

文章编号: 1000-8829(2003)10-0017-02

天线阵通道不一致的有源校正

Channel Disaccord Calibration Technique for Antenna Array

(北京航空航天大学 204 教研室 北京 100083) 崔晓莲, 关德新

摘要 对天线阵通道不一致进行校正是利用天线阵处理信号要解决的问题之一。本研究提出通过辅助信号源对通道增益和相位不一致性进行有源校正的方法, 该方法适用于均匀圆阵列估计空间信号源的频率、方位角及仰角, 计算机仿真证明该方法的有效性。

关键词 阵列信号处理, 通道不一致, 校正

中图分类号 TN971

文献标识码 B

Abstract: It is important of resolving the performance of antenna array. A technique to estimate and calibrate the performance is developed in this page. It is available for uniform circle array. Computer simulation illustrate that this method is effective.

Key words: array signal processing; channel disaccord; calibration

利用天线阵来确定空间信号源的频率、方位角及仰角是现代电子侦察系统研究的方向。与单个天线相比, 天线阵可以提高测量的精度。但是天线阵是对各个通道接收的信号进行实时处理, 各个通道增益和相位的不一致性将会导致性能指标的下降。因此对通道不一致进行校正是利用天线阵处理信号要解决的问题之一。许多学者对此问题提出了性能各异的解决方案。A. Paulraj 和 T. Kallathp^[1]局限于均匀线阵, 对天线的协方差矩阵进行分析, 估计出天线各个通道增益和相位进而准确估出信号源方向; J. Pierre 和 M. Kaveh^[2]利用一个已知信号源估出各个通道增益和相位, 对通道进行校正再估计信号源的方向; 陈建峰和黄建国^[3]采用综合校正补偿法对各阵元的输出数据进行能量归一化抵消了各阵元的增益误差。笔者研究以上方法发现参考文献[1, 3]只适用于线性阵, 并且仅

针对测向系统进行了修正, 而没有考虑到测频测向系统, 文献[2]仅对通道的增益不一致进行校正而没有对相位的不一致进行处理。

下面考虑利用均匀圆阵估计空间信号源的频率、方位角及仰角时对通道不一致进行校正的方法。

1 测频测向的实现

考虑一个有 M 阵元的均匀圆阵列, 阵列接收带宽内有 P 个信号源, 阵元输出信号及其延时 τ 后的采样序列为

$$x_m(n) = \sum_{i=1}^P g_m \exp(j\varphi_i) s_i(n) \exp[-j2\pi f_i \tau_m(\theta_i, \phi_i)] + n_m(n)$$

$$y_m(n) = \sum_{i=1}^P g_m \exp(j\varphi_i) s_i(n) \exp[-j2\pi f_i \tau] \exp[-j2\pi f_i \tau_m(\theta_i, \phi_i)] + n_m(n)$$

$x_m(n)$ 为第 m 个阵元输出的第 n 点采样, $y_m(n)$ 为第 m 个阵元输出延时 τ 后的第 n 点采样, g_m, φ_i 分别为第 m 个阵元通道的增益和相位因子, $s_i(n)$ 为第 i 个信号的采样值, $\tau_m(\theta_i, \phi_i)$ 为第 i 个信号到达第 m 个阵元时相对坐标原点的延迟时间, $n_m(n)$ 为第 m 个阵元输出的噪声分量。

将 $x_m(n), y_m(n)$ 做 N 点 FFT 变换(N 为 2 的整数幂), 处于某一峰值 K_0 周围的 L 个频率点构成 L 维列向量

$$x_m = \sum g_m \exp(j\varphi_i) A_i e^{j\gamma_{im}} d(f_i),$$

$$y_m = \sum g_m \exp(j\varphi_i) A_i e^{j\gamma_{im}} e^{-j2\pi f_i \tau} d(f_i)$$

式中

$$d(f_i) = [g(f_i - \frac{K_0 - R}{N}), \dots, g(f_i - \frac{K_0}{N}), \dots, g(f_i - \frac{K_0 + R}{N})]^T,$$

设 $\delta_{il} = A_i g\left[f_i - \frac{K_0 - (R+1-l)}{N}\right]$, 得到 DFT 波束空间

的数据矩阵 $X = \Gamma \cdot AS, Y = \Gamma \cdot \Phi \cdot AS$

$$\Gamma = \text{diag}(\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_M)$$

$$\Gamma_i = g_i \exp(j\varphi_i)$$

$$A = [a(f_1, \theta_1, \phi_1), a(f_2, \theta_2, \phi_2), \dots, a(f_p, \theta_p, \phi_p)]$$

$$a(f_i, \theta_i, \phi_i) = [a_i(f_i, \theta_i, \phi_i), a_i(f_i, \theta_i, \phi_i), \dots, a_M(f_i, \theta_i, \phi_i)]^T$$

