

基于粒子群算法的多波位高度估计方法

杨明远, 崔永香, 江利中, 陈曦, 黄勇, 李雁斌

(上海无线电设备研究所, 上海 200090)

摘要:为解决雷达斜视模式下对目标区域的高度估计问题,提出了一种基于粒子群算法的多波位高度估计方法。利用粒子群优化算法建立约束条件和目标函数,通过多次迭代使目标函数趋于一个最优值,同时得到高度的最优解。利用粒子群优化算法求解多波位测高方程组可减小方程组近似处理误差。此外,利用粒子群优化算法可随时更改波位数目,增强了该测高方法使用的灵活性,有效提高了高度估计精度。通过理论仿真和实测数据仿真分析,验证了粒子群优化算法在求解多波位测高方程组时的有效性。结果表明:该方法具有较高的高度估计精度。

关键词:斜视模式;多波位高度方法;粒子群算法;约束条件;目标函数

中图分类号:TN959.3

文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.05.008

Multi-Beam Altitude Estimation Method Based on Particle Swarm Optimization

YANG Mingyuan, CUI Yongxiang, JIANG Lizhong, CHEN Xi, HUANG Yong, LI Yanbin

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract:In order to estimate the altitude of the target area in the radar squint mode, a kind of multi-beam altitude estimation method based on particle swarm optimization algorithm is proposed. The particle swarm optimization algorithm is used to establish constraints and objective function. Through multiple iterations, the objective function tends to be an optimal value, and a highly optimal solution is obtained. The particle swarm optimization reduces the approximate processing error of the equations. In addition, the use of particle swarm optimization algorithm allows the number of beams to be changed at any time, which enhances the flexibility of the altimetry method and effectively improves the accuracy of the estimation. Through theoretical simulation and actual data simulation analysis, the effectiveness of the particle swarm optimization algorithm in solving the multi-beam height measurement equations is verified. The results show that the algorithm achieves a relatively high accuracy in altitude estimation.

Keywords:squint mode; multi-beam altitude estimation method; particle swarm optimization; constraints; objective function

0 引言

对雷达测高的研究最早可追溯到 20 世纪 70 年代。美国国家航空航天局于 1970 年开展了对卫星测高的论证和研究。1972 年,斯坦利等率先研制出 S-193 雷达测高计。1975 年,美国发射了 GEOS-3 测高卫星。1985 年,美国发射了 GEOSAT 测高卫星。随后,美国国家航空航天局、法国国家空间研究

中心和欧洲空间局发射了 ERS-1/2、TOPEX/Poseidon(T/P)、GFO、ENVISAT、ICESAT、Jason-1/2、CRYOSAT-2 等多颗测高卫星。我国对测高的研究起步较晚。1995 年,中国科学院研制出国内第一部机载测高计。2011 年,“海洋二号”(HY-2)测高卫星发射成功^[1-3]。

利用高度计测高需要安装一个天线,垂直向下

收稿日期:2017-05-18;修回日期:2017-06-16

基金项目:上海市优秀技术带头人项目(17XD1422800)

作者简介:杨明远(1991—),男,硕士,主要研究方向为雷达信号处理。

发射信号,通过测量回波延时来测量高度,该方法只能测得平台正下方的高度,且需要平台配备额外的负载。文献[4-7]提出了一种基于多普勒中心的高度估计方法,该方法无法在正侧视模式下使用,也无法在波足中心线与雷达视线的投影不重合的情况下直接使用。文献[8-9]提出了一种基于俯仰和差通道的雷达高度估计方法,当波足中心线与雷达视线的地面投影不重合时,雷达对高度的估计存在偏差。上述高度估计方法在实际应用中都存在一些问题。

雷达平台相对于目标的高度是雷达的重要参数之一。在雷达斜视模式下,雷达平台与目标区域的相对高度较难估计。本文提出的基于粒子群优化(PSO)算法的多波位高度估计方法,可应用于正侧视模式和前斜视模式,也可在平台存在俯冲速度的情况下使用^[10-12]。只要波足中心线与雷达视线的地面投影的偏离程度不是很大,就可使用该方法进行高度测量^[13]。此外,该方法的高度估计精度受场景散射强度不均匀情况的影响也较小。因此,结合粒子群算法求解多波位测高方程组,进行高度测量,可有效提高测高精度。

