

微波着陆系统波束指向误差仿真分析

吴德伟, 伍维甲, 张斌

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:为了提高微波着陆系统地面设备的角度引导精度,基于微波线性相控阵天线理论,分析了地面角度引导设备产生相控阵天线波束指向误差的主要原因——数字移相器的量化误差,并进行了不同量化阶数下的舍尾法馈相误差分析及仿真。为了寻求系统精度与设备成本的折衷,在采用四位移相器的条件下比较了随机馈相法与传统的舍尾馈相法的波束指向误差,仿真分析了相位误差均值为零法与适当随机相位量化法对波束指向误差的影响;这两种方法消除了周期性误差峰值,提高了相控阵天线的波束指向精度,其中适当随机相位量化法效果更佳;说明了采用随机馈相法能够有效减小因数字式移相器相位量化误差导致的波束指向误差,使系统精度明显提高。

关键词:微波着陆系统;相控阵天线;量化误差;随机馈相法

中图分类号: TN821+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)04-0064-05

微波着陆系统^[1] (Microwave Landing System, MLS) 能够为各类飞机提供高达 III 类的盲目着陆引导能力。其具有抗地形干扰能力并能提供多重下滑道,加之抗电磁干扰能力强、工作波道多等优点,成为了未来着陆引导系统发展的方向。MLS 采用时间基准波束扫描技术,其核心是地面设备利用相控阵天线产生高速扫描波束,机载设备通过对波束扫描时间的测量获得着陆所需的角度引导信息。

任何参数的测量都不可避免地会存在误差。在系统设计和设备研制过程中,必须认清各种误差因素及误差的数量,努力寻找减小误差的方法,从而提高系统精度,满足用户使用要求。

1 MLS 测角与误差机理

相控阵天线由许多辐射阵元排列组成,每个阵元(或一组阵元)后面接有一个可控移相器,利用控制这些移相器相移量的方法来改变各阵元间的相对馈电相位,从而改变天线阵面上电磁波的相位分布,使波束在空间按一定规律扫描^[2]。阵列天线分为线阵列天线和面阵列天线两种基本的形式^[3],MLS 相控阵天线分为方位天线和仰角天线两种,这两种天线均属于线阵列天线。本文均以线阵为基础进行讨论。 n 元均匀直线天线阵的阵因子为

$$f_{\alpha}(\alpha) = \sum_{i=1}^N I_i e^{j\psi_i} = \sum_{i=1}^N I_i e^{j(i \frac{2\pi}{\lambda} d \cos\alpha + \varphi_i)} \quad (1)$$

式中: N 为阵元个数; d 为阵元间隔; α 为线阵天线法线方向为零度时观察点所在角度; ψ_i 为到达观测点时第 i 个阵元的辐射波比第 1 个阵元的辐射波领先的相位角; $\frac{2\pi}{\lambda} d \cos\alpha$ 为信号波长为 λ 时,相邻阵元间由于波程差引起的相位差; I_i, φ_i 为第 i 个阵元馈电电流的幅值和相位值。

易见当 $\psi_i = 0$ 时, n 元均匀直线天线阵的阵因子取最大值,即相控阵天线在 α 方向产生尖锐波束。此时,相邻阵元间馈电电流的相位差和波程差引起的相位差相互抵消,则有 $\varphi_i = -i \frac{2\pi}{\lambda} d \cos\alpha$ 。

收稿日期:2007-09-27

作者简介:吴德伟(1963-),男,吉林省吉林市人,教授,博士生导师,主要从事军用无线电导航研究。
E-mail:wuweiija@sina.com

MLS角度测量原理是利用相控阵天线产生尖锐波束,并向系统工作区内扫描辐射。飞机上安装的机载设备接收到扫描波束信号,形成“往”、“返”扫描脉冲,测出这两个脉冲之间的时间差,将这个时间差与所要测量的角度建立一一对应的关系,最终得到所需测量的角度。因此,实际引导角度值与脉冲间隔时间有如下关系:

$$\theta = \frac{1}{2}(t - T_0)v \quad (2)$$

式中: θ 为方位引导角度值($^\circ$); t 为飞机接收到的“往”、“返”脉冲间隔时间(ms); T_0 为以零度角进近时飞机接收到的“往”、“返”脉冲间隔时间(ms); v 波束扫描速率。 v 和 T_0 都是系统设计的常数。

