引文格式：杨小东,张振宇,施颢,等. 激光测距复杂重叠回波信号解算方法[J]. 地理空间信息, 2026, 24(1): 7-12. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.01.002

激光测距复杂重叠回波信号解算方法

杨小东[1]，张振宇[1]，施　颢[2]，柳东升[3]
（1. 园测信息科技股份有限公司，江苏 苏州 215000；2. 江苏省基础地理信息中心，江苏 南京 210013；
3. 浙江省隧道工程集团有限公司，浙江 杭州 310000）

摘　要：针对目前分解复杂全波形激光雷达回波信号出错的问题，提出了基于波形拐点分布的高斯分解方法。首先按返回激光强度由高到低逐步递进对目标回波数据进行分解，再按照目标波形曲线拐点分布状态采用不同标准差解算方法实现精准波形分解，最后利用 Levenberg Marquardt 分线性最小二乘算法进行拟合得到准确的模拟波形。为验证该方法对波形数据分解的精度，分别采用存在微弱叠加波形、复杂叠加波形和模拟复杂叠加波形等数据进行实验，并与现有常用方法进行比对。结果表明，该方法分解的图像贴合程度和精度评价指标均优于其他方法，能准确有效地分解复杂回波信号。

关键词：激光雷达；复杂回波；波形分解
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）01-0007-06

Laser Ranging Complex Overlapping Echo Signal Solution Method

YANG Xiaodong[1], ZHANG Zhenyu[1], SHI Hao[2], LIU Dongsheng[3]
(1. Garden Test Information Technology Co., Ltd., Suzhou 215000, China;
2. Jiangsu Basic Geographic Information Center, Nanjing 210013, China;
3. Zhejiang Tunnel Engineering Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the problem of error in decomposing the echo signal of complex full waveform LiDAR, we proposed a Gaussian decomposition method based on waveform inflection point distribution. We decomposed the target echo data step by step according to the return laser intensity from high to low at first. Then, according to the inflection point distribution state of target waveform curve, we used different standard deviation solution methods to achieve accurate waveform decomposition. Finally, we used Levenberg Marquardt sub-linear least squares algorithm for fitting to obtain accurate simulation waveform. In order to verify the accuracy of this method for waveform data decomposition, we used the weak overlapping waveform data and the complex overlapping waveform data to conduct experiments respectively, and compared with the existing commonly used methods. The experimental results show that the proposed method is superior to other methods in terms of the degree of image fitting and accuracy evaluation index of decomposed image, and can accurately and effectively decompose the complex echo signal.

Key words: LiDAR, complex echo, waveform decomposition

激光雷达系统因其测量精度高、时空分辨率高、垂直分辨率高等特点被广泛应用于三维成像、地球探测和资源保护等领域[1-3]。随着激光和光电探测技术的进一步发展，激光探测技术取得了长足进步，搭载激光传感器的载体也由原有的固定式传感器拓展至车载、机载以及星载等多元化探测手段[4-6]。全波形激光雷达脉冲数据作为激光雷达探测过程中获取的原始数据，记录着从发射到接收的回波数据[7]。通过解算全波形数据能获取探测目标的多种信息，因此如何高效精准分解多样化全波形回波信号数据是当前激光雷达应用过程中需要深入研究的问题。

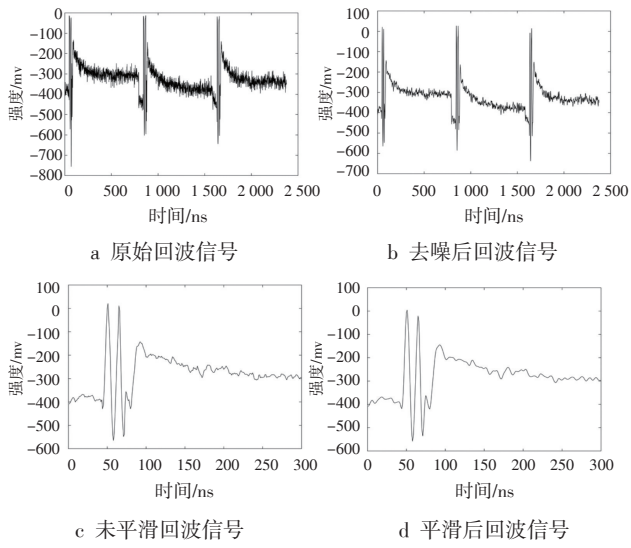
对于激光回波信号数据分解处理，国内外学者进行了大量研究，目前较常用的分解方法包括峰值检测法、反卷积法和波形分解法[8]，峰值检测法缺乏全局考虑，在波形检测时成功率较低[9]；反卷积法虽能分解复杂回波信号，但迭代次数多、计算时间较长，且精度较高的反卷积法需要提供大量训练数据，易受噪声干扰[10]；波形分解法能快速分解目标波形数据。由于高斯波形与回波信号波形相似，因此高斯分解法是现有波形分解法中应用最广泛的方法，受到广大学者[11-13]关注，但复杂叠加回波数据的分解精度仍存在一定问题。亦有学者[14-15]在原有分解方法的基础上添加参数拟合方法进一步优化波形数据，但却忽略了优化方法依托于良好的估计参数。鉴于此，本文提出了一种基于波形拐点分布的高斯分解方法。

