

激光测高仪回波分解算法^{*}

杨 庚 黄春明

(武汉大学电子信息学院电子工程系 武汉 430079)

摘 要 开发了一种激光测高仪回波基本信息提取算法, 对回波数据进行了高斯波分解, 获取了高斯波分量的个数, 及每个高斯波分量的波中心位置、宽度和幅度等参数. 该算法首先根据回波拐点的数目和位置确定出高斯分量的个数及每个高斯分量的波中心位置和宽度初始值, 随后利用线性最小二乘法计算出每个高斯分量的幅度, 最后将经过选择和标记的高斯分量针对实际回波采用 Levenberg-Marquardt 方法进行拟合, 得到优化后的高斯波基本参数. 通过这些基本参数信息, 能够进一步推导出激光测高仪光斑内各个反射表面的垂直分布、起伏程度和反射率等基本信息.

关键词 激光测高仪; 高斯函数; 数据拟合; Levenberg-Marquardt 方法

中图分类号 P 412

Decomposing Algorithm of Laser Altimeter Waveforms

YANG Geng HUANG Chunming

(Department of Electronic Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract A method to extract the basic information from laser altimeter return waveforms is developed, by which decompose a laser altimeter return waveform into a series of Gaussian components and obtain the number of the Gaussian components and the position, half-width and amplitude of each Gaussian component. From these basic parameters, the topographic information as the elevations and distributions, the surface slope and roughness, and the albedos of distinct reflecting surfaces within the laser footprint can be further induced. Firstly, the initial values of the number of Gaussian components and the position, half-wide of each component are estimated from the number and positions of the waveform's inflection points. Secondly the linear least-squares method are used to calculate the initial amplitudes of each Gaussian component. At last the waveform is fitted with the chosen and ranked Gaussians by Levenberg-Marquardt method, achieving basic optimized parameters of Gaussians. Three types of simulated return waveforms of the laser altimeter from scalariform terrain, woodland and slope surface have been fitted by this decomposing algorithm, the original waveforms are successfully approximated by the fitted ones and the optimized parameters of simulated return waveforms are satisfied. And the results prove that the decomposing algorithm of laser altimeter waveforms obtains a higher precision, it will have a good effect on the analysis of laser altimeter return waveforms.

Key words Laser altimeter, Gaussian, Data fitting, Levenberg-Marquardt method

^{*} 武汉青年科技晨光计划资助项目 (20025001008)

2004-08-16 收到原稿, 2005-01-12 收到修定稿

1 引言

激光测高仪是安装在飞行器(飞机、卫星等)上利用激光测量地面到飞行器之间距离的光电装置. 其工作原理^{[1],[2]}是激光器持续地向地面发射激光脉冲, 脉冲光束穿越大气到达地面后产生微弱的后向散射回波由望远镜接收, 再被光电探测器转换成电脉冲回波, 最后由电脉冲的渡越时间推出光脉冲的渡越时间, 从而得到地面与飞行器之间的距离.

由于测高仪激光光束具有一定的发散角, 并且大气对光束具有散射作用, 因此激光光束在地面上照亮的是一个有一定面积的光斑, 在光斑内的地形通常不会是一个简单的平面. 激光测高仪的回波是对光斑内各点反射信号按时间先后顺序的记录. 由于不同物体的后向散射系数不同, 并且光斑范围内的地形通常又是复杂多变的, 因此由系统所记录的回波形态也大多不是单一模式. 对于平面地形, 回波是与出射脉冲相似的单一波形; 而对于在垂直方向有明显高度分布的地形, 不同高度平面将平均分布在光斑内的激光能量分别反射回系统, 经探测器叠加成一个多模的复杂曲线. 这些复杂的回波实际上包含了地面的起伏, 海浪高度, 树木高度分层, 大气特性等大量有效信息^[3].

