



天线交叉波束指向误差分析^{*}

●唐益民

(成都 610036·信息产业部电子第二十九研究所)

【摘要】讨论形成左、右交叉波束宽带天线阵的设计,运用泰勒级数展开对微波网络幅相不平衡引入的天线交叉波束指向误差进行分析计算,并用一组试验数据验证了分析计算的正确性。

关键词 宽带天线阵 交叉波束 波束指向误差

0 引言

宽频带高精度微波测向技术一直是电子对抗技术研究的重点,测向天线阵波束指向误差的大小直接决定了整个测向设备测向精度的高低。近年来,随着微波集成工艺水平的提高,在工程研制中利用无源微波网络馈电形成多个天线波束提高测向精度的方法越来越普及,图1是一种四波束端口测向天线阵示意图,其中和、差波束端口进行粗测向和去模糊,左、右交叉波束(A、B波束)进行精测向。天线阵A、B交叉波束的指向误差主要取决于各测向天线单元匹配的一致性,极化响应的一致性及微波网络幅度、相位的平衡特性。假如天线阵元口径的大小已定且一致性很好,天线极化扭转器对阵列波束指向的影响很小,那么波束形成网络和射频电缆构成的幅度、相位不平衡将是产生波束指向误差的主要因素,图2为A、B交叉波束测向误差示意图。

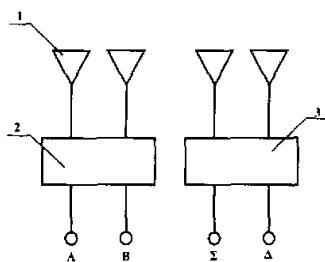


图1 四波束测向天线阵示意图

1:测向天线单元 2:左右波束形成网络
3:和差波束形成网络

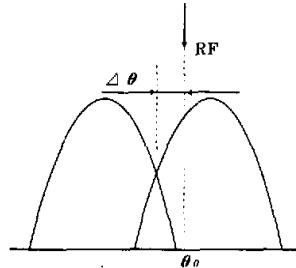


图2 A、B交叉波束测向误差示意图

本文 2001 年 1 月 17 日收到
* 电子 29 所 2000 年学术年会优秀论文



1 交叉波束指向误差的求解

1.1 E面扇形喇叭的辐射场

天线阵是按喇叭E面拼阵的,由于喇叭张口后较大的阵间距使阵因子出现瓣瓣,引起天线阵的副瓣抬高;如果阵元自身口径场存在较大的平方率相差,阵元波束出现平顶或方向图肩膀,整个阵列的“和”波束副瓣将变得很高。为降低副瓣电平,天线研制时采用了慢波介质透镜技术消除喇叭口径的平方率相差,因此角锥喇叭拼阵面E面口径场是均匀分布的等幅、同相的口径场,通过口径场积分即可得到喇叭天线的辐射场 $E(\theta)$ ^[1]。

2.2 交叉波束二元阵指向误差分析

图1中交叉波束二元阵采用E面喇叭拼阵, $E(\theta)$ 代表阵元天线场分布, A 、 B 输出端口的方向图表达式为:

$$E_A(\theta) = E(\theta) \{ 1 + m_A \cdot \exp[j(kd \sin \theta + \frac{\pi}{2} + \Phi_A)] \} \quad (1)$$

$$E_B(\theta) = E(\theta) \{ m_{B1} \cdot \exp[j\Phi_{B1}] + m_{B2} \cdot \exp[j(kd \sin \theta - \frac{\pi}{2} - \Phi_{B2})] \} \quad (2)$$

当“左-A”通道作基准校准时,式中 m_A 、 Φ_A 是“右-A”通道存在的相对于“左-A”通道的幅度和相位偏差;同样 m_{B1} 、 Φ_{B1} 是“左-B”通道存在的相对的幅度和相位偏差; m_{B2} 、 Φ_{B2} 是“右-B”通道存在的相对的幅度和相位偏差。

若左、右波束在 $(\theta_0 + \Delta\theta)$ 处相交(图2),有:

$$|E_A(\theta_0 + \Delta\theta)| = |E_B(\theta_0 + \Delta\theta)| \quad (3)$$

其中 θ_0 为理想情况下左、右波束交叉点的方位角, $\Delta\theta$ 是实际偏差值,如图2所示。(3)式还可以表达为:

$$\begin{aligned} & |1 + m_A \cdot \exp[j(kd \sin(\theta_0 + \Delta\theta) + (\frac{\pi}{2} + \Phi_A))]| = \\ & |m_{B1} \exp(j\Phi_{B1}) + m_{B2} \exp[j(kd \sin(\theta_0 + \Delta\theta) - (\frac{\pi}{2} + \Phi_{B2}))]| \end{aligned} \quad (4)$$

