

基于惯性导航系统的机载雷达天线运动补偿算法研究

王福增, 余世豪

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:机载雷达在飞机飞行的过程中跟踪前方的目标物,由于飞机与目标物的相对位置在不断的改变,因此需要改变雷达天线的波束指向,让雷达波束继续对准目标,所以在飞机飞行过程中需要不断的调整天线波束指向,从而达到跟踪目标物的目的。论文从飞机的匀速直线飞行、偏航、俯仰以及偏航与俯仰同时出现的这4种情况进行理论分析,使雷达天线随飞机运动不断调整天线扫描角度,使雷达天线波束指向目标物,实现雷达天线运动补偿。并用 MATLAB 软件对雷达天线补偿算法进行仿真。

关键词:机载雷达;运动;补偿

中图分类号:TN957.2

文献标志码:A

0 引言

相控阵雷达是一种利用电子技术控制阵列天线各辐射单元的馈电相位来改变波束方向。机载有源相控阵雷达的应用凭借着巨大的优势,为雷达提供更多扩展综合性能的可能,同时也对雷达的目标跟踪系统提出极高的要求。针对目标跟踪系统,相控阵天线主要具有波束捷变、高数据率的特点,使得传统的目标跟踪系统已经不足以发挥控阵优势^[1]。

20 世纪 60 年代以来,由于空间监视和洲际导弹预警的迫切需要,相控阵雷达技术发展很快。与传统雷达相比,相控阵雷达的主要特点和优势变现为:(1)高效率搜索、多目标跟踪,兼有多雷达功能。(2)空间目标的定向与空域滤波能力。在机载和星载雷达系统中广泛采用基于惯性导航系统产生的空时二维自适应处理技术。天线波束相控扫描的实现,可去除机械扫描雷达天线的伺服驱动系统。(3)天线孔径与雷达平台共形能力的实现。相控阵天线由众多的受移相器控制的单元按一定方式排列构成。天线单元分布在一个平面上的是平面相控阵天线。采用共形相控阵天线的机载预警雷达在工作方式上更易实现全空域覆盖,更易与将雷达、电子战、通信、导航等电子系统进行综合设计,构成综合电子集成系统。主要讨论惯性导航系统下的飞机运动状态,由于相控阵天线做相位扫描时,会出现阵元的相位误差,通过对相控阵雷达天线相位补偿技术,实现对目标的跟踪,并对目标系统仿真。

1 线性相控阵天线

假定一个由 N 个阵元构成的线性相控阵天线如图 1 所示,天线阵元排成一直线,天线阵元间距为 d ,等间距排列。

每个阵元(或一组阵元)后面接有一个可控的移相器,通过移相器的相移来改变每个阵元间的相对电相位差,从而改变天线阵面上电磁波的相位分布,使得波束在空间按一定规律扫描^[1-3]。

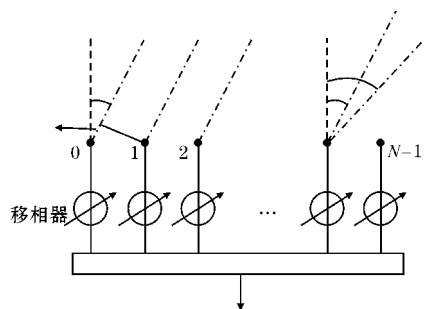


图1 线性相控阵天线

在相对于阵列法线的方向上,两个阵元之间的波程差引起的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta$$

假设阵列各单元全向均匀辐射,各阵元的激励电流幅度为 a_i ,表示满足一定副瓣要求所需的馈电的幅度加权;激励电流在阵列各单元的相位差为 $\Delta\varphi_B$,表示为获得波束扫描方向所需的相位加权,由天线阵内移相器提供。通过上述,可以得出此时天线方向图函数为

$$F(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i e^{j(\Delta\varphi - \Delta\varphi_B)}$$