为了提取光斑范围内地表物体的主要高度分布以及特定反射平面的起伏程度和反射率等信息, 必须将各个不同平面的回波从整体回波中分解出来, 也就是说要将多模的曲线分解为单模的曲线, 同时提取每个单模曲线的具体参数. 激光测高仪最初所采用的回波数据处理方法非常简单, 首先通过计算确定出发射波与回波的峰值点、质心点或过阈值点, 然后以两点之间的渡越时间来计算距离值. 显然, 这一方法对于单模的回波是有效的, 但对于多模的回波不仅会产生较大的距离误差, 而且丢失了许多有用的信息. 因此需要开发新的算法来对复杂的回波进行处理和分析, 以获取地面目标的高度分布等尽量多的有用信息, 从而提高激光测高仪对地面目标的分辨能力和系统测高精度.

国际上已经研制成功的激光测高仪所采用的出射波都是近似的高斯波形, 这些测高仪所获得的实验数据和系统的仿真研究都已证明单一平面的回波也为近似的高斯波形, 因此我们假定激光测高仪的回波是由多个高斯波叠加而成的, 即测高仪的回波是一系列高斯脉冲在时间轴上的叠加. 本文开发了

一种激光测高仪回波数据的高斯分解算法, 利用该算法对具有垂直高度分布的复杂地形的模拟回波进行了处理, 得到了令人满意的结果. 需要指出的是, 这种分解算法对地面高度分布的分辨能力受到具体的激光测高仪系统的垂直分辨率, 激光器的脉冲宽度, 光电探测器的响应特性和数据采集速率等因素的限制.

2 模拟波形与问题分析

根据文献[4]中介绍的激光测高仪回波仿真算法能够模拟出某特定工作参数的激光测高仪照射在各种不同地形上得到的回波波形. 回波数据由 N 个等时间间隔的点 $\{x_k: k=1, 2, \dots, N\}$ 组成, 这些点对应于系统的数据采样值 $\{y_k: k=1, 2, \dots, N\}$. 图1是有植被覆盖地区(例如覆盖了高大树木和灌木的地面)的仿真回波, 该波形由3个高斯函数叠加而成, 其峰值、中心、半宽分别为(30.22, 19.365, 1.500), (17.24, 25.021, 1.000), (25.30, 30.540, 0.500). 每个高斯函数与时间轴所围面积代表了地面光斑内特定高度平面所反射的激光能量, 同时假定激光测高仪的背景噪声是以正态分布叠加在有效波形上的.

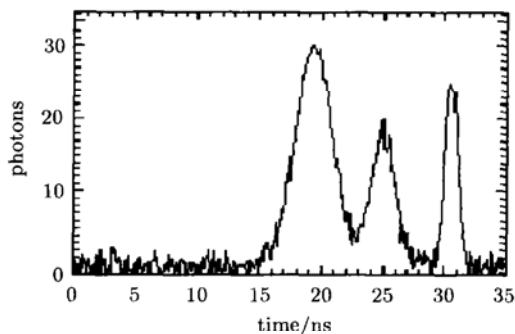


图1 仿真回波

Fig.1 Simulated return waveform

我们开发的激光测高仪回波处理算法的主要思想是, 将回波按照式(1)分解成 n 个高斯函数之和, 然后通过高斯函数拟合使得拟合波形与实际波形的标准偏差满足式(2).

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^n a_i e^{-(x-x_i)^2/2\sigma_i^2}, \quad (1)$$

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f(x_k) - y_k)^2} < \varepsilon. \quad (2)$$

式(1)中 $y = f(x)$ 是由 n 个高斯函数叠加而成的单值函数, a_i , x_i 和 σ_i 分别对应于函数第 i 个高斯分量的幅度、中心位置和半宽. ε 是由系统噪声水平所决定的拟合精度, 对于具体回波数据它为一个常数. 这样, 对激光测高仪回波分解的问题就转换为使用适当的方法从回波数据中拟合得到 $3n$ 个未知参数的问题. 由式(1)可知, 所拟合的函数是非线性函数, 因此无法采用线性的最小二乘法来拟合^[5]. 为了使拟合波形与实际回波的误差最小, 必须采用非线性最小二乘法进行数据拟合. Levenberg-Marquardt 方法(简称 LM 方法)是一种十分有效的非线性曲线拟合方法*, 该方法通过最小化拟合波形和实际波形在各点余量的平方和而得到最优化的参数值. 为了保证 LM 算法有很好的收敛, 避免在计算过程中终止于一个局部的最小值, 同时为了提高拟合精度和减少迭代次数, 在采用 LM 方法进行数据拟合时, 必须首先对要拟合的参数做一个预估, 然后将该预估值作为初始参数值代入计算.

