



海铃探路者实验 电子学读出系统设计

王铭鑫、邬维浩

海铃计划合作组

2022年8月

—— 饮水思源 · 爱国荣校 ——



1.海铃计划及探路者实验

2.海铃探路者电子学读出系统

3.联调测试

4.海试

海铃计划 TRIDENT



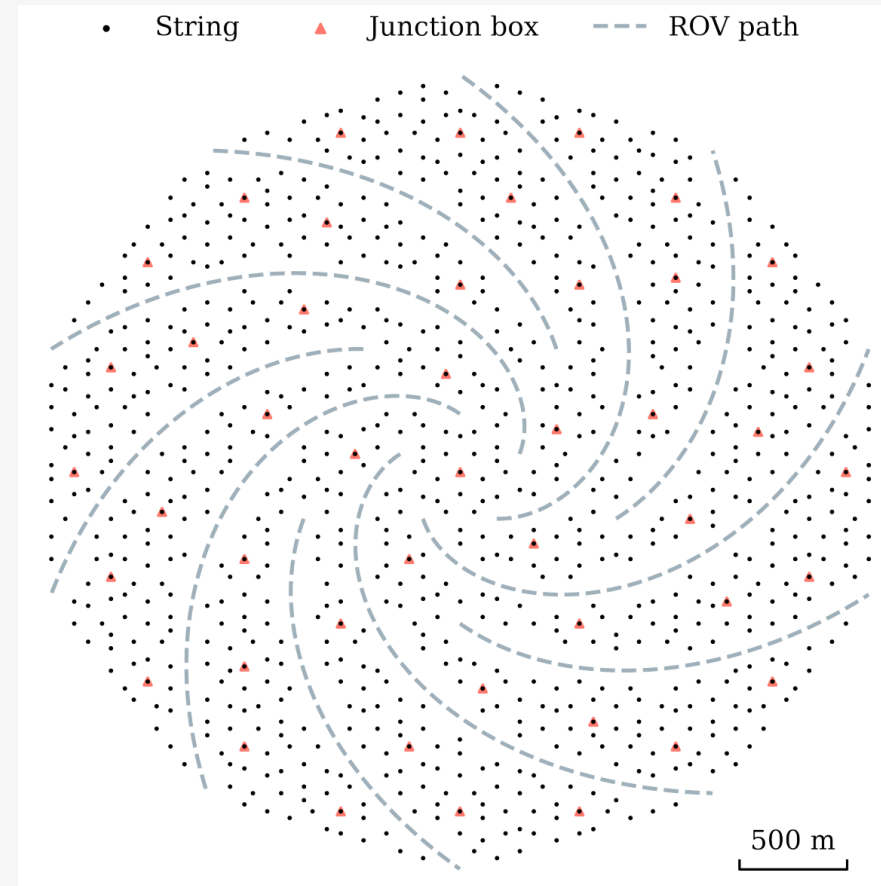
上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

主要科学目标:

- 探测高能天体中微子, 研究宇宙射线起源等科学问题
- 利用大气中微子对地球内部结构做断层扫描
- 研究海洋科学

选址要求:

