

文章编号: 1001- 2486(2007) 05- 0048- 06

海面多径环境下雷达目标俯仰角测量提取的研究与应用*

吕韶昱, 万建伟, 辛 勤

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 在单脉冲测角体制下, 由于多径回波信号的干扰, 极大地影响了雷达对低空目标俯仰角的测量。通过对多路径反射环境模型分析, 同时考虑镜面反射和漫反射的干扰, 得出了岸、海基单脉冲雷达低空目标跟踪时俯仰角测量误差的产生原因, 将传统的多目标分辨算法 (C^2 算法) 与偏差补偿技术相结合应用于低角多径环境下偏轴跟踪目标俯仰角的测量, 弥补两种算法各自的不足。在给定的测量环境下对不同高度目标进行仿真, 得到良好的仿真结果, 表明两种算法结合使用, 可较大地提高低空目标偏轴跟踪俯仰角的测量精度。并将其应用于某型雷达对掠海巡航飞行目标测量数据事后俯仰角的提取, 与雷达实时输出的俯仰角测量数据相比, 验证了该算法的有效性和可实施性。

关键词: 低空/低角度目标; 多径干扰; 偏轴跟踪; C^2 -偏差补偿算法; 俯仰角参数测量

中图分类号: TN95 文献标识码: A

Research and Application of Radar Target Elevation Measurement Extraction in the Presence of Sea-surface Multi-path

LV Shao-yu, WAN Jian-wei, XIN Qin

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the presence of sea-surface multi-path, due to the interference of multi-path reflection, the measurement of a low elevation target by monopulse is often greatly affected. So off-axis tracking technique was adopted generally. By means of the analysis based on the model of multi-path reflection environment, both specular reflection and diffuse reflection were considered. Expression for the average bias in the mono-pulse ratio due to specular and diffuse reflections and the noise in the radar channel was derived. Algorithm was combined with bias compensation so as to adapt to the elevation measurement of off-axis tracking targets in the presence of sea-surface multi-path. This is aimed to avoid the disadvantage of both techniques employed here. Throughout the simulation in some scenarios, the results show that the method combining the two algorithms together can improve the precision of low-altitude target elevation measurement. Then it was applied in the extraction of postal data of off-line cruising flying object's elevation measurement, and a comparison was made with real time data elevation measurement by actual radar system. The results indicate that this method is effective and feasible in the off-line elevation extraction and it can remarkably improve the precision of elevation measurement.

Key words: low-altitude/low-angle target; multi-path jamming; off-axis tracking; C^2 -bias compensation algorithm; elevation measurement

单脉冲比幅测角是一种很常见的测角方法, 对于单点目标, 其输出是一个实数, 即目标偏离天线波束轴线的角度。对于低空目标, 由于镜像回波信号的影响, 使得其输出变为复数。目前常用的比幅测角方法有复角法和偏差补偿算法, 文献[1]提出了复角法。复角法在实际应用中常产生病态的解, 失去了稳定性。Burder 最早研究了毫米波雷达在平坦反射面上由于镜面反射而出现的固定偏差^[2]。Daeipour 针对单脉冲测角体制雷达, 提出偏差补偿算法^[3], 该算法主要基于如下设想: 当雷达对远距离低空巡航平稳飞行目标进行跟踪时, 实单脉冲比所对应的角度与目标真实仰角在大部分时间里相差一个近似固定的值, 误差主要是由目标与镜像的干涉引起的(漫反射对单脉冲比的影响是个随机量), 在跟踪过程中, 所有涉及该固定偏差的参量都能被估计出来。 C^2 算法^[4] 是传统的多目标分辨算法, 根据之前的仿

* 收稿日期: 2006- 12- 29

基金项目: 国家部委基金资助项目 (41321090202)

