

基于改进 C^2 算法的双目标角度估计方法

王李波¹ 吴卫山^{1,2}

WANG Libo WU Weishan

摘要

角度是雷达探测和跟踪目标的重要信息,主波束宽度通常决定了雷达角度分辨率,当雷达主波束范围内包含不止一个目标时,采用传统的和差测角方法只能获得多目标的合成角度位置,不能获得场景中目标的真实角度值,严重影响了雷达对真实目标的截获和跟踪。针对雷达主波束内存在双目标的场景,首先通过理论分析和数值仿真说明双目标对和差测角的影响,再结合传统 C^2 多目标角度估计算法在和差测角中的应用,给出一种改进的 C^2 角度估计算法。最后,通过数值仿真验证了所提出的方法在双目标回波能量相同和不同场景下均适用,且角度估计精度相对传统多目标角度估计方法明显提升。

关键词

双目标;和差测角;角度不可分;改进 C^2 算法;目标角度估计

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.03.008

0 引言

精确测量目标的角度信息是雷达的重要功能,雷达测角分辨率主要受主波束宽度的限制,当雷达主波束范围内存在多个目标时,采用传统和差测角方法输出的角度为多目标合成结果^[1-2],不能反映场景中目标的真实角度。针对主波束内多目标角度不可分问题,相关学者开展了大量研究工作,如距离、速度和角度高分辨算法^[3-7],通过提高雷达在某一维度的分辨率实现目标分离后再测角,但信息高分辨需要增加雷达带宽和孔径尺寸等,硬件成本和运算量线性增加。基于和差三通道多目标分辨算法^[8-16](C^2 算法)可以在已有硬件基础上,且不需要改变雷达发射波形,仅通过信号处理实现雷达主波束内不可分双目标角度估计,具有良好的工程应用前景,但仅能在双目标回波能量相当时取得较好的角度估计结果,适用场景有限。

本文在传统 C^2 算法基础上,结合和差测角原理,通过理论推导给出一种改进的双目标角度估计方法,并通过数值仿真说明本文方法的有效性。

1 单脉冲和差测角原理

单脉冲和差测角雷达通过和路、差路分别接收目标回波信号,通过和差比实现目标角度测量,相对波束扫描测角体制雷达,单脉冲测角雷达具有测角精度高和抗干扰能力强等优点,是目前广泛应用的一种雷达测角体制。

单脉冲测角雷达不需要通过扫描雷达机械轴或者电轴进

行角度测量,和差波束仅需要单次回波数据就可以准确测量目标角度,有效抑制目标回波能量起伏对测角精度的影响。和差波束可以通过模拟和差器或数字和差实现,其中数字和差方法可以减少硬件通道不一致对和差回波幅度和相位的影响,且数字处理灵活,本文主要介绍数字和差测角的原理。在不影响测角原理情况下,将雷达测角方向的天线孔径阵面等分为两个阵面中心,该假设不会影响测角回波建模和理论分析。

单脉冲雷达和差波束测角如图1所示,左右两个等效天线阵面中心位于水平天线基线上,且距离天线阵面中心点 O 的距离均为 d 。

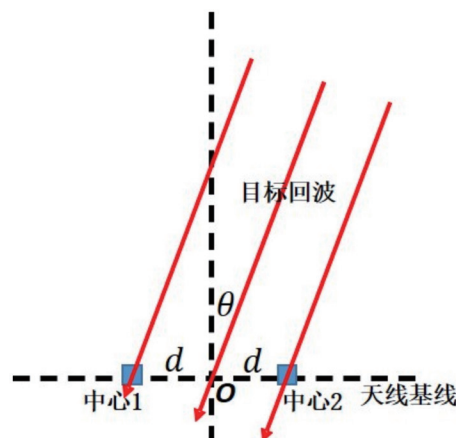


图1 单脉冲和差测角示意图

垂直方向的和差测角可以通过在垂直天线基线方向设置天线单元,通过相同的信号处理方法实现其它方向角度测量,受文章篇幅限制,本文不再重复说明。假设天线电轴垂直天线阵面,目标回波方向与天线电轴夹角为 θ 。在不考虑噪声

