

国产测绘级激光雷达关键技术 及交通设施数字化应用

毛庆洲 教授

武汉大学遥感信息工程学院

2023年6月

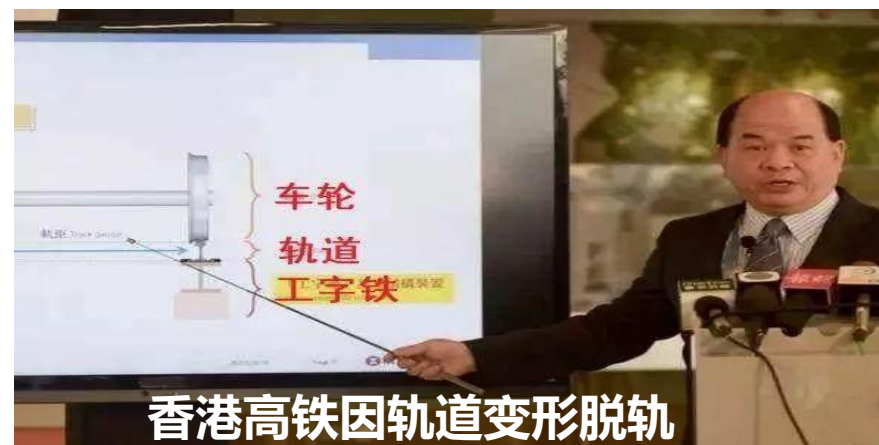


研究背景

1.1 研究背景-基础设施安全运维是国家重大需求

基础设施“结构形状和表面变化”是众多安全事故的直接原因

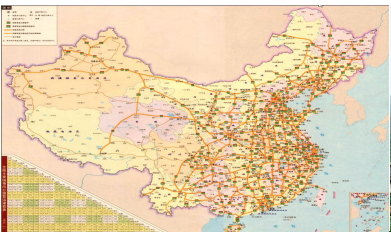
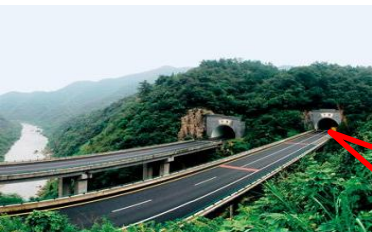
- ▶ **铁路**：轨道板离缝、钢轨磨耗、扣件失效等影响行车安全
- ▶ **隧道**：衬砌掉块、透水、侵界、错台、结构变形等引发重大安全事故
- ▶ **公路**：高速公路\机场跑道等路面坑槽、破损等影响出行安全



结构形面“状态测量”是基础设施安全运维的关键

1.1研究背景-结构形面状态测量现状与难题

我国基础设施正从大规模建设向精细化养护转变






空间分布广泛、环境恶劣

观测时间受限、精度高

结构尺度多变、形状复杂

普查测全难

指标测精难

状态判准难

精度差



效率低

高效、高精度测量技术是大范围基础设施状态测量的亟需

1.1主要创新思路

工程
应用

公路、隧道、铁路、机场等交通基础设施高精度检测测量



快速、精准、智能的系列自主测量系列装备

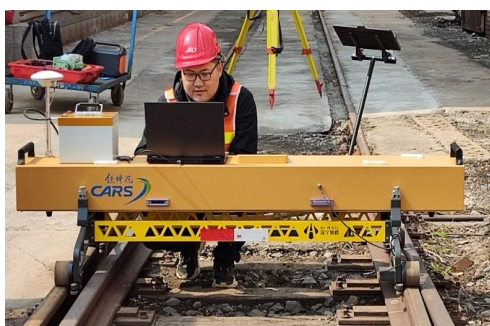
装备
研制



公路隧道检测



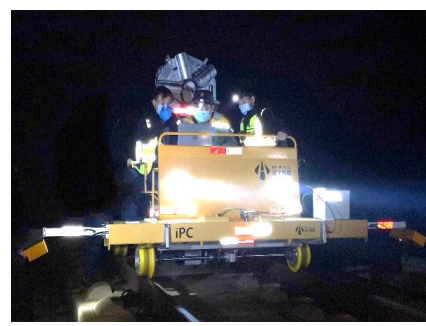
大机捣固清筛测量



道岔结构检测



地铁隧道精密测量



高铁全断面测量



技术
突破

发明高精度脉冲-相位混合式激光扫描装置

- 高信噪比高速率数字化波形高精度高重频测距
- 点频150万HZ、高精度 (0.5mm)

发展融合高分影像和点云的交通基础设施病害分析与提取方法

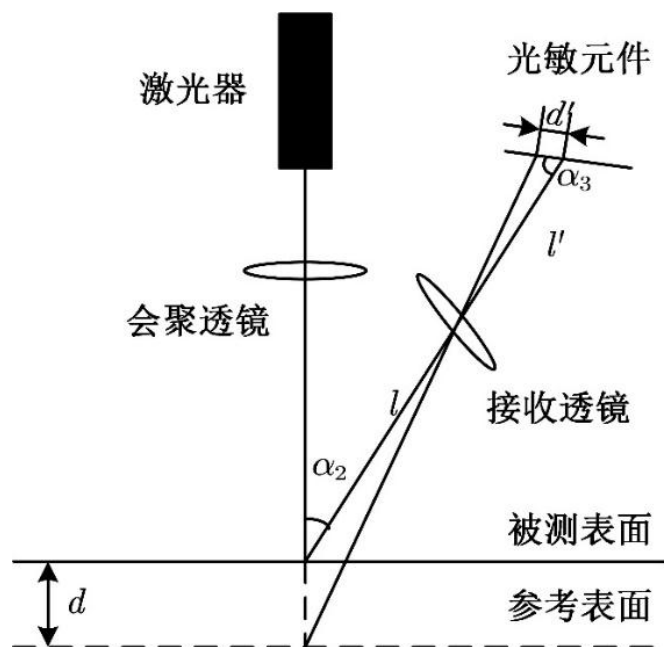
- 小波分析隧道环片点云去噪
- 融合点云灰度\深度图、高分图像的病害定位及精准识别

方法
创新

2

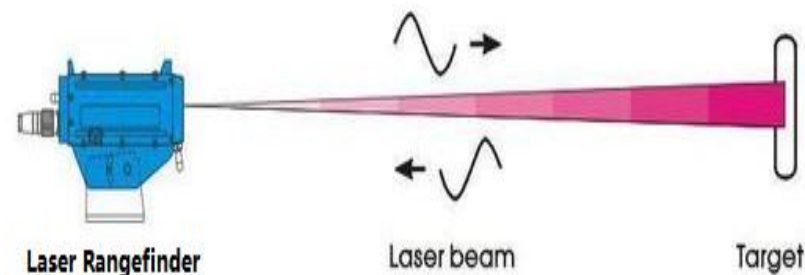
高精度激光雷达技术

2.激光雷达测距原理及方法



■ 三角法测距

- ✓ 测距精度可达到 μm 级
- ✓ 系统简单，成本较低
- 测量距离很近，精度与测程互相制约

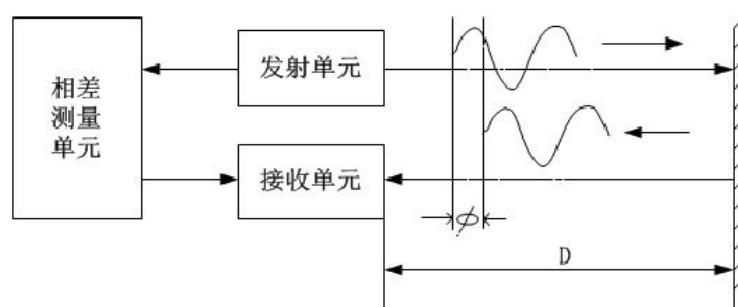


■ 脉冲式激光雷达(dTOF)

- ✓ 测量距离远
- ✓ 系统简单，易小型化
- 测距精度较低，为cm级到mm级

■ 脉冲式单光子激光雷达

- ✓ 测量距离很远
- 测距噪点多
- 测量速度慢



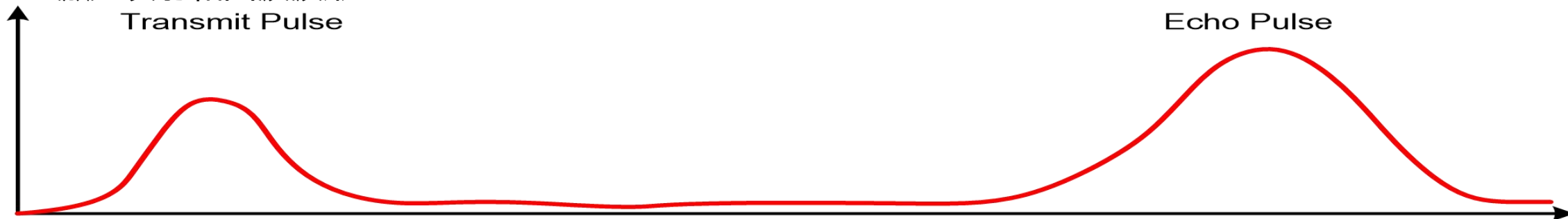
■ 相位式激光雷达

- ✓ 测距精度高，为mm级到亚mm级
- 测量距离近
- 系统较复杂

2.全波形激光雷达技术

➤ 波形数字化方法——高速ADC采样技术及FPGA在线处理技术

■ 激光发射和回波波形



■ 波形数字化



- 数据量高达50Gbits，由FPGA强大的在线处理能力，实时解算种子光和回波的时间间隔，实现高精度测距、多回波检测、获得目标物反射率等需求。

关键点：处理算法的优化及其FPGA实现

2.全波形激光雷达技术

➤ 高精度测距——多回波技术

● 高速处理能力

每个探测到的回波都需要进行处理，对算法效率提出很高要求

● 波形分解

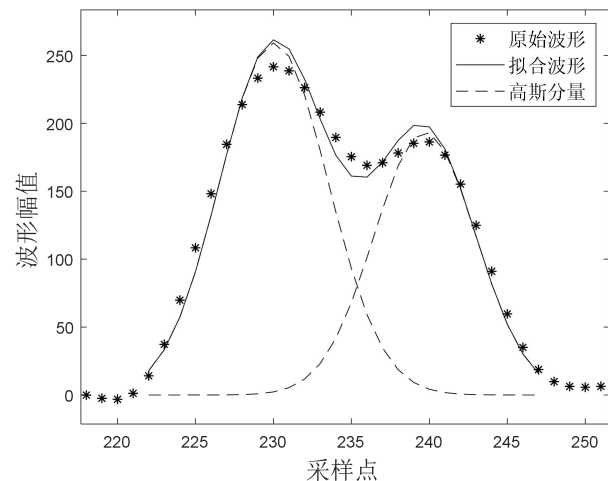
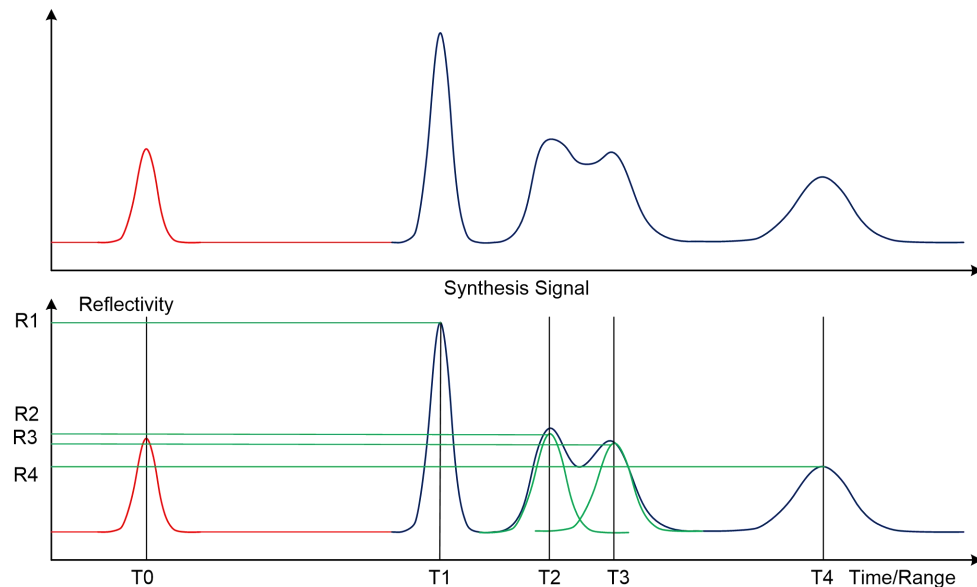
常见的波形分解算法有EM、LM算法

EM算法：将波形视为概率密度函数，通过求解波形占比进而求解每个子波形的参数；

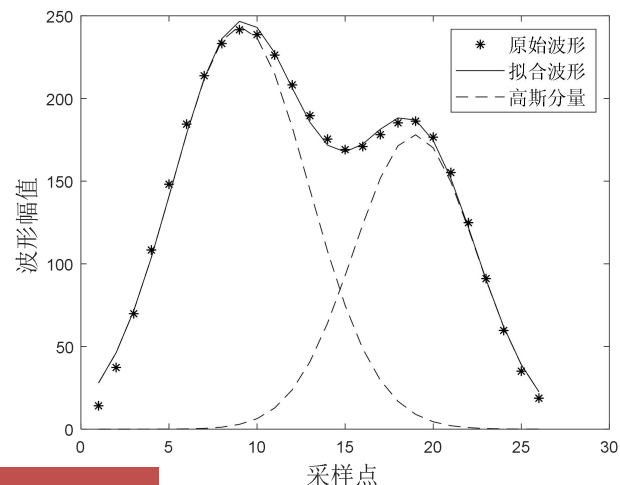
LM算法：利用非线性最小二乘法求解多个波形参数

可将重叠波形分解出数个子波形，获得更多测距值

波形分解需要迭代，耗时较长，对波形形态要求较高，且回波间隔小于1倍FWHM将无法分辨是否有多个波形；小于1.5倍FWHM测距偏差较大；大于2倍FWHM波形已基本分离



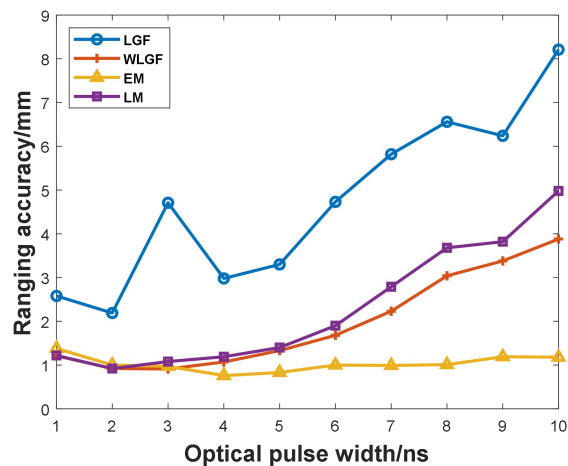
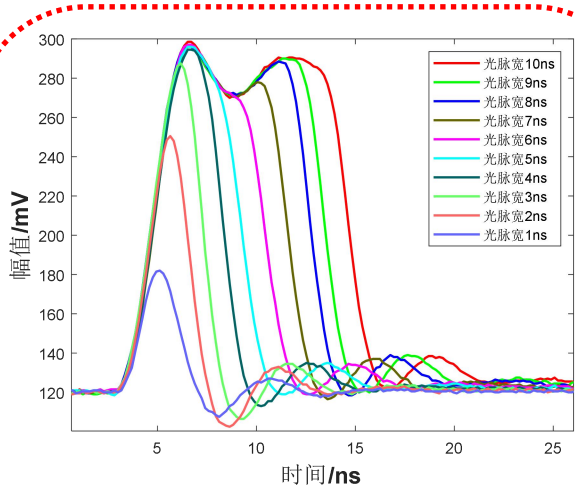
EM



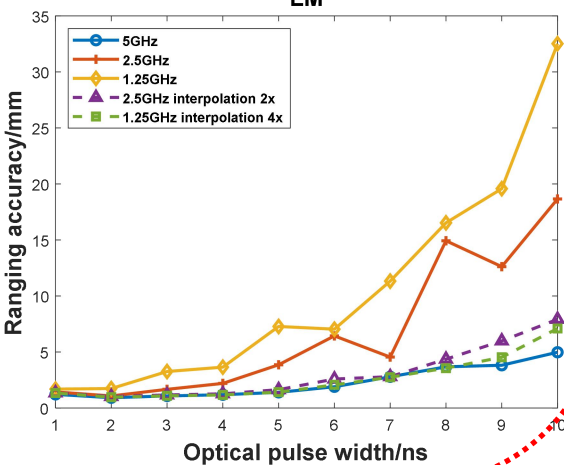
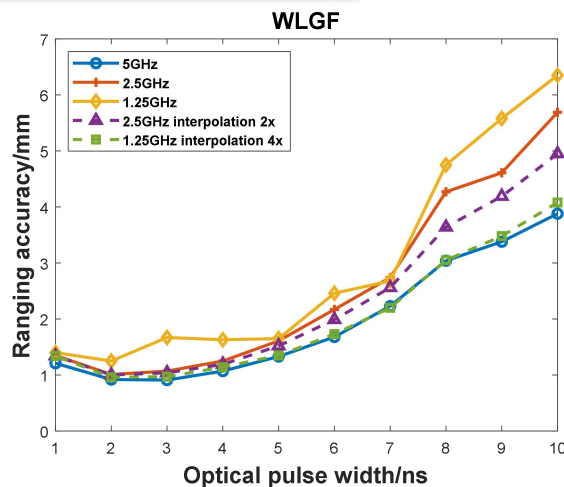
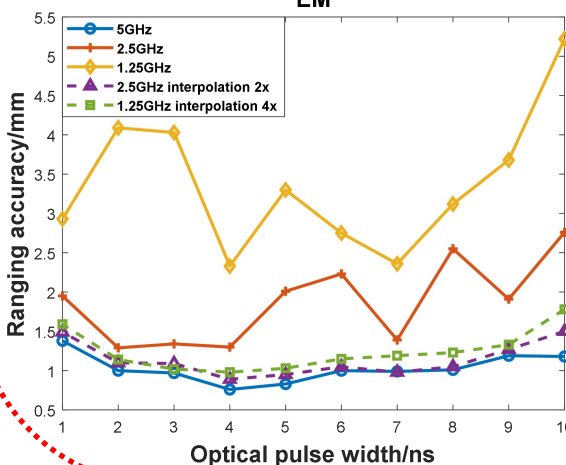
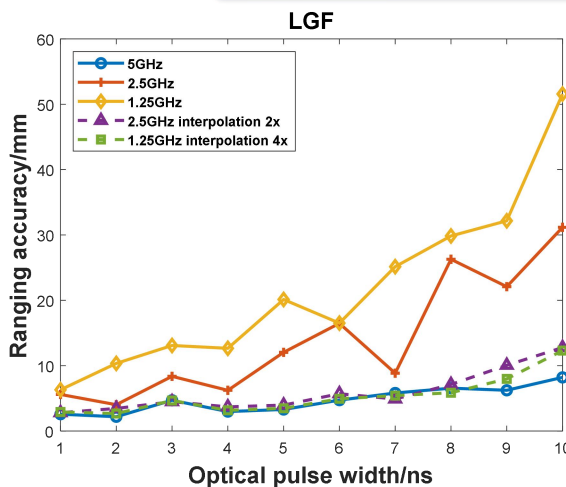
LM

2.全波形激光雷达技术

高精度测距——采样频率&脉宽



不同算法在不同采样频率下的精度



脉宽 ↑ 测距精度 ↓
 参考光幅值 ↓ 测距精度 ↓
 采样频率 ↓ 测距精度 ↓
 波形插值倍率 ↑ 测距精度 ↑

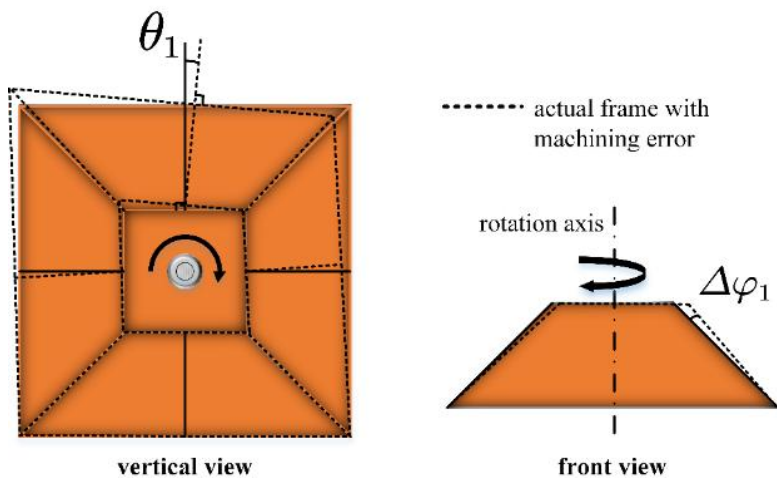
4ns脉宽、EM算法

插值后等效采样频率/GHz	原始5GHz数据测距标准差/mm	原始2.5GHz数据测距标准差/mm	原始1.25GHz数据测距标准差/mm
1.25	null	null	2.33
2.50	null	1.30	1.19
5.00	0.76	0.89	0.98
10.00	0.72	0.83	0.91
20.00	0.70	0.77	0.89
40.00	0.69	0.76	0.87
80.00	0.69	0.76	0.87