- 距离岛屿近, 深度超过3km
- 海床平坦且适合施工
- 深海流速小于20cm/s
- 海水光学性质和海洋环境条件合适



Z. P. Ye, et al., TRIDENT Collaboration, arXiv:2207.04519



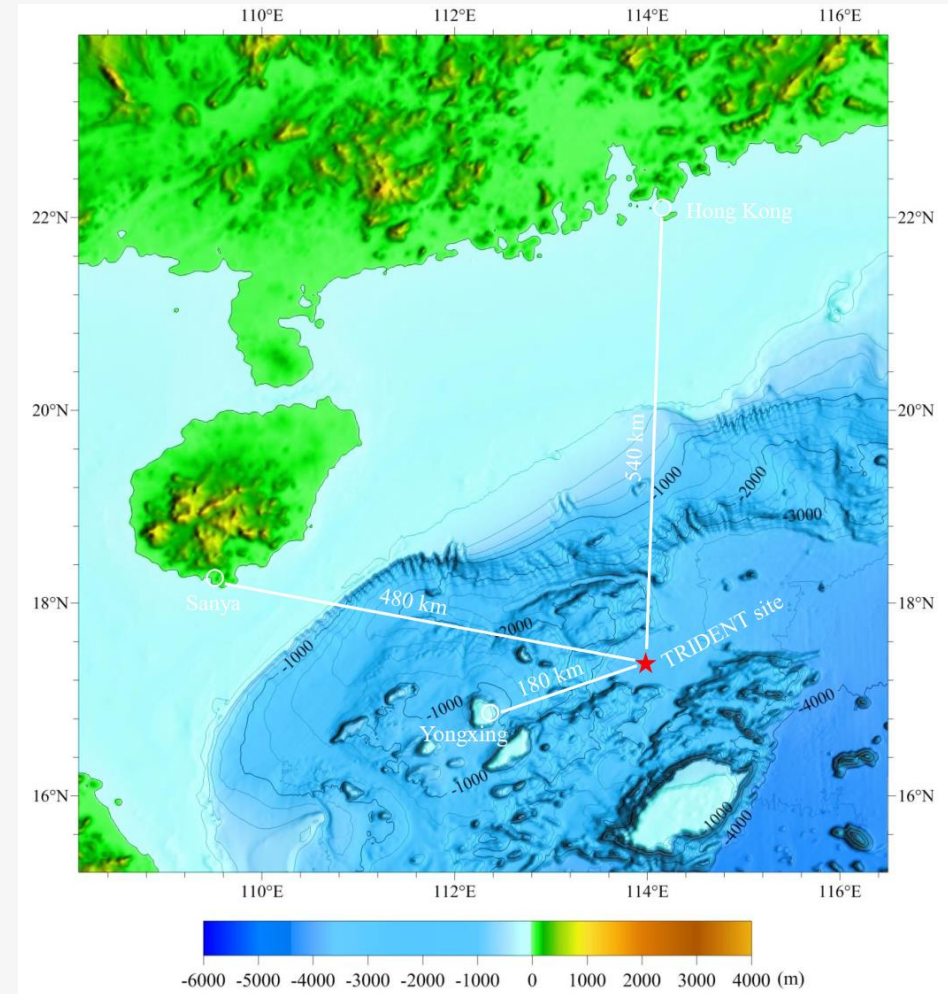
海铃探路者实验 T-REX



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

科学目标:

- 扫海
- 测量海水的光学性质
 - PMT系统和相机系统测量散射长度和吸收长度
- 监测海洋学条件
 - ADCP测量洋流流速
 - CTD测量不同深度海水的温度和盐度
 - PMT系统测量海水放射性等

