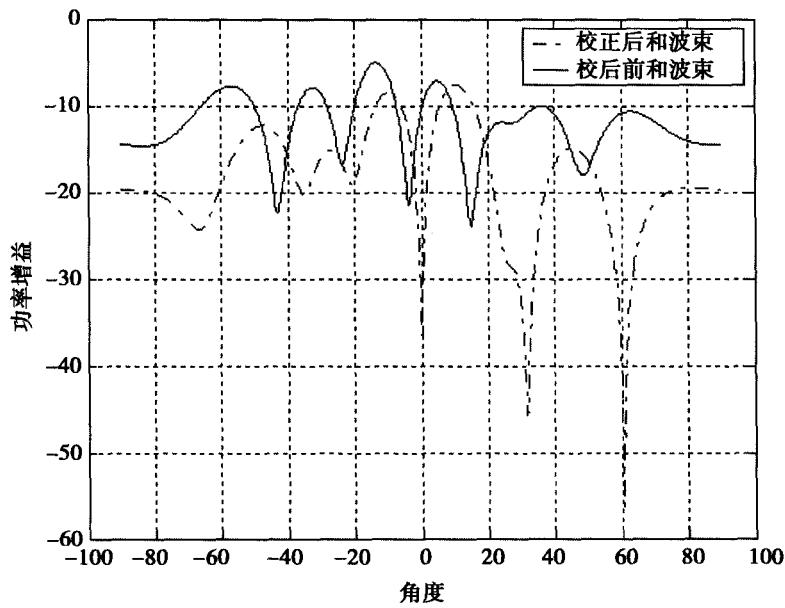


图 3 校正前和校正后的差波束空间谱

图 1 显示了  $M=8, d=0.5$  方向来自为  $0^\circ$  和  $60^\circ$  的校正前和校正后的线形阵列方向图。从图 1 可以看出，校正前 MUSIC 测向算法估计出的来波信号方向分别为  $-0.5^\circ$  和  $62.3^\circ$ ，校正后估计出的来波信号方向比较接近准确值，其来波方向分别为  $0.3^\circ$  和  $59.8^\circ$ 。

图 2 和图 3 从波束空间算法分别给出了和波束和差波束的空间谱图。假设跟踪目标方向指向  $0^\circ$ ，图 2 和图 3 显示了校正前由于通道不一致性的存在，且空间有  $60^\circ$  的旁瓣干扰，单脉冲和波束的最大增益方向和差波束的零点方向都已经偏离目标方向  $0^\circ$ ，其中和波束的最大增益方向指向  $-3.8^\circ$ ，差波束的零点方向指向  $-3.2^\circ$ 。经过校正后，和差波束均已瞄准目标方向  $0^\circ$ ，提高了跟踪精度。

## 4 总结

TD-SCDMA系统中阵列天线的校正算法是基于J. C. liberti自适应校正算法提出的优化问题中加入参考信号源这个约束条件而得出的,从仿真结果来看,校正算法不仅能够校正阵列天线的不一致性参数,还能提高波达方向估计值的准确性,而且还能够大大改善单脉冲跟踪目标的跟踪精度.这对3G通信系统的自适应阵列天线的应用有一定的参考价值.

### 参考文献:

- [1] 徐彦琴,张志涌. CDMA系统在自适应阵列天线的改进算法[J]. 南京邮电学院学报,2001,21(1):46-48
- [2] 周围,周正中,张德民. 相干多径环境下自适应阵列的性能改进[J]. 电波科学学报,2007(3):420-423
- [3] 王布宏,王永良,陈辉. 多径条件下基于加权空间平滑的阵元幅相误差校正[J]. 通信学报,2004(5):166-174
- [4] 高星辉,张承云,常鸿森. 改进MUSIC算法对信号DOA的估计[J]. 系统仿真学报,2005,17():223-224
- [5] 杨力生,杨士中. 单脉冲多目标跟踪方法与系统:中国,2006101426647[P]. 2007-07-13
- [6] 雷剑梅,陈世勇. 单元波束夹角对和差单脉冲测角性能的影响研究[J]. 电子测量与仪器学报,2007,21(5):29-30
- [7] LIBERTI J C, RAPPAPORT T S. Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications [M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999

## Calibration Algorithm for Array Antenna in TD-SCDMA System

WANG Li

(Electrical and Information Engineering Department, Huainan Normal University, Anhui Huainan 232038, China)

**Abstract:** Because inconsistent channel amplitude and phase of array antenna of TD-SCDMA affects the antenna system performance, array antenna channel inconsistency calibration algorithms based on the combination of the different reference signals and J. C. liberti algorithm were proposed. The parameters uncertainty of array antenna was corrected by computing estimate value of direction- of- arrival estimated- angle of the reference signals, and the sum and difference beam of channel correction was achieved by beamforming algorithm. The simulation results show that the algorithm can greatly improve the DOA estimation accuracy on the one hand, and the sum and difference beam pointing accuracy of single pulse is improved on the other hand.

**Key words:** TD-SCDMA; array antenna; channel inconsistency; direction- of- arrival; sum and difference beam

责任编辑:李翠薇

## 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>