对于拟合波形高斯分量的中心位置和半宽的初始值估计, 可以通过计算波形的拐点而得到. 随后, 在中心位置和半宽的初始值已知的情况下, 通过线性最小二乘法得到高斯分量幅度的初始值. 最后, 将高斯分量的参数初始估计值代入 LM 方法对回波数据按照式(1)给定的函数形式进行迭代拟合, 当拟合的结果与实际回波数据比较的余量接近实际回波的背景噪声水平时, 则认为拟合的结果是合理的, 能够很好地逼近实际的波形. 对于图 1 给出的回波, 我们给定拟合终止的标准是拟合波形与实际波形的余量的标准偏差 σ_T 必须小于实际回波背景噪声的标准偏差值 σ_n 的两倍, 即 $\varepsilon = 2\sigma_n$.

3 初始参数估计

3.1 高斯函数的拐点

设有高斯函数

$$y(x) = ae^{-x^2/2\sigma^2}, \quad (3)$$

对式(3)二阶偏导得:

$$y''(x) = \frac{a}{\sigma^4} e^{-x^2/2\sigma^2} (x^2 - \sigma^2). \quad (4)$$

显然, 式(3)中的单一高斯函数有两个拐点, 分别为 $x_1 = \sigma$ 和 $x_2 = -\sigma$. 所以, 由 n 个高斯函数叠加而成的函数(式(1))最多有 $2n$ 个拐点. 因此可以根据回波的拐点确定拟合函数的高斯分量的数目, 中心位置和半宽等信息. 由于激光测高仪一定的垂直分辨率和光斑内相邻反射面的高度距离可能会很小, 使得当两个相邻的高斯分量的中心位置过于接近时, 这两个高斯分量就只有 2 个拐点而不是 4 个.

3.2 平滑滤波

回波数据中背景噪声的随机起伏同样存在拐点. 如果在确定高斯分量数量的过程中把这些拐点加入计算, 可能将这些起伏当作地面有效回波处理, 会大大降低最后拟合结果的精度, 所以在计算实际拐点之前, 必须对原始数据进行平滑滤波.

滤波后的回波中应该包含原回波中大部分的有效频率分量, 而将高频噪声滤除. 激光测高仪的出射波是高斯型的, 实验研究和仿真研究都已证明理想的平面回波也是高斯型的(系统冲激响应与出射波的卷积). 有效回波是由宽度不窄于平面回波的高斯波叠加而成(斜面和粗糙面的回波与平面回波相比有拓宽). 因此, 有效回波的频谱与平面回波相比, 只是低频有增强, 但频谱仍然集中在平面回波的截止频率以内. 我们选取平面回波(一定半宽的高斯函数)作为滤波函数(低通滤波), 将其与原始回波数据做卷积来实现平滑滤波, 既保留了有效频谱成分, 又去除了高频噪声, 大大提高了信噪比. 同时, 为了保持原始回波的峰值水平和能量水平, 我们还将滤波函数进行了积分面积的归一化处理.

图 2(a) 中给出了使用半宽分别为 0.5 ns, 1.0 ns, 1.5 ns 的高斯函数滤波的结果. 从图中可以看出, 随着滤波高斯函数半宽的增加, 滤波后的曲线变得更加平滑, 同时各个高斯波形的展宽也逐渐变大, 并且各高斯分量的峰值也越来越小. 滤波器的不同半宽对应于不同的低频截止频率: 当滤波器半宽太窄时, 高频噪声得不到抑制, 起不到滤波的作用; 当滤波器半宽太宽时, 一些有用的频谱成分也会被滤除. 在这里, 我们选取半宽为 0.4 ns 的归一化高斯函数(平面回波)作为滤波函数, 滤波后的结果如图 2(b) 所示. 从图中可以看出, 该滤波器既对原始波形的高频噪声进行了抑制, 又很好地保留了有用的频谱成分.