作者简介: 吕韶昱(1973-), 男, 工程师, 博士生。

真, C^2 算法在低空目标俯仰角测量中需要较大的运算点数才可达到较高的测量精度, 这就造成了目标跟踪^[5]时间滞后, 且对远距离目标的测量精度较差。本文将 C^2 算法与偏差补偿技术相结合应用于低空目标俯仰角的偏轴跟踪测量, 由 C^2 算法解算目标和镜像的俯仰角代替偏差补偿的航迹滤波, 既可提高测角精度, 又可避免两种方法的不足。

1 多径几何模型及仿真场景描述

1.1 多径几何模型

在雷达跟踪测量低空目标时, 雷达波束照射目标的同时也会照射一定范围的海面(地面), 经海面反射后的雷达波束有可能到达目标, 经目标反射后再回到雷达天线。因此在实际应用中, 四条路径(直接-直接、直接-反射、反射-直接、反射-反射)的多重反射信号构成了雷达接收回波, 反射系数是一个复值, 通常包含两个分量: 镜面反射, 又称相干分量; 漫反射分量, 又称非相干分量。多径传播几何模型如图 1 所示。

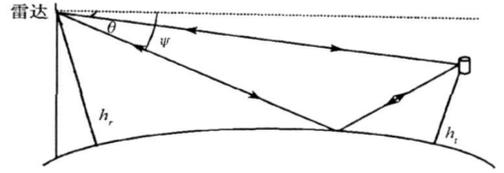


图 1 多径几何模型

Fig. 1 Multi-path geometry

1.2 仿真场景描述

场景 1 目标距海面 10m 水平巡航飞行 100s, 从距雷达 20km 处以 400m/s 的速度背离飞行;

场景 2 目标距海面 20m 水平巡航飞行 100s, 从距雷达 20km 处以 400m/s 的速度背离飞行;

场景 3 目标距海面 50m 水平巡航飞行 100s, 从距雷达 20km 处以 400m/s 的速度背离飞行;

以上目标为等效雷达反射截面积 0.1m 的无起伏目标。由于本文仿真所应用的雷达系统测量的大多是基于海面背景巡航飞行的小目标, 所以仿真中没有考虑起伏目标。仿真中采用的偏轴角分别为 0.8° 、 0.4° 、 0° 、 -0.4° 。

2 低空目标俯仰角偏轴跟踪测量的 C^2 - 偏差补偿算法

2.1 C^2 算法

C^2 算法本来是用于多目标角度分辨的最大似然估计算法, 在低仰角跟踪中利用 C^2 算法的基本思想是将低仰角目标及其镜像分别当作两个很接近的独立目标, 用复数分别表示和、差通道的数据, 利用一串脉冲的测量结果估计出目标和镜像组合的几何中心位置以及角度分布范围的数值, 从而推算出目标的角坐标。

单脉冲天线接收到的回波和、差信号分别表示为 S 和 D :

$$S = S_I + jS_Q \quad D = D_I + jD_Q \quad (1)$$

如图 1 所示, 目标和镜像组合的几何中心位置 B 角度分布范围 C^2 的估计算法表示如下:

$$B_n = \frac{\sum_{i=n-N+1}^n \operatorname{Re}(D_n^* S_n)}{\sum_{i=n-N+1}^n S_n^* S_n} \quad C_n^2 = \frac{\sum_{i=n-N+1}^n D_n^* D_n}{\sum_{i=n-N+1}^n S_n^* S_n} - B^2 \quad (2)$$

目标偏离雷达视轴俯仰角 θ 和镜像偏离雷达视轴俯仰角 ϕ 可计算得到:

$$\theta = B + \frac{1}{2} \sqrt{C^2} \quad \phi = B - \frac{1}{2} \sqrt{C^2} \quad (3)$$

