中国科学: 地球科学 2011 年 第 41 卷 第 1 期: 103 ~ 109
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

# 小光斑激光雷达全波形数据递进分解与相对辐射校正

覃驭楚[①③], 李斌[②], 牛铮[①*], 黄文江[①], 王长耀[①]

① 中国科学院遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;
② 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
③ 中国科学院研究生院, 北京 100049
* 联系人, E-mail: NiuZ@irsa.ac.cn

收稿日期: 2009-09-09; 接受日期: 2010-07-22
国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB714406)和国家科技支撑计划(编号: 2008BAC34B03)资助

**摘要** 小光斑全波形激光雷达作为新一代对地观测主动光学遥感技术, 近年来得到了广泛关注与应用. 波形数据分解与辐射校正是波形数据处理的重要环节, 它直接影响着信息提取和波形数据进一步应用. 本文以高斯混合模型为数学基础, 采用逐级递进分解的策略, 建立小光斑激光雷达波形数据的高斯分解方法; 考虑激光雷达系统获取数据过程中激光初始发射脉冲和不同观测角度大气程辐射的差异, 在高斯拟合模型的基础上, 建立波形数据的相对辐射校正模型. 采用小光斑激光雷达波形数据对提出的递进高斯分解与相对辐射校正方法进行验证, 结果表明递进分解能够准确的确定波形数据峰值个数、位置与宽度, 在波形分解基础上进行的相对辐射校正能够提高相同地物波形数据的相似性.

**关键词**
激光雷达波形数据
高斯混合模型
递进分解
相对辐射校正

机载激光雷达(Light Detection And Ranging, 简称 LiDAR)是一种集激光、全球定位系统(GPS)和惯性导航系统(Inertial Navigation Systems, INS)技术于一身的用于快速获取地面目标三维空间信息的主动式光学遥感器. 作为一种先进的对地观测系统, 在近十年内, 机载激光雷达系统在地形测绘、环境监测、三维城市建模等诸多领域得到了广泛应用[1,2].

根据回波记录方式的不同, 机载激光雷达系统可分为离散激光雷达系统和全波形激光雷达系统. 前者记录有限个离散的返回信号, 而后者以很小的采样间隔对来自目标的激光反射进行采样记录, 形成一个随时间变化的回波信号. 根据获取数据时地面光斑的大小, 机载全波形激光雷达系统又可分为大光斑和小光斑两种类型, 目前机载大光斑波形激光雷达主要为 NASA 的 LVIS(Laser Vegetation Imaging Sensor), 它在植被垂直结构参数、地面生物量估算方面得到了广泛的应用. 而 OPTECH ALTM 3100, TOPEYE MK II, RIEGL LMS-Q560, TopoSys Harrier 5600 以及 Falcon III 等则是获取波形数据的小光斑激光雷达系统[3~7].

相对于离散激光雷达而言, 全波形激光雷达能够提供更多的目标信息, 但同时也给数据处理和信

英文引用格式: Qin Y C, Li B, Niu Z, et al. Stepwise decomposition and relative radiometric normalization for small footprint LiDAR waveform. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-4120-y

息提取提出了更高的要求. Hofton 等[8]用最小二乘法对机载大光斑激光雷达波形数据进行高斯分解. Wagner 等[9]从理论角度阐述了机载小光斑全波形激光雷达的成像机理, 在此基础上提出采用高斯分解的方式提取波形数据的若干个峰值作为观测目标特征信号. 马洪超等[10]采用 EM(Expectation-maximization)算法进行小光斑激光雷达波形数据高斯混合模型参数的最大似然估计. 无论是采用最小二乘法还是 EM 算法, 其目的都是在寻求高斯混合模型参数的最优近似, 然后根据高斯拟合的参数确定波峰来获取地面高程, 也就是说这种处理方式只关注波形数据的几何信息.