1. 中国空空导弹研究院 河南洛阳 471009

2. 空基信息感知与融合全国重点实验室 河南洛阳 471009

的情况下, 天线中心 1 和中心 2 接收到的目标回波信号可以分别表示为:

$$\begin{aligned} s_1 &= A \exp(j\omega t + jkd \sin \theta) \\ s_2 &= A \exp(j\omega t - jkd \sin \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: A 表示目标回波幅度, ω 表示回波角频率, k 表示波数。

不考虑回波信号中的快时间项, 两个天线中心接收信号的幅度和相位可以表示为:

$$\begin{aligned} s_1 &= A \exp(jkd \sin \theta) \\ s_2 &= A \exp(-jkd \sin \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

通过对式 (2) 中两路信号进行数字和差, 得到和差比如下:

$$\frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2} = j \tan(kd \sin \theta) \quad (3)$$

取虚部结果如下:

$$\text{Im} \left\{ \frac{\Delta}{\Sigma} \right\} = \tan(kd \sin \theta) \quad (4)$$

当目标方向和天线电轴夹角较小时, 根据上式可以得到目标角度值:

$$\theta \approx \frac{1}{kd} \text{Im} \left\{ \frac{\Delta}{\Sigma} \right\} \quad (5)$$

当雷达主波束内只存在一个目标时, 采用式 (5) 单脉冲和差测角公式可以准确计算目标的角度信息。如果雷达主波束内存在两个目标, 假设目标 1 和目标 2 与雷达电轴的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 , 此时两个天线阵元中心接收到的信号可以分别为:

$$\begin{aligned} s_1 &= A \exp(jkd \sin \theta_1) + B \exp(jkd \sin \theta_2) \\ s_2 &= A \exp(-jkd \sin \theta_1) + B \exp(-jkd \sin \theta_2) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: A 和 B 分别表示目标 1 和目标 2 的回波信号复幅度。

按照和差测角公式, 目标角度计算结果如下:

$$\theta = \frac{1}{kd} \text{Im} \left\{ \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2} \right\} \quad (7)$$

从式 (7) 可以看出, 双目标场景下和差测角只能给出一个角度值, 且测角结果与双目标的幅相差直接相关。记双目标的幅度和相位差分别为:

$$\begin{aligned} \Delta \text{snr} &= \text{snr}_1 - \text{snr}_2 \\ \Delta \varphi &= \varphi_1 - \varphi_2 \end{aligned} \quad (8)$$

图 2 给出主波束内存在两个目标时, 不同回波信号幅度和相位差对单脉冲和差测角的影响, 其中两个天线中心间距 14 cm、载频 15 GHz、目标 1 角度为 0.5° 、目标 2 角度为 -0.5° , 横坐标表示回波相位差, 纵坐标表示角度测量值, 目标 1 和目标 2 的能量差从 0 dB 变化到 15 dB。从图 2 仿真结果可以看出, 由于目标 1 回波能量大于目标 2 回波能量, 和差测角结果全部偏向目标 1, 且能量差越大测角离目标 1 越近, 反

之也成立。双目标的合成测角结果会超出双目标角度范围, 尤其当两个目标回波能量相等, 相位差接近 180° 时, 此时双目标回波能量相互抵消, 回波叠加波前在雷达处发生畸变, 测角结果完全偏离真实目标方向。

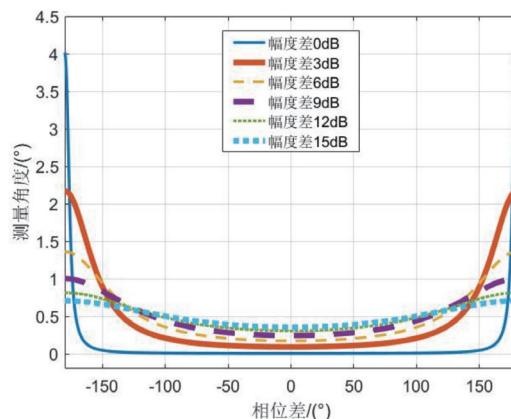


图 2 双目标合成测角结果

综上, 当雷达主波束内存在 2 个目标时, 直接采用单脉冲和差测角结果与真实目标位置存在较大偏差, 严重影响雷达对目标的检测和跟踪, 需要对测角结果进行修正。

2 改进 C^2 测角原理

C^2 算法进行双目标角度估计的基本思想是利用一串独立回波脉冲统计双目标的角度几何中心及张角, 根据角度中心和张角确定两个目标的角度位置, 根据双目标角度位置关系先验信息, 雷达选择其中一个目标进行跟踪。

