

中图分类号:TN971.1;TN821

文献标志码:A

文章编号:1674-2230(2013)04-0066-03

天线极化产生的干涉仪测角误差分析及解决方法

谢成城¹,周世群²

(1.信息综合控制国家重点实验室,成都 610036;2.解放军驻成都地区军事代表室,成都 610036)

摘要:分析了干涉仪的天线阵元极化差异导致测角误差的原理,指出该项误差是干涉仪在工程应用中最大的误差来源,提出使用基于数字处理的合成阵元代替常规阵元消除该误差的方法。合成阵元的权值表用离线方式生成,干涉仪工作时以测得的信号频率为依据在权值表中查找对应的权值实时进行阵元合成,消除阵元间的极化差异和测角误差。

关键词:干涉仪;天线极化;测角误差;数字处理

DOI:10.3969/j.issn.1674-2230.2013.04.016

DOA Measurement Error Analysis from Antenna Polarization and Solution on the Interferometer

XIE Cheng-cheng¹, ZHOU Shi-qun²

(1. Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China;

2. PLA Representative Bureau of Chengdu, Chengdu 610036, China)

Abstract: DOA measurement error from antenna polarization on interferometer is analyzed, which is a main error source in application. A solution based on digital processing synthetic array element is proposed for eliminating the error. Weights table of synthetic array elements indexed by frequency is made offline and is used online when interferometer is on operation to clear polarization difference and DOA measurement errors among array elements.

Key words: interferometer; antenna polarization; DOA measurement error; digital processing

1 引言

干涉仪是宽带反辐射导引头中常用的测向体制,其测角精度直接影响着反辐射武器的攻击精度^[1]。本文分析了影响干涉仪测角精度因素,指出在实际系统中,阵元极化特性不一致和入射波极化变化共同导致的测角误差是影响干涉仪测角精度的主要因素,并提出了一种解决该问题的方法。

2 干涉仪测角误差

干涉仪原理如图1所示。当入射角为 θ 时,A、B两阵元间由于波程差引入的相位差为 φ ,干

涉仪各参数关系为:

$$\varphi = \frac{2\pi D f \sin \theta}{c} \quad (1)$$

其中, φ 为AB两阵元间波程差引入的相位差; θ 为入射角; D 为基线长度; f 为信号频率; c 为光速。

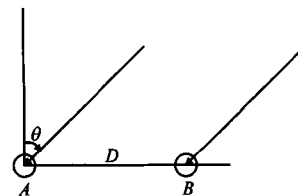


图1 干涉仪原理图

收稿日期:2013-04-28;修回日期:2013-05-15

作者简介:谢成城(1973—),男,高级工程师;周世群(1965—),男,高级工程师,长期从事电子对抗装备的质量监督工作。

对(1)式取微分并整理可得干涉仪测角误差公式:

$$d\theta = \frac{cd\varphi}{2\pi fD\cos\theta} - \frac{df}{f}\tan\theta \quad (2)$$

当 θ 、 f 和 D 给定时,测角误差与相位测量误差 $d\varphi$ 和频率测量误差 df 有关。

一般反辐射导引头要求适应的最低频率为800MHz,接收机测频误差不大于5MHz,且影响攻击精度的是 $\theta \in (-10, 10)$ 范围内的测角精度。由上述条件可知:

$$\frac{df}{f}\tan\theta \leq \frac{5}{800}\tan(10^\circ) \times \frac{180}{\pi} \approx 0.06^\circ \quad (3)$$

可见,测频误差引起的测角误差可以忽略不计,测角误差主要由相位差测量误差 $d\varphi$ 引起。

$$d\theta \approx \frac{cd\varphi}{2\pi fD\cos\theta} \quad (4)$$

3 天线极化引入的测角误差产生原理

在系统中,波程差引入的相位误差 φ 不能直接测得,而是通过测量电波在两阵元上感应电压的相位差 Ψ 间接测得。

入射波的极化状态用 Jones 矢量描述,其电场表示为^[2,4,5,7,11]:

$$E_R = \begin{bmatrix} \cos\gamma_R \\ \sin\gamma_R e^{j\eta_R} \end{bmatrix} \quad (5)$$

