

雷达低空目标跟踪的偏差补偿算法研究

杨世海, 胡卫东, 杜小勇

(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, 由于多径效应的影响, 极大地降低了雷达目标的跟踪精度, 甚至丢失该目标. 本文主要通过理论分析和对实际环境的计算仿真, 分析了岸、海基雷达跟踪低空运动目标时俯仰角测量误差大小及其产生原因. 针对固定偏差补偿法在实际应用中的不足, 提出了从复单脉冲比中估计反射路径与直接路径信号的相对相位的算法, 从而实现联合相位的动态补偿, 并在跟踪滤波中利用估计相位作为阈值来去除尖峰误差, 在仿真中获得了良好的跟踪结果.

关键词: 低空目标跟踪; 单脉冲比幅测角; 偏差补偿算法

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1741-04

Bias Compensation Research for Low-Altitude Target Tracking

YANG Shi-hai, HU Wei-dong, DU Xiao-yong

(National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: This paper deals with the measurement error of elevation angle for low-altitude target tracking with monopulse radars in the presence of multipath, which degrades the target tracking algorithms greatly. By means of the theoretical analysis and computer simulation based on real environment, we confirm that the fixed bias compensation can't solve some real scenarios' problem. Then we develop a novel compensation technique after the estimate of phase difference between direct and reflective path. Also, we can use it as a threshold to eliminate the peak error in the tracking stage. Complex monopulse ratio is utilized and the accuracy of tracking is improved, especially in some kinds of scenarios.

Key words: low-altitude target tracking; monopulse ratio; bias compensation

1 引言

1.1 问题定义

众所周知, 地、海基雷达在对低空巡航目标(这时雷达视轴的俯仰角通常接近于零)进行跟踪时, 由于主波束直接扫过地、海面, 俯仰角测量通常需要考虑两种因素的影响: 地、海杂波和多径反射. 地、海杂波使初始信杂比(动目标处理前的信杂比)大为降低, 当目标径向速度不接近于零时, 可以采用信号动目标处理的方法予以一定的改善; 多径效应使初始信杂比周期性的增强或衰落(见图 2a), 且很难用通常的频域信号处理方法加以改善, 多径几何如图 1 所示.

多径反射经常只研究一条反射路径, 实际应用中, 4 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; 散射反射, 又称非相干分量.

1.2 早先的相关研究

文献[1]较早系统研究了通常的单脉冲雷达在跟踪低空

表 1 文中符号注释

θ, ψ	雷达对目标和镜像目标的俯视角
h_t, h_r	雷达和目标相对反射点平面高度
G, ψ_k	反射点和擦地角(入射余角)
R_t, R_r	雷达到目标/杂波的等效距离
σ_t, σ_r	目标和杂波的等效雷达反射面积
g_s, g_d	天线和、差波束的电压增益函数
g	接收增益比(直接路径/反射路径)
v_s, v_d	镜面反射系数和散射反射系数
ρ_0, D	Fresnel 反射系数和扩散因子
F_t, F_r	信号和杂波的接收增益
$\rho S, \rho D$	镜面和散射反射因子
r_t, r_r	目标和镜像目标的单脉冲比值
$r, \Delta r$	低空目标的复单脉冲比, $\Delta r = r - r_t$
ϕ_t	总反射系数的附加相位
ϕ_l	由于反射路径和直接路径的距离差造成的接收相位差
ϕ_r	反射路径和直接路径的相对相位

收稿日期: 2001-09-26; 修回日期: 2002-06-03

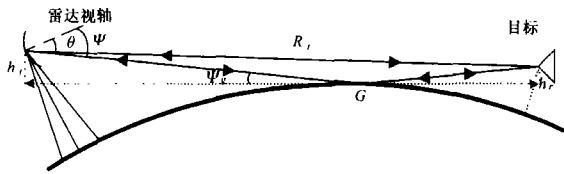


图 1 多径反射几何示意图

目标时复单脉冲比的构成,给出了详细的表达式.根据这些表达式, Sherman 在文献[2]中提出了复角法(Complex Angle),该方法利用 1 至 2 个脉冲的回波信息,通过方程求解和最优估计等算法,可以分别得出目标和镜像目标的俯仰角度.复角法的好处在于利用了复单脉冲比的全部信息,缺点是将复单脉冲比的实部和虚部放在一个方程(组)里,使它们各自的噪声(还包括对反射模型的估计误差,尤其是反射面的粗糙度)相互混叠、互耦,在实际应用中常产生病态的解,失去了稳定性.实际上,复单脉冲比的实部和虚部对目标角度估计的贡献是不一致的,本文将在后面的分析中说明这一点.