由于: $\exp[j(kd \sin(\theta_0 + \Delta\theta) \pm (\frac{\pi}{2} + \Phi))] = \exp[jkd \sin(\theta_0 + \Delta\theta)](-\sin\Phi \pm j\cos\Phi)$

将 $\exp[jkd \sin(\theta_0 + \Delta\theta)]$ 用泰勒级数展开并忽略展开级数的高次项,有:

$$\exp[jkd \sin(\theta_0 + \Delta\theta)] \approx j\Delta\theta kd \cos\theta_0 \exp[jkd \sin\theta_0] + \exp[jkd \sin\theta_0]$$

当测向天线阵完全理想时, A 、 B 波束交叉点的位置即入射波零度方向 $\theta_0 = 0$, 则上述两式简化为:

$$\begin{aligned} \exp[jkd \sin(\theta_0 + \Delta\theta)] & \approx 1 + jkd \cdot \Delta\theta \cdot \exp[j(kd \sin(\theta_0 + \Delta\theta) \pm (\frac{\pi}{2} + \Phi))] \approx \\ & (1 + \Delta\theta \cdot jkd) \cdot (-\sin\Phi \pm j\cos\Phi) \end{aligned}$$

所以(4)式可改写为近似式:

$$\begin{aligned} & |1 + m_A(1 + \Delta\theta jkd) \cdot (-\sin\Phi_A + j\cos\Phi_A)| \approx \\ & |m_{B1}(\cos\Phi_{B1} + j\sin\Phi_{B1}) + m_{B2}(1 + \Delta\theta jkd) \cdot (-\sin\Phi_{B2} - j\cos\Phi_{B2})| \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式两边均是复变函数的模,整理、化简得:

$$(m_A^2 - m_B^2)(kd)^2(\Delta\theta)^2 - 2kd \cdot [m_A \cos\phi_A + m_{B1}m_{B2} \cos(\phi_{B1} + \phi_{B2})] \Delta\theta + [m_A^2 + 1 - m_{B1}^2 - m_{B2}^2 + 2m_{B1}m_{B2} \sin(\phi_{B1} + \phi_{B2}) - 2m_A \sin\phi_A] \approx 0 \quad (6)$$

当馈电网络幅相平衡时,有: $kd\Delta\theta = 0$, 即交叉波束的指向误差为零,这是测向天线阵完全理想的工作情况;当馈电网络幅度平衡,且相位不平衡仅存在于A、B端口之间,即: $\phi_{B1} = \phi_{B2} = \phi_B$ 、 $\phi_A = 0$ 、 $m_A = m_{B1} = m_{B2} = 1$, 有 $\Delta\theta = \operatorname{tg}\phi_B/(kd)$, 当阵间距 $d = 4\lambda_0$, ϕ_B 的绝对值小于 12.3° 时, 2.25:1 带宽内交叉波束指向误差小于 0.8° ;当馈电网络相位平衡,且幅度不平衡仅存在于A、B端口之间,即: $m_{B1} = m_{B2} = m_B$ 、 $m_A = 1$ 、 $\phi_A = \phi_{B1} = \phi_{B2} = 0$, 据(6)式可算出:阵间距 $d = 4\lambda_0$, A、B端口间幅度不平衡小于 1.88 dB 时, 2.25:1 带宽内交叉波束指向误差小于 0.8° 。

事实上以上情况均是极其偶然的,只可能出现在极个别的频率点,各路、各端口间幅度、相位不平衡是普遍存在的。交叉波束的指向误差是一个典型的一元二次方程,间距、工作频率确定后,误差值与馈电网络各路、各端口间幅度、相位偏差密切相关。当各路、各端口间幅度不平衡在 $-1.88 \sim 1.88 \text{ dB}$ 间随机变化、相位不平衡在 $-12.3^\circ \sim 12.3^\circ$ 间随机变化时,图3是不同频率点的150个随机取样点交叉波束指向误差计算值。

2 实验及结论

本文设计的测向天线阵单元口径内尺寸为 $3.9\lambda_0$, 阵间距 $d = 4\lambda_0$, A、B 波束形成网络是一个进口的3dB定向耦合器。图4和图5分别是该实验模型考虑波束形成网络幅、相实际误差引起的波束指向误差计算值和实测结果的统计曲线,它们均是扣除平均偏差后的结果,由于该实验模型喇叭天线具有斜 45° 极化响应特征,实测结果包括E极化和H极化分量两种响应情况,显然计算值和实测值是比较吻合的。

