

文章编号: 1001- 2486(2009) 04- 0048- 04

连续波雷达低仰角测量算法研究*

王 展, 楼生强, 刘海涛, 李双勋, 战永红
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对采用频域比相测角的连续波体制雷达, 提出了一种基于频域比幅测角的低仰角测量算法。通过分析比相测角与比幅测角的关系, 得到可以通过在频域比幅实现连续波雷达角度测量的结论。结合 C^2 算法, 实现了连续波雷达低仰角测量算法。通过实际试验结果分析, 表明该算法具有优良的抗多径干扰性能。

关键词: 连续波雷达; 低仰角目标测量; C^2 算法

中图分类号: TN953.5 文献标识码: A

Algorithm Research on CW Radar Low-altitude Measurement

WANG Zhan, LOU Sheng-qiang, LIU Hai-tao, LI Shuang-xun, ZHAN Yong-hong

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

Abstract: The phase comparison method in frequency domain is usually used in the angle measurement by the conventional CW radar. Based on amplitude-comparison method in frequency domain, a new algorithm of low-angle measurement by CW radar is proposed. An investigation is made to expose the relationship between phase-comparison method and amplitude-comparison method, with the conclusion that the amplitude-comparison method in frequency domain can be used in the angle measurement by the CW radar. Furthermore, the utility of the C^2 algorithm is also studied. Additionally, a new algorithm of low-angle measurement of CW radar is given. Experimental results show that the proposed algorithm is effective for tracking the target in low-altitude environment.

Key words: CW radar; low-altitude target measurement; C^2 algorithm

连续波测速雷达具有测量精度高、结构简单等优点, 在靶场速度测量中有着广泛的应用。常规轻武器枪弹和重武器反坦克导弹等弹丸的弹道为低伸弹道, 飞行高度低。通过雷达测量其弹道参数时, 雷达的视轴俯仰角通常接近零度, 主波束直接照射地面, 出现多路径衰落的距离近且频繁。

目前用于低仰角测量的方法包括多目标分辨法、宽带频率分集法^[1]、利用闭环跟踪的偏差补偿法^[2]、高分辨法^[3]和复角法^[4]等。现有方法都是基于单脉冲比幅测角体制^[5], 采用的是时域分析方法; 靶场测速雷达基于连续波比相测角体制, 采用的是频域分析方法。通常的多径消除技术不能满足其要求。

1 比幅、比相算法之间的关系

1.1 比相测角

在比相测角技术中, 角度是通过直接测量由两个接收天线接收的两路多普勒信号的相位差来实现的, 图 1 给出了它的原理示意图。当目标偏离天线电轴 α 角, 由于目标到两个接收天线的距离不同, 因而两个接收天线接收的回波信号之间有一个相位差 $\Delta\Phi$ 。依据远场假设, 可以认为两条回波路线近似平行, 根据几何关系可以得出:

$$\alpha = \arcsin(\Delta\Phi/P) \quad (1)$$

其中, $P = 2\pi d/\lambda$, d 是两个天线的间距, λ 是雷达发射信号波长。

假设天线 1、2 收到的复信号分别为: $x_0 = (R_0, I_0) = A_0 e^{j\alpha_0}$, $x_1 = (R_1, I_1) = A_1 e^{j\alpha_1}$, 则

* 收稿日期: 2009- 02- 12

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 王展(1972-), 男, 副教授, 博士。

$$\Delta \Phi = \alpha_0 - \alpha_1 = \arctan(I_0/R_0) - \arctan(I_1/R_1) \quad (2)$$

1.2 比幅测角

假设两路天线接收到的信号幅度相等(在实际应用中,预先将两路接收回波信号幅度归一,即可满足假设条件),分别为 $A e^{j(\Phi_+ \phi)}$ 和 $A e^{j(\Phi_- \phi)}$,如图2所示。对比式(2)可知

$$\alpha_0 = \Phi_+ \phi, \quad \alpha_1 = \Phi_- \phi \quad (3)$$

令 S 表示雷达接收和通道信号, $-jD$ 表示雷达正交接收差通道信号,则

$$\begin{aligned} S &= A [e^{j(\Phi_+ \phi)} + e^{j(\Phi_- \phi)}] = 2A e^{j\Phi} \cos \phi \\ -jD &= -jA [e^{j(\Phi_+ \phi)} - e^{j(\Phi_- \phi)}] = 2A e^{j\Phi} \sin \phi \end{aligned}$$