第一作者简介：杨小东（1979—），本科，高级工程师，研究方向为三维激光应用，E-mail：yangxd@dpark.com.cn。

1 复杂回波信号解算方法

1.1 信号预处理

波形信号预处理主要包括噪声估计、滤波去噪和信号平滑等步骤。信号处理前需设定一定的估计，以降低传感器对信号的影响。将回波信号首尾各5%的采样点均值作为估计噪声，获取的回波信号由于噪声影响，存在大量“伪拐点”，因此利用S-G滤波器对回波信号进行去噪，避免噪声对后续信号解算造成影响。去除噪声后回波信号仍存在噪声毛刺，需进一步平滑处理。滤波去噪和信号平滑对比见图1。



a 原始回波信号　b 去噪后回波信号

c 未平滑回波信号　d 平滑后回波信号

图1 滤波去噪和信号平滑对比图

预处理后的回波信号已具备信号解算条件，但仍存在残余噪声和微量噪声毛刺，为避免影像后续信号解算，信号分解前需设定分解阈值。信号分解阈值的表达式为：

$$\sigma_{\text{th}}=3\sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(y(i)-f_x(i))^2}{n}}+\text{noise} \tag{1}$$

式中，$y(i)$ 为原始回波信号；$f_x(i)$ 为滤波后回波信号；n 为采样点数量；noise 为原始信号的背景噪声。

1.2 高斯分解方法

高斯分解法最早由Hofton提出，认为激光雷达回波信号是由若干个高斯函数分量叠加得到（图2）。通过若干高斯分量叠加逼近激光回波信号的表达式为：

$$f(x)=\sum_{i=0}^{n}A_i\exp(-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i})+\text{noise} \tag{2}$$

式中，A_i、μ_i、σ_i 分别为波形 i 的脉冲振幅、中心位置和标准差。

1.3 基于波形拐点分布的高斯分解法

高斯函数的振幅、中心位置、半波宽、振幅间距

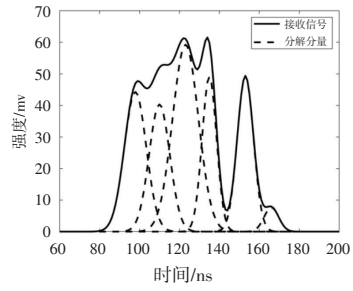


图2 波形分解示意图

离均为波形分析中的重要参数，其解算均无法离开波峰和拐点位置判断，即寻找局部最大点。局部最大点的计算公式为：

$$\begin{cases}f_x(i)>f_x(i+1)>f_x(i+2)\\ f_x(i)>f_x(i-1)>f_x(i-2)\end{cases} \tag{3}$$

波形信号中拐点位置主要通过平面曲线离散点集拐点的快速查找算法确定[16]，再通过待定点与前后两点判断待定点是否属于目标曲线拐点，判断依据见式（5）。

$$S_{i-1,i}=(x_i-x_{i-1})(y_{i+1}-y_{i-1})+(y_{i-1}-y_i)(x_{i+1}-x_{i-1}) \tag{4}$$

式中，$S_{i-1,i}$ 为判断拐点的评价参数。

$$S_{i-1,i}S_{i,i+1}<0 \tag{5}$$

若目标点 $P(x_i,y_i)$ 与前后两点计算得到的评价参数满足上述条件，则该点为目标曲线拐点；再搜寻最高峰值两侧拐点并进行分类，从而根据不同拐点分布情况建立不同标准差计算方法。拐点分类的计算公式为：

$$\begin{cases}\text{R inf}_{\text{r}}=\text{R inf}-\text{R inf}_j\\ \text{L inf}_{\text{l}}=\text{L inf}-\text{L inf}_j\end{cases} \tag{6}$$