2.2 偏差补偿算法

2.2.1 复单脉冲比误差的解析表达式

根据上面给出的多径反射模型, 考虑四条回波路径时的单脉冲比^[3]:

$$r = \frac{D}{S} = \frac{\xi_{g_s}(\theta) g_d(\theta) + \xi_{g_s}(\theta) g_d(\phi) v e^{j\varphi} + \xi_{g_s}(\phi) g_d(\theta) v e^{j\varphi} + \xi_{g_s}(\phi) g_d(\phi) v^2 e^{j2\varphi}}{\xi_{g_s}(\theta) g_s(\theta) + \xi_{g_s}(\theta) g_s(\phi) v e^{j\varphi} + \xi_{g_s}(\phi) g_s(\theta) v e^{j\varphi} + \xi_{g_s}(\phi) g_s(\phi) v^2 e^{j2\varphi}}$$

$$= \frac{r_i + (r_i + r_r)g|v|e^{j\phi} + r_r g^2|v|^2 e^{j2\phi}}{1 + 2g|v|e^{j\phi} + g^2|v|^2 e^{j2\phi}} = \frac{r_i + g|v|e^{j\phi} r_r}{1 + g|v|e^{j\phi}} \quad (4)$$

其中, v 为总的反射系数; $r_i = g_d(\theta)/g_s(\theta)$, 是只考虑直射路径时的单脉冲比, 或目标单独存在时的单脉冲比; $r_r = g_d(\phi)/g_s(\phi)$, 是只考虑反射路径时的单脉冲比, 或镜像单独存在时的单脉冲比; $\Delta r = r_r - r_i$, 是镜像与目标单脉冲比的差值; $g = g_s(\phi)/g_s(\theta)$ 是反射/直接路径的增益比; $\phi = \phi_r + \phi_t$ 是反射/直射路径的相对相位, ϕ_r 是总的反射对镜像目标产生的附加相位, ϕ_t 是由反射路径和直射路径的距离差造成的接收相位差; $g|v|e^{j\phi}$ 是和通道中, 反射与直射信号的复矢量比值。

式(4)代表了低空目标的复单脉冲比, 可进一步写为

$$\begin{aligned} r &= r_i + \Delta r \frac{g|v|e^{j\phi}}{1 + g|v|e^{j\phi}} = r_i + \Delta r \left[\frac{g|v|e^{j\phi} + g^2|v|^2}{1 + 2g|v|\cos\phi + g^2|v|^2} \right] \\ &= r_i + \Delta r \left[\frac{g|v|\cos\phi + g^2|v|^2}{1 + 2g|v|\cos\phi + g^2|v|^2} \right] + j\Delta r \left[\frac{g|v|\sin\phi}{1 + 2g|v|\cos\phi + g^2|v|^2} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

对利用实单脉冲比查表计算方法, 误差完全来源于式(5)的中间一项, 如果可以将其完全补偿, 则基本可以忽略雷达低空目标测量时多径所带来的误差。这些参数除 ϕ 以外均可以利用 C^2 算法计算得到(θ 、 ϕ 、 Δr), 从天线参数中得到 g , 可以采用反射模型估计 v 。Daeipour 认为, 对于大多数时间巡航飞行的目标, 误差是一个与目标高度相关的近似恒定的值, 因此可以通过对实单脉冲比的固定偏差来修正测角误差, 而不用考虑 ϕ 的影响, 将其设为恒定值 ϕ 。由于该补偿在大部分时间是固定不变的, 所以称为固定偏差补偿。

2.2.2 偏差补偿

由于海面反射系数与单脉冲比偏差之间的非线性关系(式(5)中间一项), 因此总的偏差并不是镜面反射和漫反射的简单叠加^[6-9]。必须考虑两种反射都存在的情况^[4]:

$$B_{total} = \text{Re} \left\{ \Delta r \left[\frac{g\eta e^{j\phi}}{1 + g\eta e^{j\phi}} - \frac{g^2 e^{j2\phi}}{(1 + g\eta e^{j\phi})^3} \gamma^2 \right] \right\} \quad (6)$$