2.全波形激光雷达技术

➤ 高精度指向——面型角度标定

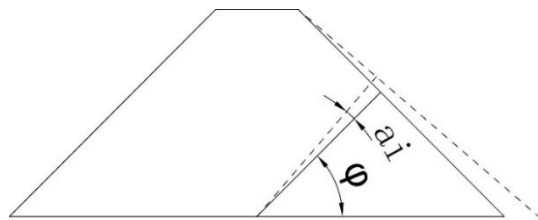
采用多面镜扫描时，存在两个方向上的角度误差



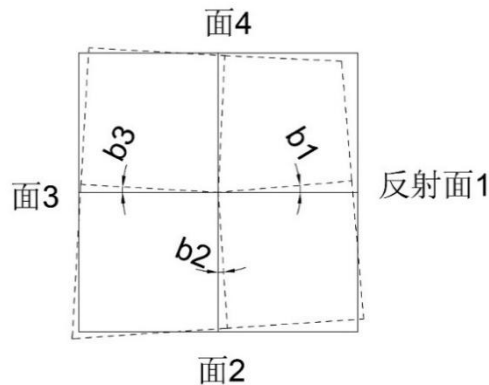
原理图

多面镜扫描能有效增加扫描线数，且能设计不同的反射角度实现不同的扫描方向

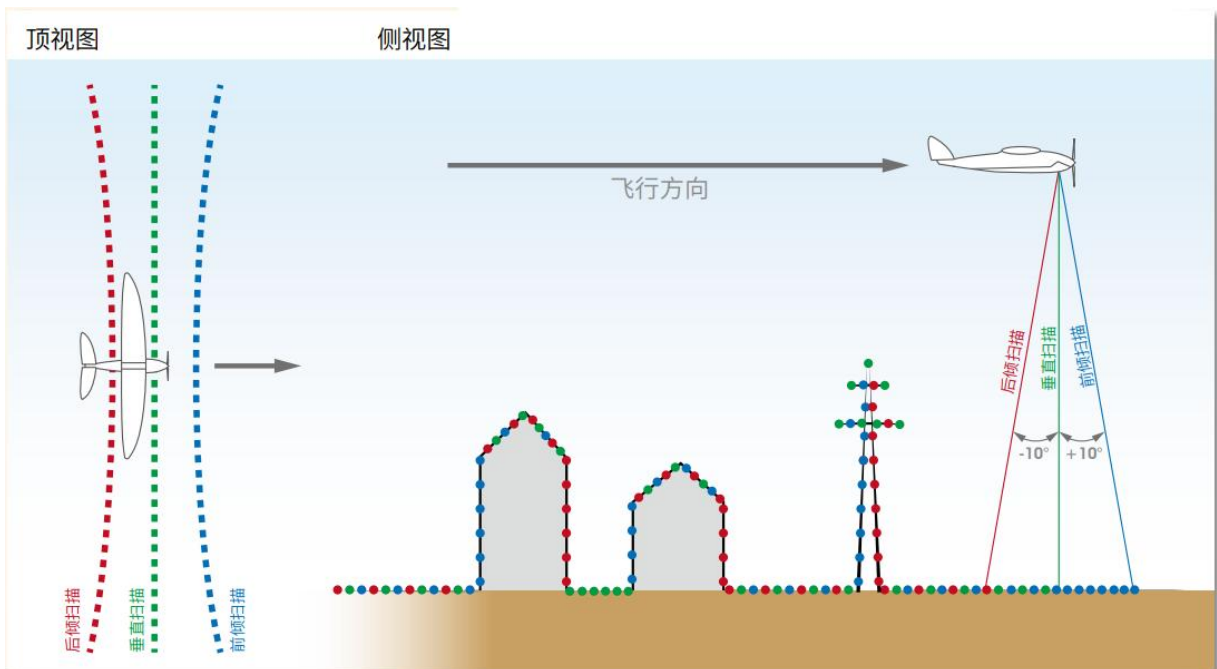
需要对角度误差进行修正



正视截面图



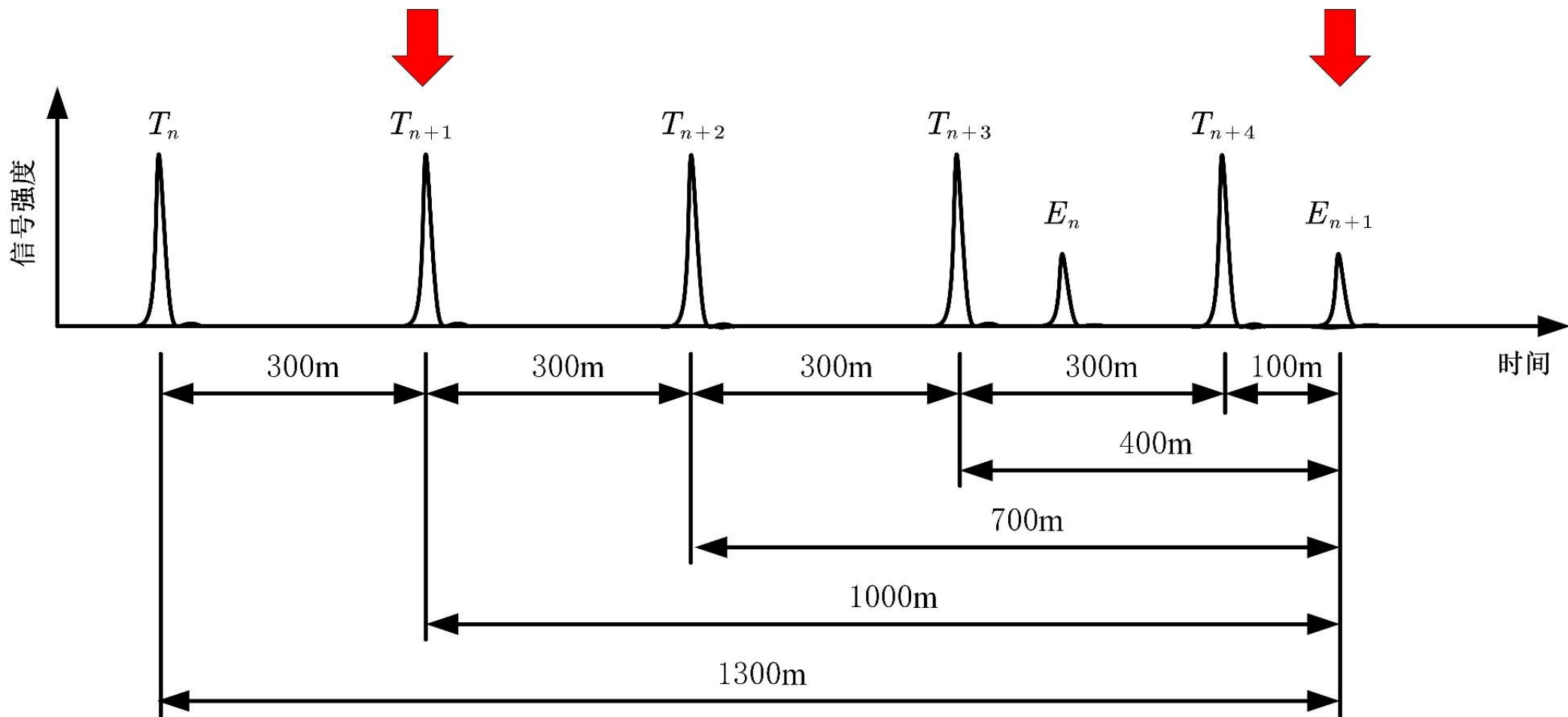
俯视截面图



2.全波形激光雷达技术

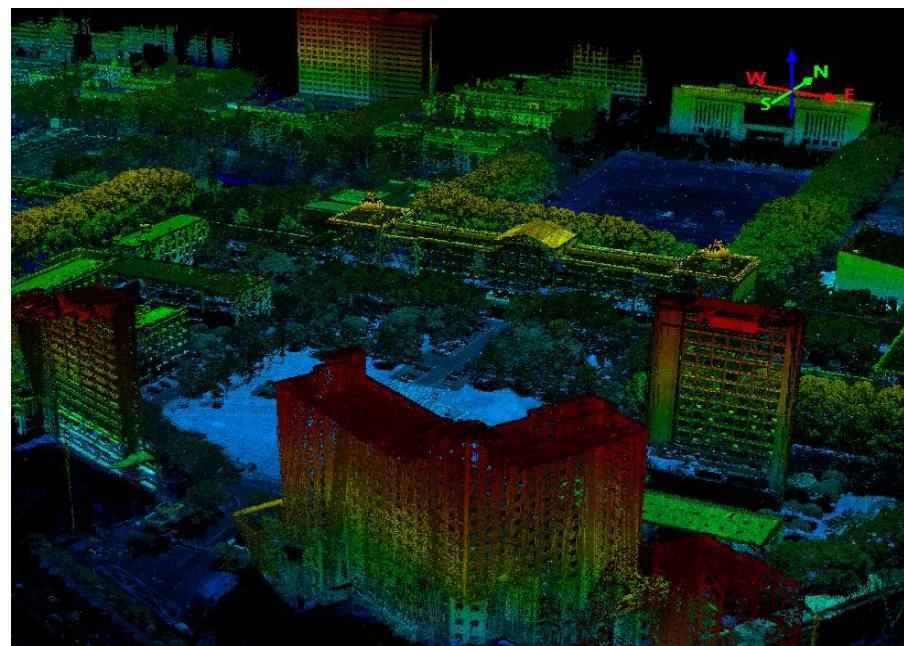
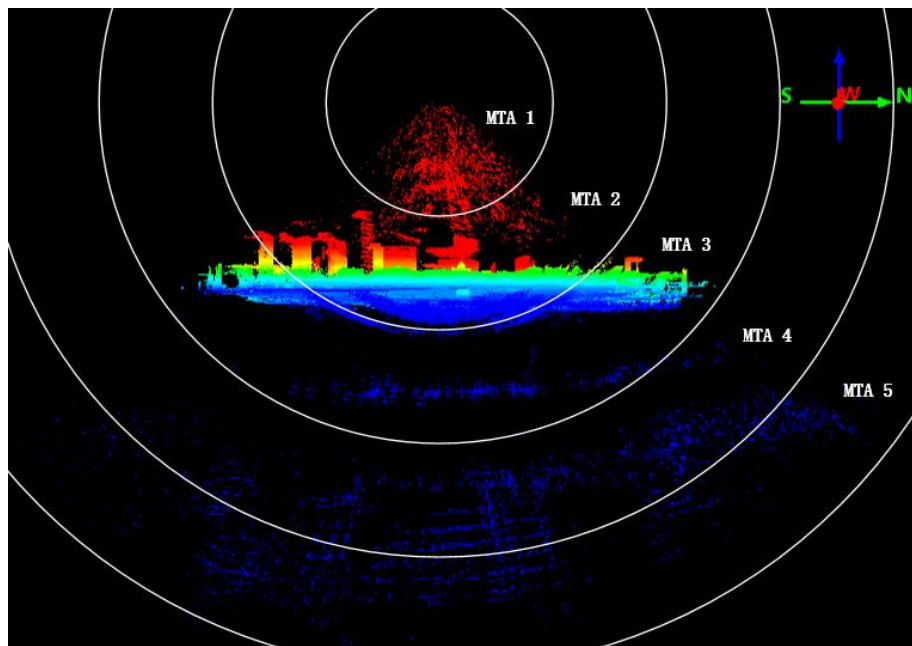
➤ 多周期回波技术——问题描述

在高频率测距时，当回波接收到的时间大于激光发射间隔时，将会产生模糊测距



2.全波形激光雷达技术

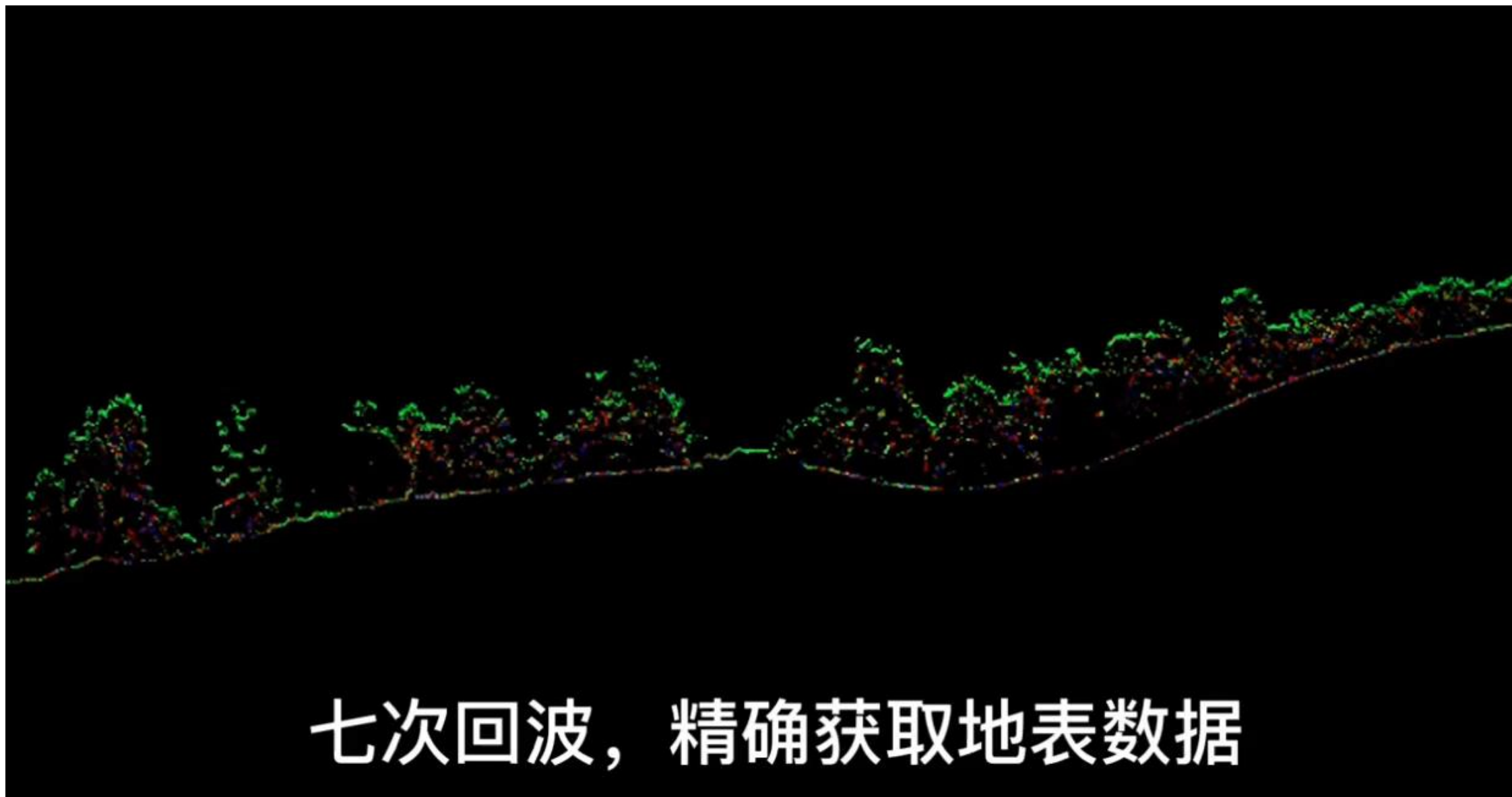
飞行条件：三面塔镜扫描，250m航高，900k点频(跨2个MTA区间)



- 最大回波数：5次
- 错误区间噪点占比：0.103%
- 点密度：206.8pt/m² (单航带)

研究MTA解算技术，解决高重频和远测程制约问题，提高点密度和作业效率

2.1 国产全波形激光雷达-城市三维地形多回波



2.2 国产车载扫描精度对比分析



国产自研270
断面扫描仪

VS

进口德国Z+F
9012扫描仪



2.2 国产车载扫描精度对比方案设计

- **试验目的：**国产\进口激光雷达精度对比分析。
- **试验方案：**选用除激光雷达不同外配置完全相同的两款移动三维测量系统，分别搭载**国产270**和**德国Z+F9012激光雷达**。
- **试验场地：**本次试验选用某普铁隧道，进行移动三维扫描扫描后隧道全断面点云精度对比。
- **试验日期：**2022年10月。



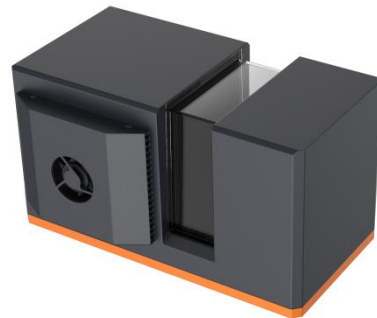
Z+F PROFILER 9012 断面仪

PROFILER 9012 是基于IMAGER 5010和2D断面激光测量系统上研发出的可用于集成车载等移动扫描的断面仪。



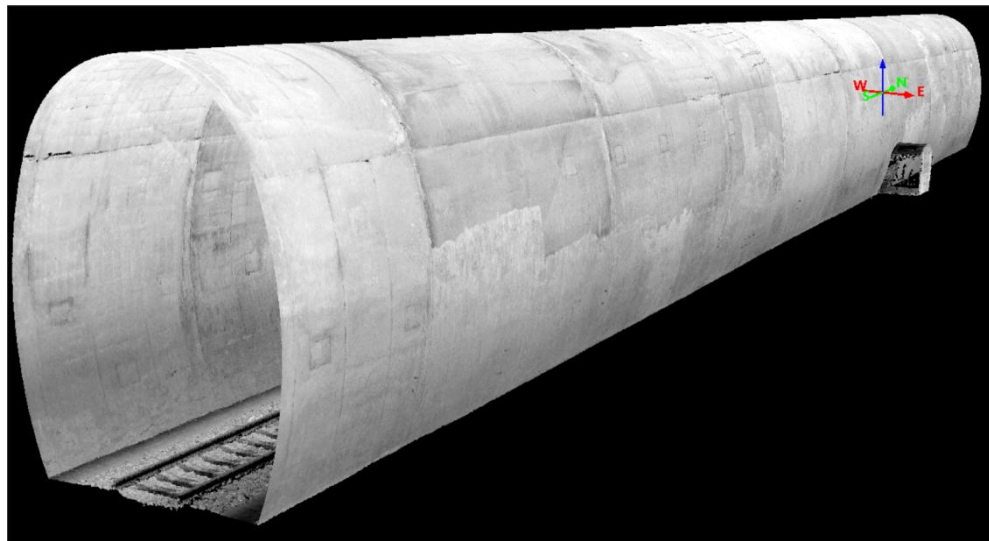
- 扫描原理：相位式
- 扫描频率：200HZ
- 扫描点频：100万点/s
- 测距精度：**2mm@80m**
- 测距范围：0.5~119m

- 扫描原理：脉冲相位式
- 扫描频率：150HZ
- 扫描点频：100万点/s
- 测距精度：**2mm@20m**
- 测距范围：0.5~300m

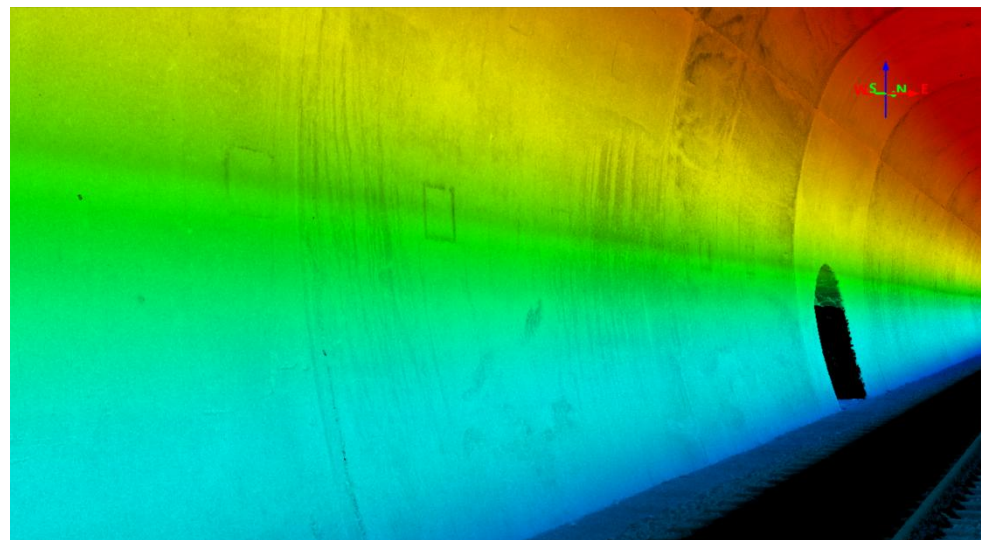
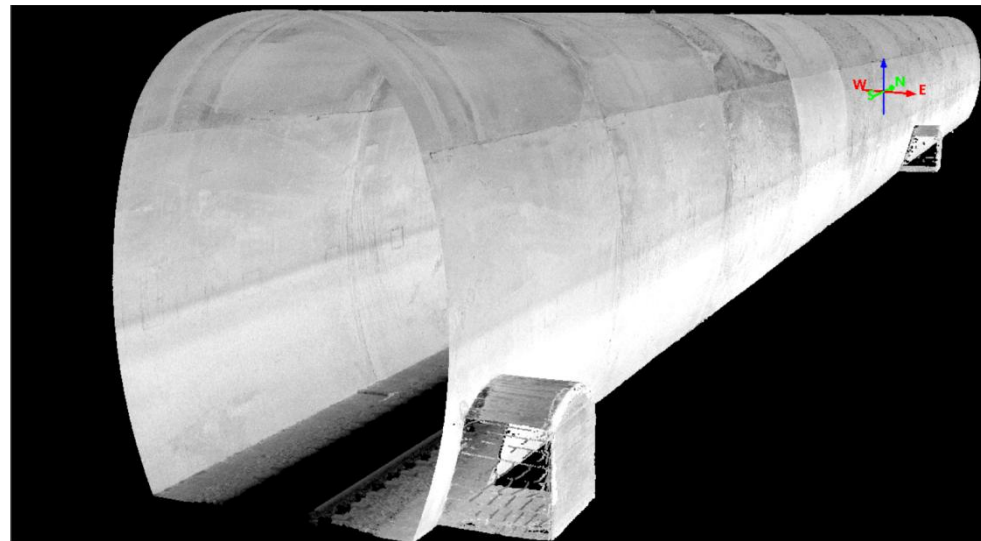