1 测高算法的设计

多波位测高方法解决了平台与目标区域之间相对高度的测量问题,而粒子群优化算法为求解多波位测高方程组的一种有效方法。多波位测高的基本原理是雷达平台在多个不同位置对目标区域进行照射,利用目标区域反射回来的雷达回波,测得目标区域与平台的波束中心距离,即斜距,并测得波束中心与地平面的夹角,即擦地角。根据斜距、擦地角和高度之间的几何关系,利用粒子群优化算法估计平台与目标区域的相对高度。这种通过联合多个波位的回波的斜距和擦地角进行高度测量的方法可有效提高测高精度。多波位测高算法的具体实施步骤如下^[9]。

1.1 测高模型的构建

根据算法的基本原理,设计多波位测高的几何模型。在雷达平台飞行航迹中,选择多个不同位置照射同一目标场景,本文以 4 个不同波位为例,录取雷达回波,形成入射角度不同的 4 个波位,多波位测高模型如图 1 所示。

1.2 多波位测高方程组

根据测高的几何模型建立多波位测高方程组,

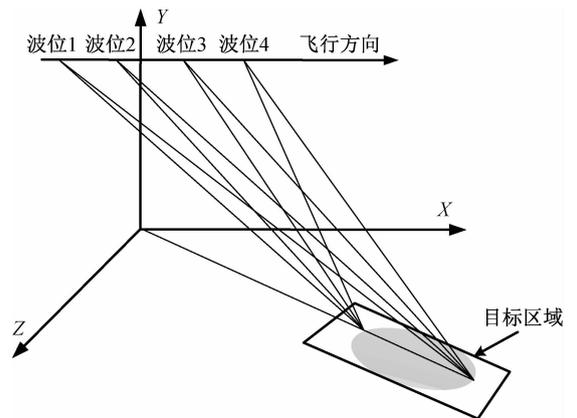


图 1 多波位测高模型

Fig. 1 Multi-beam altitude measurement model

由斜距乘以擦地角的正弦值得到高度,则可列出如下方程组,即

$$\begin{cases} H_1 = R_1 \sin(\beta_1 - \Delta_1) \\ H_1 + h_{21} = R_2 \sin(\beta_2 - \Delta_2) \\ H_1 + h_{31} = R_3 \sin(\beta_3 - \Delta_3) \\ H_1 + h_{41} = R_4 \sin(\beta_4 - \Delta_4) \end{cases} \quad (1)$$

式中: H_1 为波位 1 的平台真实高度; h_{i1} ($i=1, 2, 3, 4$) 为第 i 个波位与第 1 个波位的平台高度差; R_i 为第 i 个波位测量的斜距; β_i 为第 i 个波位测量的擦地角; Δ_i 为擦地角误差。

1.3 解多波位测高方程组

对于式(1)的多波位测高方程组,联立多个测高方程。利用粒子群优化算法可求出并消除擦地角误差,从而有效提高测高精度。本文利用粒子群优化算法,建立合适的约束条件和目标函数,通过多次迭代解出式(1)超定方程组的解,得到高度的估计值。

1.4 算法的有效边界条件

根据实际应用情况提出算法的有效边界条件。为保证方程组(1)有精度较高且唯一的解,该测高模型系统需满足以下边界条件:

1) 在测高孔径时间内,惯性导航的姿态角误差变化不明显,即认为 $\Delta_1 \approx \Delta_2 \approx \Delta_3 \approx \Delta_4$ 。满足此边界条件时,方程组(1)为可求唯一解的超定方程组。

2) 惯性导航系统可较为精确地测量不同波位间的高程差,即 h_{21} 、 h_{31} 、 h_{41} 可被精确测量。

3) 多个波位间应存在一定的差异性,相邻波位间要留有足够的距离,即保证方程组(1)中的 4 个方程具有独立性。

多波位测高方法依赖于惯性导航系统对平台姿态变化的测量精度,以及 4 个波位间的平台高度变化量。因此,测高精度一定程度上会受到惯性导航系统精度的影响。

2 粒子群算法优化测高方程组

2.1 建立约束条件和目标函数

通过粒子群算法对方程组进行优化可快速简便地得到方程组的解。而且,利用粒子群优化算法求解多波位测高方程组可任意改变方程个数,即波位个数。在利用粒子群算法前,需对测高方程组进行如下处理,即

$$\begin{cases} H_1 \approx R_1 \sin(\beta_1 - \Delta) \\ H_1 + h_{21} \approx R_2 \sin(\beta_2 - \Delta) \\ H_1 + h_{31} \approx R_3 \sin(\beta_3 - \Delta) \\ H_1 + h_{41} \approx R_4 \sin(\beta_4 - \Delta) \end{cases} \quad (2)$$