因此可以得出两路天线的相位差 $\Delta \Phi$

$$\Delta \Phi = 2\phi = 2\arctan\left(\frac{-jD}{S}\right)$$

求出相差,利用式(1),可计算出目标的偏差角。

从以上原理不难看出,比幅测角其实是通过比幅来实现相位比较的。在理想情况下, $-jD/S$ 是实数,在实际应用中一般不能满足,可以取其实际部,即

$$\Delta \Phi = 2\phi = 2\arctan\left\{\operatorname{Re}\left[\frac{-jD}{S}\right]\right\}$$

1.3 比幅、比相算法间的关系

对于比幅测角,和差通道信号分别为:

$$S = (R_0 + R_1) + j(I_0 + I_1), \quad -jD = (I_0 - I_1) - j(R_0 - R_1)$$

则幅度比 $\{-jD/S\}$ 为

$$\begin{aligned} \frac{-jD}{S} &= \frac{(I_0 - I_1) - j(R_0 - R_1)}{(R_0 + R_1) + j(I_0 + I_1)} = \frac{2(I_0 R_1 - I_1 R_0) - j(R_0^2 + I_0^2 - R_1^2 - I_1^2)}{R_0^2 + R_1^2 + I_0^2 + I_1^2 + 2(R_0 R_1 + I_0 I_1)} \\ \operatorname{Re}\left[\frac{-jD}{S}\right] &= \frac{2(I_0 R_1 - I_1 R_0)}{R_0^2 + R_1^2 + I_0^2 + I_1^2 + 2(R_0 R_1 + I_0 I_1)} = \frac{1}{\frac{A_0^2 + A_1^2}{2A_0 A_1} \frac{1}{\cos \Delta \Phi} + 1}} \tan \Delta \Phi \end{aligned}$$

如果 $A_0 = A_1$,则对 ϕ 的估算值 $\hat{\phi}$ 满足

$$\tan \hat{\phi} = \operatorname{Re}\left[\frac{-jD}{S}\right] = \left[\frac{-jD}{S}\right] = \frac{1}{\frac{1}{\cos \Delta \Phi} + 1}} \tan \Delta \Phi = \tan(\Delta \Phi / 2)$$

即 $\hat{\phi} = \Delta \Phi / 2 = \phi$ 。如果 $A_0 \neq A_1$,则 $|\hat{\phi}| < |\Delta \Phi / 2|$ 。

因此,如果两路接收回波信号幅度不一致,比幅结果绝对值会比比相结果小,幅度相差越大,两者结果相差越大。由于比相测角不受幅度大小影响,因此在以下讨论的所有算法中,都先将回波信号幅度归一化后再进行角度运算。

2 连续波雷达低仰角测量算法

C^2 算法已被证实可以应用于单脉冲比幅测角体制雷达低俯仰角的实时跟踪及事后处理,提高俯仰角的测量精度。针对连续波雷达采用频域分析和比相测角方法,提出通过 FFT 在频域上构造和差信号进行比幅,继而实现比相的测角方法。结合 C^2 算法,实现了连续波雷达低仰角测量算法。

2.1 C^2 算法原理

C^2 算法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

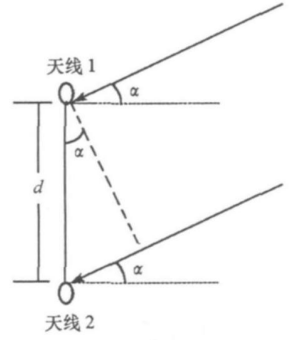


图1 比相测角原理示意图
Fig. 1 Phase comparison principle

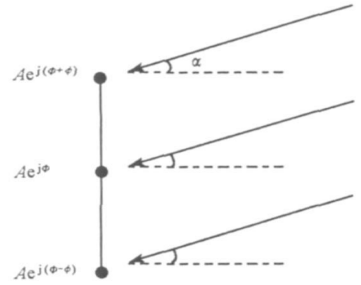


图2 比幅测角原理示意图
Fig. 2 Amplitude comparison principle

数值,从而推算出目标的角坐标。

设天线接收到的回波和差信号分别表示为 S 和 D , C^2 算法给出目标和镜像组合的几何中心位置 B 和角度分布范围 C^2 的估计表达式为

$$B = \frac{\langle S^* D \rangle}{\langle S^* S \rangle} = \frac{\langle SD^* \rangle}{\langle S^* S \rangle}, \quad C^2 = \frac{\langle DD^* \rangle}{\langle SS^* \rangle} - B^2$$