近年,文献[3]又提出一种基于单脉冲比的偏差补偿算法(Bias Compensation),该算法作如下设想:

(1)当雷达对远距离低空巡航目标进行跟踪时,单脉冲比的实部所对应的角度与真实值在大部分时间里相差一个近似固定的值且能在闭环跟踪中予以补偿.误差主要是由镜面反射引起,漫反射对单脉冲比的影响是个随机量;

(2)对小部分不满足条件 A 的时间段,在和通道设置一定的信号功率阈值,将这部分“劣点”在跟踪滤波(航迹形成)阶段前予以剔除.

通过对几种场景的仿真和后续的基于最大机动的航迹滤波,算法取得了不错的效果.但这种方法存在两个严重的缺点:一是条件 A 的适用性较窄,对于正在进行爬升(下降)的目标和近距离目标,基本上不成立;二是 B 的实现比较困难,和通道的阈值难以确定^①.为了解决这个困难,我们提出利用复角信息的动态(或相位)偏差补偿法.

2 场景描述和仿真环境

2.1 雷达、目标和环境参数

场景 1 目标距地面 50 米高度,水平巡航飞行 60 秒,从地表距离 75000 米远处飞近雷达;

场景 2 目标距地面 30 米高度,水平巡航飞行 10 秒,从地表距离 5000 米远处飞离雷达;

场景 3 目标初始距地面 10 米高度,同时以 5 米/秒的垂直速度斜线飞行 10 秒,从地表距离 30000 米远处飞近雷达;

以上目标为等效雷达反射面积 0.1 米² 的无起伏目标,水平速度均为 340 米/秒,雷达及环境参数如表 2 所示.

2.2 多径几何及环境模型

本文所采用的多径反射模型是基于实际地球曲面、较平坦地面(或海洋面),通过将雷达、目标的绝对高度经方程求解

转化为相对于反射点 G 的相对高度来进行计算仿真,最后将结果反算回雷达或目标所在地的水平坐标系(可参考[4]附录部分).下面给出一些在仿真中用到的模型^[5].

表 2 雷达及环境参数

雷 达 参 数	
天线高度	230m
雷达发射频率	6GHz
极化方式	垂直极化
脉冲串间隔(数据采样时间)	20ms
动目标处理改善因子	平均 25dB
雷达波束俯仰角	3 种场景分别固定为 0、-0.4、-1.7deg
波束宽度	1.1deg
环 境 参 数	
海面浪均方根高度	0.3m
风速	逆风 3m/s

$$v_s = \rho_0 D \rho_s \quad (1)$$

$$v_D = \rho_0 D \rho_D \quad (2)$$

杂波的归一化雷达截面积 σ^0 用于 SNR 的计算中,文献[6]通过对海面的大量试验数据得到了一个近似程度较高的 SIT 模型

$$\sigma^0 = \alpha + \beta \log \frac{\varphi}{\varphi_0} + \left[\delta \log \frac{\varphi}{\varphi_0} + \gamma \right] \log \frac{w}{w_0} \quad (3)$$

其中, φ 是入射余角(deg), w 是风速(knots), φ_0 和 w_0 分别代表参考角度和参考风速, α, β, γ 和 δ 分别是试验数据中获得的常量.

海杂波通常是非高斯的,它们在时间和空间上具有相关性,我们用 K 分布随机函数来产生归一化杂波数据.

以前的有关仿真大都采用在给定信杂比下得到跟踪方法的测角精度,本文通过对实际雷达的工作环境,利用[7, eq. (13.7)]中的公式推导出多径情况下接收机的信杂比

$$SNR_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_c} \cdot \left(\frac{F_i}{F_c} \right)^4 \cdot \left(\frac{R_c}{R_i} \right)^4 \quad (4)$$

这里 $F_i = g_s(\theta) + |v| e^{j\theta} g_s(\psi)$ 是和通道接收到的总信号, σ_c 根据 σ^0 和雷达的入射角、波束宽度等推出[7, eq. (13.4)], $v = v_s(\theta) + v_D = |v| e^{j\theta}$ 是总反射系数,使用的天线方向图函数的第一零点达到 -50dB.