目前越来越多的研究人员开始关注激光雷达强度数据在信息提取中的应用[2,11]. Hofle 和 Pfeifer[11]提出了基于波形数据本身特征与辐射传输模型的小光斑激光雷达点云强度数据定标方法. Wagner 等[9]在发射激光脉冲功率稳定、稳定大气条件等假设的基础上, 从理论上阐述了小光斑激光雷达波形数据定标方法. 而实际运行中, 激光器发射的激光脉冲的能量并不是恒定的(图 1(a), (b)), 并且激光具有良好的单色性, 其谱线宽度达到 10 nm 以下, 采用常规的 6S 和 MODTRAN 等大气辐射计算模型并不准确. 另外在低空环境下参数化大气辐射传输模型也会比较困难. 对于小光斑激光雷达波形数据而言, 高斯拟合模型中各个峰值的位置、强度等参数就已经反映了观测目标的结构特征. 由于激光器初始发射波形和大气传输路径差异等原因导致回波不可比性, 从而限制了小光斑激光雷达波形数据深入应用. 本文利用高斯混合模型对小光斑激光雷达波形数据进行递进分解, 以大气辐射传输理论为基础, 探索建立小光斑激光雷达波形数据的相对辐射校正模型.

## 1 基于高斯混合模型的波形数据递进分解

小光斑激光雷达系统工作过程中发射高斯激光脉冲, 按照一定的采样频率对回波进行采样得到波形数据, 激光雷达系统在运行过程中发射高斯脉冲, 而目标可以采用系统传递函数来描述, 从信号处理的角度看, 其回波数据相当于发射脉冲与系统传递

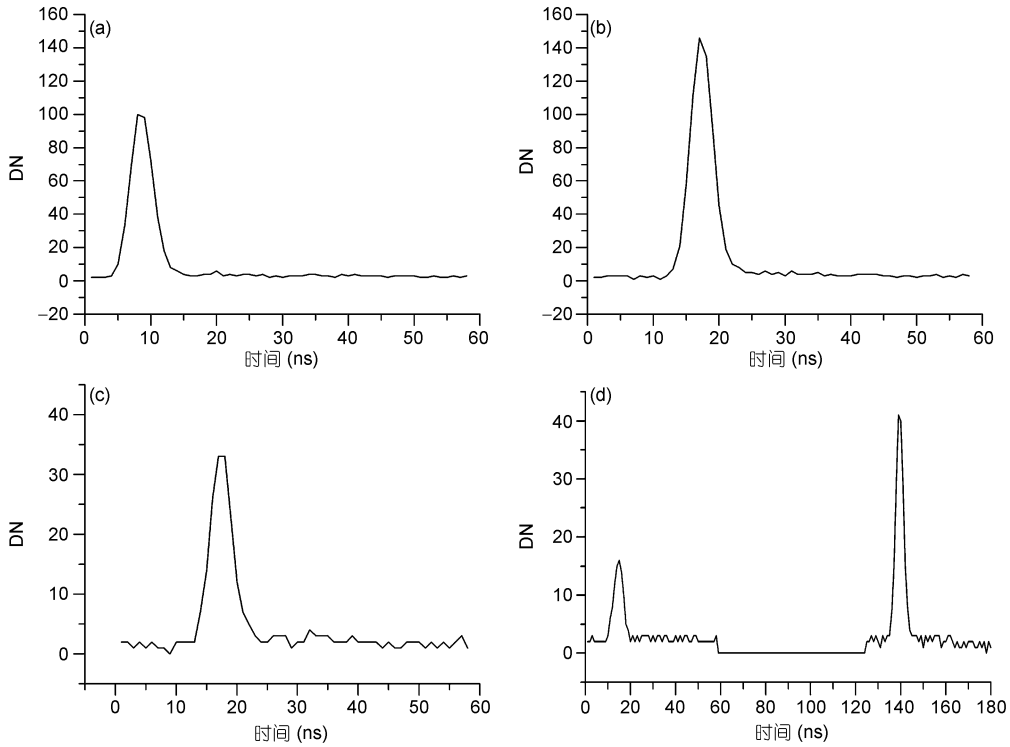



**图 1 典型硬目标与软目标的波形数据**

(a) 硬目标波形数据的发射脉冲; (b) 软目标波形数据的发射脉冲; (c) 硬目标的回波波形; (d) 软目标的回波波形

函数在时间域的卷积, 根据卷积函数的性质, 回波数据也可以用高斯模型来描述[9].