A 、 B 阵元的极化特性用 Jones 矢量描述,其有效长度表示为:

$$h_A = \begin{bmatrix} \cos\gamma_A \\ \sin\gamma_A e^{j\eta_A} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$h_B = \begin{bmatrix} \cos\gamma_B \\ \sin\gamma_B e^{j\eta_B} \end{bmatrix} \quad (7)$$

γ 和 η 为相位描述因子,均为实数。

入射波在阵元上感应出的电压为:

$$V_A = \langle h_A E_R \rangle e^{j\varphi} = [\cos\gamma_A \cos\gamma_R + \sin\gamma_A \sin\gamma_R e^{j(\eta_R + \eta_A)}] e^{j\varphi} = A_A \cdot e^{j(\phi_A + \varphi)} \quad (8)$$

$$V_B = \langle h_B E_R \rangle = \cos\gamma_B \cos\gamma_R + \sin\gamma_B \sin\gamma_R e^{j(\eta_R + \eta_B)} = A_B \cdot e^{j\varphi_B} \quad (9)$$

其中, $\langle \rangle$ 表示内积运算。 A_A 、 A_B 为电压幅度,干涉仪只关心感应电压的相位关系,可不考虑 A_A 、 A_B 。

两阵元上感应电压的相位差为:

$$\Psi = (\phi_A - \phi_B) + \phi = \Delta\phi + \phi \quad (10)$$

其中:

$$\phi_A = \arctg \left[\frac{\sin\gamma_A \sin\gamma_R \sin(\eta_R + \eta_A)}{\cos\gamma_A \cos\gamma_R + \sin\gamma_A \sin\gamma_R \cos(\eta_R + \eta_A)} \right] \quad (11)$$

$$\phi_B = \arctg \left[\frac{\sin\gamma_B \sin\gamma_R \sin(\eta_R + \eta_B)}{\cos\gamma_B \cos\gamma_R + \sin\gamma_B \sin\gamma_R \cos(\eta_R + \eta_B)} \right] \quad (12)$$

反辐射导引头干涉仪一般采用同旋圆极化天线进行组阵,为了便于讨论,我们规定采用左旋圆极化。理想情况下应有 $h_A = h_B = \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$,则 $\Delta\phi = \phi_A - \phi_B = 0$ 。

工程中由于加工精度、阵元互耦、阵元与平台耦合等因素影响,实际 $h_A \neq h_B \neq \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$,一般 $\Delta\phi = \phi_A - \phi_B \neq 0$,导致感应电压的相位差不等于波程差引入的相位差,还引入了一个额外的相位差 $\Delta\phi$ 。

$\Delta\phi$ 与干涉仪阵元的极化特性有关,也与入射波的极化状态有关。在给定入射波频率,阵元极化特性也一定, $\Delta\phi$ 只与入射波极化状态有关。

雷达天线的极化特性是空域变量^[3,8-10]。雷达工作时,天线在空间中转动搜索,对导引头来说相当于以不同的空间角度观察雷达天线的极化特性,接收到入射波极化状态是变化的, $\Delta\phi$ 也是变化的。不同雷达发射天线极化特性空域分布不同,且工作时天线转动方式也多种多样,可认为 $\Delta\phi$ 是随机变化的。统计表明, $\Delta\phi$ 均方根可达10.3度。

ϕ 的测量也受噪声影响。当反辐射平台逐渐接近目标时,收到的信号越来越强,噪声误差将越来越小。统计表明,当信噪比为30 dB时,噪声误差的均方根不大于1度。影响反辐射平台最终攻击精度的主要是天线极化引入的测角误差。

4 基于数字处理的合成阵元

垂直极化和水平极化构成一组正交极化基,二者分别经过移相和幅度加权网络后重新组合,可使合成阵元获得各种不同的极化特性。在数字信号处理技术中,这就是求两个数字化信号的复数加权和,在高速数字器件中可迅速而准确地实时完成^[6]。图2给出基于数字处理的合成阵元原理图。