式中，R inf_{r}、L inf_{l} 分别为峰值两侧存在拐点数量；R inf、L inf 分别为目标波形在峰值两侧存在的拐点数量；R inf_j、L inf_j 分别为波峰右、左侧交界点外拐点数量，交界点即为局部最小点。

对分类后的拐点进行统计并建立不同标准差解算公式。分类拐点主要分为两种情况，即 R inf_{r}、L inf_{l} 均为1和 R inf_{r}、L inf_{l} 任一拐点数量不为1。针对 R inf_{r}、L inf_{l} 均为1的情况，标准差解算方法为：

$$\begin{cases}\delta=\text{medium}(|\mu-P_{xi}|,\frac{|\mu-\text{tg}\,l|}{\sqrt{2\ln 2}}),\ \text{L inf}=1\text{且R inf}>1\\ \delta=\text{medium}(|\mu-P_{xi}|,\frac{|\mu-\text{tg}\,r|}{\sqrt{2\ln 2}}),\ \text{R inf}=1\text{且L inf}>1\\ \delta=\text{medium}(|\mu-P_{xi}|,\frac{|\mu-\text{dis}|}{\sqrt{2\ln 2}}),\ \text{Others}\end{cases} \tag{7}$$

式中，μ 为峰值对应的横坐标；P_{xi} 为距离该峰值最近的左右两拐点对应的横坐标；$\text{tg}\,l$、$\text{tg}\,r$ 分别为距离左、右侧半峰高最近点的横坐标。

该情况可分为3类：①当 L inf=1 且 R inf>1 时

（图3a），峰值左侧更能反映真实波形，将左峰一半位置来计算标准差，并与两侧拐点位置进行比较，由于 $R\,inf_r$ 、 $L\,inf_l$ 均为1，其他峰值对于主峰干扰较小，因此取中间值作为标准差表示该波峰；②当 R inf=1 且 L inf>1 时（图3b），峰值右侧更能反映真实波形，将右峰一半位置来计算标准差并进行比较；③当 R inf=1 且 L inf=1 （图3c）或 R inf>1 且 L inf>1（图3d）时，波峰表现为单个波形或被多个波形包裹但不叠加，因此需要在曲线两侧寻找距离半峰位置最近的两个点，并测量这两个点与中心位置在横轴上的距离，其中与中心位置横轴距离最近点的横轴坐标即为 dis，再进一步求得该峰标准差。

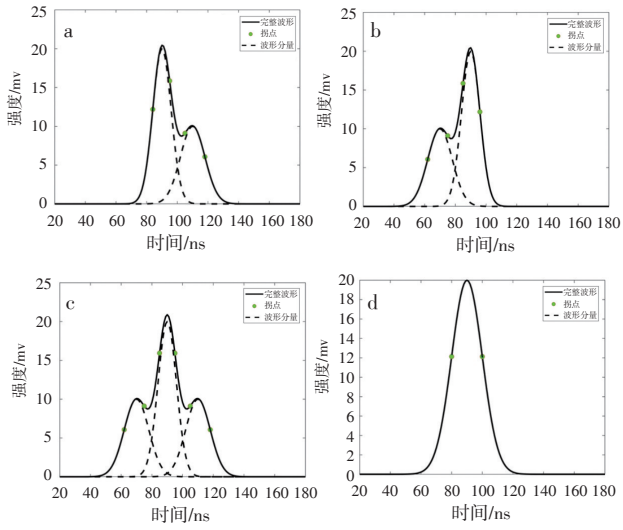


图3　拐点数量均为1示意图

针对 $R\,inf_r$ 、 $L\,inf_l$ 任一拐点数量不为1的情况，标准差解算方法为：

$$\begin{cases}\delta=\min\left(\left|\mu-P_{xl}\right|,\dfrac{\left|\mu-\mathrm{tg}\,l\right|}{\sqrt{2\ln 2}}\right), & \text{L inf}=1\text{且R inf}>1\\ \delta=\min\left(\left|\mu-P_{xr}\right|,\dfrac{\left|\mu-\mathrm{tg}\,r\right|}{\sqrt{2\ln 2}}\right), & \text{R inf}=1\text{且L inf}>1\\ \delta=\dfrac{\left|\mu-\mathrm{Dis}\right|}{\sqrt{2\ln 2}}, & \text{R inf}>1\text{且L inf}>1\\ \delta=\dfrac{\left|\mu-\mathrm{dis}\right|}{\sqrt{2\ln 2}}, & \text{Others}\end{cases}\tag{8}$$