*Ananth rangathan. The Levenberg-Marquardt Algorithm. <http://www.cc.gatech.edu/people/home/ananth/lmtut.pdf>

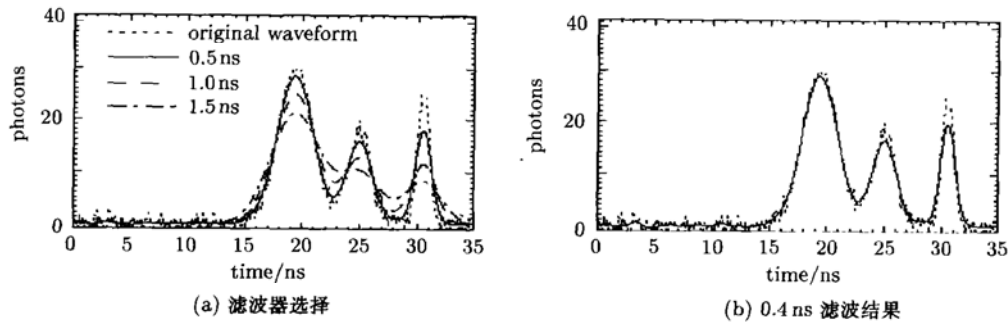


图2 滤波器设计
Fig.2 Choice of filter

3.3 初始参数取得

滤波后的波形中, 奇偶相邻的两个拐点就可以决定一个高斯分量. 设奇偶相邻的两个拐点为 p_{2i-1} 和 p_{2i} , 则相对应的第 i 个高斯分量的中心位置 x_i 和半宽 σ_i 可以表示为

$$x_i = (p_{2i-1} + p_{2i})/2, \quad (5)$$

$$\sigma_i = |p_{2i-1} - p_{2i}|/2. \quad (6)$$

对图1的原始波形进行高斯滤波之后, 得到26个拐点, 其中大部分仍然是由背景噪声的随机起伏而产生的, 并不是有效信号, 需要对这些拐点作进一步的剔除. 对于激光测高仪系统, 一个有效的地面回波的幅度应该在采集波形的直流分量以上的, 所以只有当两个拐点之间的数据值大于回波信号的直流分量的时候, 由这两个拐点所确定的高斯分量才可能是有效的地面回波. 利用这一点对26个拐点选择后, 只有10个满足要求, 也就是回波的拟合函数式(1)中 n 的最大值应该是5.

在中心位置和半宽初始值确定的情况下, 高斯分量的指数部分就可以确定了, 则可以将仿真回波看作是 n 个幅度为 a_i 的高斯函数 G_i 的线性组合, 函数形式为

$$y = \sum_{i=1}^n a_i G_i. \quad (7)$$

这样, 利用线性最小二乘法就可以得到各个高斯分量幅度的初始值^[5]. 若记 $g_{kj} = (G_k, G_j)$, $d_k = (\bar{f}, G_k)$, $\bar{f}$ 为滤波后的回波数据, 并设矩阵 $G = (g_{kj})$, 则求解幅度值的法方程可表示为

$$Ga = d. \quad (8)$$

式中, 矢量 $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ 为待求高斯分量的幅度初始估计值, $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T$, 通过求解

方程(8)就可以得到高斯分量幅度的初始估计值.

如前所述, 为了判定最终拟合结果是否满足精度要求, 我们还需要获得原始回波的背景噪声水平. 如果没有实际的系统噪声的测量值, 也可以在回波数据中选取没有地面回波的时间段的数据值来计算. 在图1的数据中, 前10个数据是完全的背景噪声, 无有效地面回波, 利用这10个的数据计算后得到背景噪声的标准偏差 $\sigma_n = 0.86$.

3.4 高斯分量选择与标记

虽然上面的处理过程中, 已经去除了大部分由噪声起伏所引起的拐点, 但是还不能完全确定剩下的拐点确定的高斯分量是否都是有效的地面回波, 所以需要对这些高斯分量进行选择 and 标记, 以去除无效的高斯分量, 获得更精确的拟合结果.