其中, η 和 γ^2 分别为随机变量 $|v|$ 的均值和方差, 用下式计算

$$\begin{cases} \eta = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_d \exp\left(-\frac{|v_s|^2}{2\sigma_d^2}\right) M\left(\frac{3}{2}, 1, \frac{|v_s|}{2\sigma_d}\right) \\ \gamma^2 = 2\sigma_d^2 + |v_s|^2 - \eta^2 \end{cases} \quad (7)$$

$M(k, l, z)$ 是一个混合超几何函数(Confluent Hyper-geometric Function), 其表达式为

$$M(k, l, z) = 1 + \frac{k}{l}z + \frac{k(k+1)}{l^2}z^2 + \dots + \frac{k_n z^n}{l_n n!} \quad (8)$$

$$k_n = k(k+1)(k+2)\dots(k+n-1) \quad k_0 = 1$$

通道热噪声与反射信号相比较小, 但对单脉冲比仍有影响, 如果考虑通道热噪声, 式(4)变为

$$\begin{aligned} r &= \frac{\xi_{g_s}(\theta)g_d(\theta) + \xi_{g_s}(\theta)g_d(\phi)v e^{j\phi} + \xi_{g_s}(\phi)g_d(\theta)v e^{j\phi} + \xi_{g_s}(\phi)g_d(\phi)v^2 e^{j2\phi} + w_1}{\xi_{g_s}(\theta)g_s(\theta) + \xi_{g_s}(\theta)g_s(\phi)v e^{j\phi} + \xi_{g_s}(\phi)g_s(\theta)v e^{j\phi} + \xi_{g_s}(\phi)g_s(\phi)v^2 e^{j2\phi} + w_2} \\ &= \frac{r_i + (r_i + r_r)g|v|e^{j\phi} + r_r g^2|v|^2 e^{j2\phi} + w_1/\xi_{g_s}^2(\theta)}{1 + 2g|v|e^{j\phi} + g^2|v|^2 e^{j2\phi} + w_2/\xi_{g_s}^2(\theta)} = \frac{r_i + g|v|e^{j\phi} r_r + n_1}{1 + g|v|e^{j\phi} + n_2} = r_i + \varepsilon \end{aligned} \quad (9)$$

偏差只需将式(7)中 $|v|$ 的均值 η 和方差 γ^2 替换为 $|v + n/g e^{j\phi}|$ 的均值 η_m 和方差 γ_m^2 ^[3],

$$\begin{cases} \eta_m = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\sigma_d^2 + \frac{\sigma_n^2}{g^2}} \exp\left[-\frac{|v_s|^2}{2\left(\sigma_d^2 + \frac{\sigma_n^2}{g^2}\right)}\right] M\left[\frac{3}{2}, 1, \frac{|v_s|}{2\sqrt{\sigma_d^2 + \frac{\sigma_n^2}{g^2}}}\right] \\ \gamma_m^2 = 2\left(\sigma_d^2 + \frac{\sigma_n^2}{g^2}\right) + |v_s|^2 - \eta_m^2 \end{cases} \quad (10)$$

其中,

$$\sigma_n^2 = \frac{2g^2 \sigma_w^2 \sigma_d^2}{|s_m|^2} + \frac{\sigma_w^2}{|s_m|^2} (1 + g^2 |v_s|^2) \quad (11)$$

包括通道热噪声的总偏差为^[4]

$$B_{bias} = \Delta r \operatorname{Re} \left\{ \left[\frac{g \eta_m e^{j\bar{\phi}}}{1 + g \eta_m e^{j\bar{\phi}}} - \frac{g^2 e^{2\bar{\phi}}}{(1 + g \eta_m e^{j\bar{\phi}})^3} \gamma_m^2 \right] \right\} - r_r \exp \left(- \frac{|s_m|^2}{2\sigma_w^2} \right) \quad (12)$$

这里, Δr 、 r_r 和 g 利用 C^2 算法解算和天线方向图得到, η_m 和 γ_m^2 由式(1)得到, 固定相位 ϕ 由设计者指定, $|s_m|$ 是和通道信号幅度, σ_w^2 是和、差通道接收机噪声功率, 可通过直接测量或估计得到。