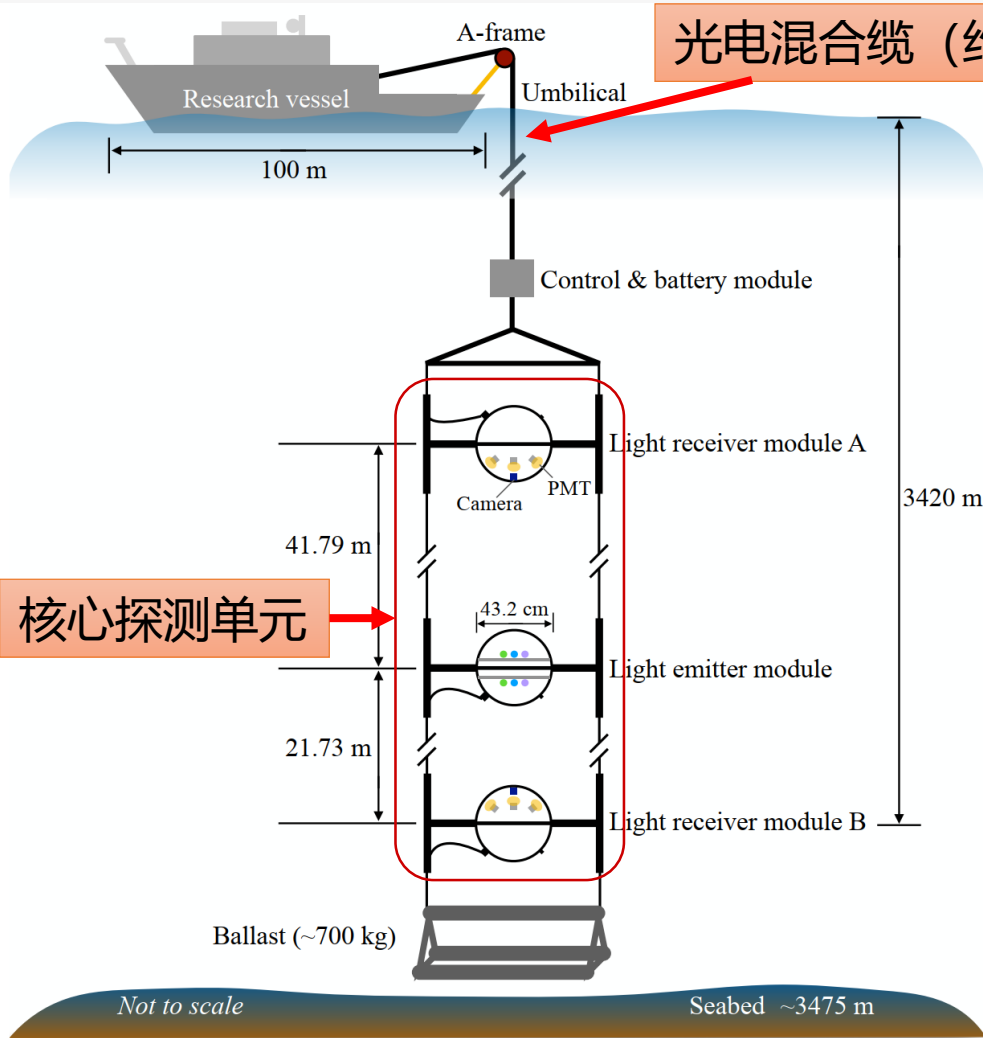


Z. P. Ye, et al., TRIDENT Collaboration, arXiv:2207.04519





海铃探路者实验 T-REX



核心探测单元测量海水光学性质

- PMT系统
 - 发光球产生光脉冲到达接收球A和B的时刻和光子数
- 相机系统