对上式微分后可得到角度误差公式:

$$\delta\theta = \frac{1}{2}v\delta t \quad (3)$$

由式(3)可知,时间测量误差导致了角度测量误差,因此任何一种影响脉冲间隔时间测量精度的因素均为系统误差来源,并且测量角度与测量的时间应该是线性关系。MLS作为角度测量系统可分为地面和机载两大部分,鉴于系统整体误差分析的复杂性,文章主要针对地面角度引导设备产生的误差进行研究。

2 波束指向误差分析

2.1 误差因素

MLS角度引导设备是以时基波束扫描原理向引导区内提供角度制导信息,其采用相控阵天线来实现快速、高精度的波束扫描。造成MLS地面设备角度引导误差的原因是多种的,但其中最主要的是相控阵扫描天线的波束指向误差。造成这种偏差的原因是由于相控阵天线采用可控数字式移相器而存在的相移量化误差以及移相器本身的相移误差。

根据波束形成和控制的原理,波束指向误差的误差源可分为两部分:一部分是由移相器的插入损耗和随机相位误差以及温度和时钟精度造成的,误差的控制取决于产品的设计;而另一部分是由于移相器相位量化误差引起的,是可控数字移相器的原理误差,它的控制是和算法有关的^[4]。本文将主要讨论由于数字移相器的量化误差所产生的波束指向误差,并寻找减小这种误差的途径。

2.2 量化误差引起的波束指向误差仿真分析

现代相控阵天线一般采用可控数字移相器来控制阵列单元的相位^[5],其结构简单、移相速度快、移相值稳定。由于相位值不能连续变化,使得移相器选取的相位值只能是按一定方法选取的最接近理想相位值的标称值。标称相位值与理想值间的误差称为移相器相位量化误差(Phase Quantization Error)。

传统的馈相方法包括舍尾法、进位法、四舍五入法等。舍尾法是取低的量化台阶,即当馈相值不是 Δ 的整数倍时,舍去不能被整除的余数部分,只保留整数部分。进位法、四舍五入法与此类似。这3种馈相方法同属于舍入法。舍入法就是对每个单元的量化相位误差与某个常数作比较,如大于这一常数,则进位,否则舍尾。第 i 个天线单元上馈电电流相位可表示为

$$\theta_{ir} = \text{Int}\left(\frac{\theta_{ih}}{\Delta} + \mu\right)\Delta \quad (4)$$

式中: θ_{ih} 为理想馈电相位; θ_{ir} 为实际相移值; $\Delta = 2\pi/2^k$ 为移相器的最小相移值; μ 为与馈电方式有关的馈相方式函数;Int(\cdot)表示对(\cdot)取小于它的整数。

其误差 ξ_i 是在 $[0, \Delta]$ 上均匀分布的随机变量,其概率密度函数为

$$f(\xi_i) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta}, & 0 \leq \xi_i \leq \frac{1}{\Delta} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

舍尾法、进位法、四舍五入法带来的相位量化误差所引起的波束指向误差,在理论上讲,水平是相当的。这里以舍尾法带来的量化误差为例,对波束指向误差进行分析。其仿真结果如图1所示。