目标与雷达波束轴夹角 θ 和镜像与雷达波束轴夹角 θ 分别为

$$\theta = B + \frac{1}{2} \sqrt{C^2}, \quad \theta = B - \frac{1}{2} \sqrt{C^2}$$

2.2 频域实现方法

在频域测角技术中角度测量与在频域测速技术中速度测量一样,是利用数字频谱分析技术来实现的,并且是在频域测速的基础上完成的。设 $x_1(n)$, $x_2(n)$ 表示同一时刻分别来自两路接收机的零中频采样序列,对其进行 FFT 计算和谱峰搜索,可获得两路多普勒信号(假定其归一化频率为 m) 频谱:

$$X_1(m) = X_{1R}(m) + jX_{1I}(m), \quad X_2(m) = X_{2R}(m) + jX_{2I}(m)$$

连续波雷达比幅测角实质是通过比幅来实现相位比较。仍然把多径反射回波看成是镜像目标回波,对连续波体制下的 C^2 算法作如下定义:

和差信号:

$$D = X_1(m) - X_2(m), \quad S = X_1(m) + X_2(m) \quad (4)$$

B 和 C 估计:

$$\hat{B}_n = \frac{\sum_{i=n-N+1}^n \operatorname{Re}[-jD_i^* S_i]}{\sum_{i=n-N+1}^n S_i^* S_i}, \quad \hat{C}_n^2 = \frac{\sum_{i=n-N+1}^n D_i^* D_i}{\sum_{i=n-N+1}^n S_i^* S_i} - \hat{B}_n^2 \quad (5)$$

相差计算:

$$\Delta \Phi = 2 \arctan(B + C/2) \quad (6)$$

目标误差角计算:

$$\hat{\alpha} = \arcsin(\Delta \Phi / P), \quad P = 2\pi d / \lambda \quad (7)$$

2.3 算法实现

在算法进行之前必须对连续波回波数据进行等时段截取。通过频谱搜索,获得回波信号的幅度和相位。算法实现的流程图如图 3 所示。

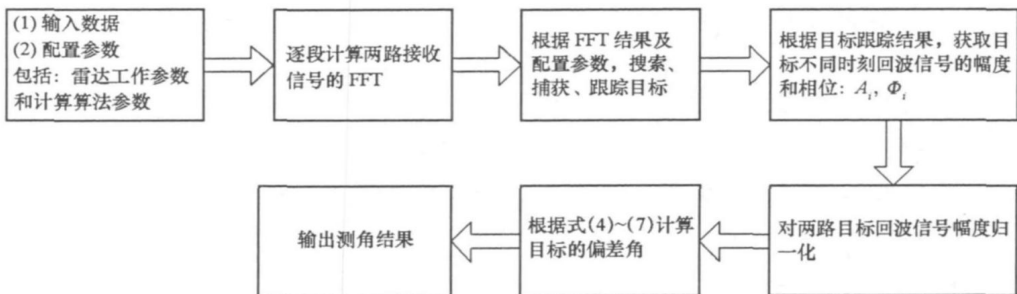


图 3 连续波雷达低仰角测量算法流程图

Fig. 3 Diagram of the proposed algorithm for low-angle measurement of CW radar

3 实测数据与结果分析

试验在平地上进行,采用 X 波段连续波测速雷达,波束宽度 2° 、雷达高度 1.5m。分别对 4 种类型轻武器进行实弹射击,各采集 5 发数据。射角包括 1° 、 2° 和 3° ,目标最大飞行高度根据武器和设计的射角不同选择为 10~50m。图 4 为 4 种类型武器实测第 1 发数据俯仰角测量结果。