经处理后的方程组有 2 个变量,分别为擦地角误差 Δ 和高度值 H_1 。在使用粒子群优化算法优化多波位测高方程组时,需建立一个合适的数学模型 $f(x) = 0$, 由此得到如下模型,即

$$\begin{cases} f_1(H_1, \Delta) = R_1 \sin(\beta_1 - \Delta) - H_1 \\ f_2(H_1, \Delta) = R_2 \sin(\beta_2 - \Delta) - h_{21} - H_1 \\ f_3(H_1, \Delta) = R_3 \sin(\beta_3 - \Delta) - h_{31} - H_1 \\ f_4(H_1, \Delta) = R_4 \sin(\beta_4 - \Delta) - h_{41} - H_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中:高度 H_1 和擦地角误差 Δ 为方程组的待优化变量。

在利用粒子群优化算法前还需建立变量的约束条件,结合实际经验建立变量 Δ 和 H_1 的约束范围为

$$\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max} \quad (4)$$

$$H_{\min} \leq H_1 \leq H_{\max} \quad (5)$$

式中: Δ_{\min} 和 Δ_{\max} 分别为 Δ 的上限约束值和下限约束值; H_{\min} 和 H_{\max} 分别为 H_1 的上限约束值和下限约束值。

利用粒子群算法求解测高方程组,需要不断进行优化迭代,最终得到方程组的一组最优解。因此,需要将求解测高方程组问题转化为一个求极值的问题。在粒子迭代出一个极值时,对应的擦地角误差值和高度值便是方程组的一组最优解。因此,建立目标函数

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^m (f_i(H_1, \Delta))^2} \quad (6)$$

式中: m 为方程个数,即波位数。由式(6)的模型可知,该函数是一个有最小值的函数, δ 的理论最小值为 0。因此,在粒子不断迭代的过程中,当 δ 不断逼

近最小值时,便得到测高方程组的一组最优解。

2.2 优化步骤

粒子群算法优化迭代过程的第一步为初始化参数,包括初始化必要的因子及粒子的初始位置和步进值,其中,粒子的位置都在上述建立好的约束条件范围内。由式(6)初始化粒子的适应度值。每次迭代都要更新步进值,步进更新公式为^[14-18]

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + C_1 \xi (p_{id}^k - x_{id}^k) + C_2 \eta (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (7)$$

式中: V_{id}^{k+1} 为第 i 个粒子 $k+1$ 次迭代后的步进值; d 为粒子维数; ξ 和 η 为 $[0, 1]$ 区间的均匀分布的随机数; p_{gd}^k 为 k 次迭代后所有粒子的最优位置; ω 为惯性权重; C_1 和 C_2 为学习因子,一般为常数; p_{id}^k 为 k 次迭代后第 i 个粒子的最优位置。

粒子群优化算法的位置更新公式为^[18]

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + rV_{id}^{k+1} \quad (8)$$

式中: x_{id}^k 为 k 次迭代后第 i 个粒子的位置; r 为约束因子。

最后,由目标函数来计算当前迭代的全局最优解和个体最优解。更新全局最优解,并判断是否迭代完成且迭代结果最优。如果否,则继续迭代;如果是,则完成迭代,得到最优目标函数值和一组测高方程的最优解。粒子群算法优化迭代过程如图 2 所示。

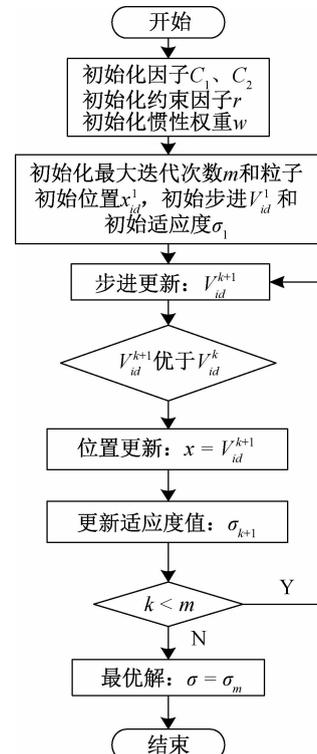


图 2 粒子群算法优化迭代过程

Fig. 2 PSO iteration process

3 仿真分析

3.1 系统参数设计

结合测高算法的有效边界条件,设计多个波位的几何关系,利用多波位测高方法进行测高,通过粒子群算法优化出高度值。多个波位几何关系见表 1。设计雷达平台与目标区域的相对高度为 5 000 m,本文以 4 个波位为例。