2.2 国产车载扫描精度对比分析

■ Z+F9012三维点云效果

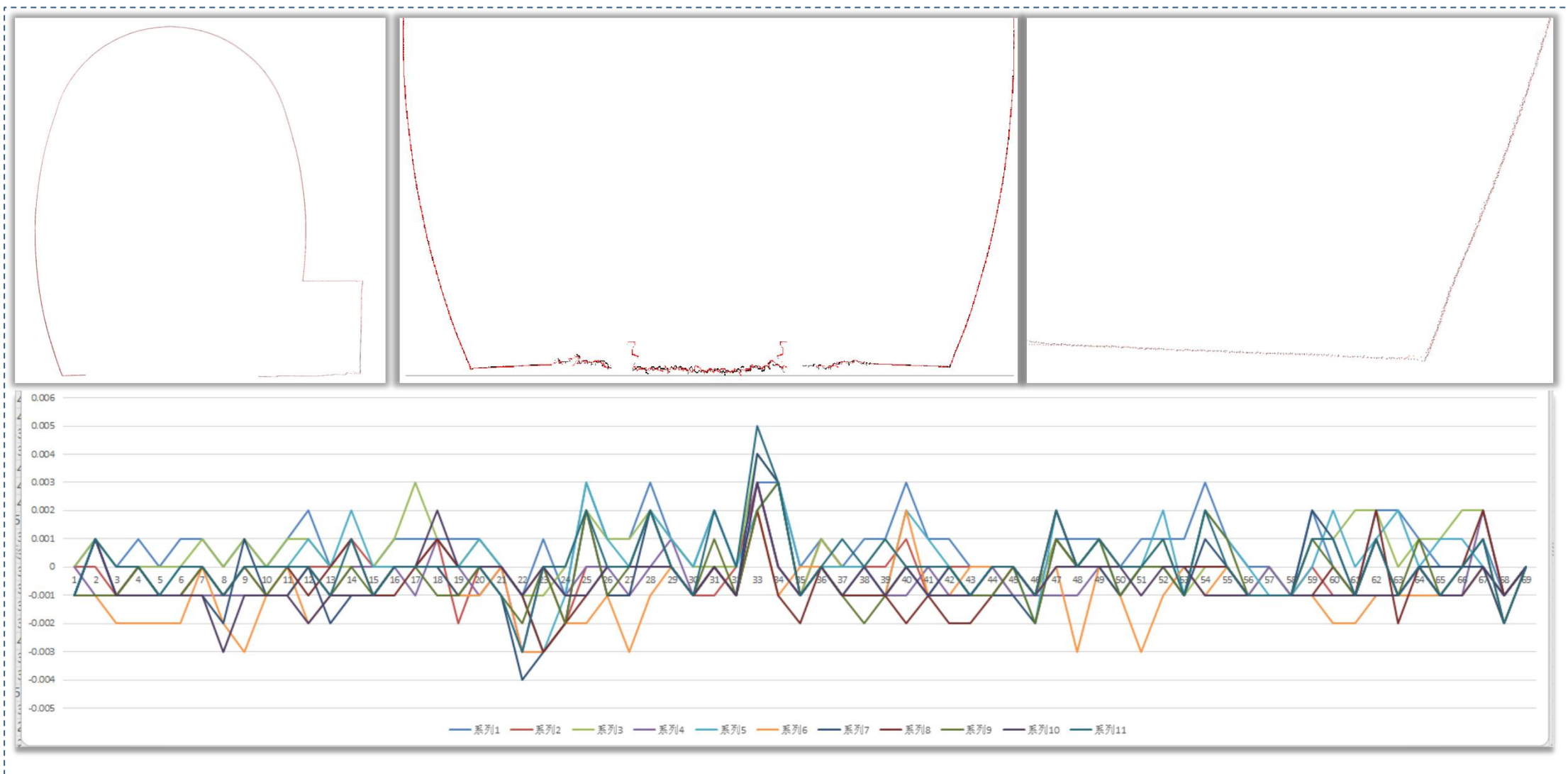


■ 国产270扫描仪三维点云效果



2.2 国产车载扫描精度对比分析

■ Z+F9012\国产270点云叠加分析：测距重复性和一致性均优于2mm，满足高精度测量检测精度要求



2.3 国产机载扫描精度对比

VS

进口奥地利Riegl-
VUX-1无人机载激光
雷达系统

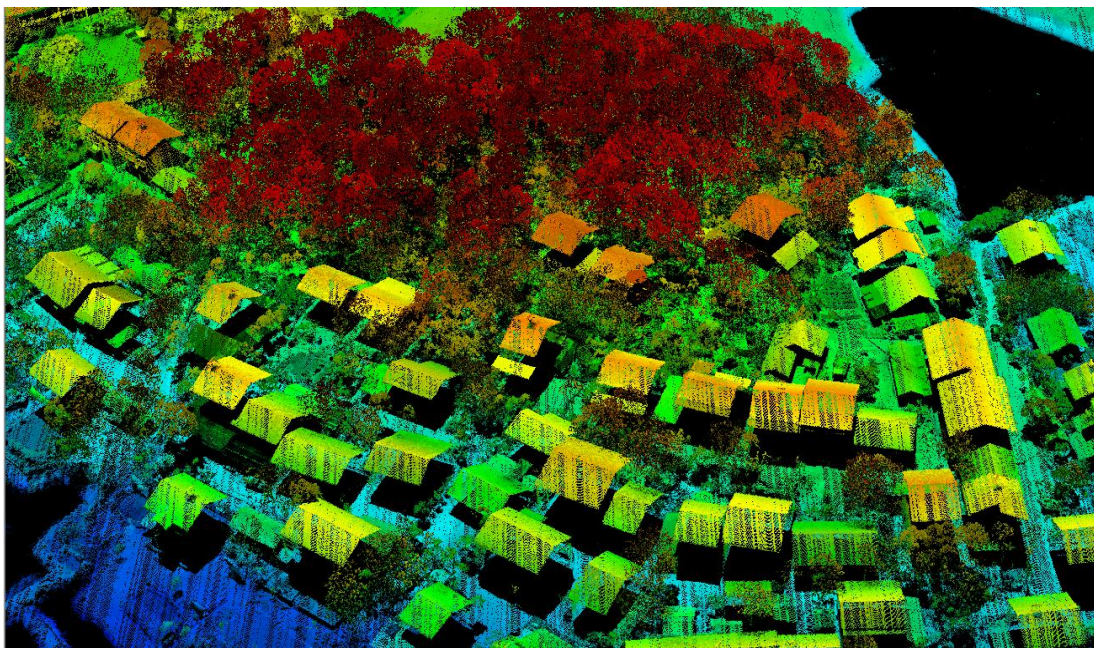


国产自研FT系列无人机
载激光雷达系统

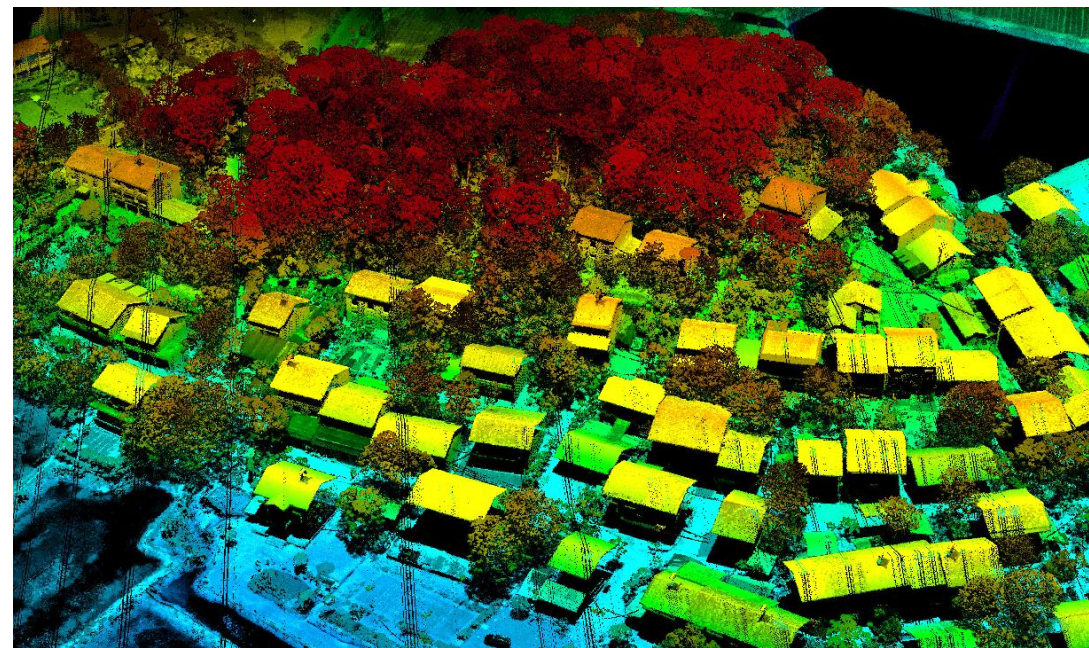


2.3 国产机载扫描精度对比

■ Rielg-VUX-1三维点云效果



■ 国产FT1500三维点云效果

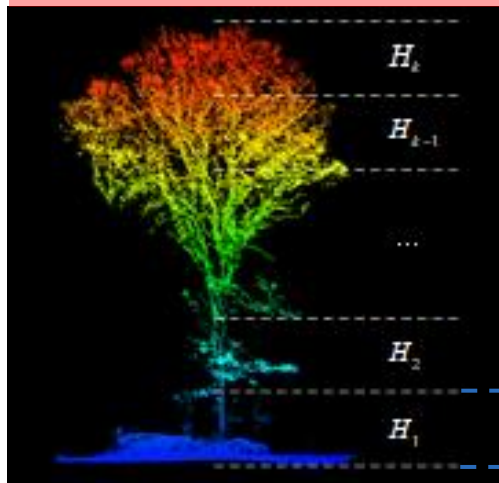


2.3 国产机载扫描精度对比

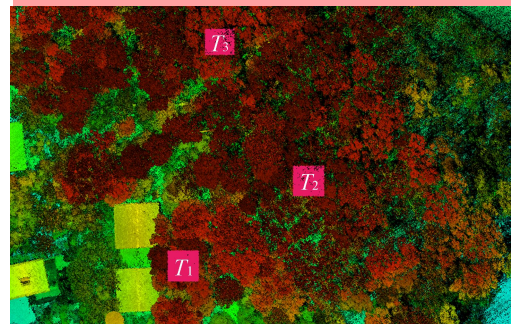
表 5-5 各选区点云穿透性

选区	高程区间	RIEGL VUX-1UAV		珞珈伊云 FT-1500		珞珈伊云 MT-1500	
		激光点数/个	比例	激光点数/个	比例	激光点数/个	比例
T1	H1	2361	0.18	11438	0.27	6079	0.38
	H2	844	0.06	3228	0.08	939	0.06
	H3	1942	0.15	7392	0.17	2412	0.15
	H4	4168	0.31	11923	0.28	4087	0.25
	H5	4064	0.30	8264	0.20	2620	0.16
T2	H1	852	0.17	2870	0.16	4173	0.26
	H2	417	0.08	1522	0.09	783	0.05
	H3	818	0.16	3315	0.19	1419	0.09
	H4	2378	0.47	6204	0.36	2619	0.17
	H5	594	0.12	3514	0.20	6726	0.43
T3	H1	1084	0.13	6356	0.24	5113	0.32
	H2	552	0.07	1390	0.05	1813	0.11
	H3	649	0.08	2734	0.10	3022	0.19
	H4	1386	0.17	4682	0.18	2342	0.15
	H5	4430	0.55	10982	0.42	3647	0.23

高程区间



选区示意



H1区间表明穿透树木达到地面的区域

- H1区间比例皆高于RIEGL VUX-1点云穿透性较好
- H2~H4区间比例与RIEGL VUX差别不大，垂直结构丰富程度相当

2.3 国产机载扫描精度对比

表 5-2 激光雷达点云与外业 RTK 点高程差

RTK 点	dz (RIEGL VUX-1UAV)	dz (珞珈伊云 FT-1500)	dz (珞珈伊云 MT-1500)
1	0.0192	0.0358	0.0373
2	0.0087	0.0242	0.0021
3	-0.0211	0.0014	-0.0238
4	-0.0039	0.0148	-0.0174
5	-0.0230	-0.0038	-0.0241
6	-0.0057	0.0139	-0.0156
⋮	⋮	⋮	⋮
15	0.0165	0.0378	-0.0364
16	0.0228	0.0441	-0.0293
17	-0.0285	-0.0122	-0.0246
18	-0.0164	-0.0125	0.0203
19	-0.0224	-0.0103	-0.0364
20	0.0016	0.0236	0.0279
标准差	0.0264	0.0280	0.0310

■ 高程精度与RIEGL VUX-1基本一致

表 5-3 各选区点云密度

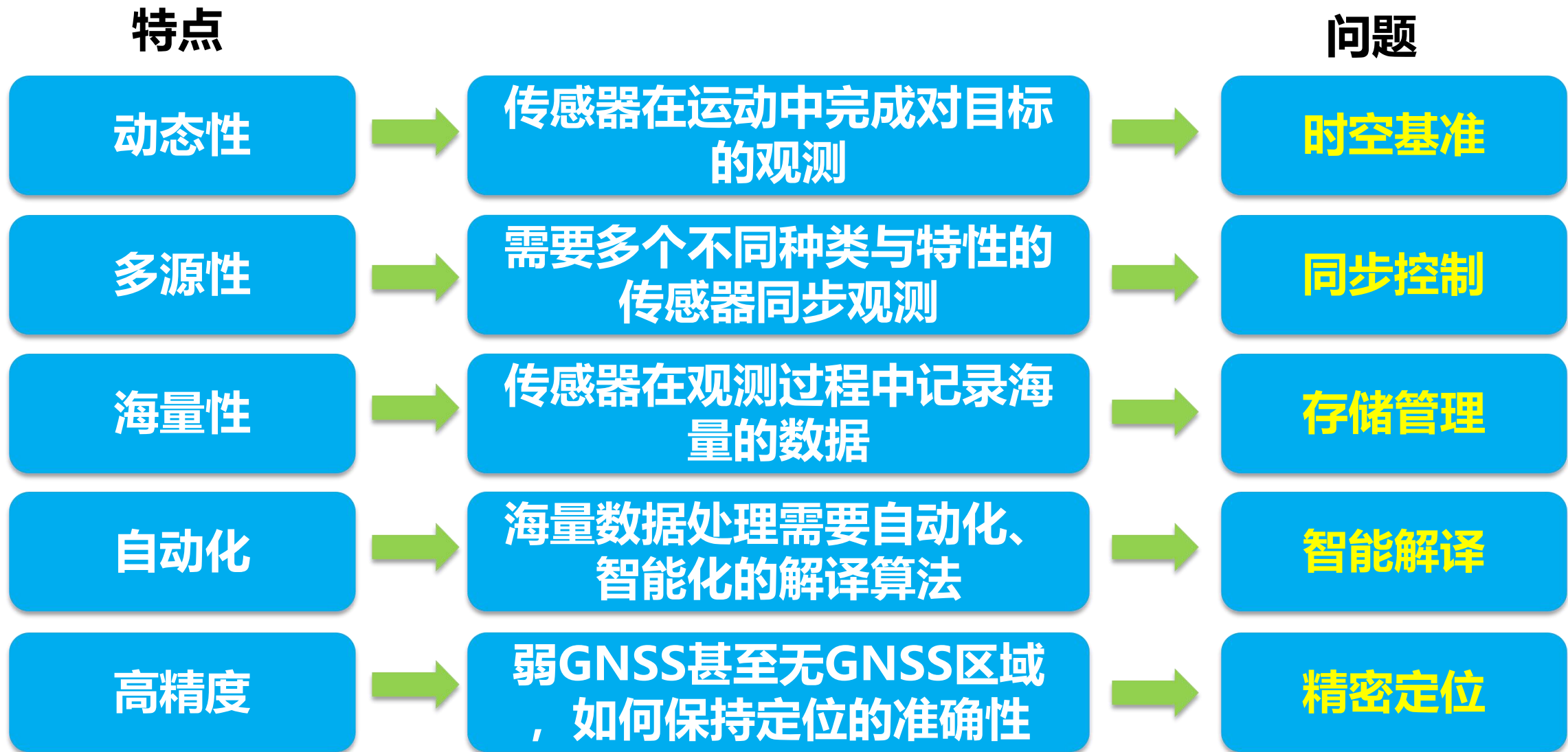
选区	D_{cloud} 点/m ³		
	RIEGL VUX-1UAV	珞珈伊云 FT-1500	珞珈伊云 MT-1500
A1	116.56	319.56	247.56
A2	104.40	374.32	187.60
A3	91.04	318.48	219.84
A4	132.32	242.76	212.04
A5	120.16	203.20	192.52
B1	46.80	139.84	148.12
B2	51.40	100.64	224.40
B3	62.80	240.00	186.72
B4	74.72	390.96	71.08
B5	150.64	380.44	197.40
B6	140.40	306.92	192.08
平均值	99.20	274.28	189.03

■ 点密度分别为RIEGL VUX-1的2.7倍和1.9倍

3

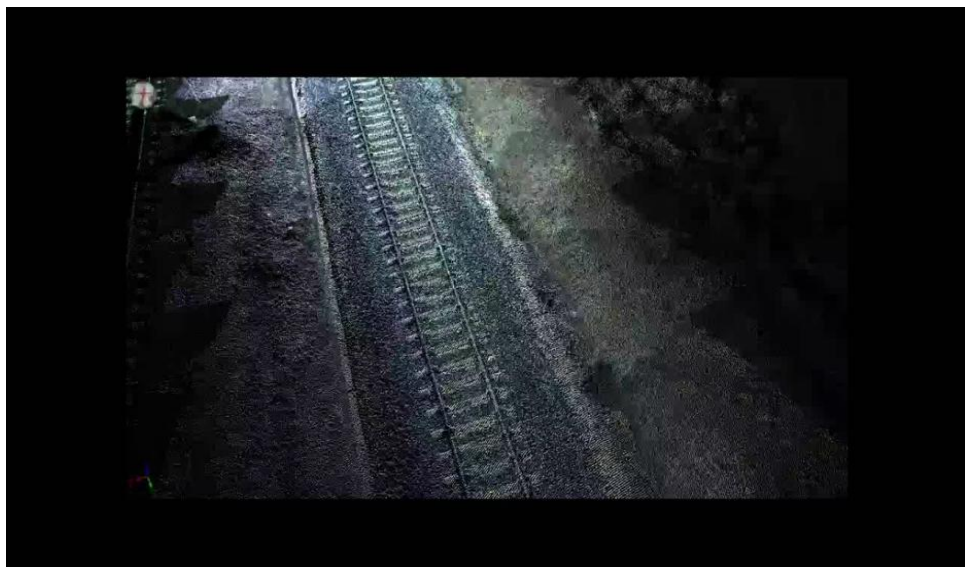
交通基础设施测量应用

3.1 移动三维激光扫描技术的特点与挑战

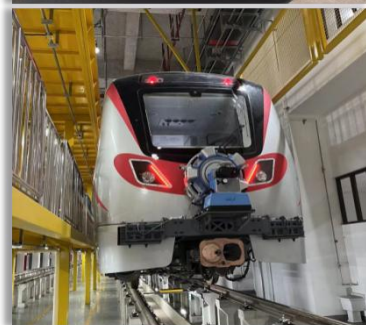


3.2 核心技术-多传感器集成技术

- 高精度移动三维扫描系统以车载平台为基础，集成GNSS/IMU/DMI组合定位定姿系统、激光扫描仪、相机、多传感器同步控制单元、嵌入式计算机以及电源供电系统等设备。