令

$$\Delta\varphi_B = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta_B$$

假设天线各单元等幅馈电,即在 $a_i = 1/N$ 的特殊情况下,并利用欧拉公式 $1 - e^{jx} = -2je^{jx/2} \sin(x/2)$, 可以得出阵列的幅度方向图函数为

$$|F(\theta)| = \frac{1}{N} \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} Nd(\sin\theta - \sin\theta_B)}{\sin \frac{\pi}{\lambda} d(\sin\theta - \sin\theta_B)}$$

当 $\frac{\pi}{\lambda} d(\sin\theta - \sin\theta_B)$ 的值很小时,式(4)可以近似为辛格函数的形式,根据辛格函数的特性可以得出线性相控阵天线的波束宽度、波束指向和增益等天线的参数指标。根据辛格函数取得最大值的条件 $\frac{\pi}{\lambda} d(\sin\theta - \sin\theta_B) = 0$, 即 $\theta = \theta_B$ 为相控阵天线的波束指向。天线增益下降到3 dB时的波束主瓣宽度对应此时天线的波束宽度,通过化简可以得出波束宽度为

$$\Delta\theta_3 \approx \frac{0.885 \lambda}{Nd \cos\theta_B}$$

对于等幅度加权的阵列天线,当天线波束指向偏离法线扫描角度后,天线在扫描角方向上的有效孔径面积减小为 $A \cdot \cos\theta_B$, 此时天线的增益为

$$G_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} A \cdot \cos\theta_B$$

式中 A 为天线的孔径面积。由此可以看出,相控阵天线增益与天线扫描角度有关,扫描角越大,相控阵天线的增益越小。

2 机载运动补偿算法

假定飞机飞行时追踪前方一个固定的目标,由于目标物飞行速度相对于飞机速度很小,因此相对于飞机而言目标物是静止的。飞机运动过程中通过飞机上的相控阵雷达天线改变阵元(辐射源)相位差从而改变波束指向角,让天线波束对目标物进行扫描和追踪,然后飞机上的雷达系统可以得知目标物在飞机直线飞行时与飞机航线的角度。飞机直线飞行时有4种情况,分别是直线飞行、偏航、俯仰以及偏航和俯仰同时存在。直线飞行是飞机沿着标准航线没有偏差的飞行,偏航是飞机在标准航线左右角度出现偏差,俯仰是飞机在标准航线上下角度出现偏差。出现偏差的角度可以从飞机的惯性导航系统得到。

2.1 直线飞行

飞机按照航线直线飞行,如图2所示。飞机在图

中的 O 点,目标物在 M 点,设飞机速度为 v ,初始位置距离目标物为 S ,角度为 θ_0 。经过一段时间 t ,当飞机运动到 P 点时,这时与目标物的角度为 θ_1 。

通过计算可以得知:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{S \cdot \sin\theta_0}{S \cdot \cos\theta_0 - vt}\right)$$

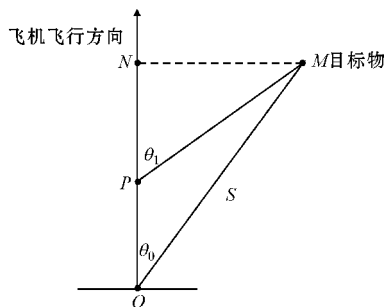


图2 直线飞行时天线扫描示意图

此时求出飞机运动一段距离后距离目标物的角度,也就是天线波束指向的角度,根据天线波束指向公式,飞机相控阵天线指向目标物时阵元之间的相位差,可以计算出当飞机从 O 点移动至 P 点时相控阵天线需要补偿 $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \left\{ \sin\left[\arctan\left(\frac{S \cdot \sin\theta_0}{S \cdot \cos\theta_0 - vt}\right)\right] - \sin\theta_0 \right\}$$