单脉冲和差测角首先对雷达等效中心回波数据进行数字和差, 得到等效和差波束接收目标信号, 假设雷达和差通道接收的信号复幅度 S 和 D 分别为:

$$\begin{aligned} S &= S_I + jS_Q \\ D &= D_I + jD_Q \end{aligned} \quad (9)$$

式中: S_I 和 S_Q 分别表示和路信号的实部和虚部, D_I 和 D_Q 分别为差路信号的实部和虚部, j 表示虚数单位。

根据 C^2 角度估计原理, 双目标的角度几何中心位置 B 和角度分布范围 C 可以表示为:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\langle D^* S \rangle}{\langle S^* S \rangle} = \frac{\langle DS^* \rangle}{\langle SS^* \rangle} \\ C^2 &= \frac{\langle DD^* \rangle}{\langle SS^* \rangle} - B^2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\langle D^* S \rangle$ 表示求信号 D 和 S 的内积。

在实际应用过程中, 和差路接收信号个数有限, 角度中心 B 和角度范围 C^2 的估计表达式为:

$$\begin{aligned} \hat{B} &= \frac{\sum \text{Re}(D_n^* S_n)}{\sum S_n^* S_n} \\ \hat{C}^2 &= \frac{\sum D_n^* D_n}{\sum S_n^* S_n} - \hat{B}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

式中： n 表示单次独立测量， $*$ 表示求共轭算符， $\text{Re}()$ 表示复数求实部函数。

根据双目标空间位置关系，可以得到目标 1 和目标 2 相对雷达视轴俯仰角 θ_1 和 θ_2 分别为：

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \hat{B} + \frac{1}{2}\sqrt{\hat{C}^2} \\ \theta_2 &= \hat{B} - \frac{1}{2}\sqrt{\hat{C}^2}\end{aligned}\quad (12)$$

上式结果假设双目标场景的和差测角结果为两个目标的几何中心，且两个目标的角度均匀分布在角度中心的两侧。当两个目标的回波能量和相位满足相同分布时，该假设成立，但当两个目标回波能量存在差异时，和差测角结果明显会偏向能量大的目标，上述假设不再成立。考虑目标 2 和目标 1 的回波能量比为 α ，重新对合成目标的中心和角度分布进行理论推导，可以得到结果：

$$\begin{aligned}E(\hat{B}) &= \frac{\theta_1 + \alpha\theta_2}{1 + \alpha} \\ E(\hat{C}^2) &= \frac{\alpha(\theta_1 - \theta_2)^2}{(1 + \alpha)^2} \\ \theta_1 &= \hat{B} + \sqrt{\alpha\hat{C}^2} \\ \theta_2 &= \hat{B} - \sqrt{\hat{C}^2/\alpha}\end{aligned}\quad (13)$$

式中： $E()$ 表示期望运算。可见，优化后的测角公式考虑了双目标回波能量差异，可以实现对双目标回波能量存在差异场景进行角度估计，实际应用中双目标能量比可以通过目标类型等先验信息或其它辅助测量手段获取。

3 数值仿真结果

不失一般性，假设雷达中心间距 14 cm、载频 15 GHz、两个目标与雷达电轴夹角分别为 0.3° 和 -0.8° 。分别对两个目标回波能量相同和不同场景，采用和差测角、传统 C^2 算法和改进 C^2 算法的测角结果进行对比，其中每次估计进行 100 次独立测量，并选择目标 1 作为要跟踪的目标进行角度测量对比，仿真结果如下。