计算与实验均表明:本测向天线阵测向微波网络(含电缆)幅度、相位不平衡在 $-1.88 \sim 1.88 \text{ dB}$ 内变化、相位不平衡在 $-12.3^\circ \sim 12.3^\circ$ 内变化时,天线阵波束指向误差(r.m.s)完全可以保证小于 0.8° ;甚至极个别频率点相位不平衡达到 20° 时,仍然能够保证 0.8° (r.m.s) 波束指向误差。

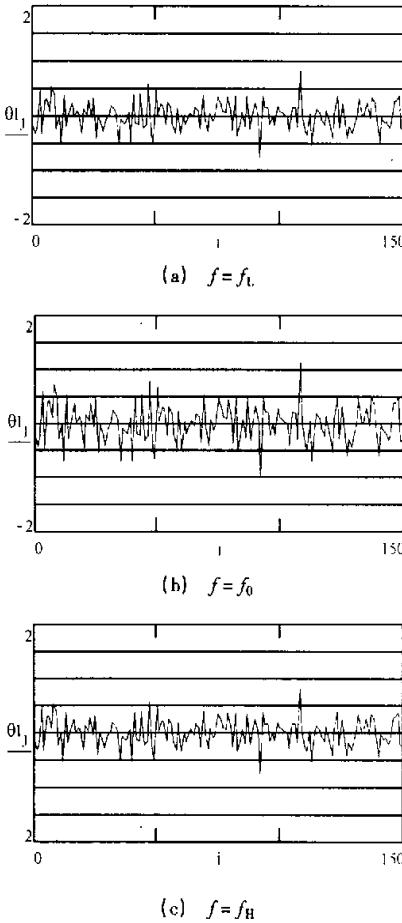


图3 交叉波束指向误差随机点计算值



图4 实验模型的波束指向误差计算值

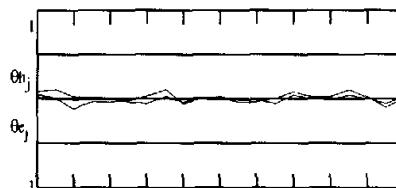
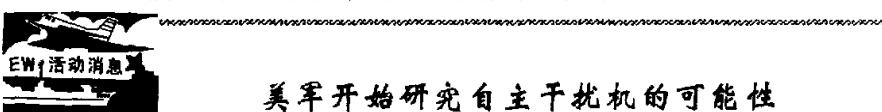


图5 实验模型的波束指向误差实测值

实线——H极化分量响应
虚线——E极化分量响应

参考文献

- 1 M.I. Skolnik. 谢卓译. 雷达手册(第六分册). 北京: 国防工业出版社, 1978: 53~54



(上接 26 页)

美国陆军对这种地基式干扰网络之所以表现出很大兴趣,原因之一在于它把干扰机对整个战场的影响限制(在特定的范围之内)。虽然 EC-130H“罗盘呼叫”机载干扰机能够压制大范围内的射频信号,但它们也很容易影响和削弱己方(友好)部队的通信,自己的部队或友军部队可能比敌人部队离这个干扰飞机更近。

在敌发射机附近布放一些功率比较低的干扰发射机,美陆军自己的通信系统的广播将不会受到影响,这些干扰机具备充分的智能,能区分出敌友的通信。它们还必须能识别出敌人网络中的关键节点,以便把干扰功率集中于那些节点上。

在战场上放置很多干扰发射机还有另一个用途,即屏蔽己方通信不使被敌截获。这些辐射源也可以增加背景射频噪声,这样就产生一道保护陆军自己的通信的屏障。

但有些问题尚待解决。例如, Darpa 尚未决定是否所有这些传感器都一样的“灵巧”,有些传感器是否应便宜点,性能差一点,而只用一个性能好些的传感器进行复杂的目标分析,对地基干扰网络起引导作用。

这些干扰机的大小和功率都未确定。这些装置将很可能作为导弹的子弹药形式投放,或精确空投。因为这些传感器被设想成很便宜,故投放机制不能太花钱。

定义整个 wolfpack 概念花了约一年的时间,之后 Darpa 转向业界开始硬件的研制。合同商将要求回答并予以解决的一个问题是功率要求。在计划结束时,大约在 2004 年, Darpa 期待有一个供试验的原型系统已准备好。

技术障碍很多,其一是电源问题。Darpa 官员认为现有的电池可以用,因为这些干扰机的功率比较小,而且也不是一直在工作。但实际的电源要求未定下来。另一些问题包括能够区分敌友信号,做比较小的天线而能在宽的频段范围工作,这些传感器之间精确调谐的通信,以及产生一个自主的逻辑来管理整个系统。

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>