对于半宽大于激光测高仪平面回波的半宽同时幅度大于3倍的背景噪声标准偏差 σ_n 的高斯分量, 我们认为可以确定是有效的地面的回波. 先将这些高斯分量先代入式(1)进行非线性拟合, 而将其余的高斯函数按照与上述高斯分量的距离进行标注, 距离越短则标注数值就越小. 当最后拟合的结果不能满足式(2)时, 再将这些高斯函数按标注系数从小到大逐一加入式(1)重新拟合.

激光脉冲在传输的过程中, 传输介质(大气), 地表物体和地形等都会对其有一定的展宽作用, 有效回波是由宽度不窄于平面回波的高斯波叠加而成. 幅度标准的选择对于不同系统是不同的, 但是必须大于背景噪声的标准偏差而小于最小的有效信号的范围. 如果取值过小, 会把一些噪声引起的波动也引入结果中, 而取值过大, 则会将一些有效波形认定为噪声, 可能会出现最后非线性拟合的结果没有办法满足式(2)的情况. 对于图1中的波形, 用3倍背景噪声标准误差作为选择标准是最合适的.

表 1 中列出了对高斯分量选择标注和初始参数估计的结果, 在 5 个高斯分量中有 3 个是满足判定条件的, 并将剩余的 2 个高斯函数标注. 将表 1 中的参数值与实际参数比较可以看出, 经过滤波后的波形存在一定的展宽, 同时相应的高斯分量幅度也有减小. 如果把这个结果用来分析地形信息, 误差将会很大, 也不能很好近似实际波形, 所以必须对这些数据做进一步的拟合优化, 即将表 1 中的参数作为初始估计值, 代入非线性方法 (LM 方法) 对原始波形进行拟合.

表 1 高斯分量的选择和标注
Table 1 Rank and selection of Gaussian components

高斯分量	中心位置 /ns	半宽 /ns	幅度	标注
1	3.300	0.400	0.49	2
2	10.750	0.450	0.34	1
3	19.250	1.550	28.70	*
4	25.000	1.000	16.98	*
5	30.500	0.600	20.30	*

4 LM 方法拟合

4.1 算法简介

LM 方法是梯度下降法与高斯-牛顿法的结合, 它既具有高斯-牛顿法的局部收敛特性, 又具有梯度法的全局特性, 而且 LM 方法利用了误差指标函数近似的二阶导数信息, 所以运算速度比梯度法快得多. 设 $\mathbf{r}(\mathbf{w})$ 为拟合数据的余量矢量, 其中 $\mathbf{w}$ 为拟合的参数矢量. 则误差指标函数及其一阶、二阶导数可以分别表示为

$$F(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{r}(\mathbf{w})\|_2^2, \quad (9)$$

$$\nabla F(\mathbf{w}) = \mathbf{J}(\mathbf{w})^T \mathbf{r}(\mathbf{w}), \quad (10)$$

$$\nabla^2 F(\mathbf{w}) = \mathbf{J}(\mathbf{w})^T \mathbf{J}(\mathbf{w}) + \sum_{j=1}^N \mathbf{r}_j(\mathbf{w}) \nabla^2 \mathbf{r}_j(\mathbf{w}). \quad (11)$$

其中, $\mathbf{J}(\mathbf{w})$ 为 $\mathbf{r}$ 关于 $\mathbf{w}$ 的 Jacobi 矩阵,

$$\mathbf{J}(\mathbf{w}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{r}_1(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}_1} & \frac{\partial \mathbf{r}_1(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}_2} & \dots & \frac{\partial \mathbf{r}_1(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}_m} \\ \frac{\partial \mathbf{r}_2(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}_1} & \frac{\partial \mathbf{r}_2(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}_2} & \dots & \frac{\partial \mathbf{r}_2(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \mathbf{r}_N(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}_1} & \frac{\partial \mathbf{r}_N(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}_2} & \dots & \frac{\partial \mathbf{r}_N(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}_m} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