收稿日期 2003-06-18

作者简介 崔晓莲(1976—), 女, 硕士研究生, 主要从事阵列信号处理等科研工作。

$$a_m(f_i, \theta_i, \phi_i) = \exp[-j2\pi f_i \tau_m(\theta_i, \phi_i)]$$

$$\tau_m(\theta_i, \phi_i) = -r \cos\left[\theta_i - \frac{(m-1) \times 2\pi}{M}\right] \sin\phi_i/c$$

$m = 1, 2, \dots, M$ $i = 1, 2, \dots, P$ c 为光速。

$\mathbf{R}_{XX} = E[XX^H] = \Gamma \cdot ASS^H A^H \Gamma^H = \sum_{i=1}^P \eta_i v_i v_i^H$, 其中 η_i ($i = 1, 2, \dots, P$) 为 \mathbf{R}_{XX} 的 P 个较大的特征值 v_i 为其对应的特征向量 $\mathbf{R}_{XX}^{\#} = \sum_{i=1}^P \eta_i^{-1} v_i v_i^H$

$$\mathbf{R}_{YX} = E[YX^H] = \Gamma \cdot A \Phi \cdot SS^H A^H \Gamma^H,$$

$$\text{构造矩阵 } E = \mathbf{R}_{YX} \mathbf{R}_{XX}^{\#}$$

利用 E 的 P 个较大特征值计算 $\frac{\arg(\lambda_i)}{2\pi\tau}$ 就可以得出信号源基频段模拟频率, 利用较大特征值对应的特征向量 E_i 即可得出信号源的方位角及仰角。

如果 Γ 是已知的, 利用上述的方法就可以估计出信号源的频率、方位角及仰角, 但是由于 Γ 是未知的, 因此无论理论还是工程实际正确估计信号源的频率、方位角及仰角就成了问题。

下面给出一种估计 Γ 的方法。

2 用一个已知方向的信号源估计 Γ

设一已知辅助信号源的参数为 (f_s, θ_s, ϕ_s) , 辅助源开关和功率大小可以人为控制, 则天线阵只接收辅助信号源时可以得到协方差矩阵

$$\mathbf{R}_{XX} = E[XX^H] = \Gamma \cdot AS_s S_s^H A^H \Gamma^H = \sum_{i=1}^P \eta_i v_i v_i^H \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_{YX} = E[YX^H] = \Gamma \cdot A \Phi \cdot S_s S_s^H A^H \Gamma^H \quad (2)$$

由式(1)得

$$\begin{aligned} S_s S_s^H A^H &= (A^H A)^{-1} A^H T^{-1} \mathbf{R}_{XX} (T^H)^{-1} \text{ 于是} \\ \mathbf{R}_{YX} \mathbf{R}_{XX}^{\#} \Gamma \cdot A &= \Gamma \cdot A \Phi \cdot (A^H A)^{-1} A^H T^{-1} \mathbf{R}_{XX} \mathbf{R}_{XX}^{\#} \Gamma \cdot A \\ &= \Gamma \cdot A \Phi \cdot (A^H A)^{-1} A^H T^{-1} \left(\sum_{i=1}^q v_i v_i^H + \sum_{i=q+1}^M v_i v_i^H \right) \Gamma \cdot A \\ &= \Gamma \cdot A \Phi E \\ &= \Gamma \cdot A \Phi \cdot (\Gamma \cdot A)^{-1} \end{aligned}$$

由上文的分析得知此时天线阵列仅接收辅助信号源, 因此 E 仅有一个较大特征值 λ_1 , 对应的特征向量是 E_1 , 于是由 $EE_1 = \lambda_1 E_1$ 得 $\Gamma \cdot A \Phi \cdot (\Gamma \cdot A)^{-1} E_1 = \lambda_1 E_1$, 可知 $\Gamma \cdot A$ 是 E_1 的线性组合, 即 $\Gamma \cdot A = k E_1$, 令

$$E_1 = [e_{11} \ e_{21} \ \dots \ e_{M1}]^T,$$

$$A = [A_1(f_s, \theta_s, \phi_s) \ A_2(f_s, \theta_s, \phi_s) \ \dots \ A_M(f_s, \theta_s, \phi_s)]$$