- 搭建道路全断面测量平台，在同步控制单元的协调下使各个传感器之间实现时空同步，P25 快速采集获取道路沿线的全断面时空数据。



3.2 核心技术-组合定位定姿技术

地下受限或封闭环境下位置精确动态位置测量精度差

存在问题

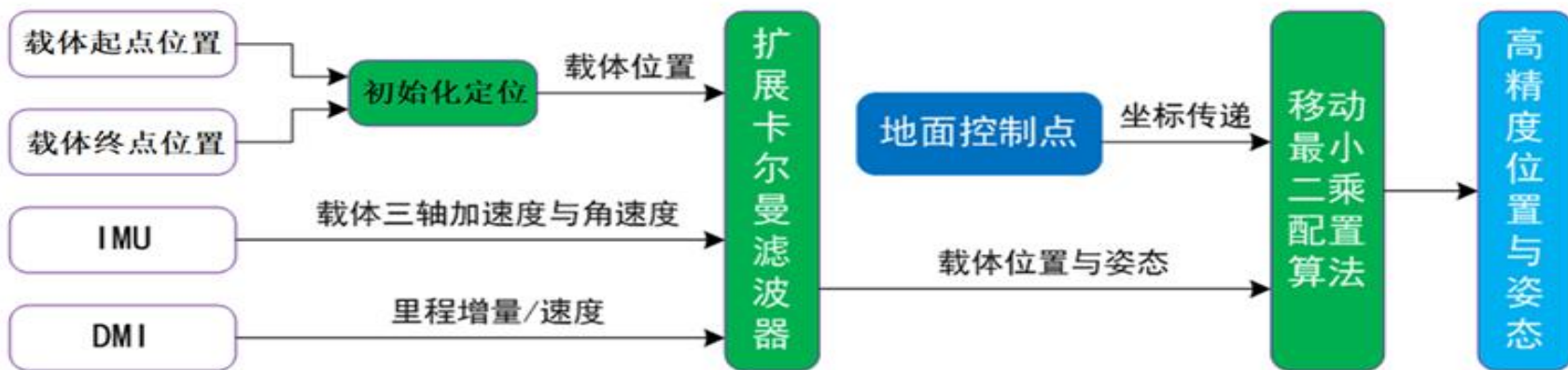
- 惯导收敛条件苛刻
- 无GNSS位置输出
- 复杂环境定位精度低

传统的GNSS动态测量精度仅为分米级，不满足厘米级甚至毫米级的工业测量需求，同时无法进行隧道无GNSS动态测量

苛刻的位置精度
要求

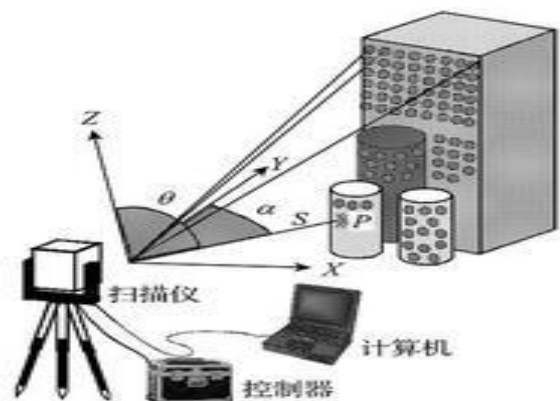
矛盾

高动态、复杂检测
环境

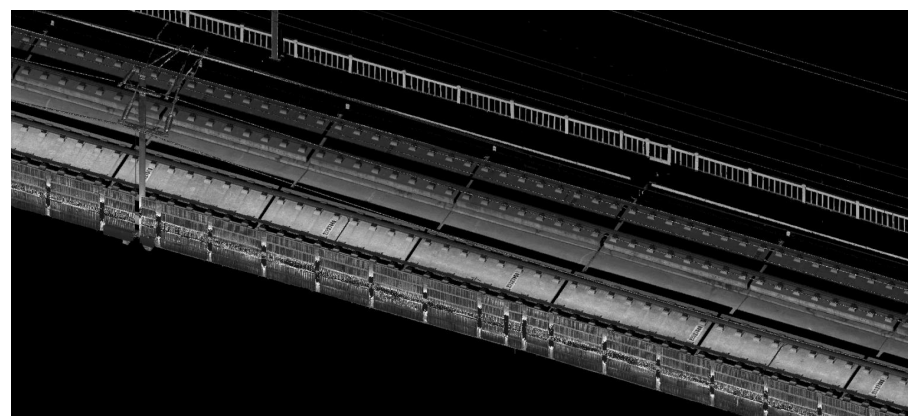


攻克地下复杂环境下惯性高精度位置与姿态测量技术
将铁路隧道结构形面测量绝对精度从分米级提高到毫米级

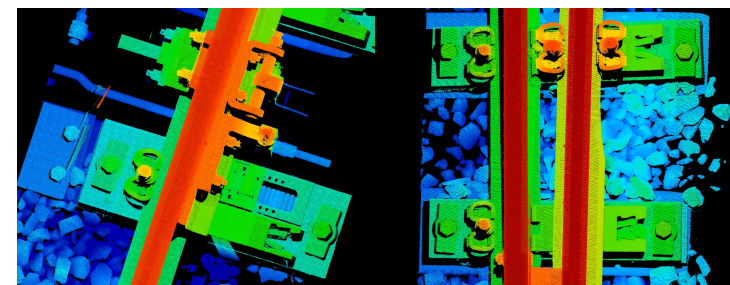
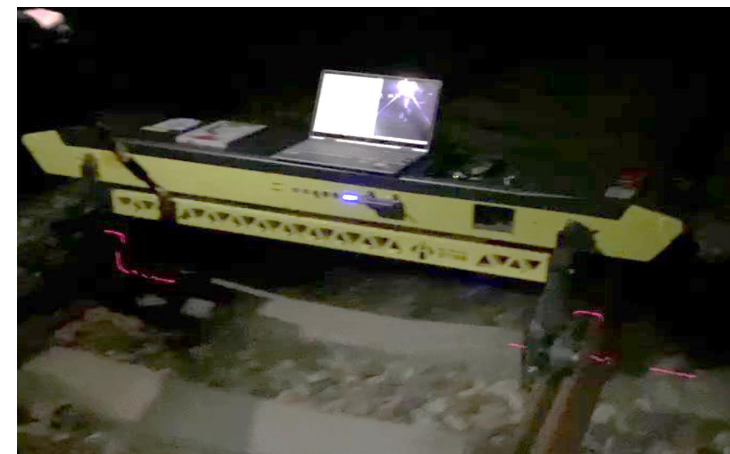
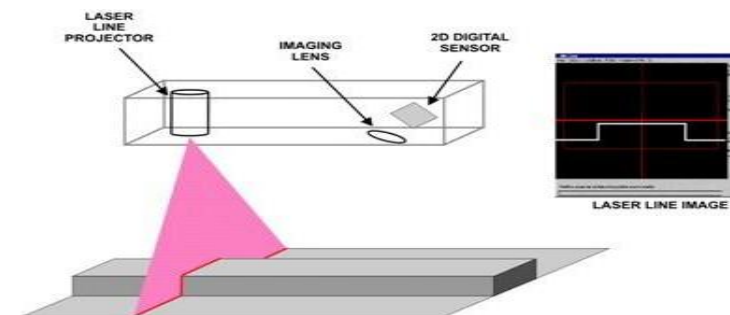
3.3 研究成果-高分辨率三维激光成像技术



固定站点扫描成像



轨道移动三维扫描成像

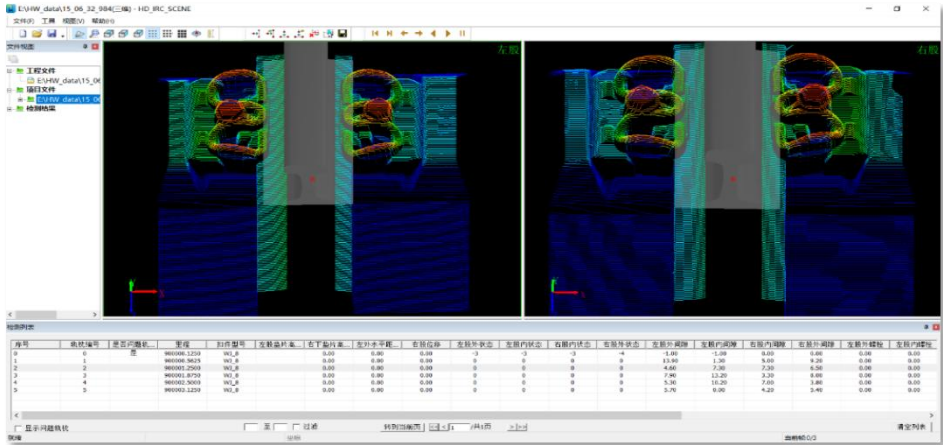


轨道移动线扫描成像

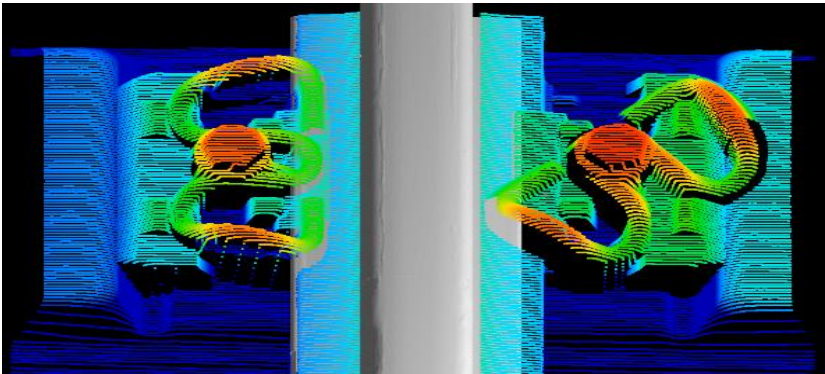
3.4 典型应用-扣件智能检测



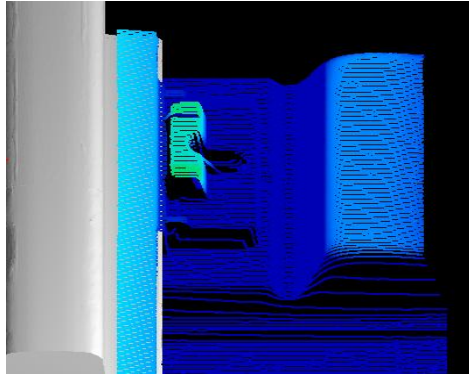
扣件安装状态检查装备



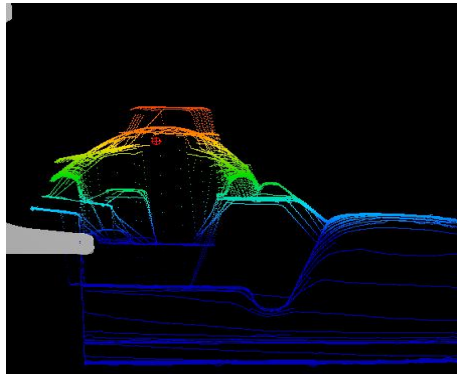
自动化检测软件



扣件歪斜



扣件丢失



扣件间隙过大

指标名称	指标参数
检测速度	30000个/时
检测精度	0.2mm
检测项目	安装状态、弹条离缝、轨下垫板厚度、左右偏移
工作方式	连续普查
工作速度	0~10km/h

- 高铁扣件：Ⅱ型；V型；WJ-7型；WJ-8型；W300-1型。
- 地铁扣件：Ⅱ型、DTV2型、DTV-1型、DJK5-1型、DTK5型、DTV2型、DZIII型、DT-III型、DTV2型、11292型。

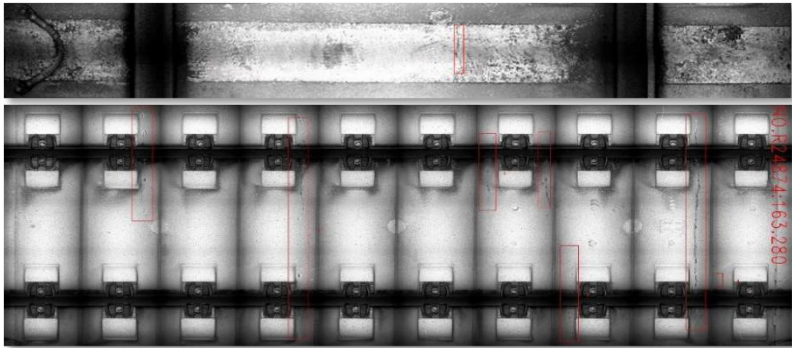
3.5 典型应用-高铁轨道板裂缝与离缝检测



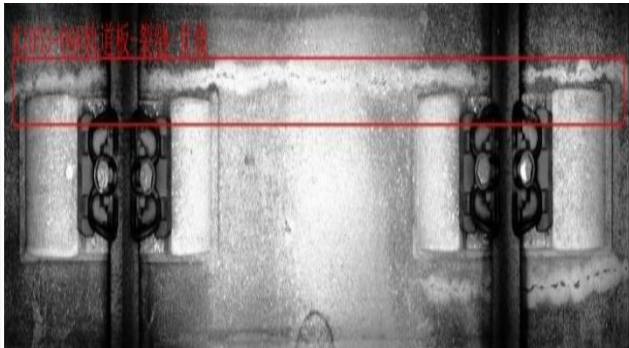
自动化轨道板离缝裂缝检测装备



自动化检测软件



全线路轨道板图像



轨道板裂缝检测



离缝检测

指标名称	指标参数
测量速度	0-10km/h
离缝精度	0.2mm
裂缝精度	0.1mm
工作时间	>4h
工作温度	-10℃—50℃
设备重量	≤80kg

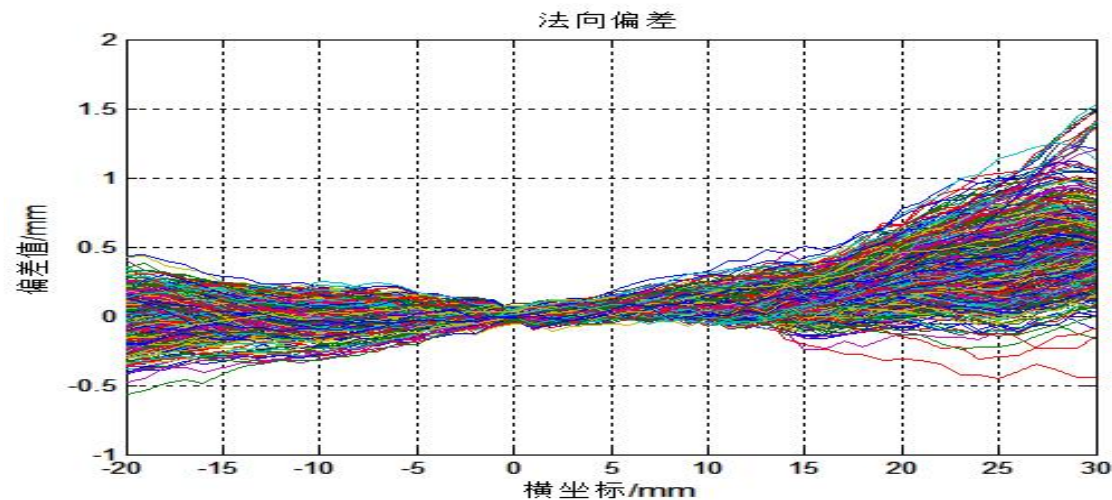
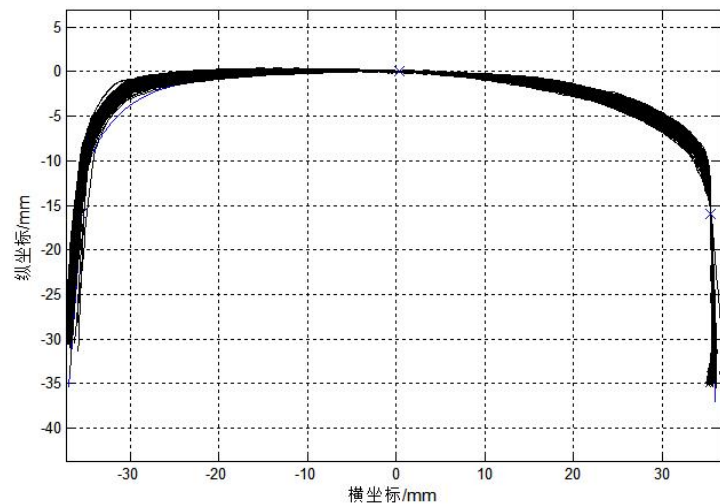
3.5 典型应用-轨道廓形测量