LM 方法是改进的高斯-牛顿方法, 形式为

$$\Delta \mathbf{w} = -[\mathbf{J}^T(\mathbf{w})\mathbf{J}(\mathbf{w}) + u\mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{w})^T \mathbf{r}(\mathbf{w}). \quad (13)$$

式中, u 为比例系数, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵. 从式 (13) 可看出, 如果比例系数 $u = 0$, 则为高斯-牛顿法; 如果 u 取值很大, 则 LM 算法接近梯度下降法. 每迭代成功一步, 则 u 减小一些, 这样在接近误差目标的时候, 逐渐与高斯-牛顿法相似. 高斯-牛顿法在接近误差的最小值的时候, 计算速度更快, 精度也更高.

4.2 拟合结果

使用交互式语言 IDL 可以编写 LM 方法的拟合函数完成对回波非线性拟合工作*, 给出原始数据, 高斯分量参数的初始估计值和测量不确定度 Ω_i (在这里我们对图 1 各点取相同的不确定度), 函数通过最小化 χ^2 值, 即可得到一组最佳拟合参数. χ^2 值由下式计算得到:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - f(x_i)}{\Omega_i} \right]^2. \quad (14)$$

为了提高计算精度, 减小迭代次数, 函数还允许对需要拟合的参数根据实际情况给出一定的约束条件. 例如, 拟合的高斯分量幅度大于回波的直流分量, 拟合的高斯分量半宽不小于系统平面回波曲线的半宽等.

图 3 和图 4 中分别给出了使用 LM 方法对回波拟合的结果以及实际波形与拟合波形的余量, 其中拟合波形与原始波形的余量的平均值和标准偏差分别为 -0.05 和 0.93. 余量标准偏差是小于原始波形背景噪声标准偏差的 2 倍的拟合结果是合理的, 并且很好地满足了精度要求. 将图 3 与图 2(b) 比较可以看出, 非线性拟合的波形更好地反映了原始波形的有用信息, 比较理想地去除了因为高斯滤波所产生的对原始波形各个高斯分量半宽的展宽和峰值的减小等不良的影响. 同时在表 2 的参数列表表中可以看出, 非线性拟合波形参数比线性最小二乘法得到的参量估计值更加接近真实值 (仿真原始波形时所采用的参数). 需要注意的是, 如果拟合的结果不满足精度要求, 则需要将表 1 中标注的高斯函数按其序号逐一加入式 (1) 重新拟合.

*Craig Markwardt. Curve fitting in IDL using MPFITFUN and MPFITEXPR. <http://astro.physics.wisc.edu/~craigm/idl/>

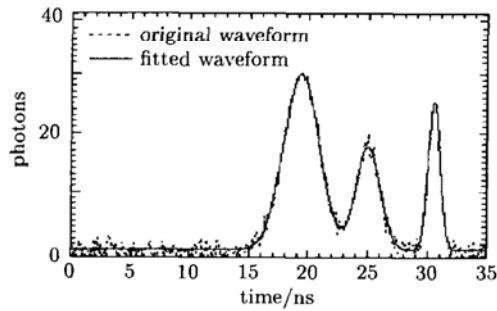


图3 拟合波形

Fig.3 Fitted waveform

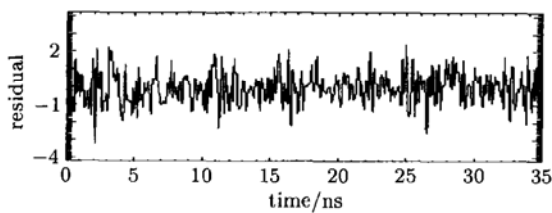


图4 原始波形与拟合波形的余量

Fig.4 Difference between fitted and original waveform

当高斯分量的初始参数值与实际值差得很远 (例如将初始参数设为 0) 时, 非线性拟合将会终止

在一个局部极小值. 如果将所有的高斯分量加入做拟合, 却仍然不能满足我们所需要的精度要求, 则高斯分量的初始参数值需要重新计算, 或者选择其他的近似函数拟合.