在单脉冲比的实部中去掉上面计算得到的固定偏差 B_{bias} , 就得到补偿后的单脉冲比

$$\hat{r}_t = \operatorname{Re}(r) - B_{bias} = \operatorname{Re} \left(\frac{D}{S} \right) - B_{bias} \quad (13)$$

由文献[3], 其为相位平均意义上的无偏估计。那么测得的目标俯仰角为

$$E = \hat{r}_t / k + E_0 \quad (14)$$

k 为和雷达系统相关的常数; E_0 为雷达视轴偏轴角。

单脉冲测量值通过一阶回归滤波, n 时刻的滤波输出为:

$$E_{filter}^n = \alpha E_{observal} + (1 - \alpha) E_{filter}^{n-1} \quad (15)$$

2.3 C^2 - 偏差补偿算法流程

(1) 根据所采用的 C^2 算法的点数, 利用采样的回波视频信号数据计算目标和镜像偏离雷达视轴俯仰角 θ 和 ψ ;

(2) 根据天线方向图电压增益函数, 利用上一步所得到的 θ 和 ψ 计算 g 、 r_r 和 Δr ;

(3) 利用海情和环境参数求解镜面反射系数 v_s 和漫反射系数方差 σ_d^2 , 这一步的计算也需要用到目标和镜像偏离雷达视轴俯仰角 θ 和 ψ ^[4,7-9];

(4) 利用所得的 g 、 σ_d^2 、 v_s 和接收到的回波视频信号和通道能量 $|s_m|^2$ 以及接收机通道噪声方差 σ_w^2 , 由式(1)计算 σ_n^2 ;

(5) 利用已经计算得到的 g 、 σ_d^2 、 v_s 、 σ_n^2 , 由式(10)计算 $|v + n_2 / g e^{j\bar{\phi}}|$ 的均值 η_m 和方差 γ_m^2 , 同时指定固定相位 $\bar{\phi}$, 仿真中发现 $0^\circ \leq \bar{\phi} < 90^\circ$ 范围内对补偿结果影响不大;

(6) 利用 g 、 r_r 、 Δr 、 $|s_m|^2$ 、 σ_w^2 、 η_m 、 γ_m^2 和 ϕ , 由式(12)计算需要补偿的总的单脉冲比偏差;

(7) 利用上一步的结果和雷达视轴的偏轴角 E_0 , 由式(13)、(14)、(15)解算目标相对于雷达系统天线水平面的俯仰角。

C^2 - 偏差补偿算法的解算过程是一个迭代过程, 图 2 给出的是单次计算的流程, 实际操作需要循环执行。

3 仿真及结果分析

3.1 仿真

仿真中所采用的雷达系统载波频率为 6000MHz, 极化方式为水平极化, 脉冲重复频率为 2000Hz, 10 脉冲积累, 16×4 的相控阵天线, 天线波束宽度为 1.05° , 天线高度为 230m; 海浪均方根高度为 0.25m, 逆风风速为 2m/s。

三种场景在不同偏轴角下 C^2 - 偏差补偿算法的俯仰角测量以及常规单脉冲比幅的均方根误差如表 1 所示。在数据解算中, v_s 和 σ_d^2 根据测量环境以及雷达系统参数求得^[3,7-9]; ϕ 在本次处理中选 -30° 。估计值的均方根误差用

$$\epsilon_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (E_n - \bar{E}_n)^2} \quad (16)$$