- 钢轨廓形磨耗检测利用GNSS\IMU\线结构激光传感器获取钢轨断面轮廓数据，通过算法智能化分析钢轨廓形特征参数

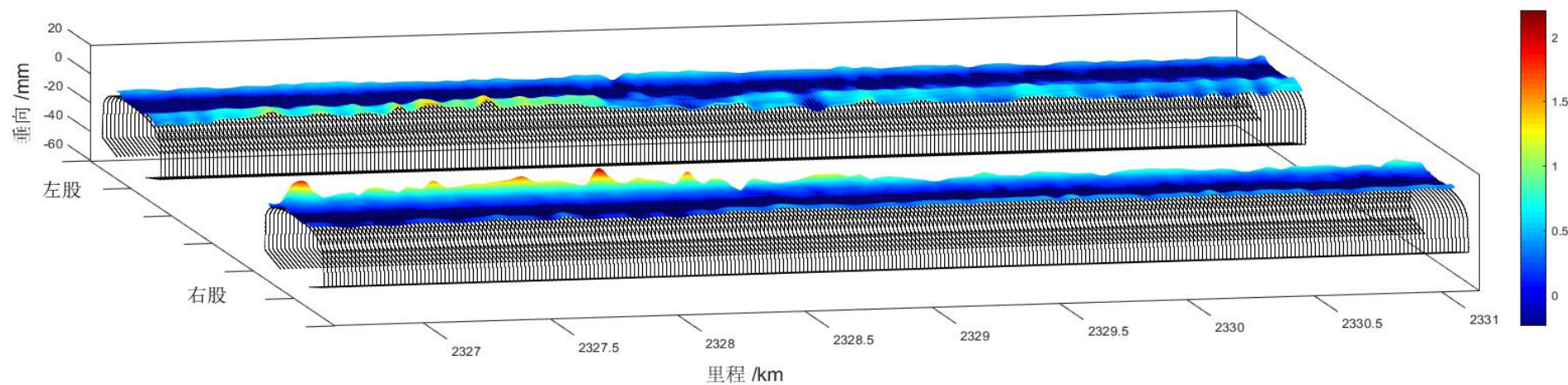


实现线路几何参数、钢轨廓形、磨耗及伤损等钢轨状态综合评估

3.5 典型应用-轨道廓形测量

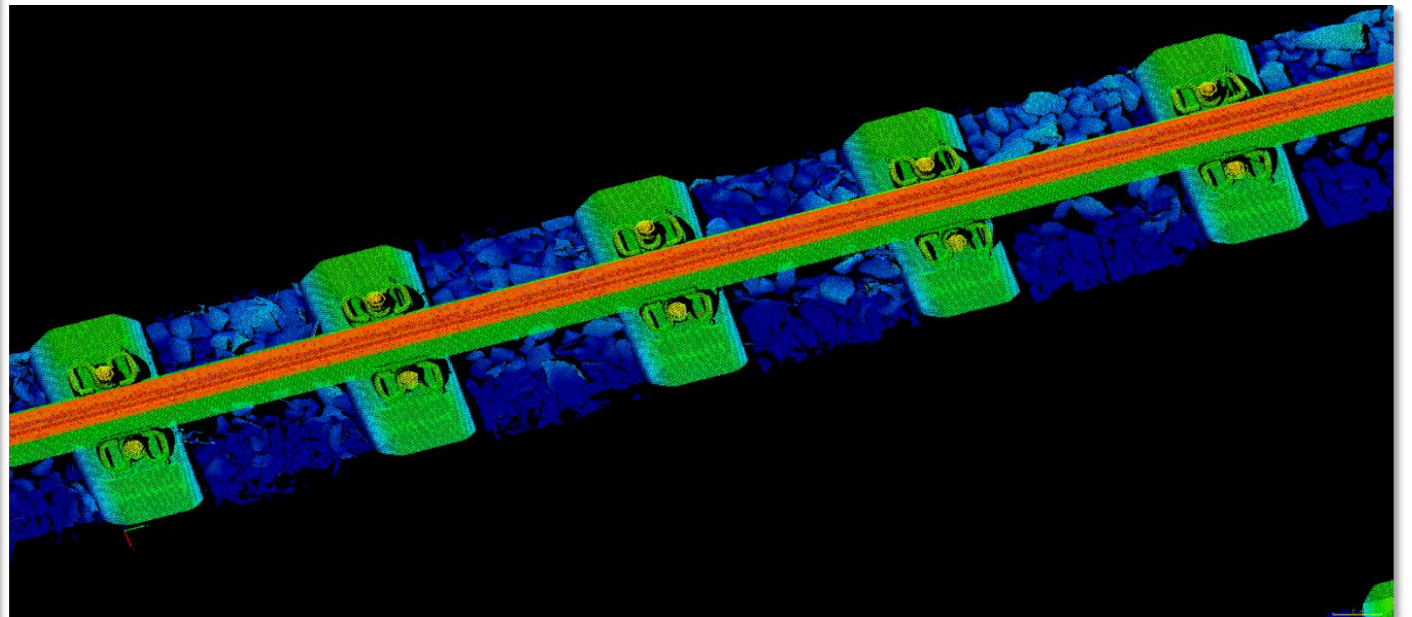
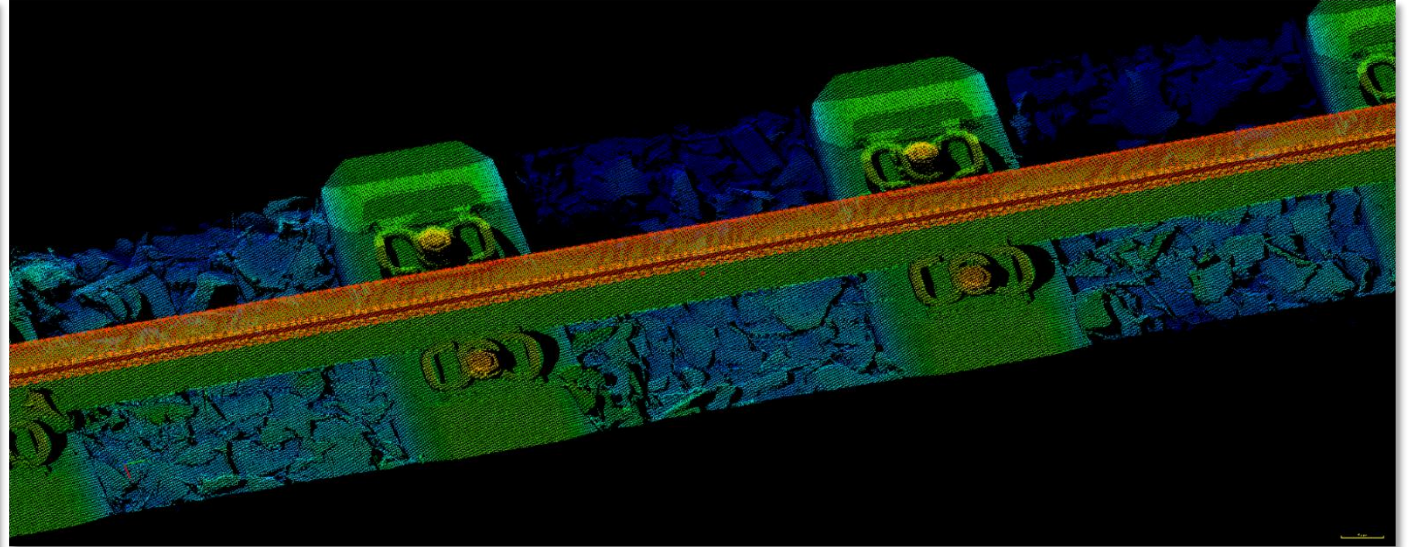
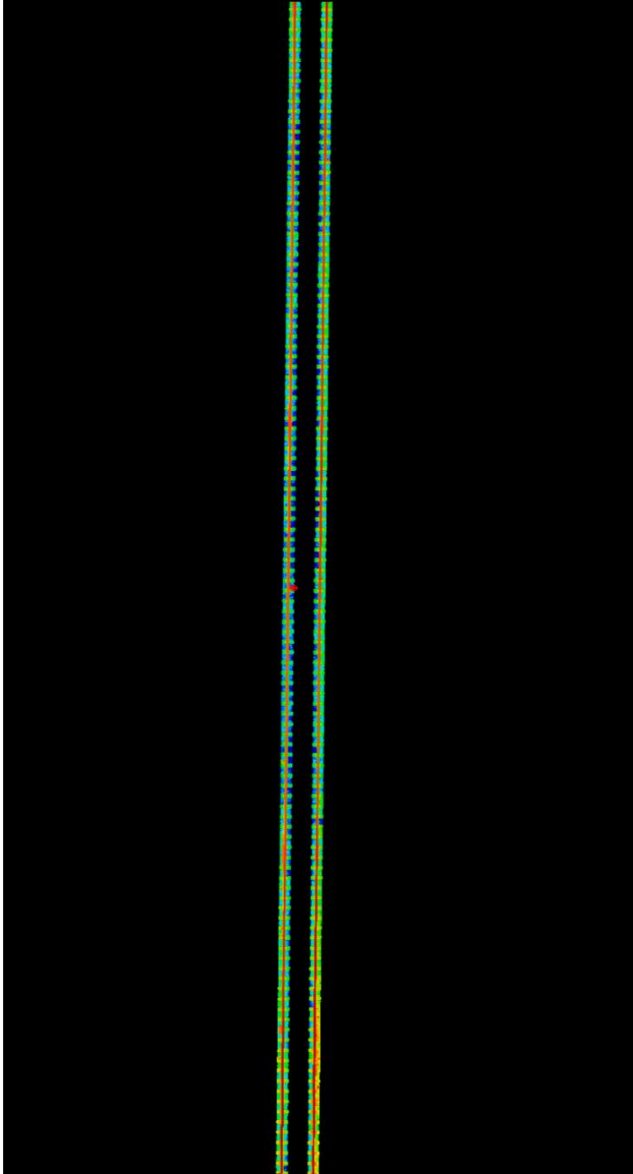
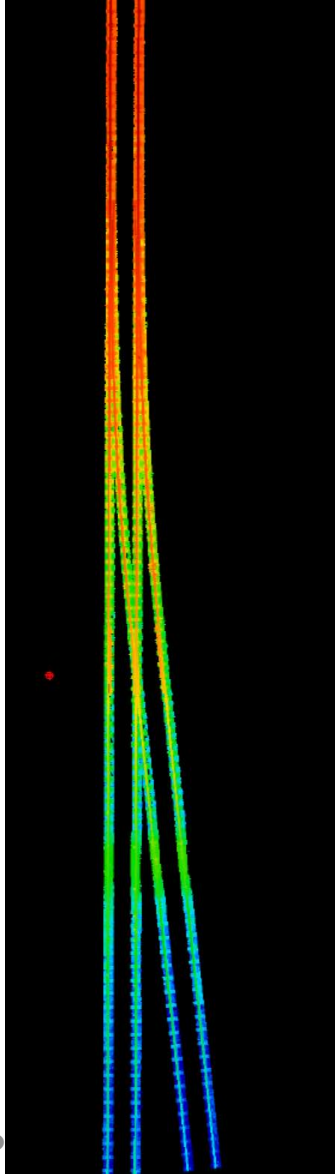


区间廓形偏差图



钢轨连续廓形变化图

3.5 典型应用-道岔测量

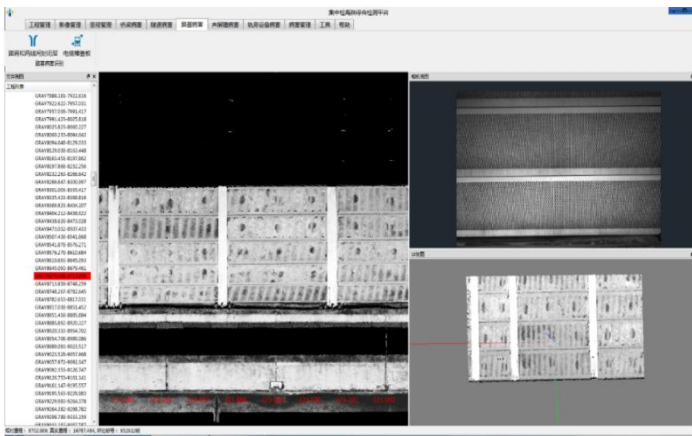
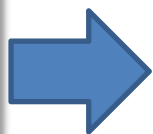


3.5 典型应用-高铁轨道全断面综合检测

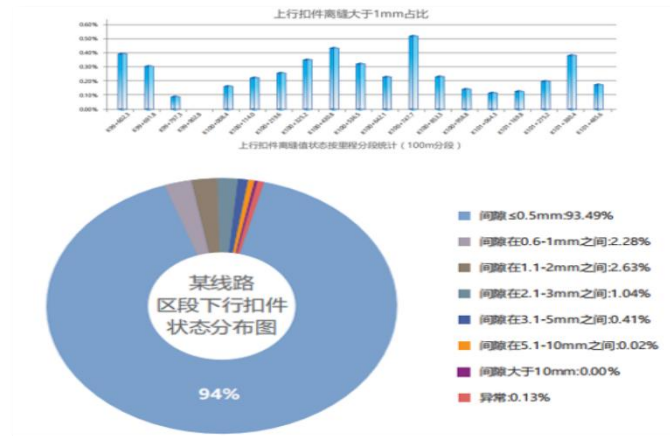
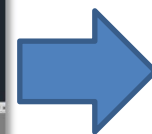
- 高铁轨道全断面综合检测平台以电动自行小车为载体，集成轨道扣件检查模块、轨道板裂缝与离缝检查模块、铁路移动测量系统、隧道全景（轨旁）、轨面光带检查模块等于一体。



外业采集，充分利用天窗



内业精细化分析



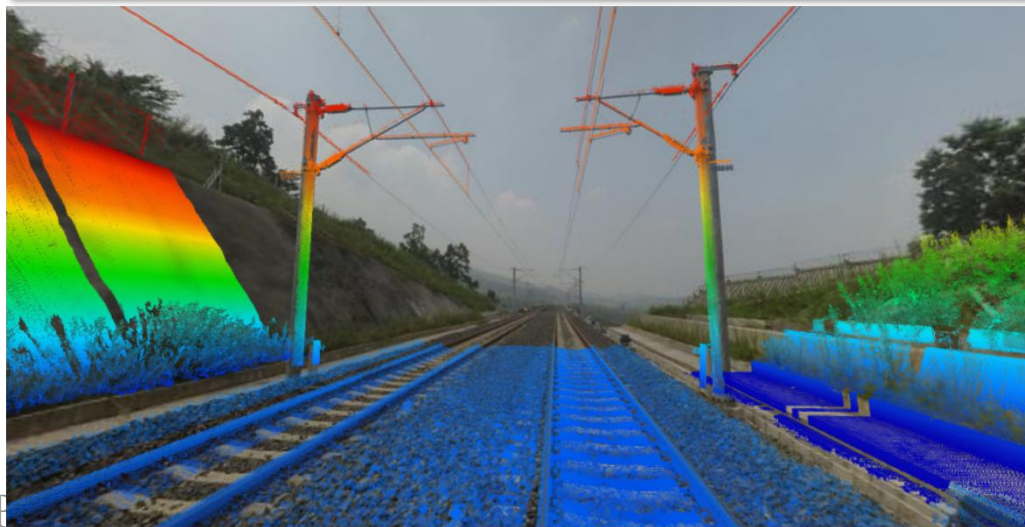
成果化报表输出

- 平台设备工作时间大于4小时。
- 设备以10km/h工作

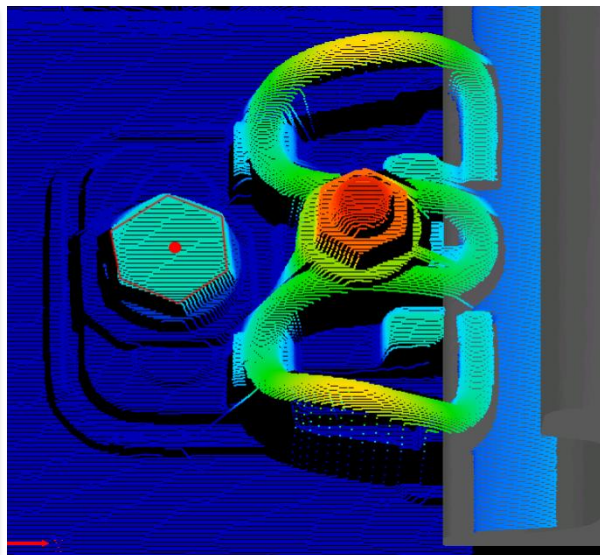
- 平台设备工作时间大于4小时。
- 设备以10km/h工作

3.5 典型应用-高铁轨道全断面综合检测

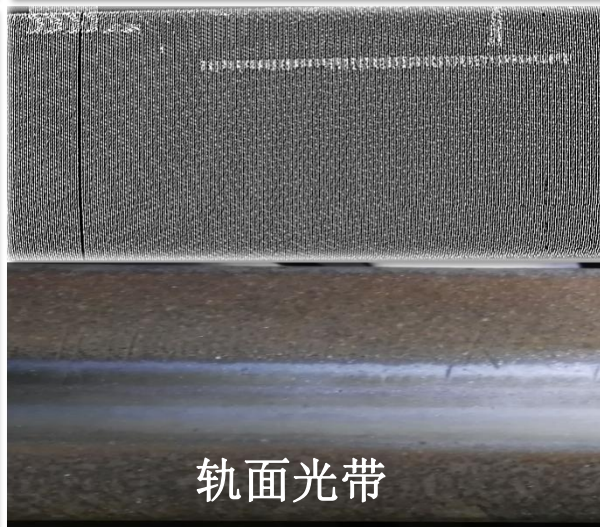
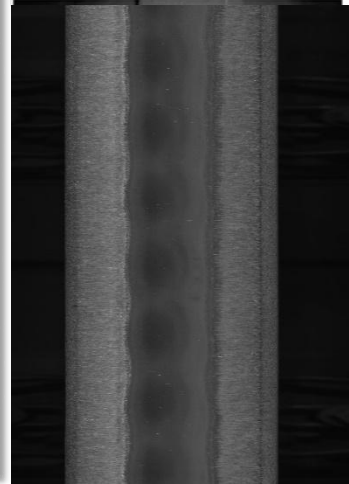
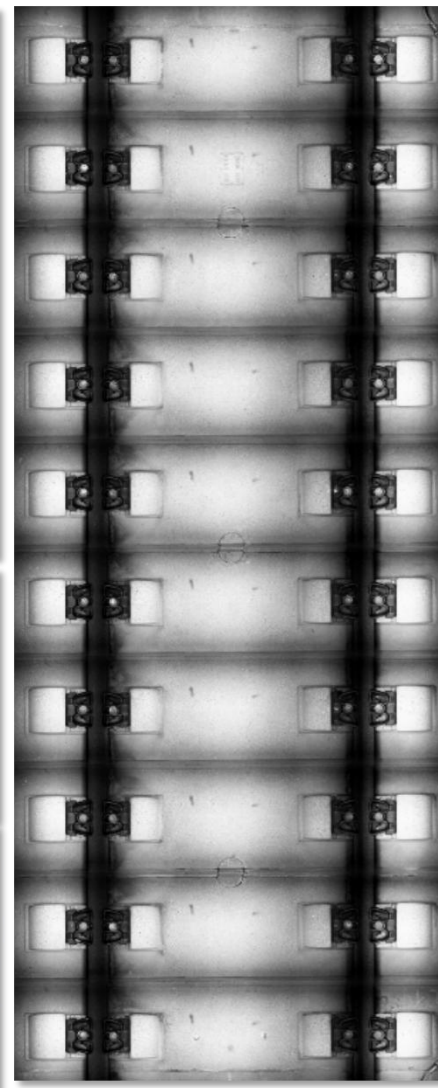
线路三维点云及实景