理论仿真的输入误差见表 2。

表 1 几何关系表

Tab. 1 Geometric relationship

波位序号	高度/m	作用距离/m	擦地角/(°)	方位角/(°)	擦地角固定偏差/(°)
1	5 000	22 000	13.14	6.57	0.18
2	5 000	18 000	16.13	8.16	0.18
3	5 000	15 000	19.47	10.36	0.18
4	5 000	12 000	24.62	13.00	0.18

表 2 理论级仿真的输入误差

Tab. 2 Input error of simulation at theoretical level

3σ 斜距误差/m	3σ 擦地角误差/(°)	3σ 高层差误差/m
60	0.03	10

3.2 理论仿真分析

根据表 1 的几何关系,在不加入任何误差的情况下,通过优化迭代得到高度值。未加入任何误差时的仿真结果见表 3。仿真中,设计粒子个数为 20 个,迭代次数为 50 次。

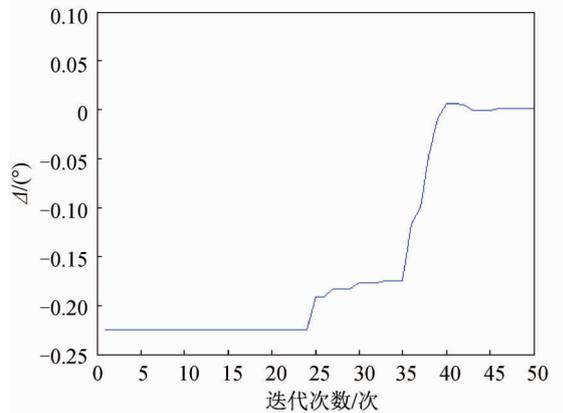
表 3 无误差时粒子群优化仿真结果

Tab. 3 PSO simulation results without errors

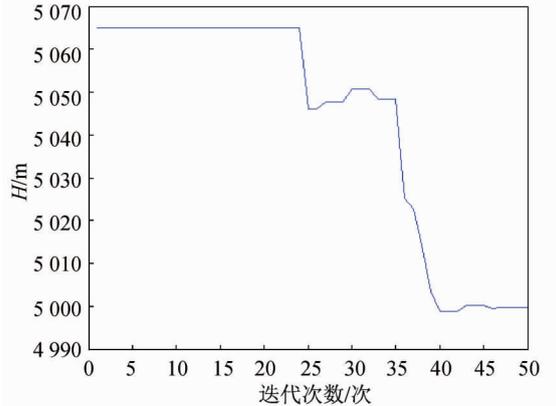
试验序号	优化擦地角误差值/(°)	优化高度值/m	目标函数值
1	8.22×10^{-5}	4 999.99	-0.000 46
2	-5.49×10^{-6}	4 999.97	-0.000 78
3	-6.71×10^{-5}	5 000.00	-0.000 59
4	6.58×10^{-6}	4 999.99	-0.000 12
5	-5.67×10^{-5}	5 000.01	-0.000 83

由理论仿真可知,无误差时优化得到的擦地角误差值和高度值与理论仿真的输入值几近相同,且目标函数值也近似为 0。因此,利用粒子群算法优化多波位测高方程组能取得很好效果。无误差情况下粒子群算法的 1 次优化结果如图 3 所示。由图 3

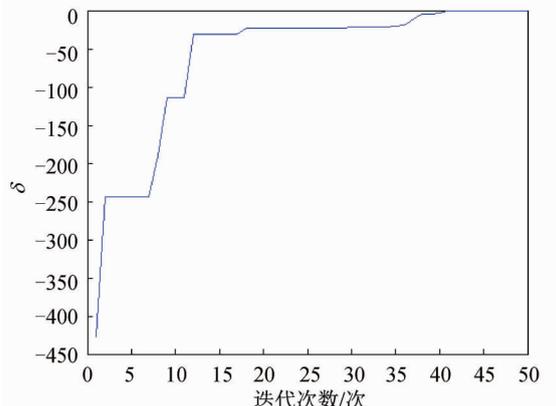
(a)可知,擦地角误差逐渐趋于 0°;由图 3(b)可知,高度逐渐趋于 5 000 m;由图 3(c)可知,目标函数值逐渐趋于 0。