图3给出其数学模型,其中 c_1 、 c_2 为复常数。

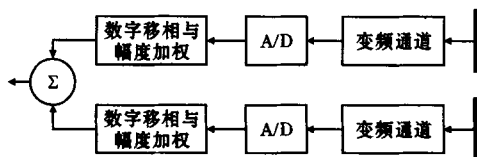


图2 基于数字处理的合成阵元原理图

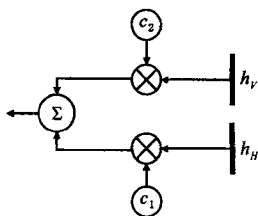


图3 合成阵元的数学模型

5 使用合成阵元消除天线极化引入的测角误差

消除天线极化引入的测角误差的关键是使 A 、 B 阵元的极化特性一致。使用常规阵元,难以满足这一要求。我们采用图2所示的基于数字处理的合成阵元来解决该问题。阵元由一个垂直极化天线和一个水平极化天线按图4所示的方式构成。

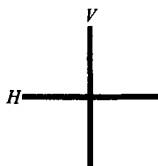


图4 合成阵元的构造

理想情况下,水平和垂直极化天线有效长度分别为 $h_H = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 、 $h_V = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$,令 $c_1 = 1$ 、 $c_2 = j$,即可使合成天线特性为左旋圆极化:

$$h_H + jh_V = \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于加工精度、阵元互耦、阵元与平台耦合等因素影响,实际垂直和水平极化天线均有一定的交叉极化分量存在。不失一般性,令实际水平和垂直天线有效长度分别为: $h_H = \begin{bmatrix} \sin \gamma_H \\ \cos \gamma_H e^{j\eta_H} \end{bmatrix}$ 和

$$h_V = \begin{bmatrix} \sin \gamma_V \\ \cos \gamma_V e^{j\eta_V} \end{bmatrix}。$$

影响导引头攻击精度的是 $\theta \in (-10, 10)$ 范围内的测角精度,对于宽波束天线,在这个角度范围

内相位描述因子 γ_H 、 η_H 、 γ_V 、 η_V 可认为只与入射波频率有关,与视在方向无关。可事先在暗室通过仪器测试建立相位描述因子 γ_H 、 η_H 、 γ_V 、 η_V 与入射波频率的查找表。考虑互耦影响,上述查找表应在阵元完成组阵并安装在导引头上后进行。

导引头工作时,先测得入射波频率,然后通过查表和内插确定相位描述因子, h_H 和 h_V 即为已知量。在此条件下求解复数方程组,可得 c_1 、 c_2 。

$$c_1 h_H + c_2 h_V = \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \quad (14)$$

将解出的 c_1 、 c_2 代入图3所示数学模型,则合成阵元的极化特性被调整为理想的左旋圆极化。

用这种方法将 A 、 B 阵元的极化特性均调整为理想左旋圆极化,两阵元极化特性一致,天线极化引入的测角误差为零。

6 总 结

本文分析了干涉仪中天线极化引入测角误差的原理,提出使用基于数字处理的合成阵元代替常规阵元消除该误差的方法,并从数学上对该方法进行了证明。

参考文献:

- [1] 陈鑫,王浩丞,唐勇,等.多径环境中被动雷达导引头指向性能分析[J].电子信息对抗技术,2011,26(4):1-4.
- [2] 曾清平.雷达极化技术与极化信息应用[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [3] 罗佳.天线空域极化特性及应用[D].长沙:国防科学技术大学研究生院,2008.
- [4] 李永祯.雷达极化抗干扰技术[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [5] 王被德.雷达极化理论和应用[M].南京:电子工业部第十四研究所,1994.
- [6] 庄钊文.雷达极化信息处理及其应用[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [7] Harold Mott. 天线和雷达中的极化[M].林昌禄,译.成都:电子科技大学出版社,1989.
- [8] 戴幻尧.抛物面反射天线的空域瞬态极化特性研究[J].电波科学学报,2009(2):126-131.
- [9] 戴幻尧.电扫偶极子相控阵天线的空域极化特性分析[J].国防科技大学学报,2010(1):84-89.
- [10] 戴幻尧.实测雷达天线的空域极化特性测量及校正[J].现代雷达,2010(7):83-86.
- [11] 戴幻尧.非理想阵元极化特性对干涉仪测角的影响及修正[J].电波科学学报,2010(3):519-526.

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>