3 单脉冲测角的偏差补偿算法

3.1 固定偏差补偿

在满足一定条件下^②,多径情况下的复单脉冲比可以简化表示为^[3]

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

① 由于目标或距离不同及杂波的干扰,和通道信号功率的变化范围很大,需要较长跟踪时间才能确定这个阈值的取值.

② 忽略接收通道热噪声的影响以及目标的 RCS 对所有的多径分量是一致的.通常这个角度很小,例如目标高度 20m,距离雷达 10km,直接路径与反射路径在目标上的夹角约 0.12°.

显然,对利用实单脉冲比查表计算方法,误差来源于式(5)中间一项,如果能够将其完全补偿,则基本可以忽略雷达低空目标跟踪时多径所带来的误差.在闭环跟踪中,这些参数除了 ϕ_r 以外或者可以从航迹滤波中得到 (θ, ψ) , 或者可以从天线参数中得到 (g) , 或者可以采用环境模型求得 (v) , 因此可以通过对实单脉冲比的补偿来修正测角误差.

若要更精确的对偏差予以补偿,对相位的正确估计成为关键.文[3]设想从多径几何中估计出相对相位,但对于工作于 15.9GHz 的雷达,9 毫米的路径估计误差就会带来 180° 的相位估计误差,因此只好采用将相对相位位置为零的次优方法(也即固定偏差补偿).

3.2 相对相位的估计

相对相位 ϕ_r 主要包括两个部分,由于反射带来的 ϕ_r (与人射角有关,相对稳定)和由于路径差带来的 ϕ_r (对目标高度变化敏感),都难以从多径几何中估计出来.但图 2 显示出一种有趣的现象,即在接收信号的高信噪比区($\phi_r \rightarrow 0$ 的多径增强区间),复单脉冲比的实部对目标的角度敏感而对相对相位不很敏感(可参考[3], Fig. 5); 虚部对相对相位敏感而对目标的角度不很敏感.这一结论也可以部分通过(5)式的实部和虚部分别对 ϕ_r 求导看出来

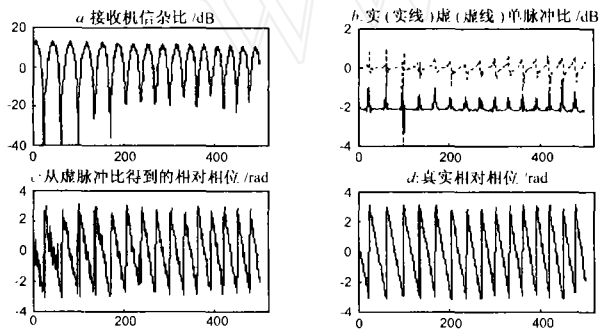


图 2 场景 3 的复单脉冲比图形和相对相位(为对比起见,图 b 的实单脉冲比向下移动两个单位)

$$\frac{d\text{Real}(r)}{d\phi_r} = \Delta r \cdot d \left(\frac{g|v|\cos\phi_r + g^2|v|^2}{1 + 2g|v|\cos\phi_r + g^2|v|^2} \right) / d\phi_r = 0 |_{\phi_r=0} \quad (6)$$

$$\frac{d\text{Imag}(r)}{d\phi_r} = \Delta r \cdot d \left(\frac{g|v|\sin\phi_r}{1 + 2g|v|\cos\phi_r + g^2|v|^2} \right) / d\phi_r = \Delta r \cdot \frac{g|v|}{(1 + g|v|^2)} |_{\phi_r=0} \quad (7)$$

所以,我们首先用复单脉冲比的实部获取目标带偏差的角度信息,再用虚部获取相对相位对此加以补偿,就能既充分利用复单脉冲比的有效信息,又不会将各自的误差相互耦合造成结果的不稳定.利用虚单脉冲比来估计相对相位 ϕ_r 的具体推导见附录,该方法的另一个好处是相对相位是比和通道信号功率更好的阈值设定对象,可以在航迹滤波前对相对相位设定阈值来去除角度测量的尖峰误差,或者作为频率捷变的参考变量.