式中，P_{xl} 、 P_{xr} 分别为距离该峰值最近的左、右拐点对应的横坐标。

该情况可分为4类：①当 L inf=1 且 R inf>1 时（图4a、4d），峰值左侧更能反映真实波形，且峰值右侧存在波形叠加，选用峰值左侧拐点与左侧最贴近半峰点位置作为标准差解算依据，由于 $R\,inf_r$ 、 $L\,inf_l$ 中任一拐点数量不为1，对于主峰有较大干扰，因此选取最小值作为标准差，避免标准差过大合并叠加波；②当 L inf=1 且 R inf>1 时（图4b、4e），峰值右侧更能反映真实波形，选用峰值右侧拐点与右侧最贴近半峰点位置作为标准差解算依据；③当 R inf>1 且 L inf>1 时（图4c），由于拐点受到叠加波形影响，中心到拐点的距离无法准确表达标准差，因此将峰值左右两侧各两个拐点平均位置分别记为S1和S2，寻找最大振幅两侧接近振幅值一半位置的振幅值，记录其对应的时间位置，再计算中心位置与这两个时间位置的距离，距离最近点记为S3，比较S1、S2和S3与中心位置的距离，中间值即为Dis，最后代入公式求得标准差；④其他情况（图4f），如一侧或两侧缺少拐点，原因在于幅值对应的间距过短，拐点未被判断出来，因此找到振幅左右对应一半位置的振幅点，将与中心位置距离最近点dis作为标准差计算参数。

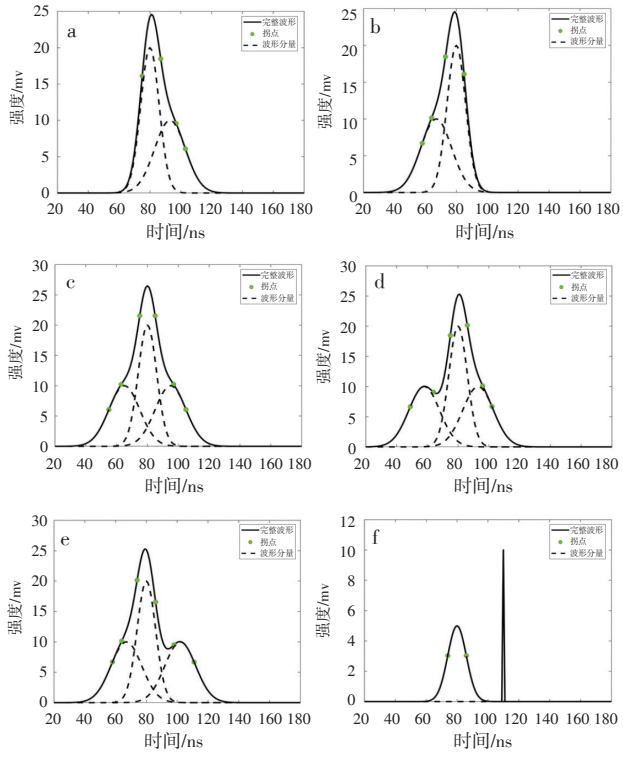


图4　任一拐点数量不为1示意图

将初始参数 A 、 μ 、 σ 代入高斯函数中，再将滤波后的回波信号与高斯函数相减，为使相减后的振幅值非负，令原始波形信号振幅低于0 mv的部分等于0 mv，完成迭代。当振幅小于阈值时，停止迭代，分解流程见图5。

1.4　参数剔除与最优化估计

由于迭代分量的分解将产生一些无意义的高斯分量（图6），因此在迭代时和迭代结束后需剔除这些分量。任意两个高斯分量若小于一个发射脉冲宽度，则可剔除波峰值较小的分量。虽然上述方法能很好地进行分解，但只是对目标波形相关参数的大致估计，分