设第一个阵元是参考阵元, $\Gamma_1 = 1$, 于是 $\Gamma_i = \frac{e_{i1}}{e_{11}}$

$\times \frac{A_1(f_s, \theta_s, \phi_s)}{A_i(f_s, \theta_s, \phi_s)}$ 至此可以估计出 Γ 。

3 计算机仿真

在 8 阵元的均匀圆阵上进行计算机仿真, 设天线

通道增益为 $(1, 1.41, 1.23, 0.89, 0.68, 1.360, 0.71, 3.6)$, 各个通道相位偏差为 $(0^\circ, -8^\circ, 3^\circ, 2^\circ, -5^\circ, 4^\circ, -3^\circ, 8^\circ)$, 选取辅助信号源为 $(2.56 \text{ GHz}, 180^\circ, 45^\circ)$; 待估计的空间信号源为 $(2/7.36 \text{ GHz}, 60^\circ, 45^\circ) \times (2/7.96 \text{ GHz}, 200^\circ, 30^\circ), (2/7.36 \text{ GHz}, 30^\circ, 70^\circ), (2/7.87 \text{ GHz}, 270^\circ, 20^\circ)$; 信噪比为 10 dB ; 每组为 100 次

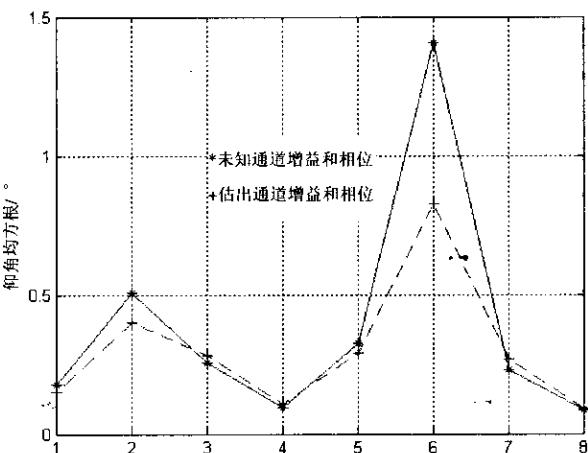
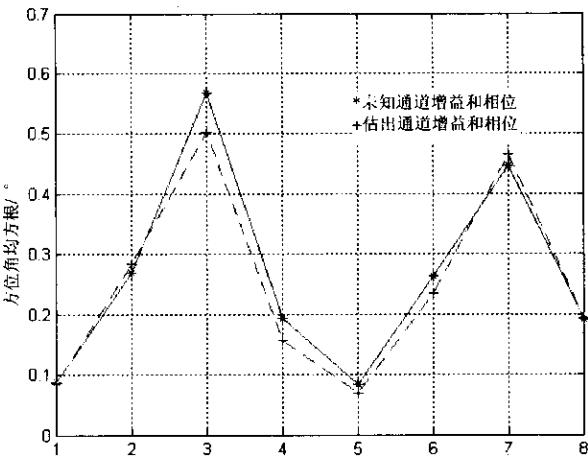
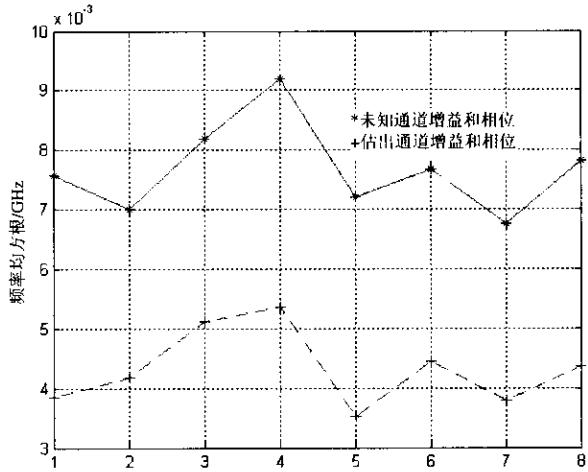


图 1 未知与估出通道增益相位的均方根比较

(下转第 26 页)

机下载。因此可以通过上位PC机方便地修改参数,有利于动态管理各CAN总线节点。

(4) SJ1000是Philips公司生产的CAN微控制器,它符合CAN2.0B协议,完全兼容PCA82C200;支持29位标识符模式,有64B的接收缓冲区、能通过验收屏蔽

码寄存器和验收码寄存器对标准帧或扩展帧进行单向/双向接收滤波;对CAN总线上的每一个错误可进行错误中断;可通过检测具体位来仲裁丢失中断等特性。通过与SJ1000的RX、TX连接的电路的主要芯片为PCA82C250,它是CAN控制器与物理总线之间的接口,可以提供对总线的差动发送能力和对CAN控制器的差动接收能力,具有很强的抗干扰能力。