5 算法应用

我们利用以上分解算法对在出射脉冲半宽为 1 ns 的情况下得到的 3 种地形仿真回波进行了处理. 图 5、图 6 和图 7 中分别给出了阶梯型地形, 林地和斜坡地形的仿真回波及最后的拟合结果.

从图中可以看出, 回波分解算法的拟合结果与原始波形吻合得非常好, 拟合波形都比较精确地近似了原始波形. 图 5 中回波为两个半宽 (分别为 1.010, 1.000 ns) 与出射波 (1.000 ns) 一致的高斯波形, 由此可推断光斑内分布有两个间距较大 (与激光测高仪的高度分辨率相比) 的平面, 两个高斯波中心位置的时间差反映了两个平面的高度差, 而不同的幅度 (分别为 9.21, 65.57) 则反映了构成阶梯面的两个平面在光斑中所占面积的差异, 离测高

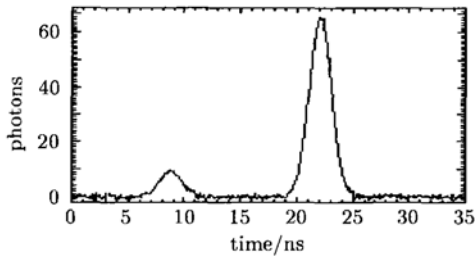
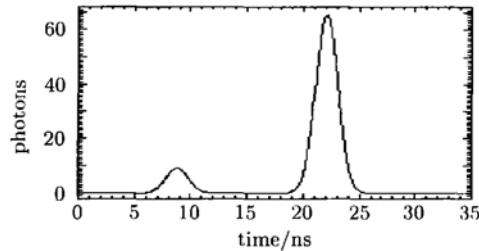


图5 阶梯型地形回波, 高斯分量的中心、半宽、峰值分别为 (8.802, 1.010, 9.21) 和 (22.104, 1.000, 65.57)

Fig.5 Waveform returned from scalariform terrain with the Gaussian parameters of

(8.802, 1.010, 9.21) and (22.104, 1.000, 65.57)

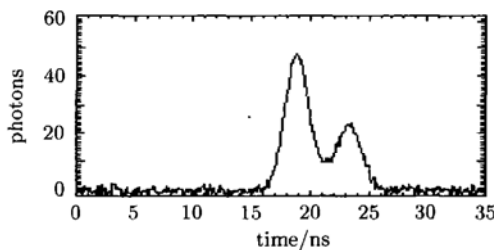
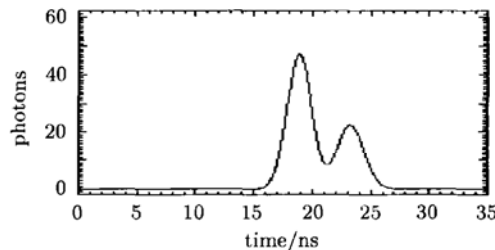


图6 林地回波, 高斯分量的中心、半宽、峰值分别为 (18.898, 1.040, 47.08) 和 (23.274, 1.146, 22.53)

Fig.6 Waveform returned from woodland with the Gaussian parameters of (18.898, 1.040, 47.08)

and (23.274, 1.146, 22.53)

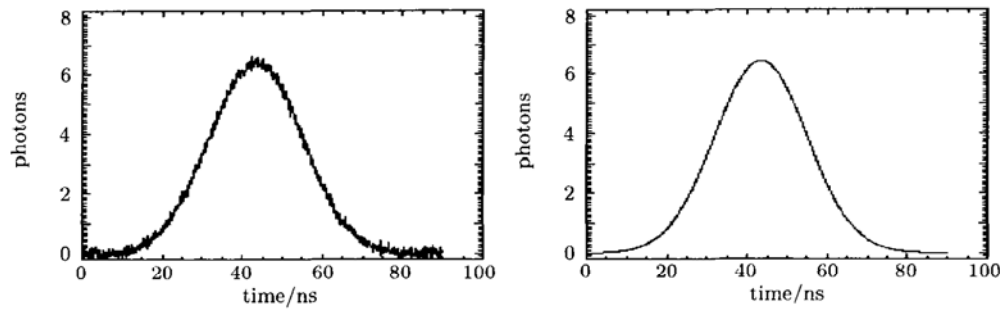


图 7 斜坡地形回波, 高斯分量的中心、半宽、峰值分别为 (43.456, 11.574, 6.44)
Fig.7 Waveform returned from slope surface with the Gaussian parameters of (43.456, 11.574, 6.44)