2.2 飞机偏航

如果飞机出现偏航的情况,如图3所示。飞机在图中的 O 点朝着箭头的方向飞行,偏航的角度为 θ_2 , 偏航角可以在飞机的陀螺仪上得知。目标物在 M 点,设飞机速度为 v ,初始位置距离目标物为 S ,角度为 θ_0 。经过一段时间 t ,当飞机运动到 P 点时,这时与目标物的角度为 θ_1 。

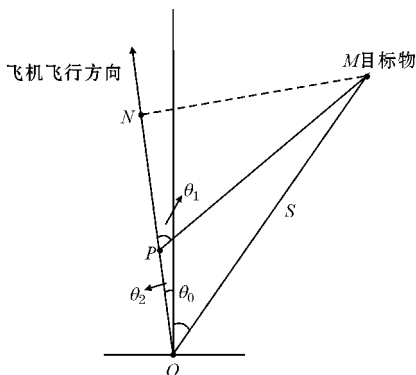


图3 偏航时天线扫描示意图

通过计算可以得知:

$$\theta_1 = \arctan\left[\frac{S \cdot \sin(\theta_0 + \theta_2)}{S \cdot \cos(\theta_0 + \theta_2) - vt}\right]$$

当飞机从 O 点移动至 P 点时相控阵天线需要补偿 $\Delta\varphi$

为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \left\{ \sin \left\{ \arctan \left[\frac{S \cdot \sin(\theta_0 + \theta_2)}{S \cdot \cos(\theta_0 + \theta_2) - vt} \right] \right\} - \sin(\theta_0 + \theta_2) \right\}$$

2.3 飞机俯仰

如果飞机出现俯仰的情况,如图4所示。飞机在图中的O点朝着箭头的方向飞行,俯仰的角度为 θ_2 ,俯仰的角度可以在飞机的陀螺仪上得知。目标物在M点,设飞机速度为 v ,初始位置距离目标物为 S ,角度为 θ_0 。经过一段时间 t ,当飞机运动到P点时,因为飞机有个向上俯仰的角度,与目标物不在同一水平平面上(PG垂直于平面ONM),这时飞机与目标物的角度为 θ_1 。

通过计算可以得

$$\angle OPM = \arccos \frac{(vt)^2 + (vt \cdot \sin\theta_2)^2 + (S \cdot \cos\theta_0 - vt \cdot \cos\theta_2)^2 - (S \cdot \sin\theta_0)^2 - S^2}{2vt \cdot \sqrt{(vt \cdot \sin\theta_2)^2 + (S \cdot \cos\theta_0 - vt \cdot \cos\theta_2)^2 + (S \cdot \sin\theta_0)^2}}$$
$$\theta_1 = 180^\circ - \angle OPM$$

当飞机从O点移动至P点时相控阵天线需要补偿 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d [\sin(180^\circ - \angle OPM) - \sin\theta_0]$$

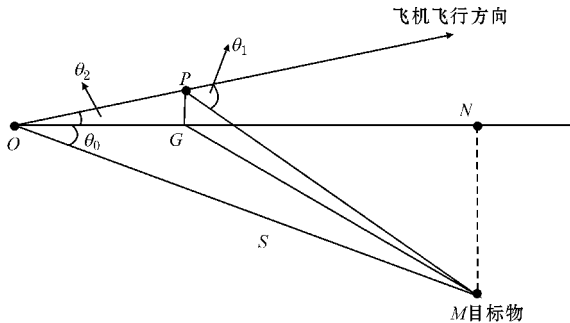


图4 俯仰时天线扫描示意图

2.4 飞机出现俯仰和偏航

如果飞机同时出现俯仰和偏航两种情况时,如图5所示。飞机在图中的O点朝着箭头的方向飞行,俯仰的角度为 θ_2 ,偏航的角度为 θ_3 。偏航和俯仰的角度可以在飞机的陀螺仪上得知。目标物在M点,设飞机速度为 v ,初始位置距离目标物为 S ,角度为 θ_0 。经过一段时间 t ,当飞机运动到P点时,因为飞机同时有个向上俯仰的角度和左右偏航的角度,与目标物不在同一水平平面上(PG垂直于平面OFM,OF为飞机飞行方向在平面ONM上面的投影),这时飞机与目标物的角度为 θ_1 。