 - 接收球A和B对恒定发光的发光球拍照，分析图像中心的平均灰度值

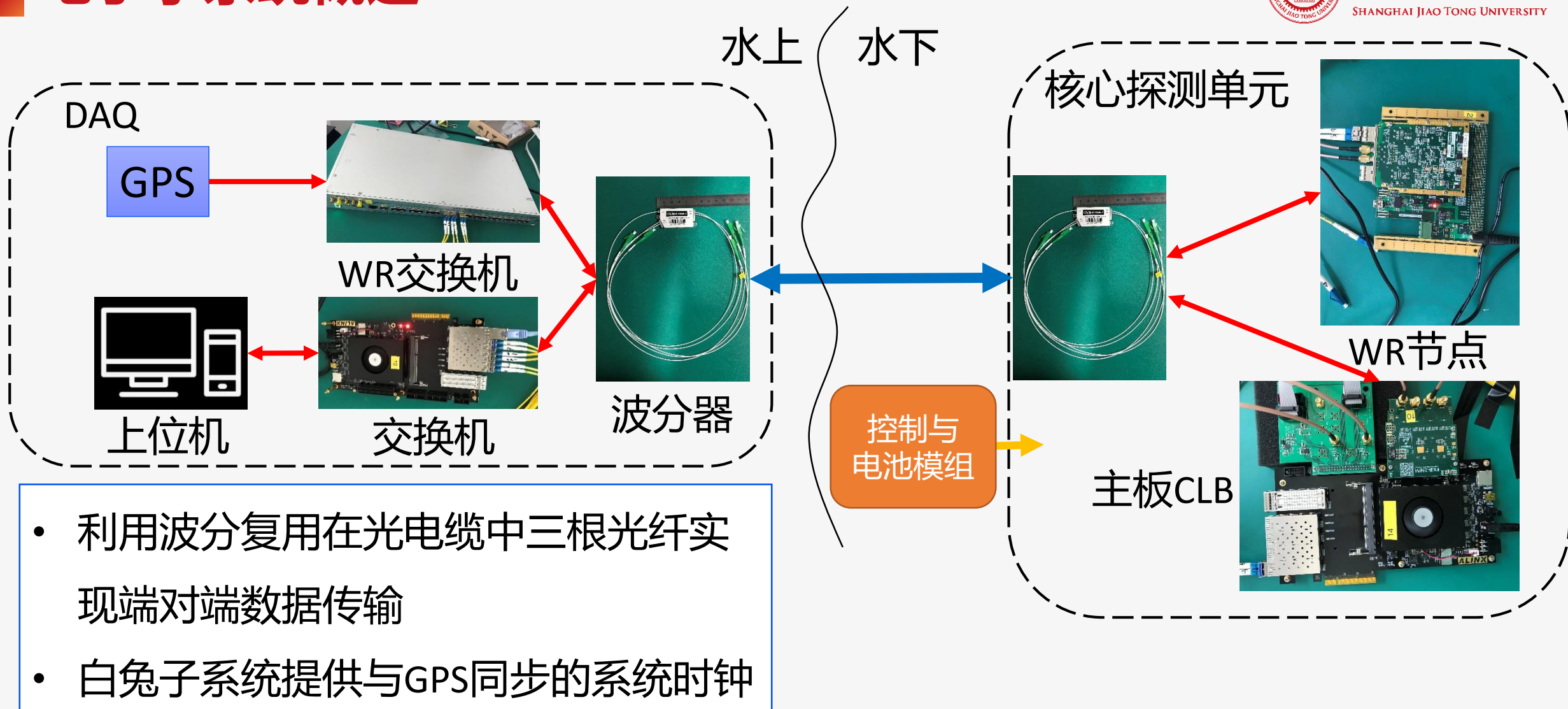
挑战:

- 发光球光脉冲强度超过 10^8 光子，时间宽度小于10ns
- 系统时钟与GPS同步
- 光电混合缆光纤数有限（4根），光纤链路光损耗超过20dB
- 深海实验时间超过2h，且装置可以回收重复使用