2.2 CAN节点卡的设计

基于CAN总线的分布式智能测控节点的原理结构如图3所示。电路主要由单片机、RAM、EPROM等组成的主机部分;由SJ1000、82C250、光电隔离电路等组成的CAN总线控制及接口部分;由A/D转换器、放大电路、8选一多路开关、I/V变换电路等组成的8通道模拟量输入电路;由D/A转换器、单极性电压输出电路、AD694等实现的2通道模拟量输出电路;由光电隔离和74HC245组成4通道开关量输入和4通道开关量输出电路;节点地址设置电路。各节点以主机部分为核心,根据各自功能的不同分别采用图中的不同电路部分完成各种数据采集与控制功能。为了把各

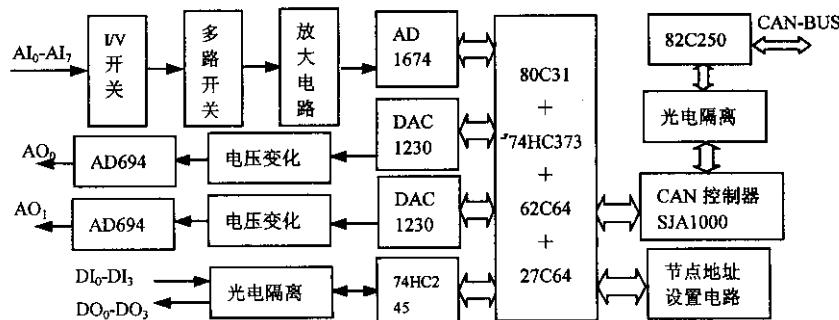


图3 CAN总线智能测控节点的原理结构图

个节点的不同种类、不同格式的信息能够在基于CAN协议的标准下进行通信,每个节点都设有CAN总线控制及接口部分的电路。

3 基于现场总线的船舶集成监控系统设计

基于局域网的船舶航海与轮机集成监控系统主要由上下两层网络组成。其中下层为设备和仪器数据采集和控制网,上层为微机综合显示、控制和管理网,包括数字视频实时监视与摄像头变焦和云台转动控制,通过海事卫星M、B、C、F站与直升机、岸上机关之间的数字通信、数字电话和传真。整个系统设计如图4所示。

整个集成监控系统采用CAN、RS-485、RS-232和TCP/IP等总线实现现场数据采集与控制,以千兆光纤网为骨干,使用硬软件分别使服务器、交换机、工控机和监控机实现双热备冗余以增强可靠性,使用Microsoft SQL Server 2000数据库实现重要的历史数据存储、查询和备份;通过卫星使用Web服务和Email服务实现船岸之间的信息交流。

(上接第18页)

MontoCarlo试验组成;图1是未知通道增益和相位与估出通道增益和相位后的信号源频率及DAO估值的均方根比较。可以看出估计出通道增益和相位后对信号源频率、方位角及仰角进行估计时,估值的精度都有不同程度改善,尤其对频率估值的精度影响显著。

4 结束语

如何校正天线阵通道增益和相位的不一致性,对于阵列天线的工程实际有非常重要的作用。本研究提出了通过辅助信号源估计通道特性矩阵 Γ 的参数的方法,该方法的特点是在不增加设备成本的前提下对天线通道不一致性进行有效校正,进而准确估计出空间信号的频率、方位角和仰角等参数。计算机仿真证明了该方法的实用性。

参考文献:

- [1] Paularj A and Kailath T. Direction of arrival estimation by eigenstructure method with unknown sensor gain and phase [A]. Proc IEEE ICASSP[C]. 1985: 640-643.
- [2] Pierre J and Kaveh M. Experimental performance of calibration and direction-finding algorithms [A]. Proc IEEE ICASSP[C]. 1991.
- [3] 陈建峰,黄建国.阵列误差校正的综合校正补偿法[J].声学学报,1998,23(6).
- [4] 陈志群,权太范,赵淑清.一般阵列误差情况下空时谱分析的研究[J].电子学报,2001,29(1).
- [5] 唐斌.空间信号多维参数估计方法研究[D].成都:成都电子科技大学,1996-05:50-74.
- [6] 万明坚.高分辨率测向系统研究[D].成都:成都电子科技大学,1991:51-57.
- [7] 王曙,周希朗.阵列信号波达方向——频率的同时估计方法[J].上海交通大学学报,1999,33(1).
- [8] 斯德谊,刘荣科.时空欠采样宽频段信号频率和二维角估计方法[J].电子学报,2000,28(3).

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),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>