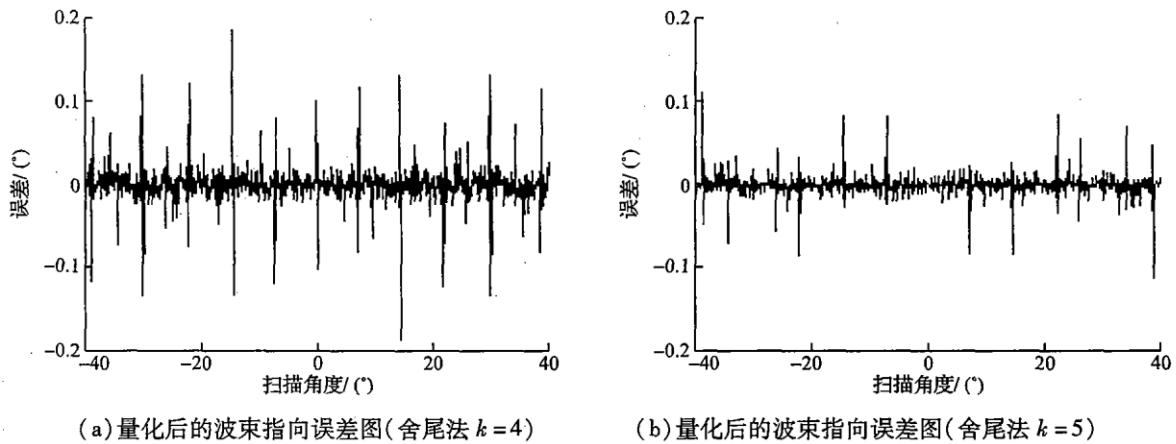


图1 采用舍尾法馈相的波束指向误差

Fig.1 The beam pointing error obtained from floor phase feeding

由图1可见,波束指向误差是关于扫描角 α 的函数,误差峰值周期性重复出现,且在 $\alpha = \pm \arcsin(k \frac{\lambda\Delta}{2\pi d})$, $k=0, \pm 1, \dots, \text{Int}(\frac{2\pi d}{\lambda\Delta})$ 附近存在峰值;移相器的位数增加了一位, $\delta(\alpha)$ 的峰值从数量和幅度上均减小了一半左右,由此可知 $\delta(\alpha)$ 的峰值与 2^k 成反比,即 $\delta_\alpha \propto \frac{1}{2^k}$ 。无疑,增加移相器的位数可以大大减小误差,但是在实际应用中移相器位数每增加1位,所要求的工艺水平和器件成本就会大幅提高,因而一味通过增加移相器位数来减小波束指向误差的方法所付出的成本较高。基于对各种因素的综合考虑,目前相控阵天线多采用四位移相器^[6]。为此我们需要寻找一种在保持移相器位数不变时,也能减小波束指向误差的方法。

3 提高波束指向精度的方法

相控阵天线中采用传统的馈相方法,会出现与扫描角相关的周期性误差峰值,误差峰值出现的原因是舍尾法所造成的相位误差积累。为改善这一情况,打破舍尾法带来的这种规律性,可以采用随机馈相法(randomizing phase feeding)。

随机馈相法是指在某一时刻,阵列中每个天线单元的馈相值在原有量化相位值的基础上,按一定的概率随机加0或 Δ 。相位误差均值为零法^[7]、二可能值法^[8]、适当随机量化法^[9]以及预加相位法^[10]都属于随机馈相法,它们相当于引入了有利的随机噪声。相位误差均值为零法和二可能值法是对相控阵每个天线单元的量化相位,按一定的概率决定是进位还是舍去,以获得较高的天线性能,两种方法本质相似,所以这里仅就误差均值为零法进行讨论。适当随机量化法则是通过选取一段门限,在门限外采用随机相位量化法,而在门限内采用靠近法取量化相位。预加相位法的关键在量化前给阵元加上一个随机的相位值,而这种方法在MLS地面设备中不易实现,所以这里不具体讨论。

3.1 相位误差均值为零法

相位误差均值为零法就是要从统计概率上保证在对某个相位值进行多次量化时所产生的量化误差均值为零。即在量化后相位误差 ξ_i 的取值有以下2种:

$$\xi_i = \begin{cases} a_i = \varphi_i' - \varphi_i \\ b_i = \varphi_i'' - \varphi_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: φ_i 为第*i*个阵列单元的要求相位; φ_i' 为第*i*个阵列单元进位后的相位; φ_i'' 为第*i*个阵列单元舍尾后的相位。因此, $\xi_i = a_i$ 为进位的相位差,其概率为 P_i ; $\xi_i = b_i$ 为退位的相位差,其概率为 Q_i 。

根据相位误差均值为零法的定义,即式(6)的相位误差部分的均值为零,得

$$\overline{\xi_i} = P_i a_i + Q_i b_i = 0 (P_i + Q_i = 1) \quad (7)$$

则有

$$P_i = \frac{-b_i}{a_i - b_i}, \quad Q_i = \frac{a_i}{a_i - b_i}$$

因此,移相器的位数一旦确定,只要通过公式算出阵列单元的要求相位 φ_i ,就可以确定其在量化时“入”和“舍”的概率。再由计算机依据这个概率来判断是进位还是舍尾。各阵元的馈相值确定之后,相控阵天线的波束指向即可确定。