(a) 擦地角误差迭代结果



(b) 高度迭代结果



(c) 目标函数迭代结果

图 3 无误差情况优化结果

Fig. 3 Optimization results without errors

为更真实地反映实际情况,对输入量加误差,并再次通过仿真验证该算法的可靠性和有效性。将表 2 中的误差加入到测高方程组中,再次进行优化迭代,得到输出擦地角误差值与高度值。加入误差情

况下的仿真结果见表 4。仿真中,设计粒子群算法中的粒子个数为 20 个,迭代次数为 70 次。

表 4 加误差时优化结果

Tab. 4 Optimization results with errors

试验序数	优化擦地角误差值/(°)	优化高度值/m	目标函数值
1	0.065	4 990.6	-8.94
2	-0.063	5 029.9	-12.67
3	0.008	5 006.4	-3.03
4	0.024	5 002.8	-8.26
5	0.058	4 993.8	-6.18

由以上仿真可知:擦地角误差的均值和标准差分别为 0.0184° 和 0.0512° ;高度的均值和标准差分别为 $5\,004.7\text{ m}$ 和 15.49 m 。粒子群算法优化的高度均值与实际仿真的高度相差不到 5 m ,这进一步验证了该算法高度估计效果。加误差情况下的 1 次优化结果如图 4 所示。由图 4(a)可知,擦地角误差最终趋于稳定;由图 4(b)可知,高度最终逼近真实高度值;由图 4(c)可知,目标函数值最终趋于理论值 0。

3.3 实测数据分析

为更好地验证基于粒子群算法的多波位测高方法的有效性,利用实测数据进行仿真分析。表 5 给出了实测输入参数,即雷达平台的几何参数。

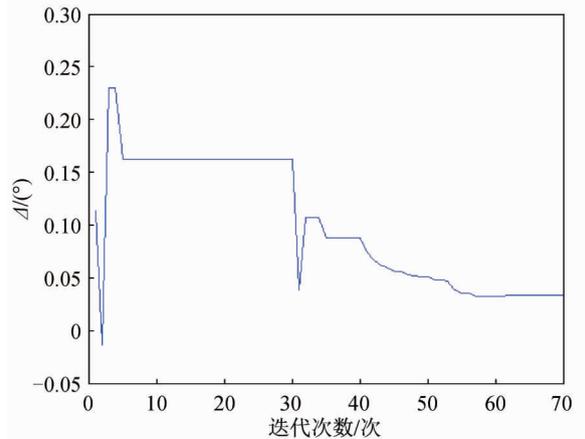
表 5 实测输入参数

Tab. 5 Actual measurement input parameters

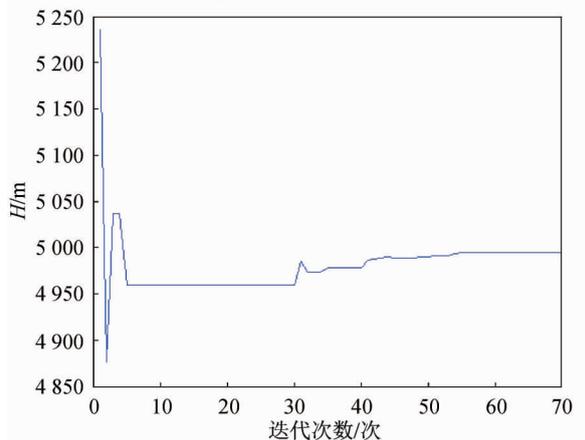
速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	方位角/ (°)	作用距离/ m	参考飞行 高度/m	高度测量 3σ 误差/m
120	13	10 000	4 957	50

这里以差分 GPS 提供的高度作为评估高度的参考高度,通过对比参考高度和多波位估计的高度来验证基于粒子群优化算法的多波位测高方法的有效性。实测数据中,方位向共有 9 920 个脉冲,以 64 个脉冲为一组,共有 155 组数据。分别对每组实测数据进行处理,利用粒子群算法优化的多波位方法估计雷达高度。