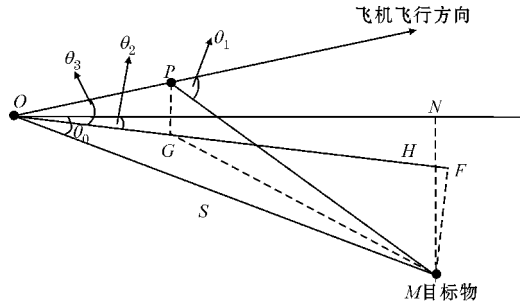


图5 偏航加俯仰时天线扫描示意图

通过计算可以得

$$\angle OPM = \arccos \frac{(vt)^2 + (vt \cdot \sin\theta_3)^2 + (S \cdot \cos(\theta_0 - \theta_2) - vt \cdot \cos\theta_3)^2 - (S \cdot \sin(\theta_0 - \theta_2))^2 - S^2}{2vt \cdot \sqrt{(vt \cdot \sin\theta_3)^2 + (S \cdot \cos(\theta_0 - \theta_2) - vt \cdot \cos\theta_3)^2 + (S \cdot \sin(\theta_0 - \theta_2))^2}}$$
$$\theta_1 = 180^\circ - \angle OPM$$

当飞机从O点移动至P点时相控阵天线需要补偿 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d [\sin(180^\circ - \angle OPM) - \sin\theta_0]$$

2.5 运动补偿的过程

在飞机整个运动过程中,通过惯性导航系统可以获得飞机的状态,因此可以随时读取飞机航行方向、俯仰角以及飞行速度,前方目标物通过探测可知其距离,由于飞机飞行速度相对目标物大得多,因此现假定目标物相对飞机静止,经过一段时间 t 自动对相控阵天线做相位补偿使波束指向目标物,如此循环,经过一个单位时间就修正一次波束指向。流程图如图6所示。

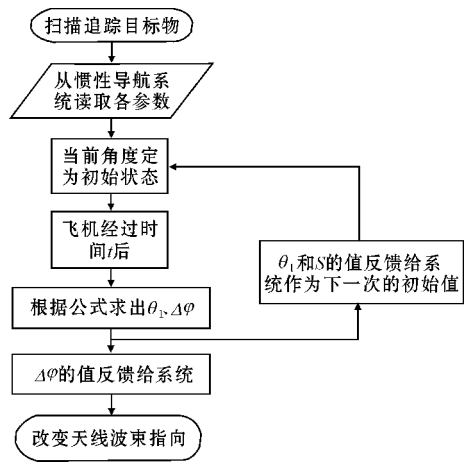


图6 运动补偿算法流程图

2.6 运动补偿算法的 MATLAB 仿真

通过参考实际的飞机与机载相控阵天线,选定对于这次仿真比较合适的参数,其中阵元个数 $N=20$,20个阵元成一字形排列,机载天线发射频率为 $f=2 \times 10^{10}$ Hz,

天线波长 $\lambda = c/f = 0.015 \text{ m}$, 阵元间距 $d = \lambda/4 = 0.00375 \text{ m}$ 。用 MATLAB 进行仿真时需设定目标物的距离和角度以及偏航角和俯仰角,通过理论公式计算飞机飞行过程中调整天线方向图,实现对目标物的跟踪^[4-6]。假设目标物在飞机右前方 45° 位置处距离飞机 10 km , 初始角度 θ_0 为 45° , 假设飞机的飞行速度为 900 km/h 即 $v = 250 \text{ m/s}$ 。当飞机处于偏航和俯仰两种状态叠加飞行时,偏航角度 $\theta_2 = 2^\circ$, 俯仰角 $\theta_3 = 1^\circ$, 飞机经过 1 s 后距离目标物的 9845.6 m , $\theta_1 = 48.073^\circ$ 。这时需要改变的天线相位差为 $\Delta\varphi = 0.0579 \text{ rad}$ 。雷达天线调整前、后天线方向图如图 7 所示。