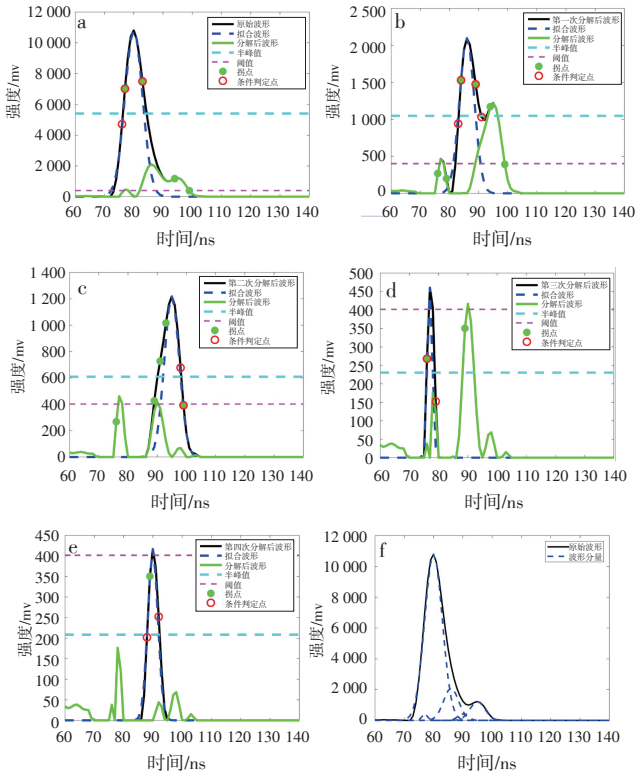


图5　高斯拐点选择分解法分解流程

解过程中与实际波形仍有一定差距，且在分解过程中还会产生负震荡现象（图7），因此需进行参数优化，

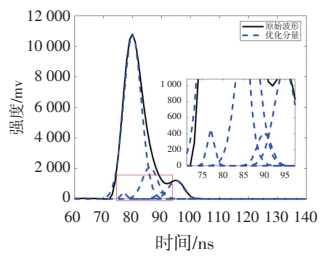


图6　过度分解示意图

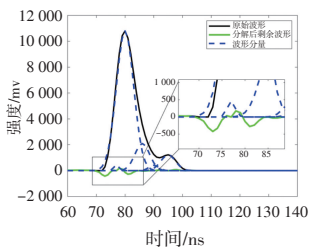
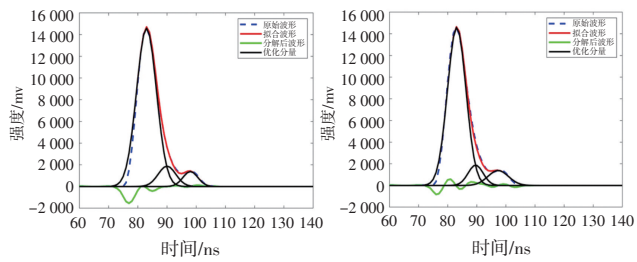


图7　波形分解负震荡现象

使高斯函数模型更加接近滤波后的波形。目前参数优化主要采用非线性最小二乘法进行拟合。常用的非线性最小二乘法为Levenberg-Marquardt（LM）算法，同时具有梯度下降法和牛顿法的优点，通过调整步长找到函数值中最优参数，但极度依赖初始参数。高斯拐点选择分解法为该方法提供了良好的基础参数，参数优化后有效缓解了负震荡现象（图8），且使波形更贴合滤波后波形。



a 初步分解后波形　　b 优化拟合后波形

图8　参数优化对比

2　波形分解实验与分析

2.1　弱叠加回波数据分解分析

为验证本文方法的精度和有效性，本文对存在叠加情况且回波强度存在明显差异波形进行分解，并对比目前通用方法。采用迭代法、拐点匹配法和本文方法对该样本数据进行解算，各方法的分解结果见图9，可以看出，3种方法均能成功分离出3个高斯分量，对强度较大的波形均成功实现了分离；但对于微弱波形，迭代法分解得到的数据与实际波形存在明显偏移，拐点匹配法仅对第一个样本数据实现较好的数据分解，其余两个样本数据均存在偏移现象，本文方法未产生偏移现象，拟合波形与样本数据能够很好贴合，仅在第一、三个样本数据中分解微弱波形相较于原始数据偏宽，其原因在于数据预处理后仍存在一定噪声影响，导致目标样本数据无法完全用高斯函数表示，在参数优化过程中为考虑全局误差在数据末端出现分解波形过宽的现象。为更直观地体现本文方法的分解精度，本文采用均方根误差（RMSE）和决定系数（R^2）对拟合结果进行精度评价，RMSE越小，表示与原始数据越贴合；R^2越接近于1，表示拟合波形曲线与原始波形曲线越相似。由表1可知，在3个样本数据中本文方法均优于其他两种方法，虽然在精度评价指标中精度相差不大，但迭代法、拐点匹配法的精度指标均建立在微弱波形偏移情况上，无法正确表达目标波形参数。