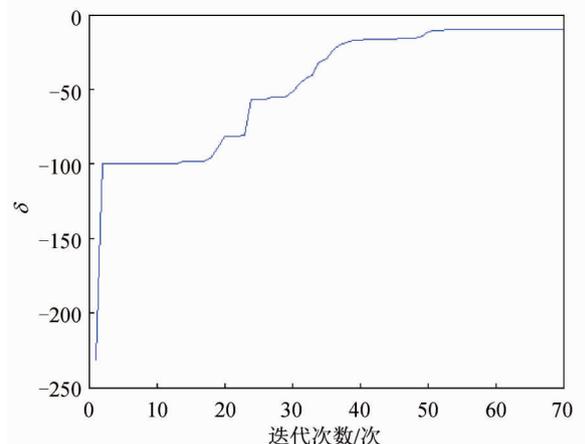
设计迭代次数为 50 次,粒子个数为 20 个, Δ 的约束范围为 $[-2^\circ, 2^\circ]$, H_1 的约束范围为 $[4\,000, 6\,000]\text{ m}$ 。粒子群优化估计结果如图 5 所示。图 5(a)为目标函数,纵坐标为目标函数的优化结果,横坐标为数据组。从图中可以看出,每组数据迭代的



(a) 擦地角误差迭代结果



(b) 高度迭代结果



(c) 目标函数迭代结果

图 4 误差情况优化结果

Fig. 4 Optimization results with errors

目标函数值都相差不大,这验证了粒子群算法迭代的稳定性。图 5(b)为擦地角误差,纵坐标为擦地角误差的优化结果,横坐标为数据组。从图中可以看出,每次迭代的擦地角误差值很小,都在 0 附近波动。图 5(c)为高度值,纵坐标为高度值,横坐标为