扣件三维

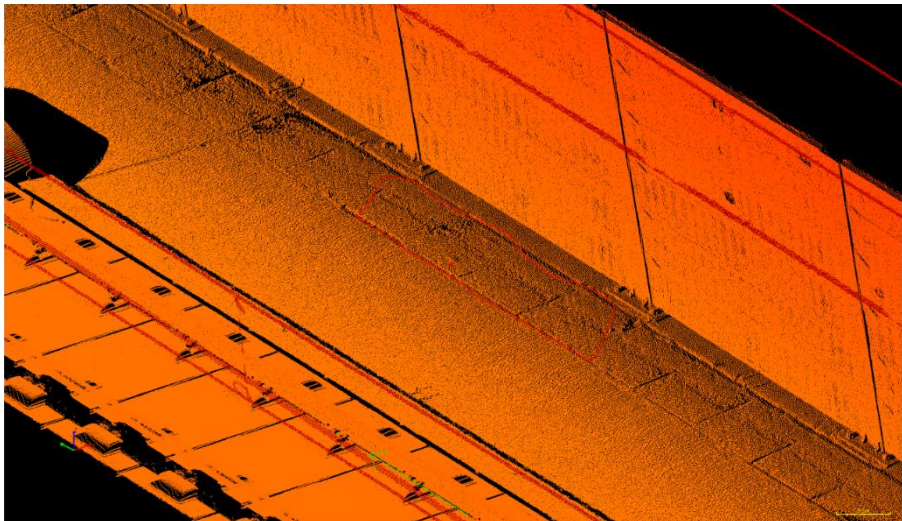


轨道板及支承层

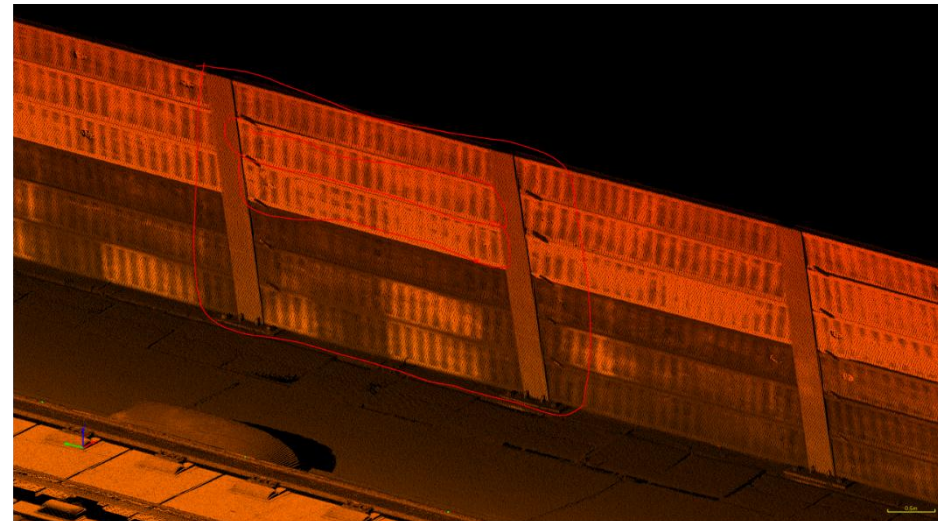


轨面光带

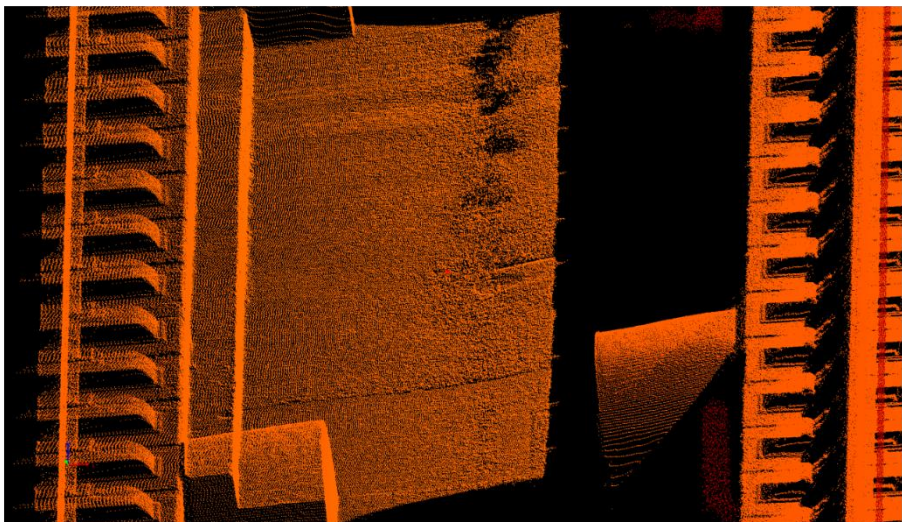
3.5 典型应用-高铁轨道全断面综合检测



路基：电缆槽盖板状态（缺失、破损）



声屏障：单元板错位、脱落（两板内部、两板之间）



桥梁：两线间防水层状态（卷起、异物）



隧道：综合洞室牌子（缺失、损坏、脱落）

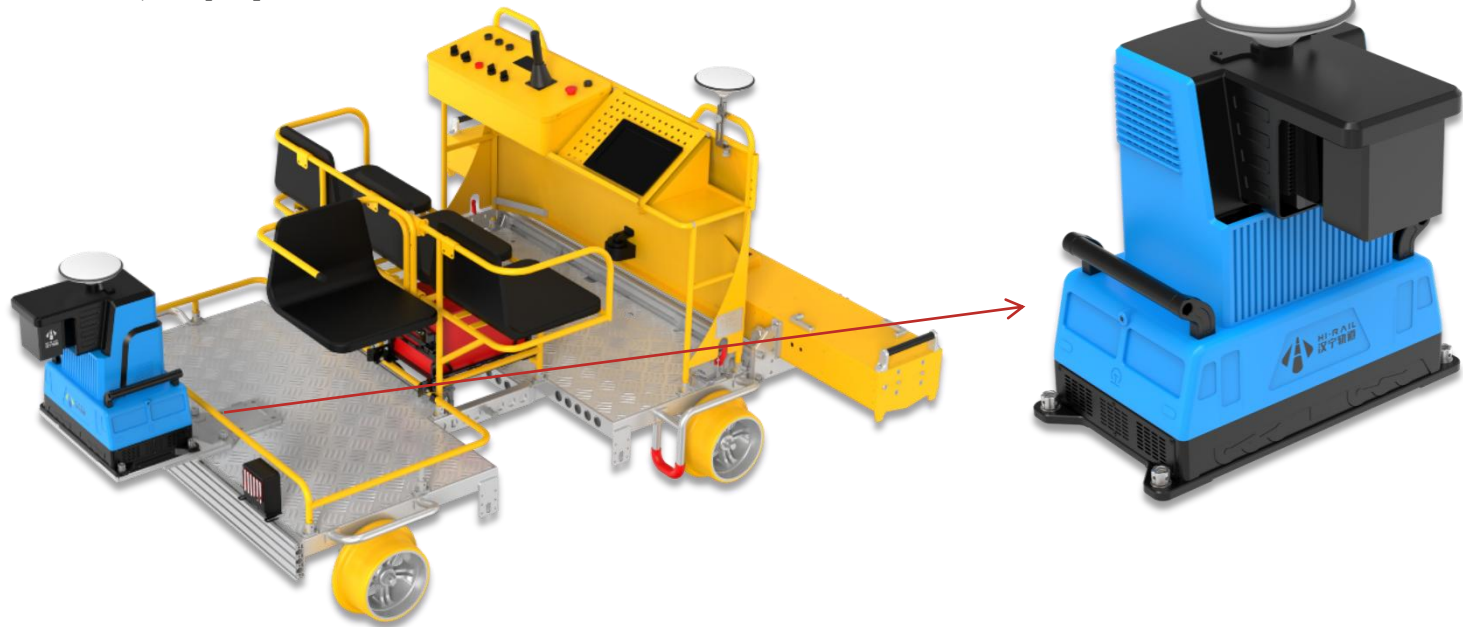
3.6 创新应用-轨道移动三维扫描大机捣固清筛技术



- **技术背景：**现阶段大机捣固清筛作业需要实施轨道线形测量作业，精度要求平面20mm，高程15mm。满足线路线形平顺性设计要求和抬道和拨道施工要求，保障线路运营安全。
- **主要问题：**现阶段方案采用惯导小车，依赖控制网，采用惯性小车接触测量方式作业效率低1-3km/h，现场里程人工校核作业要求高，作业风险高。

3.6 创新应用-轨道移动三维扫描大机捣固清筛技术

■ 方案架构



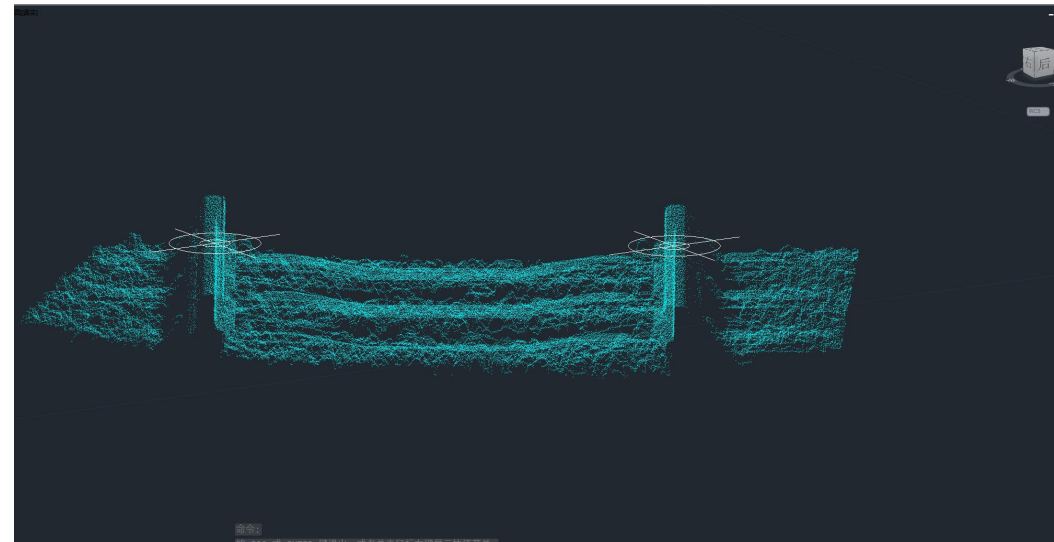
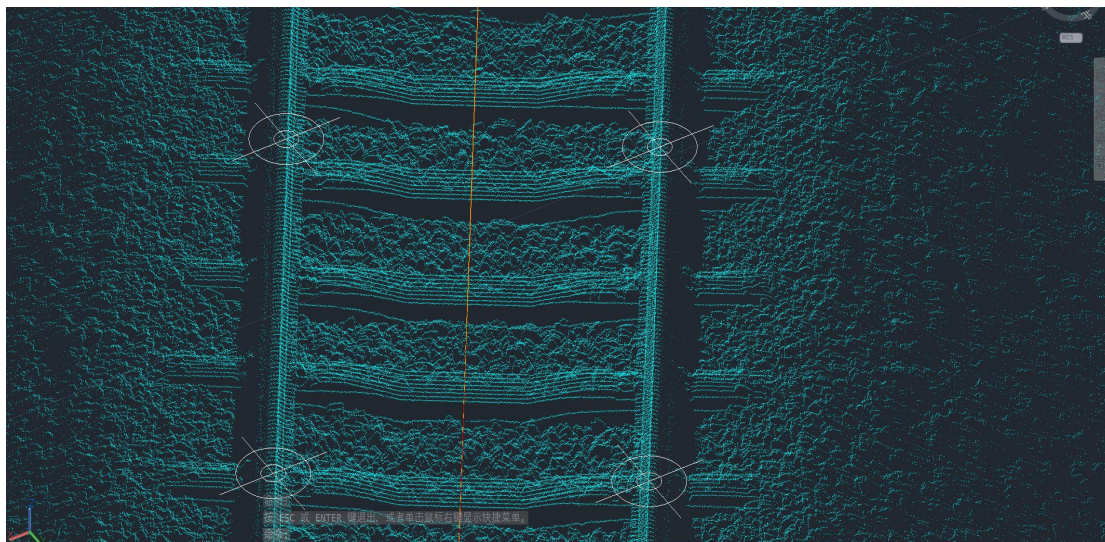
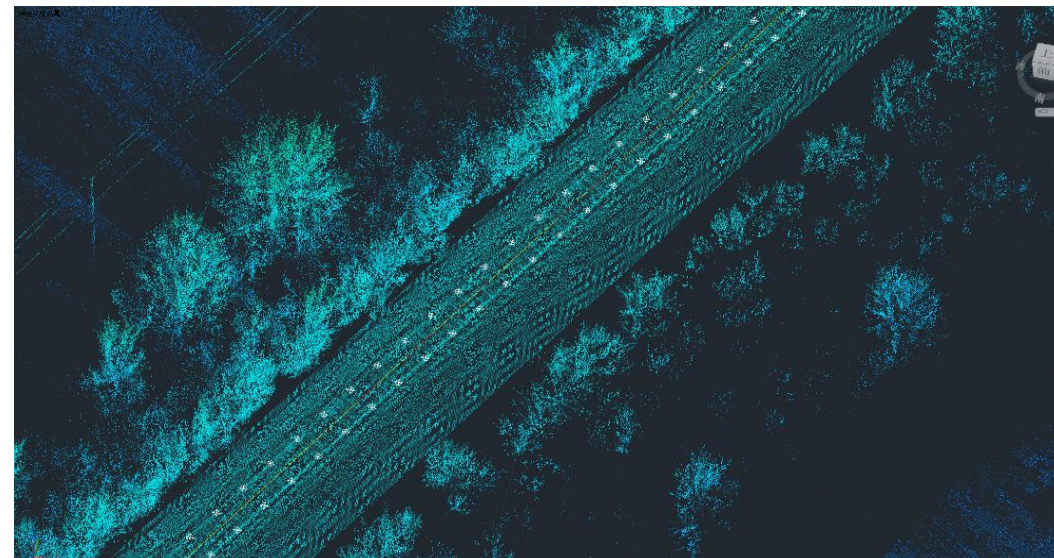
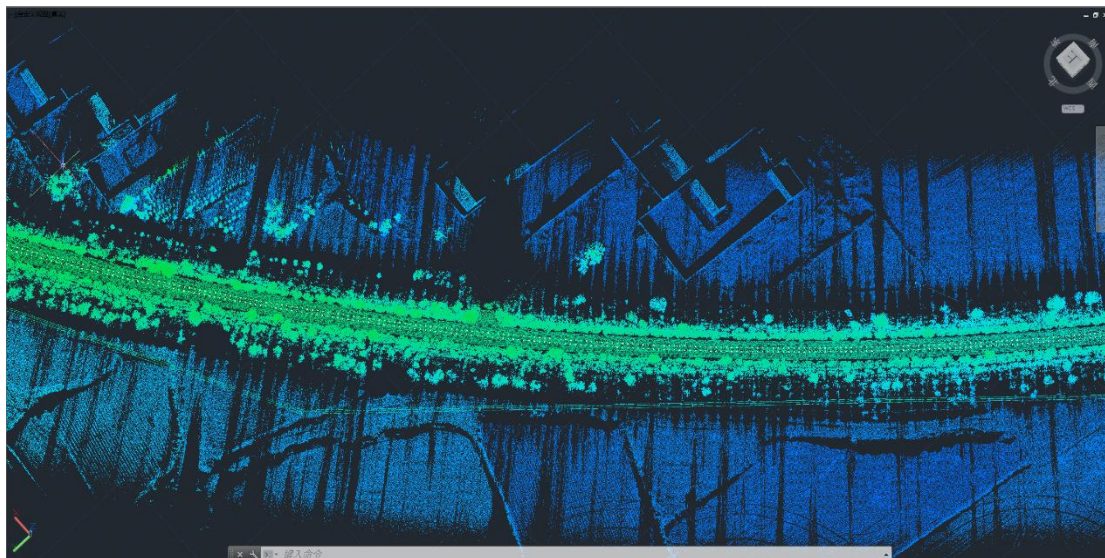
- 轨道移动三维扫描大机捣固测量车台以电动自行车为载体，搭载轨道几何线形三维扫描系统，实现**15km/h**速度下的轨道高精度场景采集，系统集成激光惯导、GNSS、**国产270扫描仪**、里程编码器和同步控制模块等，搭配后处理软件模块实现**大机捣固成果输出**。

指标项	参 数 要 求
激光发射频率	200万点/秒
扫描频率	150转/秒
扫描角度	270°
测距精度	2mm@10m
线路横向偏差	绝对精度20mm
线路垂向偏差	绝对精度15mm
线路相对偏差	相对精度2mm
惯性单元	激光惯导（自动寻北）
作业效率	0-20km/h轨道车
工作环境	全天候作业（雨雪除外）

3.6 创新应用-轨道移动三维扫描大机捣固清筛技术



3.6 创新应用-轨道移动三维扫描大机捣固清筛技术



3.6 创新应用-轨道移动三维扫描大机捣固清筛技术

UltraEdit-32 - [D:\weixin\WeChat Files\wxid_0eesvhpum4si42\FileStorage\File\2021-03\qx#11b.txt]

文件(F) 编辑(E) 搜索(S) 项目(P) 视图(V) 格式(T) 列表(L) 宏(M) 高级(A) 窗口(W) 帮助(H)

qx#11b.txt

曲线计算资料 11号曲线			
点号	里程	拨道量	既有曲率
5 288	k 942+635.000,	5.2,	.000000000
6 289	k 942+639.999,	7.0,	.000011732
7 290	k 942+644.999,	3.0,	-.000002159
8 291	k 942+650.000,	0.0,	.000010097
9 292	k 942+654.999,	2.1,	-.000002639
10 293	k 942+659.999,	5.5,	-.000005362
11 294	k 942+664.999,	6.2,	.000003131
12 295	k 942+669.999,	5.3,	-.000000209
13 296	k 942+674.999,	4.6,	-.000006258
14 297	k 942+680.000,	0.7,	-.000002453
15 298	k 942+685.000,	-2.0,	-.000004520
16 299	k 942+689.999,	-2.4,	-.000001114
17 300	k 942+695.000,	-3.3,	.000003870
18 301	k 942+700.000,	-2.4,	-.000007335
19 302	k 942+705.000,	2.3,	-.000000726
20 303	k 942+709.999,	7.3,	-.000002324
21 304	k 942+715.000,	11.2,	.000016629
22 305	k 942+719.999,	6.7,	-.000030916
23 306	k 942+724.999,	-13.2,	-.000022915
24 307	k 942+729.999,	-21.7,	-.000016693
25 308	k 942+734.999,	-21.8,	.000016733
26 309	k 942+739.999,	-13.6,	-.000004069
27 310	k 942+744.999,	-7.3,	-.000011667
28 311	k 942+749.999,	-7.0,	-.000002731

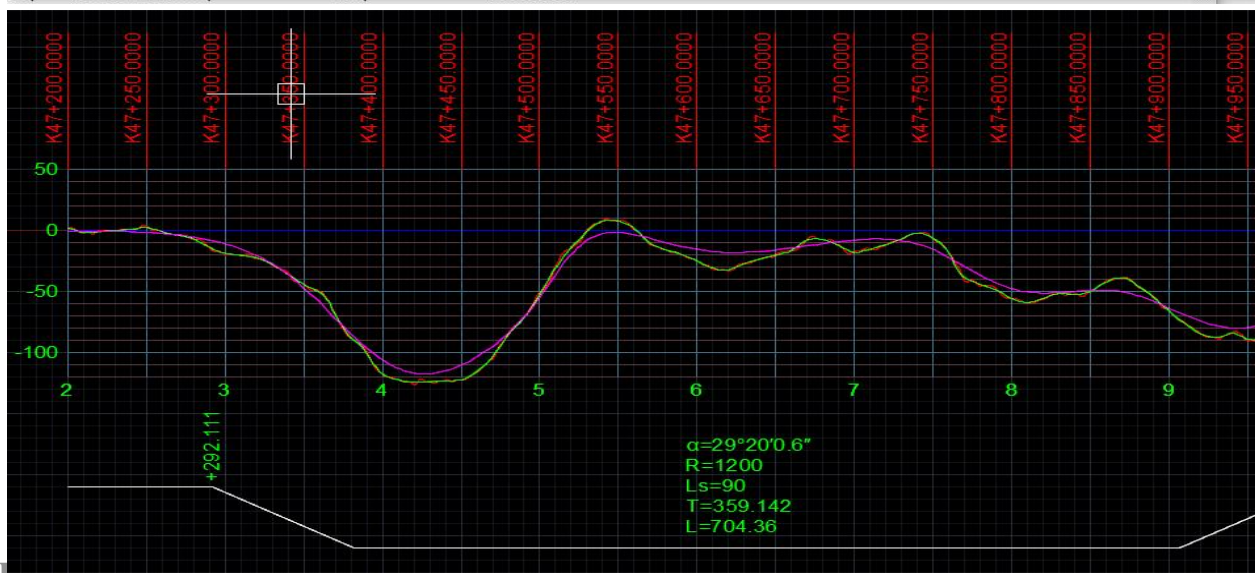
如需帮助文件, 请按 F1

行 1, 纵列 1, C0

DOS

修改: 2021/3/31 20:18:17 大小: 14436

插入



UltraEdit-32 - [D:\weixin\WeChat Files\wxid_0eesvhpum4si42\FileStorage\File\2021-03\qx#12b.txt]

文件(F) 编辑(E) 搜索(S) 项目(P) 视图(V) 格式(T) 列表(L) 宏(M) 高级(A) 窗口(W) 帮助(H)

qx#11b.txt qx#12b.txt

曲线计算资料 12号曲线			
点号	里程	拨道量	既有曲率
5 531	k 943+850.000,	0.0,	.000000000
6 532	k 943+854.999,	-1.1,	-.000004403
7 533	k 943+860.000,	0.1,	.000001197
8 534	k 943+865.000,	0.6,	-.000008008
9 535	k 943+869.999,	-2.9,	-.000007876
10 536	k 943+875.000,	-2.4,	.000000018
11 537	k 943+879.999,	-2.0,	.000002028
12 538	k 943+885.000,	-0.5,	.000000267
13 539	k 943+890.000,	0.8,	.000002009
14 540	k 943+894.999,	1.2,	.000004816
15 541	k 943+899.999,	3.9,	.000002792
16 542	k 943+905.000,	8.0,	-.000011613
17 543	k 943+909.999,	6.4,	-.000003673
18 544	k 943+915.000,	6.5,	-.000002758
19 545	k 943+920.000,	5.3,	.000001513
20 546	k 943+924.999,	3.3,	.000010844
21 547	k 943+929.999,	-4.1,	.000012440
22 548	k 943+934.999,	-5.2,	-.000024788
23 549	k 943+939.999,	6.0,	.000013477
24 550	k 943+944.999,	10.5,	.000008915
25 551	k 943+950.000,	10.5,	-.000003474
26 552	k 943+954.999,	8.8,	.000004849
27 553	k 943+959.999,	4.6,	.000006844
28 554	k 943+964.999,	3.9,	.000005847

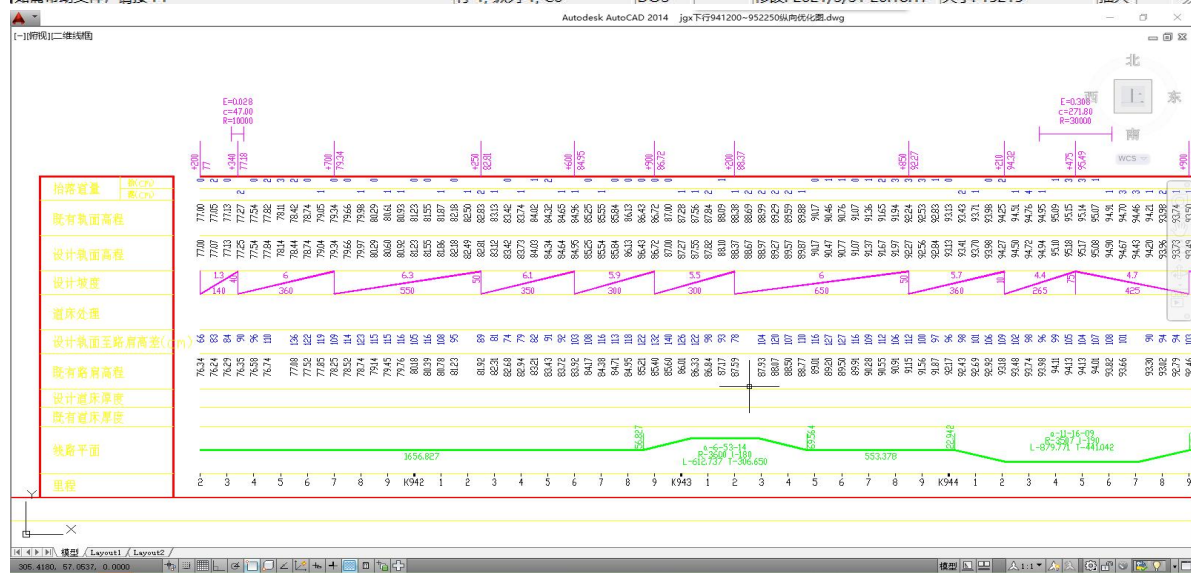
如需帮助文件, 请按 F1

行 1, 纵列 1, C0

DOS

修改: 2021/3/31 20:18:17 大小: 15215

插入



3.6 创新应用-轨道移动三维扫描大机捣固清筛技术

测点拨距表

点号	里程 (m)	实测拨距 (mm)	预留拨距 (mm)	作业拨距 (mm)	线形	备 注
1	47200	2	-1	-3	直	
2	47201.998	2.2	-0.6	-2.9	直	
3	47203.997	2	-0.3	-2.3	直	
4	47205.999	0	0	0	直	
5	47207.999	-1.5	0.3	1.9	直	
6	47209.997	-2.3	0.6	2.9	直	
7	47212.001	-1.5	0.9	2.4	直	
8	47213.996	-1.7	1.2	2.9	直	
9	47216.003	-2.9	1.5	4.5	直	
10	47218.002	-1.5	1.8	3.3	直	
11	47220.003	-0.3	2.1	2.4	直	
12	47222	-0.2	2.4	2.6	直	
13	47224.002	0.2	2.6	2.4	直	
14	47226.003	0	2.8	2.9	直	
15	47227.996	-0.8	3.1	3.9	直	
16	47230.004	-0.9	3.3	4.2	直	
17	47232.004	-0.5	3.5	3.9	直	
18	47234.005	0.5	3.7	3.2	直	
19	47235.999	0.9	3.8	2.9	直	
20	47238.004	0.7	4	3.3	直	
21	47239.992	0.6	4.1	3.5	直	
22	47242.01	1.1	4.2	3.1	直	