高斯模型作为常用的统计模型, 它能够很好的近似很多复杂的概率分布情况, 已经广泛应用于语音分析、图像处理等领域. 高斯混合模型作为单一高斯模型的延伸, 它以多个高斯函数加权为基础实现随机变量分布状态的描述, 而模型中每一个高斯函数分量可以采用权重、均值、协方差来描述. 对于一维随机变量, 每一个高斯函数分量可以采用式(1)来描述, 而高斯混合模型则可以表达为若干高斯函数分量的加权和(公式(2)):

$$f(x_i) = h_i \exp\left[-\frac{(x_i-\alpha_i)^2}{w_i^2}\right], \tag{1}$$

$$G(x) = \sum_{i=1}^{i=k} f(x_i), \tag{2}$$

其中 $f(x_i)$表示第 $i$ 个高斯函数分量, $h_i$, $\alpha_i$, $w_i^2$ 分别代表该高斯函数的权重、均值和方差. 式(2)表示高斯混合模型 $G(x)$为 $k$ 个高斯函数的加和. 对于激光雷达波形数据而言, 不同的观测目标的回波数据有较大差异. 当观测目标为道路、建筑屋顶等硬目标时, 回波数据可以采用单一高斯函数拟合(图 1); 但在激光雷达探测植被时, 激光脉冲可以穿透植被冠层, 其回波数据在不同的反射层都有峰值出现, 在这种情况下则需要采用多阶高斯函数来描述(图 1). 高斯函数的权重、均值和方差则分别代表着波形数据中某个峰值的强度因子、中心位置与峰值宽度因子. 波形数据分解本质上就是估计波形数据拟合模型中各个高斯函数的权重、均值和方差等参数.

一般而言, 高斯混合模型的参数估计没有确定的解析解. 目前常用的高斯模型参数估计方法主要包括最小二乘法、EM 算法等. 其中 EM 算法是 Dempster 等[12]在 1977 年提出的基于最大似然原则的参数估计方法, 其核心思想是以初始控制信息为基础, 设定参数估计的误差期望和最大迭代次数, 经过多次迭代实现参数的最优估计. 参数估计过程中误差期望或者最大迭代次数到达阈值就停止计算, 在计算过程中误差期望和最大迭代次数成为相互制约的因素: 最大迭代次数设置太大, 需要消耗大量的计算资源, 而且可能导致过度拟合, 算法陷入局部优化, 反之则误差期望达不到要求. 激光雷达波形数据拟合模型的阶数是变化的, 在进行高斯模型参数估计之前就需要对确定高斯混合模型的阶数, 这样就进一步增加了波形数据拟合的计算量和难度. 因而在这里采用递进拟合的策略, 算法实施的基本策略是: 设定适当的迭代次数和误差期望, 在这里误差期望包括拟合的 $R^2$ 以及原始数据与拟合波形的最大距离值. 首先进行第一次迭代, 在最大迭代次数之内达到 $R^2$ 的期望数值则停止, 假若达到最大迭代次数时误差期望未满足则进入高一阶的迭代, 但是本次迭代的结果输入下一次迭代作为初始控制信息, 即低阶迭代得到的峰值参数以及计算原始数据与拟合波形的距离时得到的最大距离位置作为下一次迭代的初始条件, 直到达到迭代终止的条件. 在本文中误差期望中的 $R^2$ 设置为 0.95, 原始数据与拟合波形的最大距离值期望设置为波形数据的平均值加方差, 技术路线见图 2 所示.