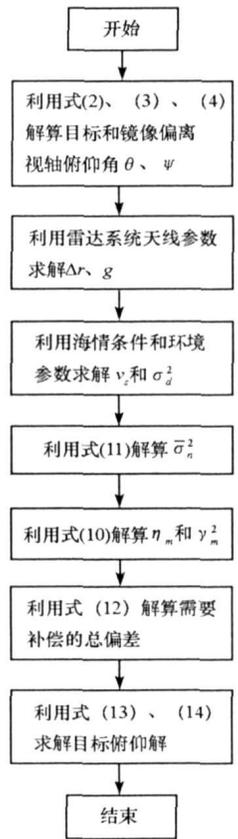


图 2 算法流程图
Fig. 2 Algorithm flow

来计算。

由均方根误差表可以看出,两种算法结合使用可以提高俯仰角的测量提取精度。 C^2 算法与偏差补偿算法结合使用可以克服两种方法的不足: C^2 算法需要较多的估计点数(1000点以上),造成时间滞后以及远距离目标俯仰角估计精度下降;偏差补偿算法对近距离目标的补偿效果较差,避免了偏差补偿算法需要进行的航迹滤波。仿真中采用的 C^2 算法的估计点数为200,也就是1s的时间。如果需要更高精度的测量,可以适当地增加 C^2 算法的估计点数。由仿真结果可以看出,雷达视轴偏轴角度应该根据目标飞行高度的不同而调整,不应该对所有低于临界角的目标使用固定值。

表1 均方根误差

Tab.1 RMS error

目标高度 h_i (m)	偏轴角($^\circ$)	0.8		0.4		0		-0.4	
	C^2 算法中使用的点数 N	估计值的均方根误差 (mrad)	单脉冲比均方根误差 (mrad)						
10	200	1.1734	1.4200	1.0473	1.3270	0.7621	1.0515	0.7308	0.9491
20	200	1.0695	1.3941	0.9195	1.3486	0.7503	1.0278	0.8305	1.0844
50	200	0.5446	0.8454	0.5123	0.7536	0.4921	0.7305	0.5634	0.7789

3.2 事后俯仰角提取及结果分析

通过插值计算在试验中输出的数据结果是20/s。图3为某次飞行试验中原始测量的20/s的俯仰角数据,原始测量为1000点 C^2 算法;图4为 C^2 -偏差补偿算法事后提取的20/s的数据, C^2 算法的解算点数为200。目标飞行时间为349s,目标距离为36.97852km-17.15674 km-66.98242km,目标方位为66.447 $^\circ$ -200.022 $^\circ$ 。

估计值的均方根误差用式(16)计算,与GPS外弹道测量系统提供的真值比对,对原始测量值进行随机误差修正后数据的均方误差为0.8573mrad, C^2 -偏差补偿算法提取的均方误差为0.8133mrad。

对比雷达系统实时输出数据和事后解算结果可以看出,在低空目标俯仰角事后提取中是比较有效的。目标飞行过程中基本无起伏,但是由于目标到雷达距离由远及近,又由近到远,相对于测量雷达,目标俯仰角有一定的起伏,从给出的结果可以看出,与实时输出数据比较, C^2 -偏差补偿算法可以较大改进俯仰角的测量精度,为靶场决策提供依据。

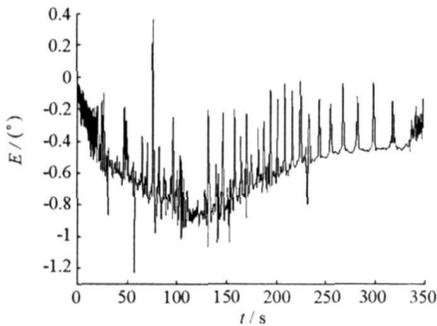


图3 原始测量数据
Fig.3 Original data

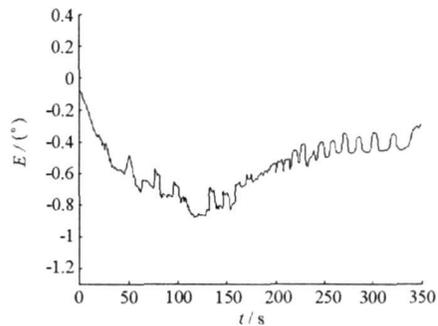


图4 C^2 -偏差补偿算法解算数据
Fig.4 Off-line extractive data

4 结论

本文结合实际雷达系统应用环境,研究了单脉冲雷达对低空目标偏轴跟踪中俯仰角的测量问题,应用 C^2 算法结合偏差补偿算法对掠海巡航飞行的低空目标进行俯仰角的偏轴跟踪测量,这种方法可以应用在多径干扰较强的测量环境,具有较好的抗多径干扰性能。通过对不同高度目标仿真的结果可以看