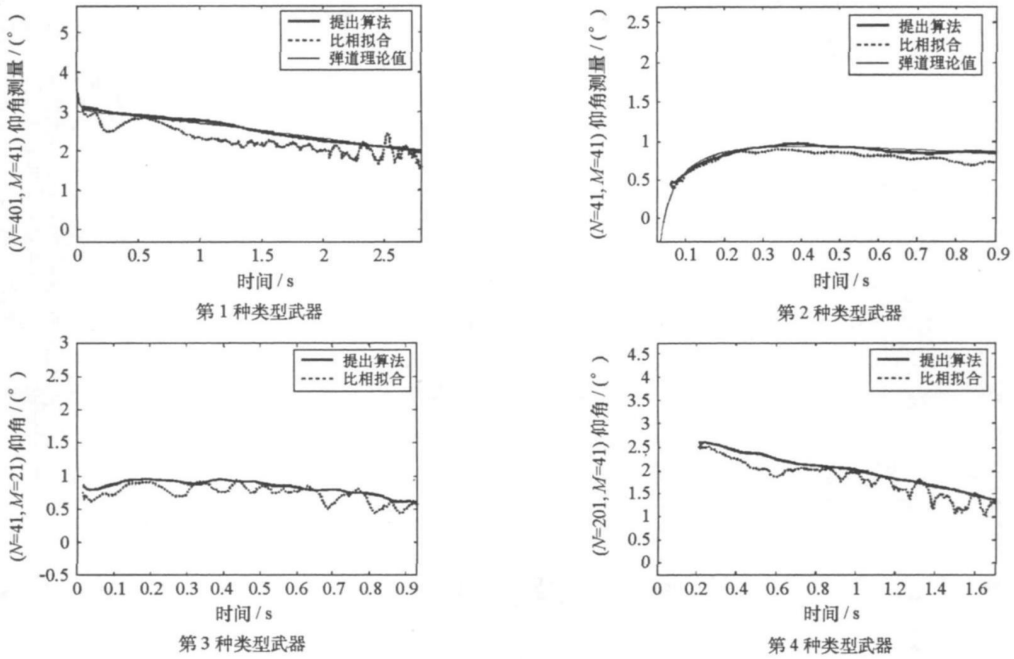


图4 实测数据俯仰角测量结果

Fig. 4 Elevation measurement results of real experimental data

关于试验结果的系统误差分析,需要对测量值与真值进行比较。由于只有前两种武器有真值作为参考,只对该两种武器进行系统误差分析。由于雷达布站的原因,天线中心与枪口存在坐标差,俯仰角真值是以枪口为中心的,雷达测量是以天线为中心的,因此真值与测量值进行比对时进行了坐标修正。

通过对 20 发试验数据处理结果的分析,提出方法系统误差、随机误差,与比相测角结果相比,有非常明显的改善,如表 1 所示。所提方法的测角结果可以满足实时跟踪的需求,验证了提出的连续波雷达低仰角测量方法的有效性。

表 1 实际数据俯仰角误差

Tab. 1 Elevation angle error of real experimental results

试验内容	发数	比相系统差 (mrad)	比相随机差 (mrad)	提出算法系统差 (mrad)	提出算法随机差 (mrad)
武器 1, 射角 3°	5	3.6~ 6.2	5~ 10.3	0.2~ 0.9	0.4~ 0.7
武器 2, 射角 1.1°	5	0.7~ 1.4	1.1~ 2.0	0.1~ 0.25	< 0.1
武器 3, 射角 1.6°	5		1.7~ 4.5		< 0.1
武器 4, 射角 2.5°	3				< 0.1
武器 4, 射角 1.2°	2		7~ 9.4		< 0.1

4 结束语

研究了连续波雷达对低空目标俯仰角跟踪测量的问题。在某雷达系统中应用提出算法对多径环境下运动目标的俯仰角进行了跟踪测量。通过实测数据结果分析,提出算法的有效性和稳健性得到了充分的验证。下一步的研究工作是如何尽快在工程上验证其性能。

参考文献:

- [1] 吕韶昱. 相控阵雷达低空目标仰角测量算法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [2] 杨世海, 胡卫东, 杜小勇. 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.
- [3] 范志杰, 尚社. 一种用于低空目标探测与跟踪的新方法[J]. 雷达科学与技术, 2004, 3(2): 153- 157.
- [4] 杨世海, 王立冬, 韩兴斌. 复角法存在的问题及其改进[J]. 现代雷达, 2004, 26(5): 13- 16.
- [5] Skolnik M I. Radar Handbook[M]. Second Edition. 王军, 米慈中, 许绍杰, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [6] 祝一薇, 楼生强, 王展, 等. 单脉冲雷达低仰角测量的 C^2 算法研究[J]. 电光与控制, 2008, 11(15): 36- 40.