3.3 仿真性能比较

(1) 常规单脉冲测角(见图 3 的上面 3 幅)

除了场景 1 外,实单脉冲比的偏差都不是固定的,而是迅

速变化的.场景 1 大部分时间存在约 $-0.8 \sim -1\text{mrad}$ 的固定偏差,但也包含 3 个持续时间 3~4s 的幅度达 $10 \sim 20\text{mrad}$ 的尖峰误差;场景 2、3 的误差是动态变化的,而且很剧烈,场景 2 的初期部分由于反射路径回波只从天线副瓣进入而误差较小,场景 3 后段具有明显的固定偏差(约 -2mrad).

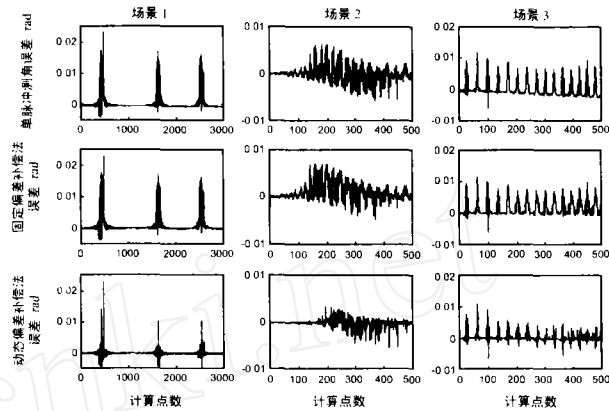


图 3 3 种场景下不同测角方法的误差比较

(2) 固定偏差补偿法(见图 3 的中间 3 幅)

场景 1 由于相对相位变化缓慢,实单脉冲比的大小基本不随反射相位差的变化而变化,因此可以在多数时间段上予以固定补偿;场景 2 和 3 的直接和反射路径间的距离差变化很快,导致相对相位变化也很快(场景 2 还有漫反射在总反射功率中比重大的因素),误差处于固定补偿范围的时间缩短,虽然补偿了固定偏差,但总体误差仍然很大,必须考虑进行相位的动态补偿.

(3) 联合相位的动态偏差补偿法(见图 3 的下面 3 幅)

对于场景 2 和 3,联合相位的动态偏差补偿法的测角精度比固定偏差补偿法提高了很多,尤其是总的误差方差和尖峰误差的持续时间,这一点对后续的航迹滤波很有帮助.

4 结束语

在我们的仿真中,后续航迹滤波采用基于最小二乘的 α - β 滤波器,不同的相位阈值用于不同的场景,在不考虑目标运动的情况下测角误差都达到 $1/15 \sim 1/20$ 波束宽度.由于针对不同种类的目标,其航迹滤波方式变化较大,因此本文不对其进行详细探讨.

本文研究了单脉冲雷达对低空目标进行跟踪所产生的问题,发现此时复单脉冲比的实部和虚部对目标角度估计的贡献是不一致的.综合复角法和固定偏差补偿法的优点,提出一种联合相位的偏差补偿算法.这种算法的特点在于可以工作在某些极端不利的场景中,从单脉冲比的虚部中估计相对相位是这一算法的关键点.通过对雷达实际工作环境的仿真,该算法的有效性得到了充分验证.如何更好地估计相对相位以及在跟踪滤波阶段利用这一参数是下一步的研究课题.

附录:相对相位的解析表达式

定义 r_r 是当前复单脉冲比的虚部, Δr 和 g 是从闭环跟踪得到的相应值, $|v|$ 是从反射模型(1)(2)得到的总反射系数的模.那么,式(5)的虚部为

$$r_i = \Delta r \left(\frac{g|v|\sin\phi_r}{1 + 2g|v|\cos\phi_r + g^2|v|^2} \right) \quad (8)$$

一般情况下 $\delta = g|v| > 0$, 简化(8)有

$$\Delta r/r_i \sin\phi_r - 2\cos\phi_r = (1 + \delta^2)/\delta \quad (9)$$

定义矢量 $\mathbf{a} = [-2, \Delta r/r_i]$, $\mathbf{b} = [\cos\phi_r, \sin\phi_r]$, 数量 $c(1 + \delta^2)/\delta \geq 2$, 则有