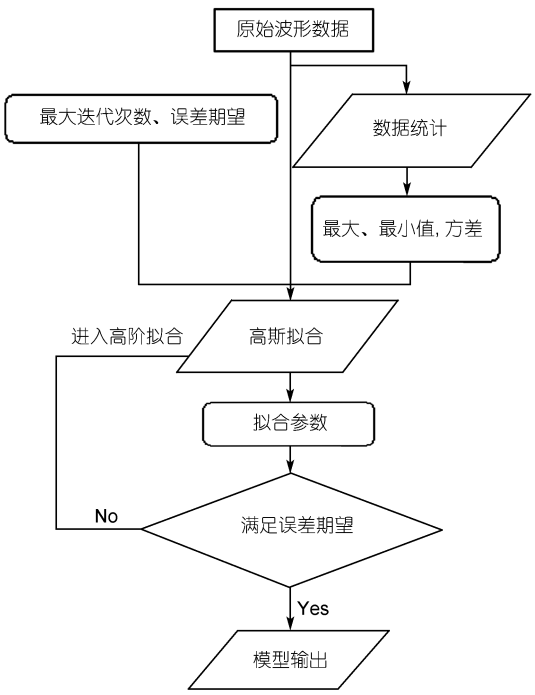



**图 2 递进高斯分解流程**

## 2 波形数据相对定标

激光雷达系统在获取波形数据的过程中, 激光器发射功率并不是一个恒定值, 其变化主要体现在发射脉冲的强度与脉宽的变化. 发射脉冲从传感器到目标之间的传播距离是由飞行高度和扫描角度决

定的, 这意味着不同的发射脉冲大气衰减也有差异, 因而同一次飞行中获取的波形数据其入射脉冲的强度和脉宽并不完全一样. 对于任何一个波形数据而言, 发射脉冲的强度、脉宽以及传输距离是已知的, 设定标准发射脉冲和传输距离, 在考虑发射脉冲的初始状态及大气衰减对回波波形影响的基础上, 将回波波形数据校正到标准化的发射脉冲、传输距离的水平上, 这样可以实现激光雷达波形数据的相对辐射校正.

### 2.1 大气衰减影响

考虑激光具有良好的单色性和方向性, 在水平均一大气条件的假设下, 忽略大气多次散射和发射影响, 激光在大气中辐射传输规律可表达为式(3)的形式[13]:

$$I = I(0)\mathrm{e}^{-\tau/\mu}, \tag{3}$$

其中 $I(0)$代表初始光强, $\tau$ 表示大气光学厚度, $\mu$ 代表传输夹角的余弦值, 考虑两束激光脉冲分别不同的倾斜角下行传输至同一水平面, 则有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\mathrm{e}^{\tau/\mu_2}}{\mathrm{e}^{\tau/\mu_1}}, \tag{4}$$

使用泰勒级数对式(4)展开可得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1+\tau/\mu_2}{1+\tau/\mu_1}, \tag{5}$$

即:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}\cdot\frac{\mu_2+\tau}{\mu_1+\tau}. \tag{6}$$

目前机载小光斑波形激光雷达系统获取数据时发射脉冲的倾斜角一般都小于 25°, 也就是说$\mu_1$ 和$\mu_2$ 都介于 0.9~1 之间. 机载激光雷达一般都采用 1064 nm 左右的近红外波段作为探测波段, 考虑根据该波段的大气散射特性以及激光雷达运载平台的飞行高度低于 1000 m 以下的情况, 激光传输穿过的大气光学厚度$\tau$一般都小于 0.1. 观察式(6)中 $(\mu_2+\tau)/(\mu_1+\tau)$, 其比值介于 $\mu_2/\mu_1$ 与 1 之间, 根据前述各数的取值范围可知, 该比值的变化范围很小. 在激光雷达运行过程当中, $\tau$ 本身是一个很难测量的量, 因而这里使用 $\mu_2/\mu_1$ 和 1 的平均值来近似 $(\mu_2+\tau)/(\mu_1+\tau)$. 这样式(6)可以近似为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}\cdot\left(\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}+1\right)\right) = \frac{\mu_1+\mu_2}{2\mu_2}. \tag{7}$$

### 2.2 发射脉冲对回波的影响

一般而言, 激光雷达的发射脉冲可以采用单峰的高斯模型来拟合, 模型的振幅值、方差两个参数反映了发射脉冲的强度与脉宽, 而激光器运行过程中其功率变化使得不同波形数据的发射脉冲有差异, 拟合模型的振幅值、方差就直接反映了发射脉冲能量和脉宽, 假设发射脉冲的振幅值只影响回波数据的峰值, 而脉宽只影响回波数据的波峰宽度, 因而设定一个标准发射脉冲, 计算波形数据的发射脉冲与标准发射脉冲的振幅值、方差的比例系数, 校正后的波形数据的高斯拟合模型系数为

$$h_m = h_{ori}\cdot\frac{h_{sp}}{h_{st}}, \tag{8}$$

$$w_m = w_{ori}\cdot\frac{w_{sp}}{w_{st}}, \tag{9}$$

其中 $h_{ori}$, $w_{ori}$, $h_m$, $w_m$ 分别为校正前和校正后波形数据高斯拟合模型的峰值强度因子和峰值宽度因子, $h_{sp}$, $w_{sp}$, $h_{st}$, $w_{st}$ 分别代表波形数据发射脉冲和标准脉冲高斯拟合模型的峰值强度因子和峰值宽度因子.