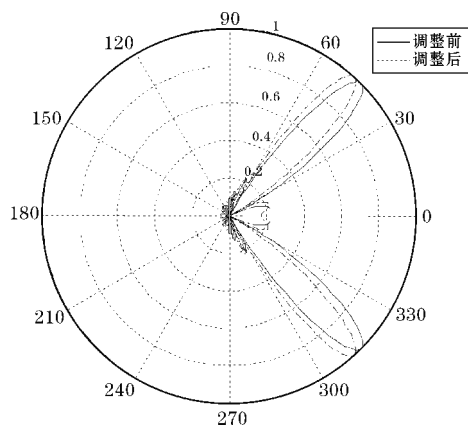


图7 机载雷达天线调整前、后天线方向图

3 结束语

对惯性导航系统机载相控阵雷达天线相位扫描的运动补偿算法进行研究,在波束指向的基础下,研究运动补偿算法,在进行运动补偿时,从惯性导航系统中读取飞机当前的各项参数,其中参数包括飞机当前离目标物的距离 S 和初始角度 θ_0 ,当前的速度 v ,如果有俯

仰和偏航还要读取俯仰角与偏航角。根据公式计算出经过时间 t 后飞机与目标物的角度,在整个计算过程中飞机处于运动,经过一个单位时间 t 就修正一次波束指向,并且修正后的波束指向角作为下一次运动补偿的初始角度。这样飞机就在飞行中自动修正天线扫描方向,达到补偿的作用,最后对系统天线补偿过程进行仿真。

致谢:感谢成都信息工程大学科研基金(KYTZ201306)对本文的资助

参考文献:

- [1] 胡卫东,郁文贤,卢建斌,等. 相控阵雷达资源管理的理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2010:11-18.
- [2] J R Mohammed. Phased array antenna with ultra-low sidelobes[J]. Electronics Letters, 2013, 49(17):1055-1056.
- [3] NH Noordin, V Zuniga, N Haridas. Uniform circular arrays for phased array antenna[J]. Antennas & Propagation Conference, 2011:1-4.
- [4] 王曼珠,张缙民,崔红跃. MATLAB 在天线方向图中的应用与研究[J]. 西藏大学学报:自然科学版, 2004, 26(4): 24-27.
- [5] D Sun, Z B Lu, Y J Chen, et al. Design of a wide-band conformal phased array antenna with aperture-coupled antenna[J]. in Proc. IET Int. Radar Conf., 2009:1-3.
- [6] 陈天禄,郭燕红. 阵列天线方向图的 MATLAB 实现[J]. 西藏大学学报:自然科学版, 2010, 25(1): 103-107.

Research on Motion Compensation of Airborne Radar Antenna based on Inertial Navigation System

WANG Fu-zeng, YU Shi-hao

(College of Electronic Engineering, CUIT, Chengdu 610225, China)

Abstract: During the flight, the airborne radar is continuously tracking targets ahead. Because the relative position between the plane and the target is constantly changing, the radar antenna beam direction must be adjusted accordingly for the purpose of tracking the target. Analyzed theoretically in this paper are the four kinds of flight circumstances including the uniform straight line, the yaw, the pitch and the yaw and pitch. The radar antenna scanning angle will be adjusted along with the movement of aircraft, which make the antenna beam aim at the target all the time and implement the movement compensation. The radar antenna compensation algorithm is simulated with MATLAB software.

Key words: airborne radar; motion; compensation