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}' = c \quad (10)$$

式(10)可以用图4中的矢量图来解释, \mathbf{a} 是以原点为起始点, 终点 A 沿着一条平行于 Y 轴的直线移动的 ($x = -2$) 的矢量, \mathbf{b} 是另一条以原点为起始点, 矢径为 1 的旋转矢量. 从原点画一个半径为 c 的圆, 从 A 向这个圆作 2 条切线 AB 和 AC . 显然, 当 \mathbf{b} 旋转到 OB 或 OC 的重叠位置时, \mathbf{b} 的角度正是(10)的解. 因此, 从图4我们可以得到两个解 ϕ_1 和 ϕ_2 为

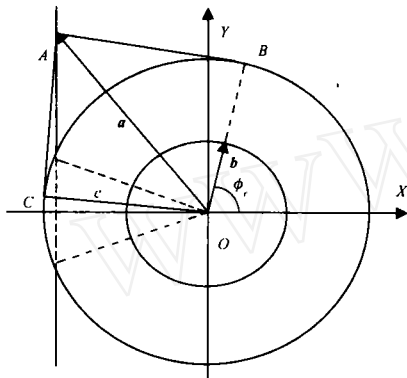


图4 相对相位 ϕ_r 解析表达的矢量图

$$|\phi_{1,2}| = \begin{cases} \pi - \tan^{-1} \left(\frac{|\Delta r/r_i|}{2} \right) \mp \cos^{-1} \left(\frac{(1 + g^2|v|^2)/g|v|}{\sqrt{(\Delta r/r_i)^2 + 4}} \right), & \text{当 } \sqrt{(\Delta r/r_i)^2 + 4} \geq c \\ \text{无解} & \text{当 } \sqrt{(\Delta r/r_i)^2 + 4} \leq c \end{cases} \quad (11)$$

$\phi_{1,2}$ 的符号与 $\Delta r/r_i$ 的相同, 同时, 式(11)也表明解析表达式的输入变量是有限制的, 在求解前必须对它们做一些处理. $\phi_{1,2}$ 解的范围为

$$\begin{cases} 0 \leq |\phi_1| \leq \pi - \cos^{-1}(2/c) \\ \pi - \cos^{-1}(2/c) \leq |\phi_2| \leq \pi \end{cases} \quad (12)$$

只有一个解 ϕ_1 满足我们的要求. 如果输入变量选择的较好 (c 必须在某些地方等于 2), 则 ϕ_1 的值就恰等于在 $[-\pi, \pi]$ 折叠后的相对相位 ϕ_r . 虽然最后获得的相位是折叠的, 但由于补

偿相位位于指数项, 因此可以直接应用.

参考文献:

- [1] S M Sherman. Monopulse Principles and Techniques [M]. Norwood, MA: Artech House, 1984.
- [2] S M Sherman. Complex indicated angles applied to unresolved radar targets and multipath [J]. IEEE Trans on AES, 1971, AES-7(1): 160 - 170.
- [3] E Daeipour, W D Blair, Y Bar-Shalom. Bias compensation and tracking with monopulse radars in the presence of multipath [J]. IEEE Trans on AES, 1997, 33(3): 863 - 882.
- [4] Y Bar-Shalom, A Kumar. Tracking low elevation targets in the presence of multipath [J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(3): 973 - 979.
- [5] M W Long. Radar Reflectivity of Land and Sea [M]. Lexington: D C Heath, Company, 1975.
- [6] H Sittrop. On the sea-clutter dependency on windspeed [C]. London: International Radar Conference, 1977. 110 - 114.
- [7] M I Skolnik. Introduction to Radar Systems [M]. N. Y.: McGraw-Hill Book Company, 1980.

作者简介:



杨世海 1970 年生于陕西省宝鸡市, 1991 年毕业于电子科技大学, 1999 年在国防科技大学获工学硕士, 现在该校攻读博士学位. 主要研究方向为现代信号处理、雷达信号处理、CDMA 通信等.



胡卫东 1967 年生于辽宁省葫芦岛市, 1994 年和 1997 年在国防科技大学分别获得工学硕士和博士学位, 现在该校任副教授. 主要研究方向为雷达目标识别和数据融合等, 已发表论文数十篇.