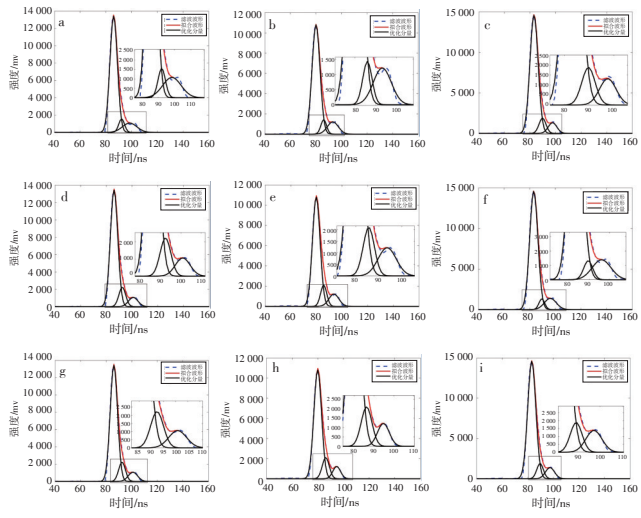


图9　3种算法对弱叠加波形分解结果

注：a~c为迭代法；d~f为拐点匹配法；g~i为本文方法。

表1　微弱叠加波形分解算法对比

组数	迭代法		拐点匹配法		本文方法	
	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2
1	2.17	0.997 1	1.99	0.997 6	1.98	0.997 6
2	1.55	0.997 9	1.24	0.998 7	1.23	0.998 7
3	2.29	0.997 5	2.44	0.997 1	2.26	0.997 6

2.2　公共复杂回波分解分析

为验证本文方法分解的准确性和适用性，本文采用美国航天宇航局的机载全波形激光雷达系统数据进行验证。实验区位于密西西比州伊萨奎纳西南部（34°07 N、88°28 E），数据采集时间为 2019 年 5 月 23 日，下载自 https://lvis.gsfc.nasa.gov。首先对样本数据进行预处理，再分别采用迭代法、拐点匹配法和本文方法对从样本数据中随机抽取的波形数据进行分解，最后采用 LM 算法对分解得到的估计参数进行拟合优化。3 种方法的波形分解拟合结果见图 10~12，分解精度评价见表 2。

从分解波形数量来看，在面对相同复杂回波信号数据条件下，本文方法能分解出相等或更多的波形分量，较好地表达波形曲线信息。从分解结果图来看，迭代法和拐点匹配法未能很好地分解复杂叠加波形，极易产生遗漏和错误判断的情况，其原因是它们无法对拐点信息进行有效判断，导致得到的波形参数中的