### 2.3 波形数据校正模型

综合考虑发射脉冲与大气衰减考虑对回波的影响, 纠正后波形数据的高斯拟合模型可以表达为

$$\begin{cases} f_m(x_i) = h_m\cdot\dfrac{\mu_1+\mu_2}{2\mu_2}\cdot\mathrm{e}^{\left[-\frac{(x_i-\alpha_i)^2}{w_m^2}\right]}, & (10) \\ G_m(x) = \sum\limits_{i=1}^{i=k} f_m(x_i). & (11) \end{cases}$$

式(10)和(11)分别表示纠正后高斯函数分量和波形数据的高斯拟合模型, 利用纠正后波形数据的高斯拟合模型, 计算在原始波形数据长度范围内的反射强度, 就能够得到校正到标准发射脉冲水平下的波形数据.

## 3 试验与结果分析

本文采用黑河综合遥感联合试验中获取的小光斑激光雷达波形数据为实验数据, 该数据集由 Lite Mapper-5600 小光斑激光雷达系统于 2008 年 6 月在

甘肃张掖市获取, 平均密度为每平方米 1.7 个回波.

### 3.1　波形数据选择

选择飞行区域内道路、农田、林地等典型地表覆盖类型作为研究样本. 考虑到小光斑激光雷达发射脉冲到目标的光斑较小、采样密度高等特点, 以同步获取的高分辨率 CCD 数据为基础, 针对分别选定相对均一的上述三种典型地表类型覆盖区域各一块, 选择处于中心位置的点作为基准坐标, 建立 2 m×2 m 的样区, 通过坐标计算提取落在三种地表类型样区内的波形数据. 其中农田区域有 5 个回波波形数据, 林地和道路区域则分别有 4 个回波波形数据.

### 3.2　相对辐射校正模型参数化

在波形数据相对辐射校正过程中, 模型输入参数包括标准传输距离、标准脉冲与待校正波形数据, 其中标准脉冲、标准传输距离需要通过人工干预指定. 试验中采用的实验数据获取过程中飞行任务的设计飞行高度为 650 m, 所选样区为张掖城区附近, 海拔高度变化较小. 式(10)中大气影响采用激光脉冲与水平方向的夹角的比例来计算, 忽略激光传输过程中大气状况的差异, 采用距离与角度本身是等价的, 因而采用距离比例来描述激光传输过程中大气影响. 在检查波形数据的时候发现飞行高度都在 700 m 左右, 标准传输距离设为 700 m. 从定义上讲标准发射脉冲可以是任意符合单峰高斯模型的激光脉冲, 但是考虑到相对辐射校正过程中, 标准发射脉冲与待校正波形数据本身的发射脉冲差别过大时, 校正模型中的近似条件将会使校正结果具有较大的误差. 因而采用所有参与待校正波形数据的发射脉冲的平均值作为标准脉冲, 其峰值强度为 106.10, 峰值中心位置为 16.02, 脉冲宽度因子为 2.48(图 3).

### 3.3　结果分析

一般而言农田和道路区域的回波数据只包括一个峰值, 而林地区域的回波则有多个峰值, 图 4 表示分别使用常规的最小二乘分解和递进分解两种方法分解林地波形, 从图中可以看出, 常规的最小二乘分解在分解过程中陷入了局部最优化, 在多峰值的情况下递进分解能够更好描述回波数据中多个峰值的振幅和中心位置.