电子学系统概述

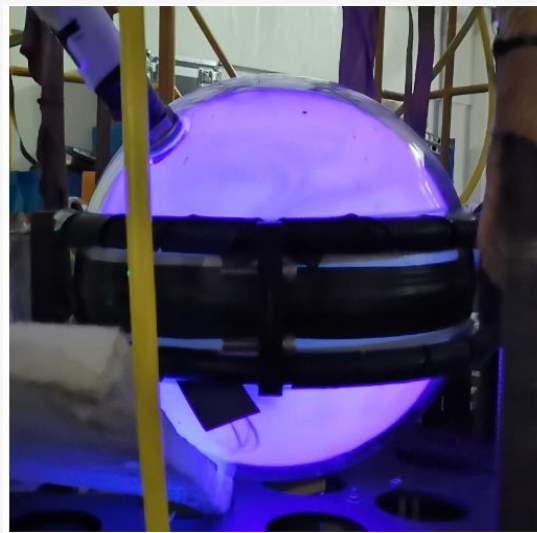




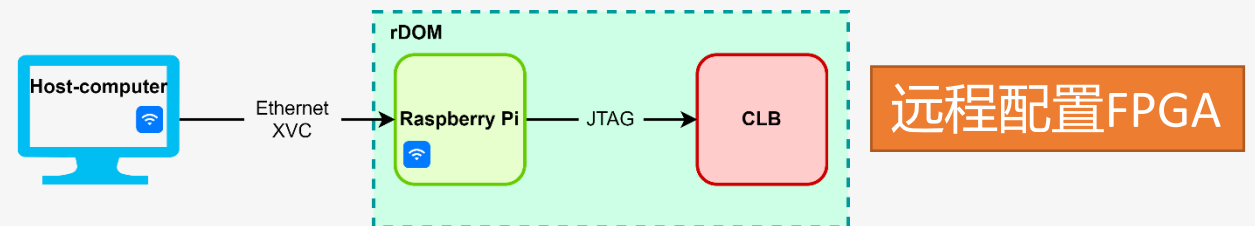
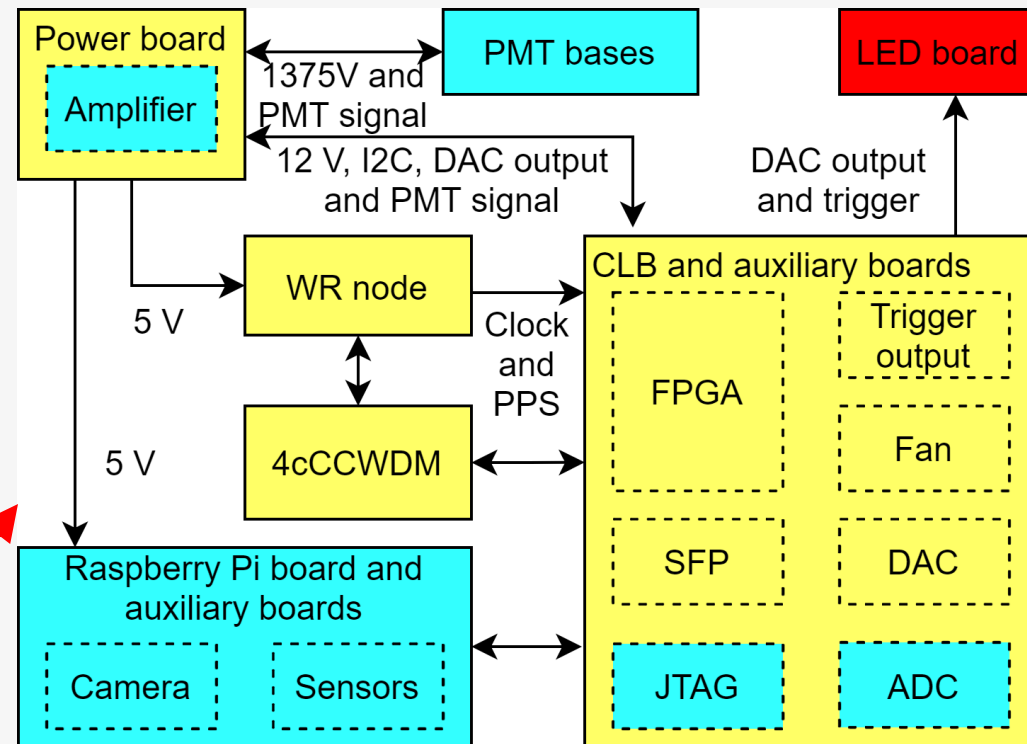
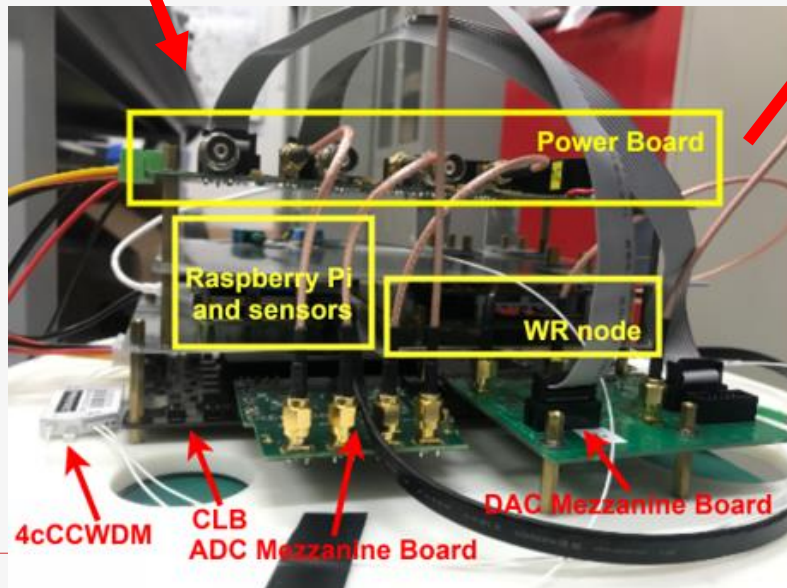
核心探测单元电子学设计