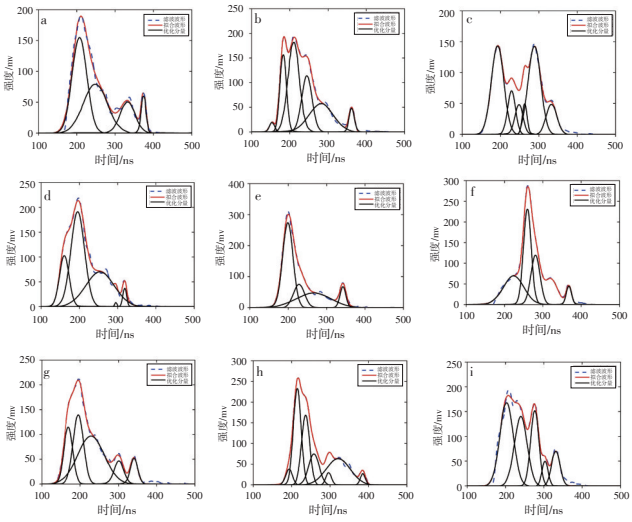


图 10　迭代法优化拟合结果图

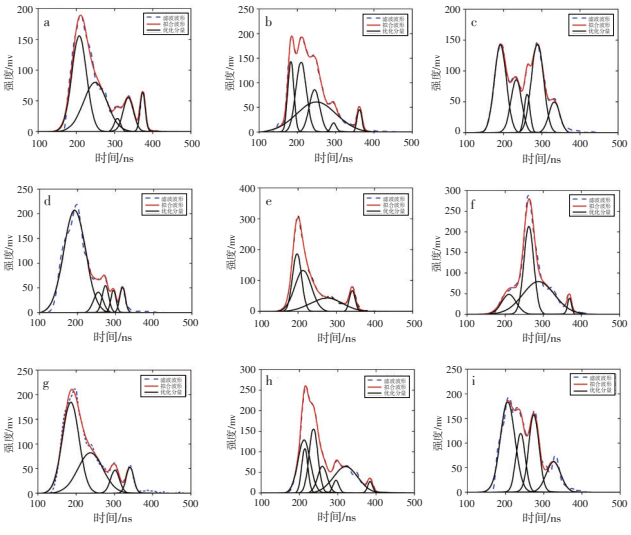


图 11　拐点匹配法优化拟合结果图

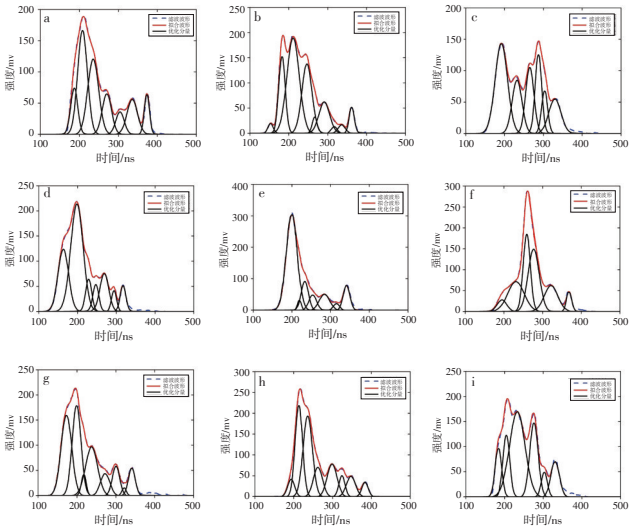


图 12　本文方法优化拟合结果图

标准差偏大，从而将多个叠加波形判断为单个波形数据，而本文方法对拐点分布情况进行分类，针对不同分布类型采用不同的标准差计算公式，提供了精确的高斯波形参数。从精度指标来看，本文方法的 RMSE 在多组样本数据中均小于其他两种方法，且 R^2 更接近 1，说明本文方法能更好地分解复杂回波信号且具有较强的适用性。

为了进一步证明本文方法的有效性，选取陆地区域 16 384 条回波信号进行分解，再利用 R^2 的平均值对分解得到的波形分量进行比较。值得注意的是，波形分解的准确性至关重要，一旦估计失误，将导致波形分解错误，振幅分解中出现负值，该类情况被界定为不可靠脉冲。由表 3 可知，本文算法分解的可靠脉冲数量最多，可靠比率达到 98.64%，平均 R^2 接近于 1；迭代法的可靠脉冲数量较少，这与该算法拟合优化时将所有高斯波形固定分解有关；拐点匹配法的不可靠脉冲数量最多，说明在复杂叠加脉冲的情况下根据残差来添加波形的方法效果并不理想。

2.3　模拟复杂回波分解分析

为深入探究各方法在复杂回波分解中的精度表现，本文叠加多个高斯波形，构建了一个模拟复杂回波数据集，并采用 3 种方法对该模拟波形信号进行分解。分解得到的波形见图 13，迭代法虽能准确分解出模拟波形中的波形分量数量，但在面对大面积迭代波形时，无法精确获取半宽波形，从而导致后续分解过程中出现误差；拐点匹配法在应对复杂迭代波形时，由于无法根据残差有效添加波形，因此完全丧失了波形分解能力；本文方法则与原始波形数据更契合，能准确拟合出原始波形的波形分量数量，为后续波形拟