测点拨距表

点号	里程 (m)	实测拨距 (mm)	预留拨距 (mm)	作业拨距 (mm)	线形	备 注
49	47296.009	-16.9	-4.6	12.3	缓	
50	47298.008	-18.4	-5.5	12.9	缓	
51	47300.006	-19.6	-6.4	13.2	缓	
52	47302.008	-19.6	-7.3	12.3	缓	
53	47304.01	-19.5	-8.4	11.1	缓	
54	47306.01	-20.4	-9.4	11	缓	
55	47308.008	-20.3	-10.6	9.7	缓	
56	47310.01	-20.8	-11.8	9.1	缓	
57	47312.015	-20.5	-13	7.5	缓	
58	47314.008	-19.2	-14.3	4.9	缓	
59	47316.012	-20.3	-15.6	4.7	缓	
60	47318.009	-22.2	-17.1	5.2	缓	
61	47320.008	-23.4	-18.5	4.9	缓	
62	47322.012	-22.9	-20.1	2.9	缓	
63	47324.009	-23.7	-21.6	2.1	缓	
64	47326.01	-24.9	-23.3	1.6	缓	
65	47328.001	-26.5	-25	1.5	缓	
66	47330.012	-28.3	-26.8	1.5	缓	
67	47332.007	-29.7	-28.6	1.1	缓	
68	47334.006	-30.9	-30.6	0.4	缓	
69	47336.004	-32.1	-32.5	-0.4	缓	
70	47338.01	-32.7	-34.6	-1.9	缓	

测点拨距表

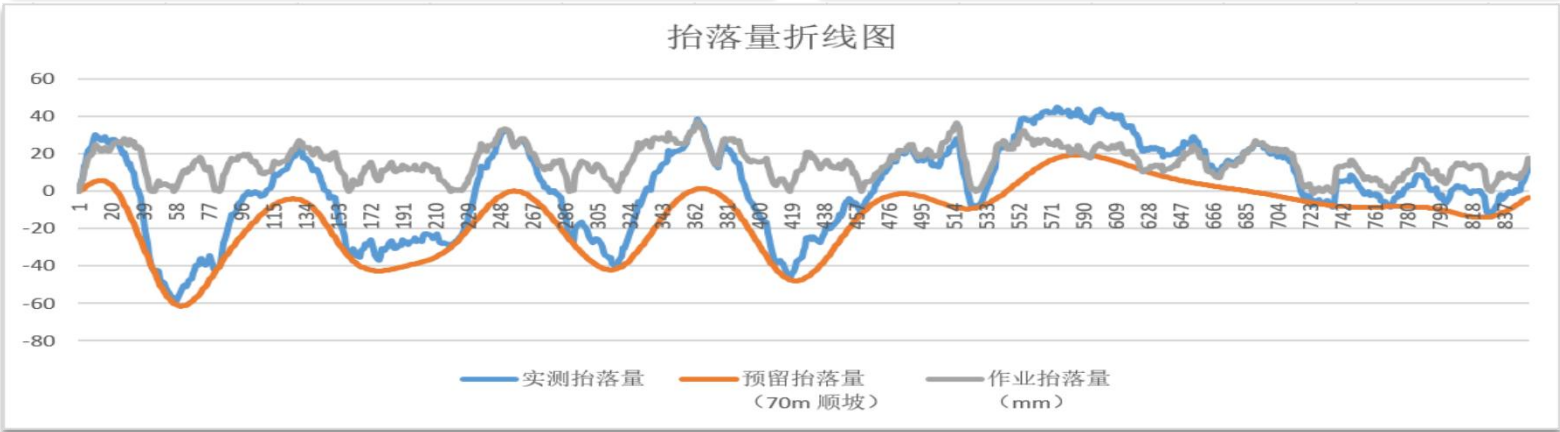
点号	里程 (m)	实测拨距 (mm)	预留拨距 (mm)	作业拨距 (mm)	线形	备 注
112	47422	-125.1	-116.8	8.3	圆	
113	47424.006	-121.8	-117.3	4.5	圆	
114	47425.998	-122.1	-117.7	4.5	圆	
115	47428	-124.1	-117.9	6.1	圆	
116	47429.999	-124.4	-118	6.4	圆	
117	47431.999	-124.9	-118	6.8	圆	
118	47433.999	-125.1	-117.9	7.2	圆	
119	47436.009	-123	-117.6	5.4	圆	
120	47437.991	-123.3	-117.2	6.1	圆	
121	47439.999	-122.9	-116.7	6.2	圆	
122	47441.997	-122.7	-116.1	6.7	圆	
123	47443.998	-124	-115.3	8.7	圆	
124	47445.998	-123.7	-114.5	9.2	圆	
125	47447.998	-122.5	-113.5	9	圆	
126	47449.994	-122.2	-112.4	9.8	圆	
127	47451.996	-122.2	-111.2	11	圆	
128	47453.997	-121.1	-109.9	11.2	圆	
129	47455.994	-119.1	-108.5	10.6	圆	
130	47458	-117.5	-107	10.5	圆	
131	47459.999	-116.1	-105.4	10.6	圆	
132	47462.004	-113.9	-103.7	10.1	圆	
133	47463.996	-111.8	-102	9.9	圆	

3.6 创新应用-轨道移动三维扫描大机捣固清筛技术

■ 抬落量表

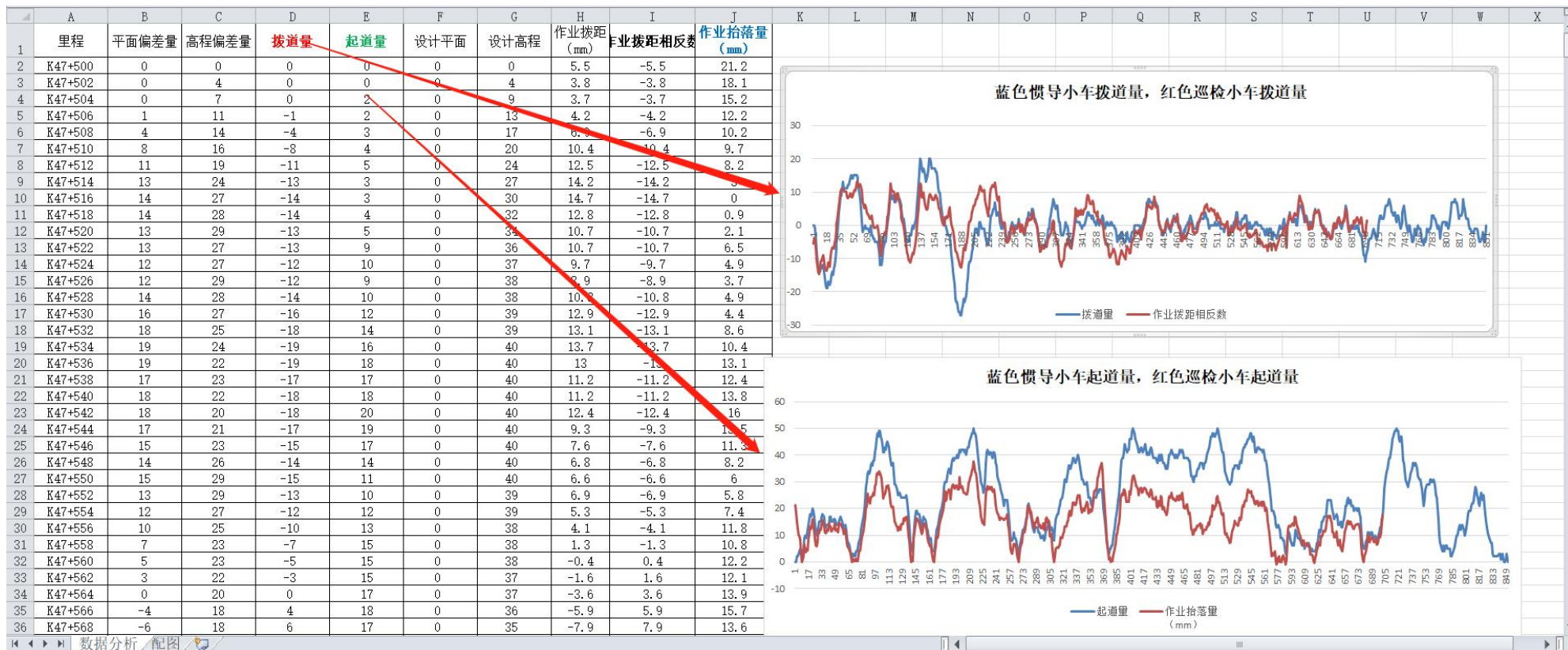
抬落量查询表					
里程 (m)	实测抬落量	预留抬落量 (70m 顺坡)	作业抬落量 (mm)	线形	备 注
47266.005	4.9	-19.1	23.9		
47268.005	1.9	-21.2	23.1		
47270.006	1	-23.4	24.4		
47272.007	-3.1	-25.6	22.5		
47274.006	-9.5	-27.8	18.3		
47276.01	-14.4	-30	15.6		
47278.005	-20.6	-32.2	11.6	竖曲	
47280.007	-27.7	-34.4	6.7	竖曲	
47282.003	-34.3	-36.5	2.2	竖曲	
47284	-38	-38.7	0.7	竖曲	
47286.011	-40.6	-40.8	0.1	竖曲	
47288.007	-43	-42.8	-0.1	竖曲	
47290.005	-42.7	-44.8	2.1	竖曲	
47292.006	-42.3	-46.7	4.4	竖曲	
47294.005	-42.9	-48.5	5.6	竖曲	
47296.009	-47.3	-50.3	3	竖曲	
47298.008	-48.5	-52	3.5	竖曲	
47300.006	-49.2	-53.5	4.3	竖曲	K47+300.0000
47302.008	-51	-54.9	4	竖曲	
47304.01	-52.7	-56.3	3.5	竖曲	
47306.01	-54.7	-57.4	2.8		
47308.008	-56.1	-58.5	2.4		

抬落量查询表					
里程 (m)	实测抬落量	预留抬落量 (70m 顺坡)	作业抬落量 (mm)	线形	备 注
48859.989	-10	-13	3		
48861.987	-8.5	-12.7	4.2		
48863.986	-6.2	-12.4	6.2		
48865.991	-2.5	-12.1	9.5		
48867.987	-1.5	-11.7	10.2		
48869.988	-4	-11.3	7.3		
48871.989	-2.7	-10.9	8.2		
48873.986	-1.6	-10.4	8.8		
48875.986	-0.9	-9.9	9		
48877.987	-0.1	-9.4	9.3		
48879.987	-1.2	-8.9	7.7		
48881.99	-0.9	-8.4	7.4		
48883.988	-0.2	-7.8	7.6		
48885.99	1	-7.2	8.3		
48887.985	0	-6.7	6.6		
48889.986	0.6	-6.1	6.7		
48891.989	4.7	-5.4	10.1		
48893.989	4.5	-4.8	9.3		
48895.986	6.5	-4.2	10.7		
48897.985	10.5	-3.6	14.1		
48899.986	14.6	-3	17.6		K48+900.0000



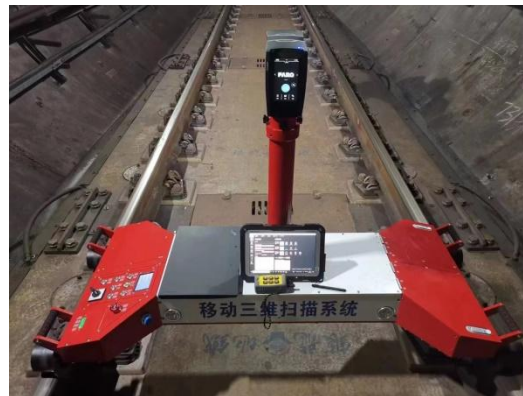
3.6 创新应用-轨道移动三维扫描大机捣固清筛技术

■ 与惯导小车线形设计方案对比分析



- 选用本方案成果的轨道调整数据与惯导小车轨道调整数据进行对比，线形设计方案精度一致，完全满足轨道大机捣固作业要求（平面20mm，高程15mm），两套方案对比本方案外业作业效率提升5倍以上。

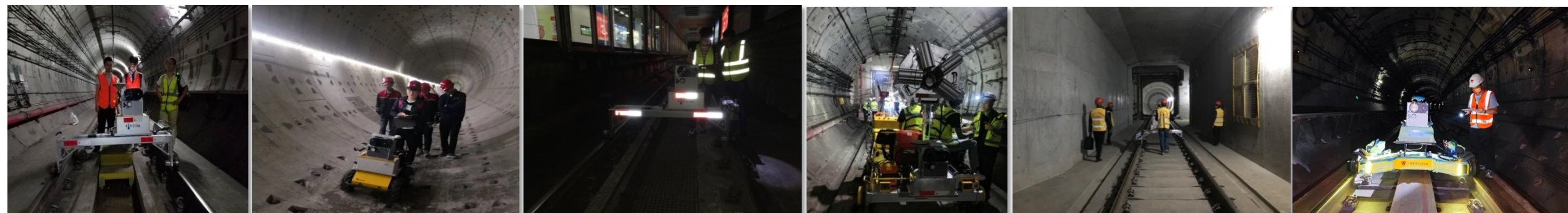
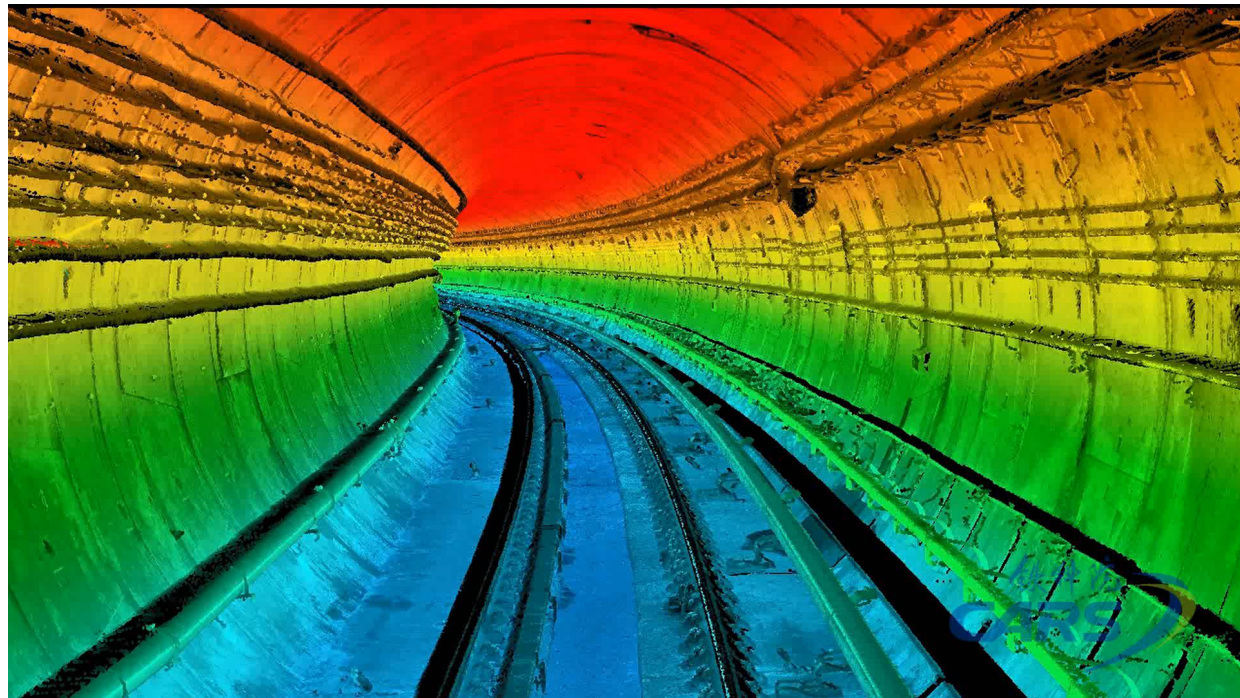
3.7 创新应用-融合激光图像的隧道检测测量技术



- **技术背景：**现阶段基于三维激光扫描的隧道结构型面检测作业方案已经比较成熟，由于国内缺乏测距精度优于2mm的高精度激光扫描技术，主流厂家均集成德国Z+F9012、徕卡P40、Faro等高精度三维扫描模块。
- **主要问题：**系统整体集成费用高，售后维护周期长（4个月以上）。满足隧道高精度检测测量要求（**测距精度优于2mm@20m**）的**国产高精度三维激光扫描技术现阶段处于空白**。

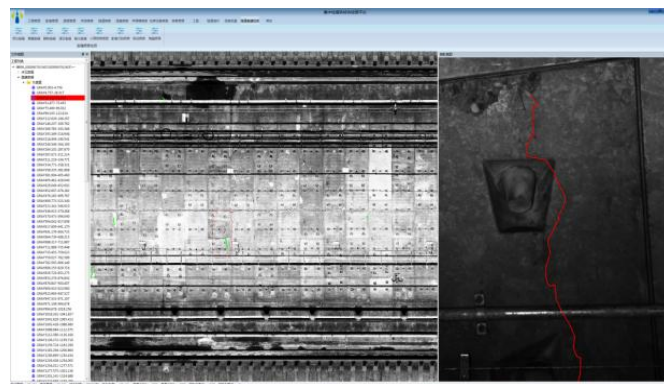
3.7 创新应用-融合激光图像的隧道检测测量技术

- **创新思路：**团队结合自身隧道激光三维扫描技术成果以及近6年来在**国内二十余地铁城市5000km地铁隧道**和**1000km 高铁隧道**工程经验，设计了一套融合激光图像的隧道检测测量技术方案，该方案经湖北省科技成果鉴定为**国际领先**。
- **突破了自主高精度地铁隧道三维扫描技术装置国产化难题**，发明专利10余项，填补了国内空白。

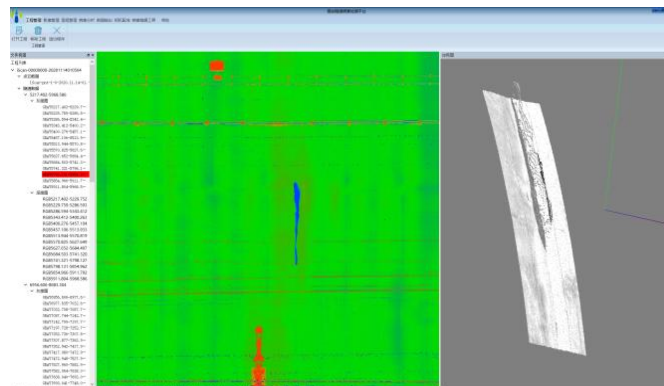


3.7 创新应用-融合激光图像的隧道检测测量技术

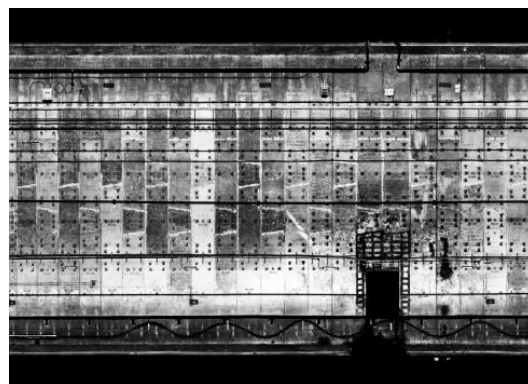
技术方案满足地铁\高铁隧道收敛、错台、侵限、掉块、渗水、裂缝等变形参数自动精准提取