3.1 双目标回波能量相同场景

双目标回波能量相同，数字仿真测角结果如图 3 和 4 所示：直接采用和差测角的结果处于目标 1 和目标 2 之间，不能准确指示场景中任一目标的真实角度，且测角结果存在较大波动；传统 C^2 角度估计结果相对和差测角结果存在一定改善，测角结果波动明显减小，且测角更加偏向期望跟踪的目标 1；改进 C^2 角度估计结果相对传统 C^2 角度估计结果误差进一步减小，且角度估计结果分布在真实目标附近，测角性能明显提升，证明该方法对回波能量相同场景的适应性。

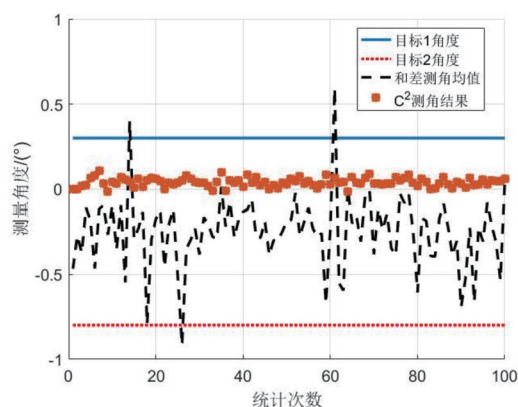


图 3 能量相同 C^2 角度估计结果

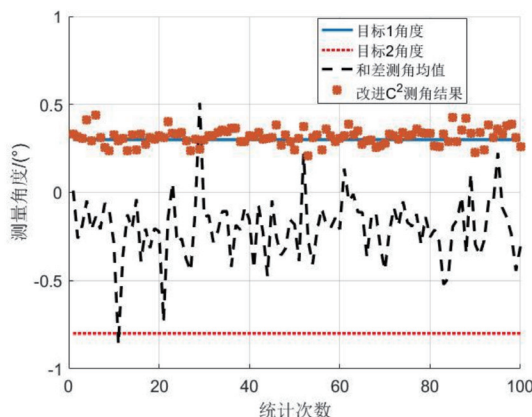


图 4 能量相同改进 C^2 角度估计结果

3.2 双目标回波能量不同场景

仿真条件与双目标回波能量相同场景类似，但目标 2 回波能量比目标 1 回波能量高 5 dB，仿真结果如图 5 和 6 所示。直接采用和差测角结果明显偏向能量更强的目标 2，且测角存在较大波动；传统 C^2 角度估计结果相对直接采用和差测角结果存在一定改善，波动明显变小且更加偏向期望的目标 1，但是距离目标 1 依然存在较大偏差；改进 C^2 角度估计结果相对传统 C^2 角度估计结果误差进一步减小，且角度估计结果分布在期望目标附近，测角性能明显提升。

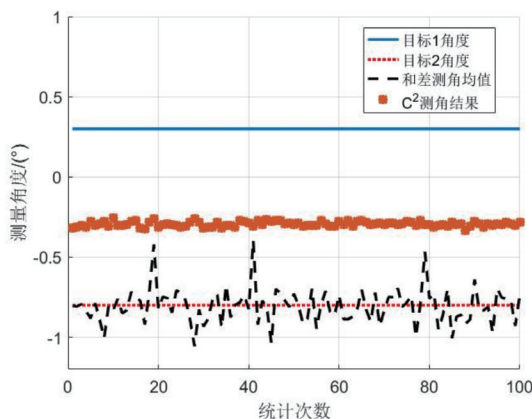


图 5 能量不同 C^2 角度估计结果

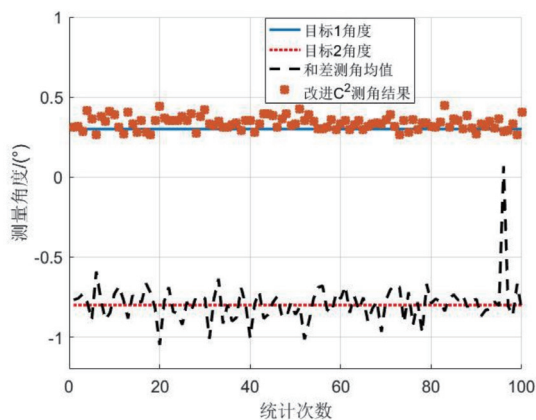


图6 能量不同改进 C^2 角度估计结果

综上数值仿真结果,本文提出的改进 C^2 角度估计算法可以适用于双目标回波能量相同和存在差异的场景,相对传统多目标角度估计算法,扩大了 C^2 角度估计的适应范围,且角度估计精度明显提升。