出, 该算法可以显著改善俯仰角的测量精度, 并且两种算法结合使用可以弥补 C^2 算法的时间滞后以及取代偏差补偿算法的航迹滤波。通过对实际测量数据的处理分析验证了 C^2 - 偏差补偿算法对低空目标偏轴跟踪俯仰角测量的有效性。但补偿使用的相对相位 ϕ 是一固定值, 对误差尖峰补偿效果较差。下一步的研究内容是如何有效地动态估计相对相位, 更高精度地实现对低空目标俯仰角的测量提取。

参考文献:

- [1] Sherman S M. Complex Indicated Angles Applied to Unresolved Radar Target and Multipath[J]. IEEE Trans. on AES, 1971, AES- 7(1): 160-170.
- [2] Bruder J A, Saffold J A. Multipath Propagation Effect on Low-angle Tracking at Millimeter-wave Frequencies[C]// IEE Proc. Pt. F, 1991.
- [3] Daeipour E, Blair W D, BAR-Shalom Y. Bias Compensation and Tracking with Monopulse Radars in the Presence of Multipath[J]. IEEE Trans. on AES, 1997, 33(3): 63- 82.
- [4] William J B, Joel B, Thomas M W. Monopulse Elevation Discrimination Experiments in Low-angle Multipath[C]// SPIE Conf. RPTA, 1998, 3462.
- [5] 贺明科, 王正明, 朱炬波. 去偏转换坐标卡尔曼滤波器的雷达目标跟踪[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(5): 57- 60.
- [6] 杨世海. 雷达低空目标跟踪的偏差补偿算法研究[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1741- 1744.
- [7] Long M W. Radar Reflectivity of Land and Sea[R]. Lexington: D C Heath, Company, 1975.
- [8] Sinha A, Bar-shalom Y, Blair W D, et al. Radar Measurement Extraction in the Presence of Sea-surface Multipath[J]. IEEE Trans. AES, 2003, 39(2): 550- 567.
- [9] 杨世海. 相控阵雷达低空目标探测与跟踪技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002.

(上接第 25 页)

4 小结

- (1) 建立的发动机低频振荡模型仿真结果与试验结果基本吻合;
 - (2) 通过提高喷注压降, 加大燃烧室特征长度, 能够抑制发动机中的振荡, 都存在负面影响。
- 本文的研究还有待在如下两方面完善:
- (1) 通过仿真和试验, 得到过氧化氢发动机的最优参数;
 - (2) 完善发动机动力学仿真模型, 特别是要能反映出燃烧室内的燃烧过程。

参考文献:

- [1] Ventura M, Wernimort E. History of the Reaction Motors Super Performance 90% H_2O_2 /Kerosene LR- 40 Rocket Engine[R]. AIAA- 01- 3838, 2001.
- [2] Musker A J. Highly Stabilised Hydrogen Peroxide as a Rocket Propellant[R]. AIAA 2003- 4619, 2003.
- [3] Johnson C, Anderson W, Ross R. Catalyst Bed Instability within the USFE H_2O_2 JP- 8 Rocket Engine[R]. AIAA 2000- 3301, 2000.
- [4] 杜新, 汪亮, 葛李虎, 等. H_2O_2 - PE 固液混合火箭发动机试验研究. 固体火箭技术[J]. 2003, 26(2): 61- 64.
- [5] 杨锡武, 何保成, 任凤升, 等. 某型弹用冲压发动机巡航段供油振荡的数值仿真[J]. 推进技术, 2006, 27(2): 158- 161.
- [6] 曹泰岳. 火箭发动机动力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004.