接收球



发光球

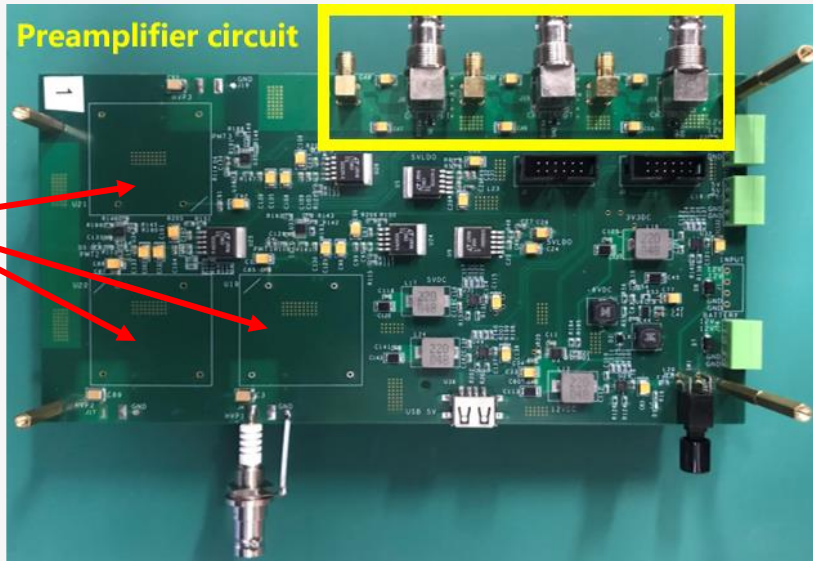




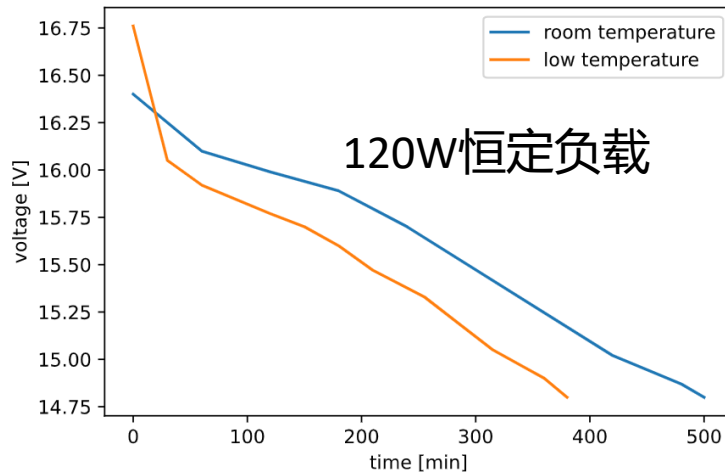
核心探测单元供电设计



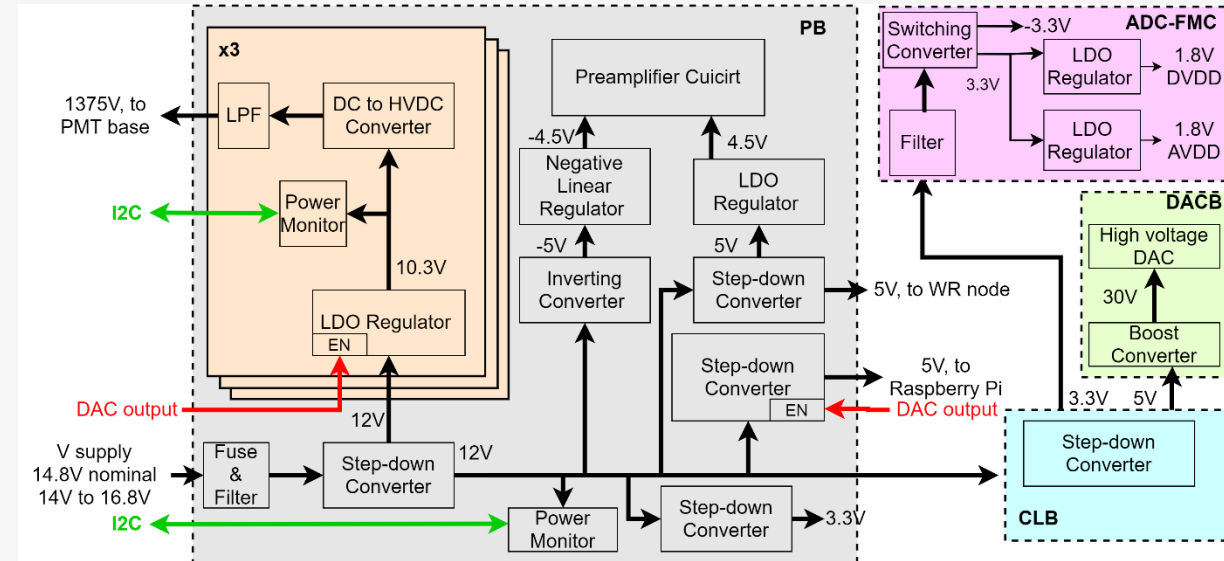
高压模块GP15



1200Wh锂电池



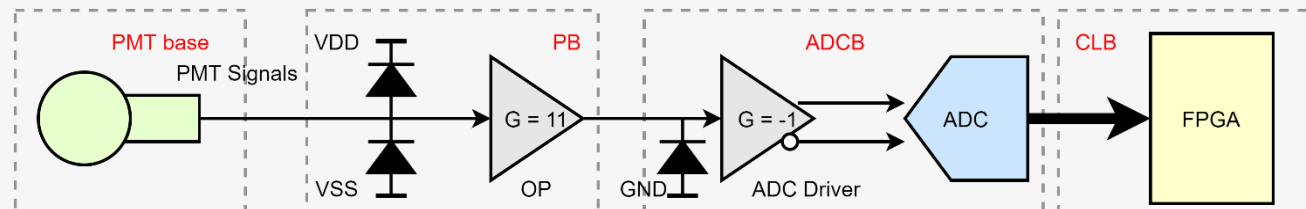
室温和低温 (0°C) 电池电量测试



- 核心探测单元总功耗小于90W
- 控制与电池模组内置锂电池 (约1200Wh)
满足单次实验需求
- 船上备有相同电池交替使用
- 关键节点设有电源监控