4 结论

本文通过理论推导和数值仿真给出雷达主波束内双目标对单脉冲和差测角的影响,结合传统 C^2 角度估计思想,对角度估计算法进行优化。通过数值仿真对比,证明本文给出的改进 C^2 角度估计算法可以提高双目标的角度估计精度,且适用于双目标能量相同和不同场景。

参考文献:

- [1] 陈涛,李君,汪向阳,等.基于注意力机制的雷达有源干扰信号识别[J].航空兵器,2021,28(5):86-91.
- [2] 王海军,聂孝亮,刘海业,等.基于二分法STFT的宽带信号检测算法研究[J].航空兵器,2019,26(3):33-39.
- [3] 肖宇,郑桂妹,宫健.单脉冲角跟踪误差影响因素分析[J].弹箭与制导学报,2017,37(2):18-22.
- [4] 刘继东,吴金亮,孙书恩.某单脉冲雷达多路径仰角跟踪误差建模与计算[J].装备指挥技术学院学报,2007,18(1):84-86.
- [5] 吕韶昱,万建伟,辛勤.海面多径环境下雷达目标俯仰角测量提取的研究与应用[J].国防科技大学学报,2007(5):48-53.
- [6] YANG S H, HU W D, DU X Y. Bias compensation research for low-altitude target tracking[J]. Acta electronica sinica, 2002, 30(12):1741-1744.
- [7] ELGAMEL S A, SORAGHAN J J. Enhanced monopulse radar tracking using fractional fourier filtering in the presence of interference[C]//2010 11th International Radar

Symposium. Piscataway: IEEE, 2010: 378-381.

- [8] WANG Z, SINHA A, WILLETT P, et al. Angle estimation for two unresolved targets with monopulse radar[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2004, 40(3):998-1019.
- [9] SHERMAN, SAMUEL. Complex indicated angles applied to unresolved radar targets and multipath[J]. IEEE transactions on aerospace & electronic systems, 1971, AES-7(1):160-170.
- [10] BAUM M, WILLETT P, HANEBECK U D, et al. Polynomial-time algorithms for the exact MMOSPA estimate of a multi-object probability density represented by particles[J]. IEEE transactions on signal processing a publication of the IEEE signal processing society, 2015, 63: 2476-2484.
- [11] NANDAKUMARAN N, SINHA A, KIRUBARAJAN T. Joint detection and tracking of unresolved targets with a joint-bin processing monopulse radar[C]//Signal and Data Processing of Small Targets 2006. Bellingham, WA: SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2006: 1-10.
- [12] 吕韶昱,万建伟,辛勤. C^2 动态相位估计的偏差补偿算法:雷达低空目标俯仰角测量提取的研究与应用[J].信号处理,2008,24(3):450-455.
- [13] 吕韶昱,熊伟,万建伟,等. C^2 算法在雷达低空目标俯仰角测量中的应用[J].现代雷达,2007,29(7):41-44.
- [14] 姜来春.基于 C^2 算法海杂波抑制在低仰角跟踪时的应用[J].现代电子技术,2013(13):25-27.
- [15] 方宗奎,张会成,吕韶昱,等.雷达低空目标俯仰角跟踪的 C^2 算法研究[J].海军航空工程学院学报,2007(4):431-434.
- [16] 巢育龙,胡庆荣,李迎春.变系数 C^2 算法在雷达低空目标角度测量中的应用[J].空军预警学院学报,2013,27(2):1845-1848.

【作者简介】

王李波(1989—),男,河南新乡人,硕士研究生,工程师,研究方向:雷达信号与信息处理。

吴卫山(1968—),男,河南洛阳人,硕士研究生,研究员,研究方向:雷达系统设计。

(收稿日期:2023-12-25)