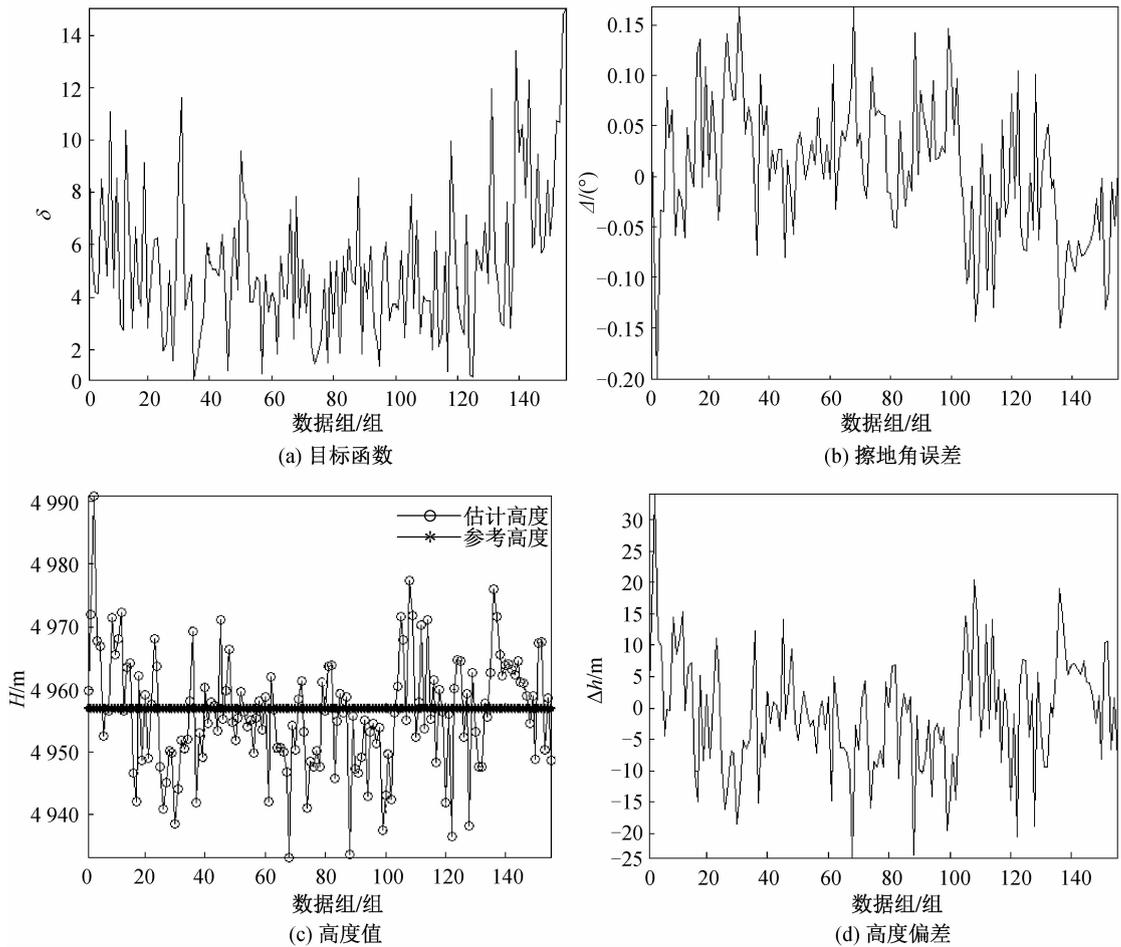


图 5 粒子优化方法估计结果

Fig. 5 PSO method estimation results

数据组,圆圈线为粒子群算法的多波位高度估计结果,星线为参考高度。从图中可以看出,估计高度在参考高度范围内小幅波动。图 5(d)为高度偏差,纵坐标为高度偏差值,横坐标为数据组,图中,高度估计误差的均值为 -0.94 m,高度估计误差的标准差为 10.2 m。高度估计误差的标准差的 3 倍值小于系统要求的高度测量 3σ 误差。因此,粒子群优化算法能在多波位高度估计过程中取得较好的效果。

4 结束语

本文提出的基于粒子群算法的多波位高度估计方法,可通过粒子群优化算法估计出多波位测高方程组的解,且具有较高的精度。同时,粒子群优化多波位测高方法可随意调整波位数目,在实际应用过程中提高了工程效率。此外,利用粒子群算法优化多波位测高方程组,不需要对多波位测高

超定方程组做近似处理,避免了方程组近似处理引入的误差,提高了高度估计的精度。与高度计测高方法相比,粒子群算法优化的多波位测高方法可在很大程度上减轻雷达平台的载荷。粒子群优化算法为多波位测高方法提供了一种有效的求解方法,使得该测高方法能在雷达斜视测高背景下得到很好的应用。

在多波位的设计过程中,为保证多波位测高的有效性,多波位测高方程组内方程需存在差异性,即相邻波位设计要有一定的间距。波位的个数也是实际设计中要考虑的一个重要因素。如果波位间距较大,或波位数目较多,多波位测高的实时性就难以满足需求。此外,基于粒子群算法的多波位高度估计方法需要惯性导航系统提供波位间的雷达高度差和擦地角变化值,所以该方法的高度估计精度也受到惯导精度的影响。后续将针对以上因素,结合实际测高需求对该算法进行进一步研究。

参考文献

- [1] 蔡玉林, 程晓, 孙国清. 星载雷达高度计的发展及应用现状[J]. 遥感信息, 2006(4): 74-78.
- [2] 李勇, 魏春岭. 卫星自主导航技术发展综述[J]. 航天控制, 2002(2): 70-74.
- [3] 陈双, 刘韬. 国外海洋卫星发展综述[J]. 国际太空, 2014(7): 29-36.
- [4] ZENG T, LI Y H, DING Z G, et al. Estimation of aircraft altitude based on squint mode SAR data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(1): 135-139.
- [5] LONG T, LIU L, DING Z. Strategy of Doppler centroid estimation in synthetic aperture radar[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2011, 5(3): 279-287.
- [6] LONG T, LI Y, DING Z, et al. Interpolation method for geometric correction in highly squint synthetic aperture radar[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2012, 6(7): 620-626.
- [7] KREYENKAMP O, KLEMM R. Doppler compensation in forward-looking STAP radar[J]. IEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation, 2001, 148(5): 253-258.
- [8] 谢尔曼, 巴顿. 单脉冲测向原理与技术[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2013: 53-87.
- [9] 李英贺. 大前斜 SAR 成像技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [10] HARGER R O. Synthetic aperture radar systems: theory and design[M]. New York: Academic Press, 1970: 23-45.
- [11] 保铮. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 97-128.
- [12] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999: 163-189.
- [13] 龙杰. 单脉冲前斜 SAR 成像信息处理技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [14] WANG H Q, CAO C X. Parallel particle swarm optimization based on simulated annealing[J]. Control & Decision, 2005(5): 500-504.
- [15] 高海兵, 周驰, 高亮. 广义粒子群优化模型[J]. 计算机学报, 2005, 28(12): 1980-1987.
- [16] 王芳. 粒子群算法的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [17] 江涛. 改进的粒子群优化算法[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [18] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 206-230.

(本文编辑: 李栋颀)