3.2 适当随机相位量化法

适当随机相位量化法是在相位误差均值为零法的基础上,做进一步的改进,从而减少量化误差。该方法在量化中首先确定门限 $q(0 < q < 1)$,将门限内接近进位后的相位值的相位,量化后取进位值;门限内接近舍尾后的相位值的相位,量化后取舍尾值;对不在门限内的相位采用相位误差均值为零法进行量化。

相位误差:

$$\phi_{\Delta} = \begin{cases} -k\Delta & , k < q \\ (1-k)\Delta & , k > 1-q \end{cases} \quad (8)$$

门限外的相位误差为

$$\phi_{\Delta} = \begin{cases} -k\Delta, & \text{概率为 } P \\ (1-k)\Delta, & \text{概率为 } 1-P \end{cases} \quad (9)$$

式中, Δ 为量化间隔。

门限取值不同,其量化后的效果也就不一样。当门限 q 取0.5时,适当随机法即为四舍五入法;当 $q=0$ 时,适当随机法即为相位误差均值为零法。选择合适的参数进行计算,可以使控制波束指向扫描的量化相位得到优化,从而减小波束指向误差。

3.3 仿真分析

采用相位误差均值为零法、适当随机量化法馈相时的波束指向误差仿真图分别如图2所示。由仿真结果可看出,较之传统的舍入法,采用随机馈相法后波束指向误差变得随机起来,消除了周期性峰值误差,并且误差也明显减小。这是因为,当采用舍尾法量化时,实际相位值均小于要求相位值,在某一时刻各天线单元产生的电场在观察点处都朝着一个方向偏移,叠加后天线的最大波束指向在这个方向上的偏转幅度急剧增大,造成峰值。对于随机馈相法,它并不像舍尾法那样实际馈相值都小于要求馈相值,而是将实际相位值按一定规律取大于或小于要求的相位值。比如:当第 i 个天线单元的实际相位取小于要求相位时,第 $i+1$ 个天线单元的实际相位就有可能取大于要求的相位,从而使得天线单元辐射场强叠加后,量化误差带来的波束指向误差近似抵消,从而消除了峰值,使得在所有扫描角度上波束指向误差都相差不大。图2还表明,适当随机相位量化法在减小波束指向误差方面取得的效果要好于相位误差均值为零法。实质上,随机馈相法就是引入了一个有益的随机噪声,通过理论分析和计算机模拟演算表明,随机噪声的引入能有效提高相控阵天线的波束指向精度。

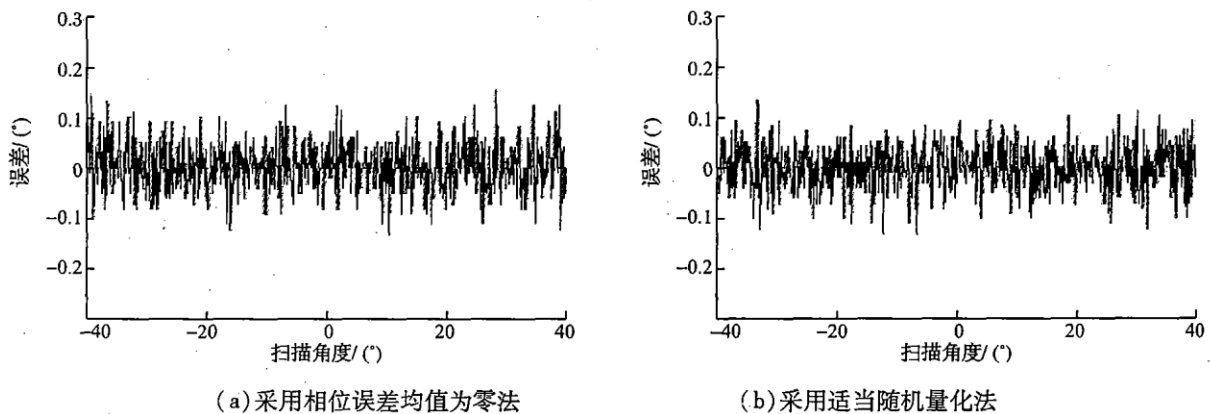


图2 采用随机馈相方法时的波束指向误差

Fig. 2 The beam pointing error obtained from randomizing phase feeding

4 结论

可控数字移相器的应用,是相控阵天线优越性能得以实现的关键。但由此不可避免地引入了相位量化误差,从而严重影响了相控阵天线的波束指向精度,最终导致了MLS地面角度引导设备的信号误差。因此,