表 2 参数对比
Table 2 Comparison of parameters

	x_1 /ns	a_1	σ_1 /ns	x_2 /ns	a_2	σ_2 /ns	x_3 /ns	a_3	σ_3 /ns
真实值	19.365	30.22	1.500	25.021	17.24	1.000	30.540	25.30	0.500
初始值	19.250	28.70	1.550	25.000	16.98	1.000	30.500	20.30	0.600
拟合值	19.371	30.07	1.492	24.992	17.51	1.007	30.554	25.28	0.498

仪距离略远的那个平面面积占优。林地的回波为两个重叠的高斯波, 其双峰位置确定了林地的平均树高。由于树冠的反射率低于裸地面的反射率, 因此从双峰的幅度 (分别为 47.08, 22.53) 可以推断出在光斑内树冠的面积是占优的。从图 7 的拟合结果看来, 回波半宽 (11.574 ns) 远远大于出射波半宽, 因此可以推断光斑内的地面是倾斜的或起伏的; 又由于回波波形比较光滑, 拟合波形与原始波形间的误差较小, 从而可以推断这是一个斜面的回波 (起伏地形的回波不仅整个波形有拓宽, 而且回波波形包含了許多高频分量, 因此拟合波形与原始波形间的误差会比较大); 回波半宽与出射波半宽的比反映了斜面的倾斜程度。

6 讨论

本文所开发的激光测高仪回波基本信息提取算法, 能够将回波分解成高斯分量的叠加, 拟合出各个高斯分量的中心位置、半宽和幅度。这些高斯分量的中心位置、半宽和幅度分别反映了激光测高仪光斑内各个反射表面的垂直分布、起伏程度和反射率等基本信息。因此, 该算法不仅能够提高激光测高仪的测高精度, 而且还能给出激光光斑内的许多基本的地形信息。文中采用该算法对具有垂直高度分布的复杂地形仿真回波进行了处理, 得到了令人满意的结果, 证明该算法具有较高的精度, 能够在

激光测高仪的回波分析中发挥很好的作用。

由于算法的选择, 拟合精度的要求, 以及初始高斯分量数目和参数的确定等, 都会对最终的拟合结果产生影响, 所以必须根据系统的具体情况来对这些因素做出选择, 以获得最佳的拟合结果。另外, LM 方法并非只能应用于高斯函数的拟合, 也同样可以应用于其他非线性函数的拟合, 所以在激光测高仪的数据分析中, 我们还可以选择其他函数来更精确拟合回波波形。在具体的应用过程中, 还可以对拟合的结果进行约束, 约束条件由具体系统决定。

参考文献

[1] Gardner C S. Ranging performance of satellite laser altimeters. *IEEE Trans. Geos. Remote Sensing*, 1992, **30**(5):1061—1072

[2] Coyle D B, Kay R B, Steven J *et al.* Design and performance of the vegetation canopy (Lidar) laser transmitter. *IEEE Aeros. Conf. Proc.*, 2002, **3**:1457—1464

[3] Harding D J *et al.* Satellite laser altimetry of terrestrial topography: Vertical accuracy as a function of surface slope, roughness, and cloud cover. *IEEE Trans. Geos. Remote Sensing.*, 1994, **32**(2):329—339

[4] Abshire J B, McGarry J F, Pacini L K *et al.* Laser altimetry simulator. Version 3.0 User's Guide. NASA Technical Memorandum 104588. 1994

[5] Zhang Chipin, Shi Yunhui. Computational Method. Beijing: Science Press, 2002, 187. in Chinese (张池平, 施云慧. 计算方法. 北京: 科学出版社, 2002, 187)