波形数据高斯分解得到的峰值高度、宽度代表了

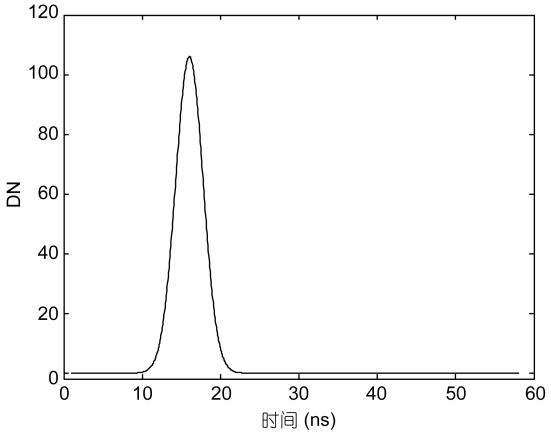



**图 3　标准发射脉冲**

波形数据的特征. 以校正前后波形数据峰值高度、宽度的平均值、方差为指标, 对各个试验区域校正前后波形的特征参数进行统计, 其中林地区域的波形数据只统计最大峰值(表 1).

从表 1 可以看出三类试验区域内波形数据有较大的差异, 其中道路区域的峰值高度最大, 这是因为道路具有较高的反射, 并且是硬目标, 避免了峰值宽度扩展导致的峰值高度减小. 数据获取在夏季, 其时农田区域有大约 1 m 左右的大田玉米, 由于作物冠层的多次散射导致农田区域的峰值宽度最大. 由表 1 中可以看出校正后所有区域波形数据峰值高度方差减小, 其中在林地区域峰值高度变化要比农田区域和道路大; 波形数据校正前后峰值高度的平均值变化相对较小, 并且农田区和林地的平均值减小而道路的平均值变大, 这说明相对辐射校正模型能够提高同一区域波形数据的相似性提高. 波形数据校正前后峰值宽度的变化相对较小, 而且没有明显的变化规律, 这是因为激光雷达发射脉冲宽度变化不大, 只有当激光雷达系统发射脉冲不稳定时峰值宽度校正才会有明显的效果.

## 4　结论与讨论

本文采用递进分解的策略, 解决了激光雷达波形分解中高斯函数的阶数确定问题; 同时利用低阶分解的先验知识, 避免了分解过程中陷入局部优化. 但是本文中采用了从低阶到高阶逐级分解的策略, 从而导致计算效率不高. 在波形分解的基础上, 考虑大气程辐射与激光脉冲强度差异建立激光雷达波形