波束指向误差已经成为地面角度引导设备控制运动噪声和航迹跟踪误差的主要成分。本文提出的几种提高天线波束指向精度的方法,通过仿真证明能够有效减小因数字式移相器相位量化误差导致的波束指向误差,使系统精度明显提高。

参考文献:

- [1] 周其焕,魏雄志,崔红跃. 微波着陆系统[M]. 北京:国防工业出版社,1990.
ZHOU Qihuan, WEI Xiongzi, CUI Hongyue. Microwave Landing System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990. (in Chinese)
- [2] Robert J. Mailloux. Technology for Array Control[J]. IEEE Trans, 2003, 51(1): 35 - 38.
- [3] Don Parker, Zimmermann D C. Phased Arrays[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, 2002, 50(3): 678 - 686.
- [4] Robert J Mailloux. Phased Array Antenna Handbook(Second Edition)[M]. Boston: Artech House Press, 2005.
- [5] Rao J B L, Patel D P V. Voltage - Controlled Ferroelectric Lens Phased Antennas[J]. IEEE Trans, 2004, 47(3): 4124 - 4127.
- [6] 宛清,王晟达,张志军,等. 相控阵雷达波控系统移相器位数的选取[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2007, 8(1): 30 - 32.
WAN Qing, WANG Shengda, ZHANG Zhijun, et al. A Selecting Method of Phase Shifters Digit of Phased Array Radar Beam Control System [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2007, 8(1): 30 - 32. (in Chinese)
- [7] 沈文辉,周希朗,彭根建. 相控阵天线零相位误差法的波束指向分析[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(s): 87 - 89.
SHEN Wenhui, ZHOU Xilang, PENG Genjian. Analysis for Improving the Beam - steering Accuracy of Phased Array Antenna by Zero Mean Phase Error Method [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(s): 87 - 89. (in Chinese)
- [8] 沈文辉,曹伟,郭燕昌. 二维相控阵天线二可能值法的波束指向分析[J]. 南京邮电学院学报:自然科学版, 2000, 20(2): 32 - 34.
SHEN Wenhui, CAO Wei, GUO Yanchang. Analysis of Beam Pointing of 2 - D Phased Array Result with Two - probable Values [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2000, 20(2): 32 - 34. (in Chinese)
- [9] 江卫,郭燕昌. 适当随机相位量化对和差波瓣指向精度的改善[J]. 现代雷达, 1997, 19(4): 62 - 66.
JIANG Wei, GUO Yanchang. Improvement of Phase Control Beam Pointing for Sum and Difference Pattern [J]. Modern Radar, 1997, 19(4): 62 - 66. (in Chinese)
- [10] Shen W H, Zhou X L. Suppression of Quantization Side Lobes of Phased Arrays[J]. IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004, 4: 4121 - 4127.

(编辑:徐楠楠)

Emulation and Analysis of Beam Pointing Error in Microwave Landing System

WU De - wei, WU Wei - jia, ZHANG Bin

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of ground angle guiding equipment in Microwave Landing System, based on microwave linear phased array antenna theory, the main factors of causing phased array antenna beam to point error and the errors produced by floor phase feeding in different Quantization steps are analyzed. Beam pointing errors obtained from floor phase feeding and from randomizing phase feeding by using 4 - bit Phase Shifter are compared. Through simulation, two randomizing phase feeding methods are particularly discussed and analyzed. The periodic error is eliminated by using these two methods and consequently the phased array antenna beam pointing accuracy is improved especially by Appropriate Random Phase Quantization. The simulation results indicate that beam pointing error is significantly decreased and the location accuracy is greatly improved.

Key words: microwave landing system; phased array antenna; quantization error; randomizing phase feeding