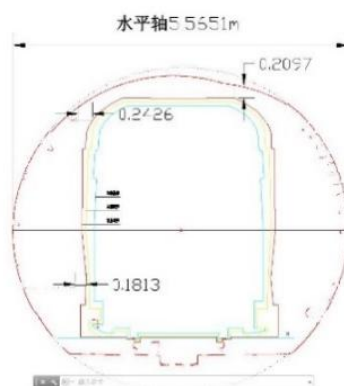
隧道裂缝检测



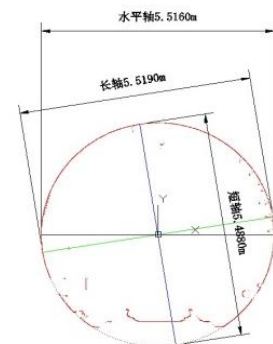
衬砌掉块识别



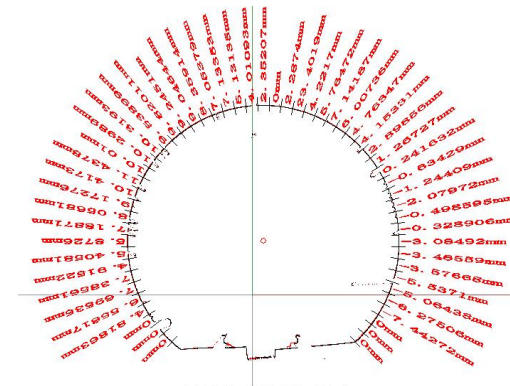
渗水



侵限



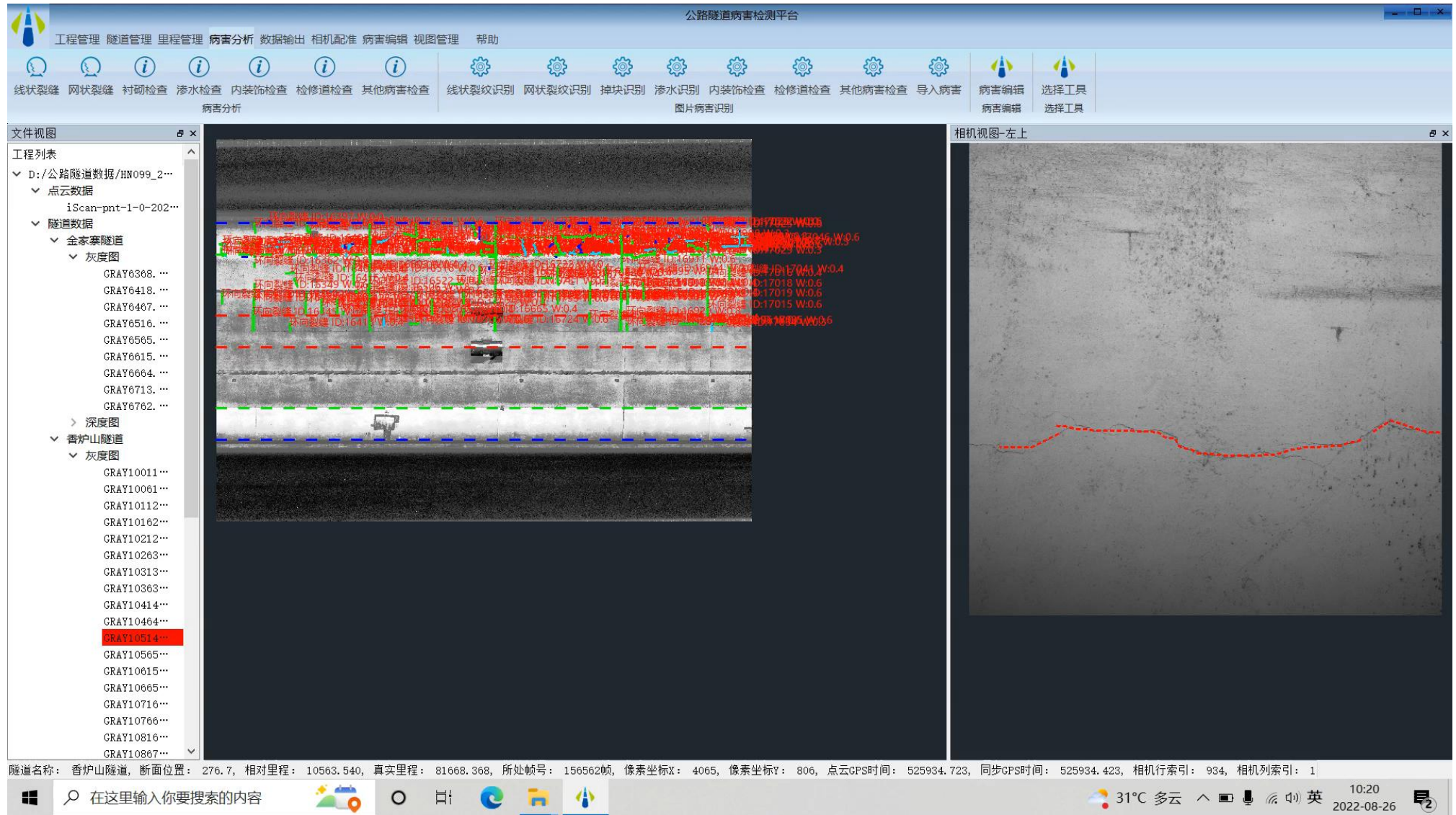
水平收敛



错台

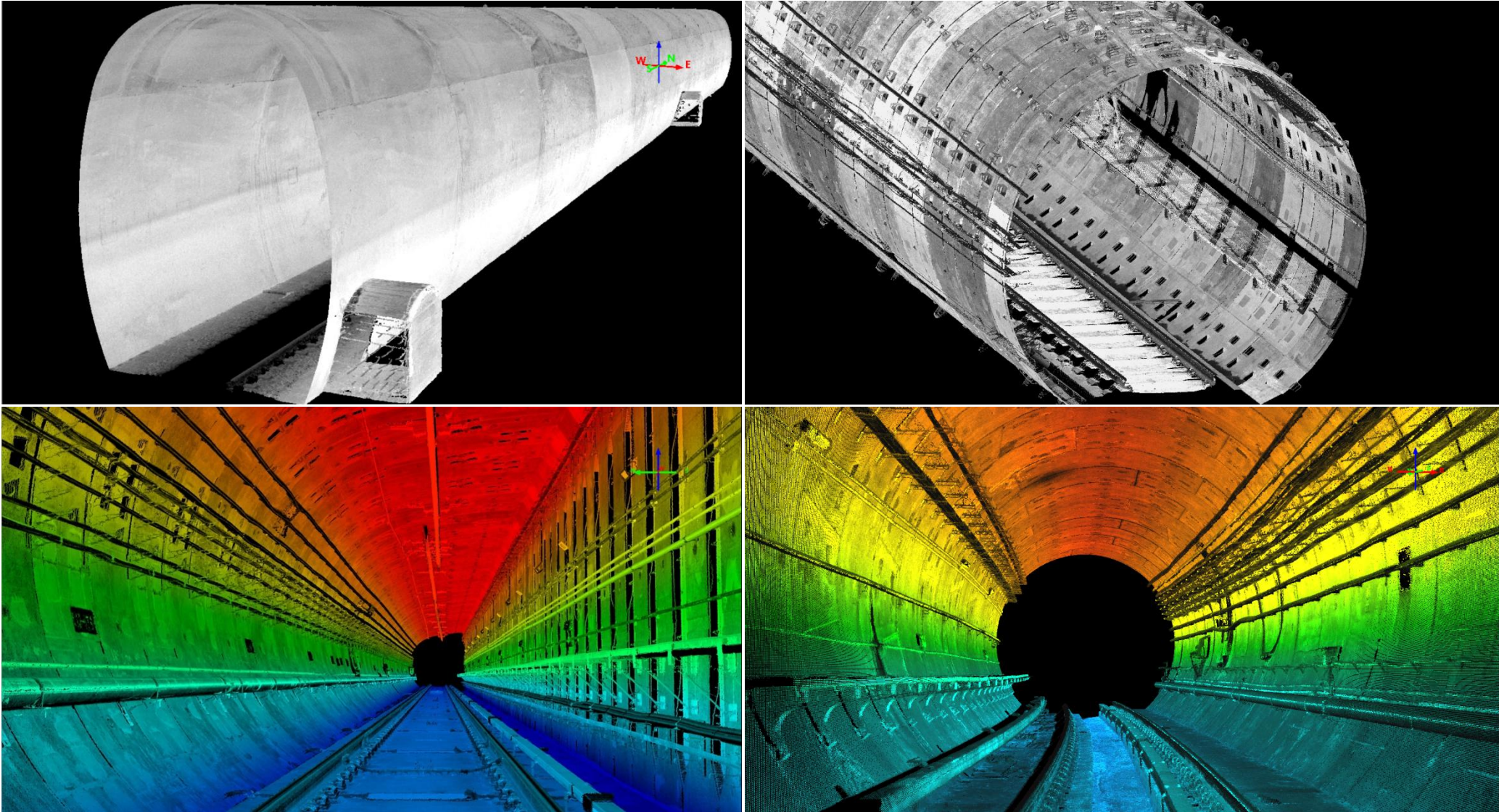
3.7 创新应用-融合激光图像的隧道检测测量技术

深度学习 隧道病害 智能提取



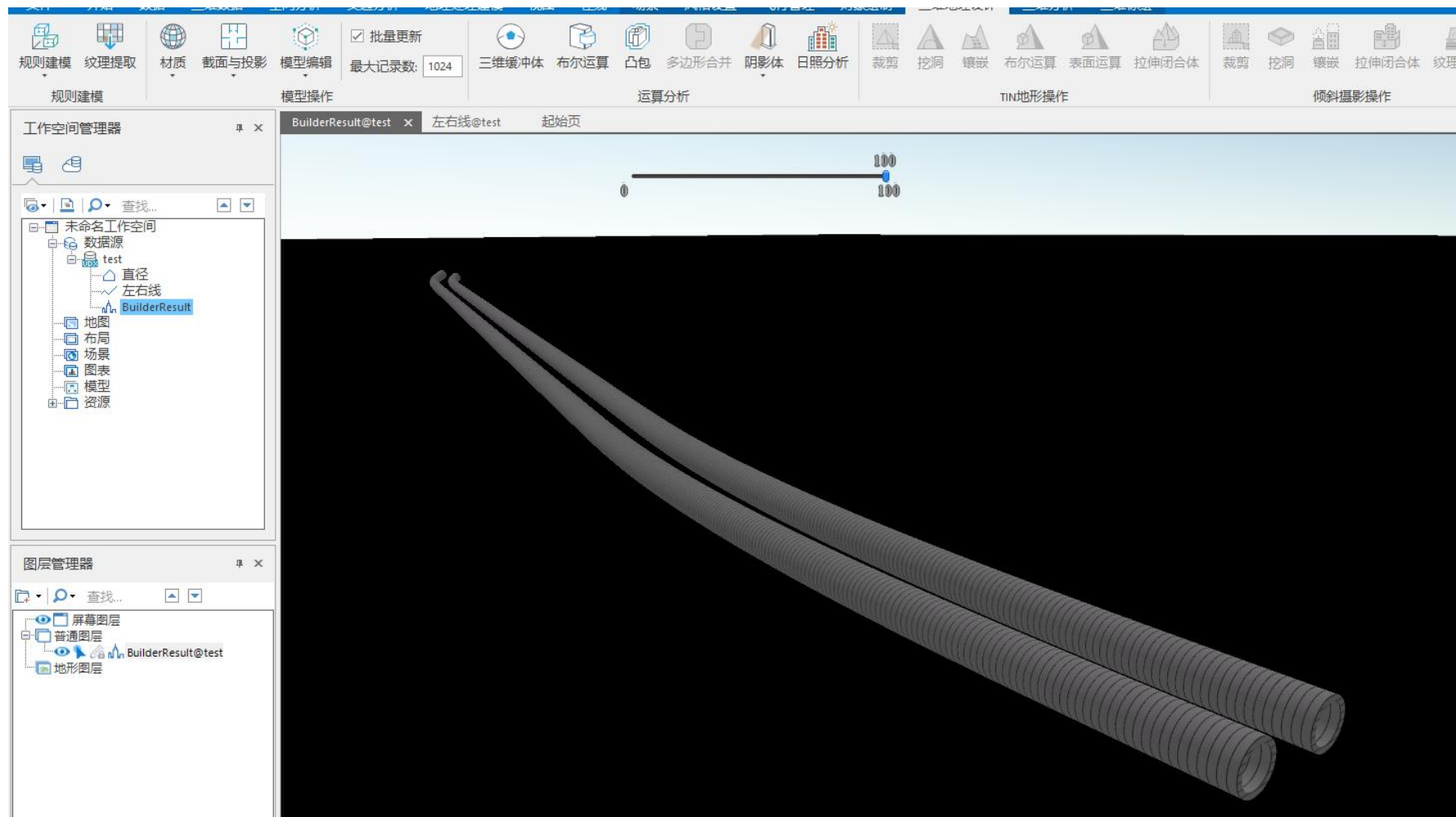
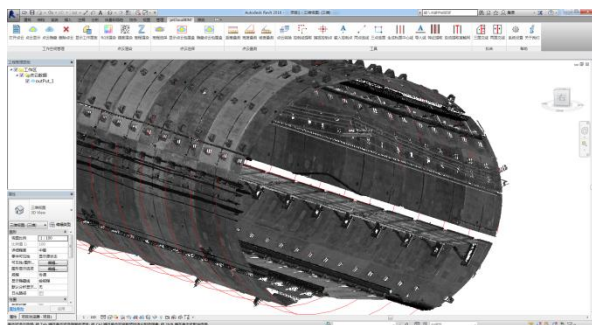
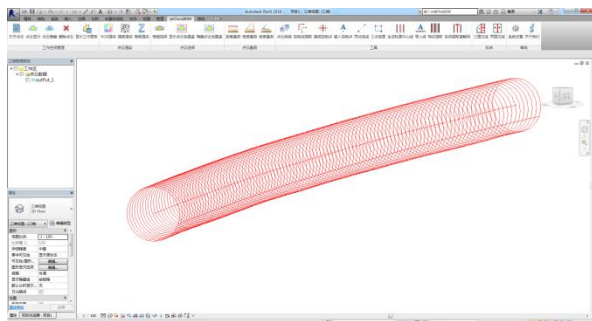
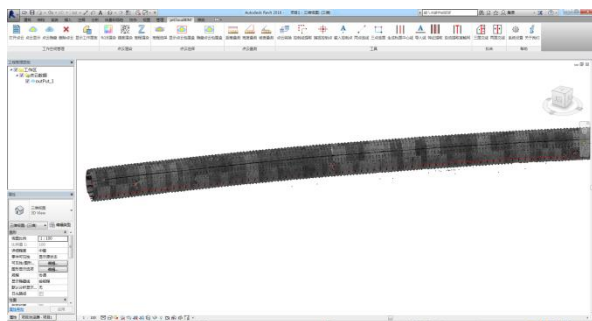
3.7 创新应用-融合激光图像的隧道检测测量技术

■ 不同场景高精度隧道三维点云



3.7 创新应用 - 融合Supmap软件平台应用

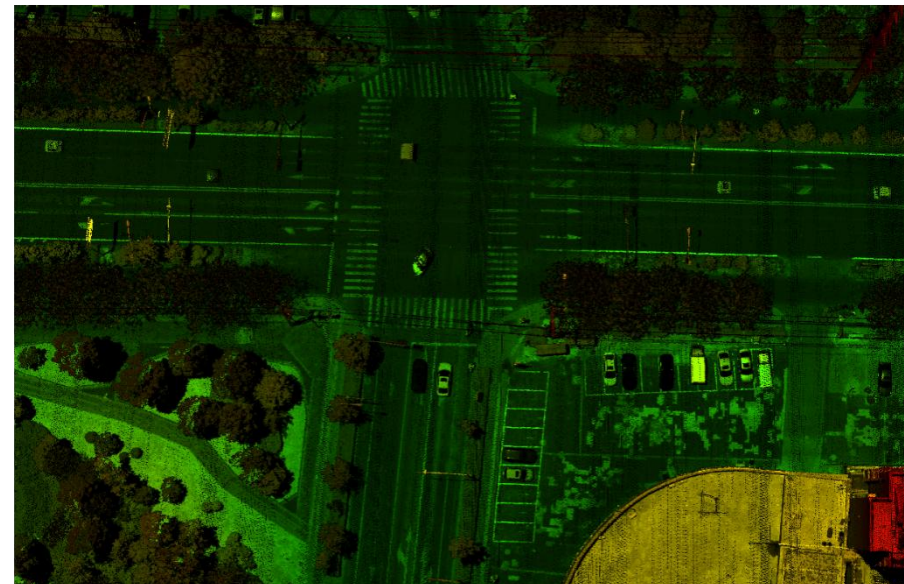
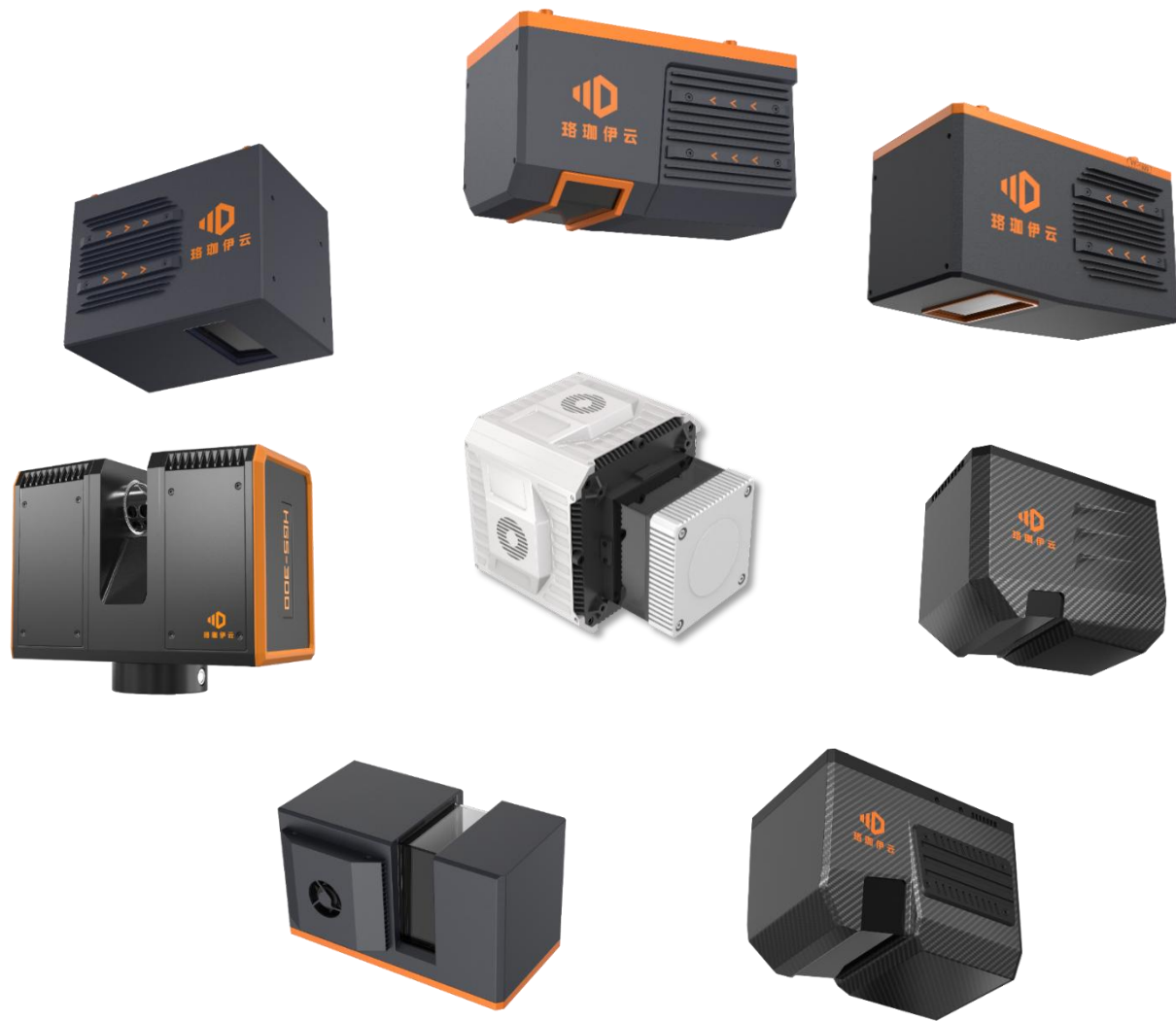
- 支持隧道三维点云场景的特征提取，之后在**SUPERMAP平台**中实现隧道环片模型构建和发



4

总结

4.1 成果总结-空天地底全要素高精度三维信息系列装备



4.2 应用总结

- 截止目前，团队的激光雷达测量技术装备已广泛应用于我国高铁、普铁、城市轨道交通、公路等领域的基础设施全断面检测过程中，取得了良好的经济社会效益。



- **铁路移动测量**完成青藏铁路、京张高铁、巴基斯坦铁路等**近万公里扫描**应用，相关技术成果行业领先。
- **地铁隧道扫描**已经完成武汉、苏州、北京、广州等20余城市应用，累计完成建设期1000多公里和运营期**5000多公里**地铁结构形面安全测量应用，行业占比60%以上。
- **公路隧道检测**完成贵州、四川、云南等地近3000km的隧道三维扫描检测项目。
- 完成各铁路局轨道全断面综合检测服务近万公里，推动了我国轨道交通基础设施数字化检测技术升级。



Thank You All!

GISTC
空间智能 因融至慧

2023地理信息软件技术大会
2023 Geospatial Information Software Technology Conference