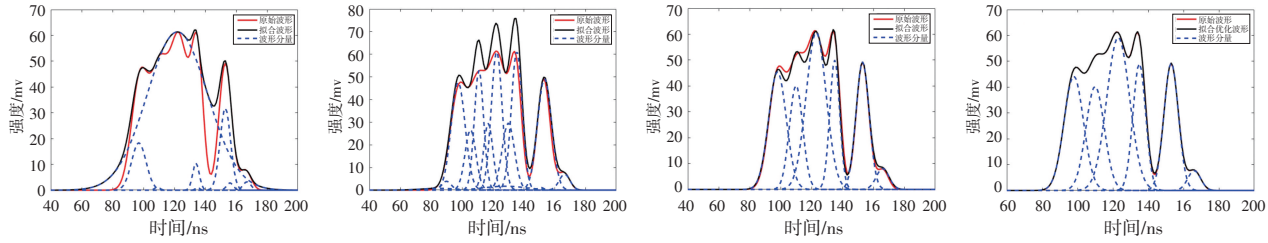
表2 多种波形分解算法对比

组数	迭代法			拐点匹配法			本文方法		
	N	RMSE	R^2	N	RMSE	R^2	N	RMSE	R^2
1	4	1.07	0.987 2	5	1.03	0.988 1	7	0.77	0.993 3
2	6	0.80	0.994 8	6	0.79	0.994 9	9	0.71	0.995 9
3	6	0.79	0.992 0	5	0.80	0.991 6	6	0.77	0.992 4
4	5	1.03	0.991 0	5	1.44	0.982 6	7	0.93	0.992 7
5	4	0.83	0.995 5	4	0.84	0.995 5	7	0.82	0.995 7
6	5	0.92	0.993 6	4	1.10	0.989 1	6	0.86	0.994 4
7	5	0.85	0.993 5	4	1.14	0.990 1	8	0.76	0.994 8
8	7	0.83	0.995 1	7	0.83	0.995 1	8	0.79	0.995 6
9	5	1.23	0.995 1	4	1.34	0.986 0	6	1.00	0.992 2

表3 测区分解结果对比

方法	可靠脉冲数	不可靠脉冲数	脉冲总数	平均 R^2	可靠比率/%
迭代法	15 483	901	16 384	0.938 5	94.50
拐点匹配法	11 331	5 053	16 438	0.686 0	69.15
本文方法	16 162	222	16 384	0.979 9	98.64

合提供了更精确可靠的基础参数。此外，在本文方法分解参数的基础上，对该分解参数进行了拟合优化，使拟合波形与原始数据更接近（图13d）。原有分解参数和拟合后波形参数见表4，本文方法能在无基础参数的情况下，为模拟波形提供良好的分解基础参数。在分解参数的基础上对分解波形进行拟合优化，得到的RMSE仅为0.001 6，且 R^2 值为1，充分证明了本文方法与原始模拟波形高度契合。因此，本文方法能真实有效地完成复杂波形分解任务，即使在存在叠加波形的情况下，也能达到良好的分解效果。



a 迭代法　b 拐点匹配法　c 本文方法　d 本文方法优化后结果

图13 3种方法对模拟叠加波形分解结果

表4 模拟波形分解算法对比

	参数	1	2	3	4	5	6
	实际参数	45	40	60	50	50	8
A	解算参数	47.666 5	35.455 0	61.359 9	54.025 2	49.183 6	7.505 2
	拟合参数	44.258 9	40.316 4	59.248 4	49.101 2	49.364 3	7.662 8
	实际参数	98	110	123	135	153	166
μ	解算参数	99	110	122	135	153	166
	拟合参数	97.898 5	109.973 8	123.034 6	134.967 7	153.010 4	166.033 1
	实际参数	5.500 0	5.000 0	6.500 0	3.500 0	4.000 0	3.500 0
δ	解算参数	5.945 3	4.671 3	5.945 3	4.000 0	4.246 6	3.397 3
	拟合参数	5.489 3	5.177 7	6.479 9	3.610 8	4.057 5	3.635 2

注：RMSE为0.097 8、R^2 为0.996 0；拟合优化后RMSE为0.001 6、R^2 为1。

3 结 论

全波形激光雷达回波信号可记录完整的脉冲数据，提供目标地物完整信息；但目前高斯波形方法在分解复杂回波信号时并不完善，迭代法和拐点匹配法在面对复杂叠加波形时，难以准确分解目标波形，无法为后续参数优化拟合提供良好的参数基础。鉴于此，本文提出了基于波形拐点分布的高斯分解法。为验证本文方法的可靠性，分别从弱叠加回波、复杂叠加回波和模拟复杂波形数据等方面进行实验论证，结果表明不论是弱叠加回波还是复杂叠加回波，本文方法均优于其他两种方法，有效弥补了无法准确分解复杂叠加波形信号的缺点，且在各样本数据分解过程

（下转第25页）