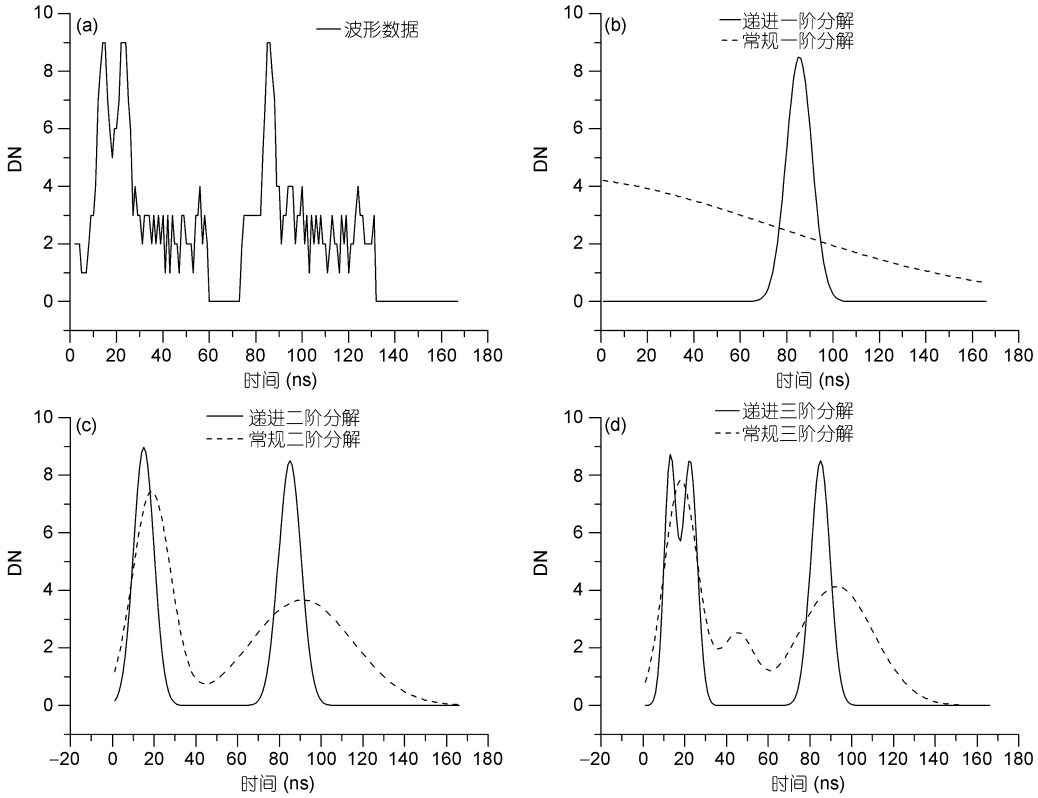



**图 4　常规最小二乘分解与递进分解比较**

**表 1　波形数据校正前后波形参数对比**

| | 统计量 | 农田区 | 道路 | 林地 |
|---|---|---|---|---|
| 峰值高度 | 平均值(校正前) | 19.83 | 32.3 | 12. 96 |
| | 平均值(校正后) | 19.61 | 33.8 | 12. 75 |
| | 方差(校正前) | 2.57 | 2.72 | 2.83 |
| | 方差(校正后) | 1.62 | 2.15 | 1.06 |
| 峰值宽度 | 平均值(校正前) | 4.12 | 2.77 | 5.58 |
| | 平均值(校正后) | 4.11 | 2.78 | 5.77 |
| | 方差(校正前) | 0.36 | 0.38 | 0.48 |
| | 方差(校正后) | 0.37 | 0.29 | 0.27 |

数据相对辐射校正模型, 使得同样地物之间波形数据的相似性提高, 实现了回波数据的相对辐射校正. 由于地物的方向性反射, 同一目标对不同方向入射激光的反射率存在差异, 并且地物特别是林地的多次散射也会导致波形数据的差异, 因而在进一步的研究工作中需要考虑地物的方向性反射, 探索不同入射方向的激光雷达波形数据的归一化校正处理.

**致谢**　黑河综合遥感联合试验提供激光雷达波形数据, 审稿专家严谨认真的审阅为文章提出了宝贵的修改意见, 在此一并致谢.

## 参考文献

1　Ackermann F. Airborne laser scanning——Present status and future expectations. ISPRS-J Photogramm Remote Sens, 1999, 54: 64–67

2 王成, Menenti M. 机载激光雷达数据的误差分析及校正. 遥感学报, 2007, 11: 390–397
3 Drake J B, Knox R G, Dubayah R O, et al. Above-ground biomass estimation in closed canopy neotropical forests using LiDAR remote sensing: Factors affecting the generality of relationships. Glob Ecol Biogeogr, 2003, 12: 147–159
4 Lefsky M A, Cohen W B, Parker G G, et al. LiDAR remote sensing for ecosystem studies. Bioscience, 2002, 52: 19–30
5 Mallet C, Bretar F. Full-waveform topographic LiDAR: State-of-the-art. ISPRS-J Photogramm Remote Sens, 2009, 64: 1–16
6 覃驭楚, 吴运超, 牛铮, 等. 基于小光斑激光雷达数据的稀疏林地冠层高程重建. 自然资源学报, 2008, 23: 507–513
7 Sun G, Ranson K J. Modeling LiDAR returns from forest canopies. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2000, 38: 2617–2626
8 Hofton M A, Minster J B, Blair J B. Decomposition of laser altimeter waveforms. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2000, 38: 1989–1996
9 Wagner W, Ullrich A, Ducic V, et al. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS-J Photogramm Remote Sens, 2006, 60: 100–112
10 马洪超, 李奇. 改进的 EM 模型及其在激光雷达全波形数据分解中的应用. 遥感学报, 2009, 13: 35–41
11 Hofle B, Pfeifer N. Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. ISPRS-J Photogramm Remote Sens, 2007, 62: 415–433
12 Dempster A P, Laird N M, Rubin D B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. J Royal Stat Soc Ser B-Methodol, 1977, 39: 1–38
13 徐希孺. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 2005