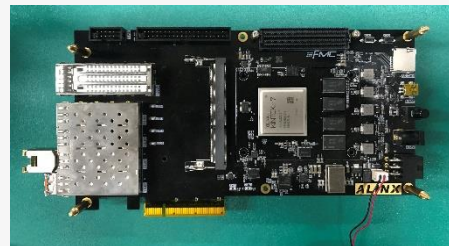
PMT信号数字化



海南展创3英寸
PMT, XP72B20



ADC FMC插件
250 MSPS ADC,
AD9613



黑金AX7325开发板
Xilinx Kintex-7 FPGA,
XC7K325T

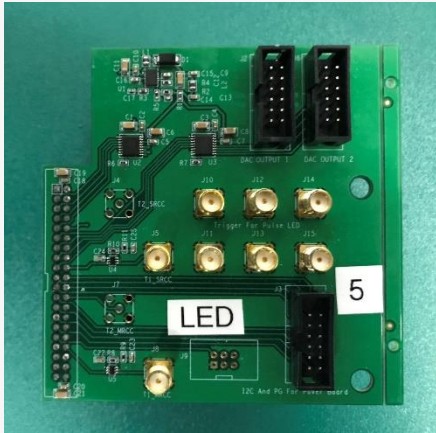
• 采数模式

- 自触发：
 - 设定每个通道阈值，过阈触发
- 同步触发：
 - 产生同步触发信号，使得发光球产生光脉冲，接收球保存PMT波形
- 同步触发频率、触发阈值、触发位置和窗口长度可配置

发光系统设计



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

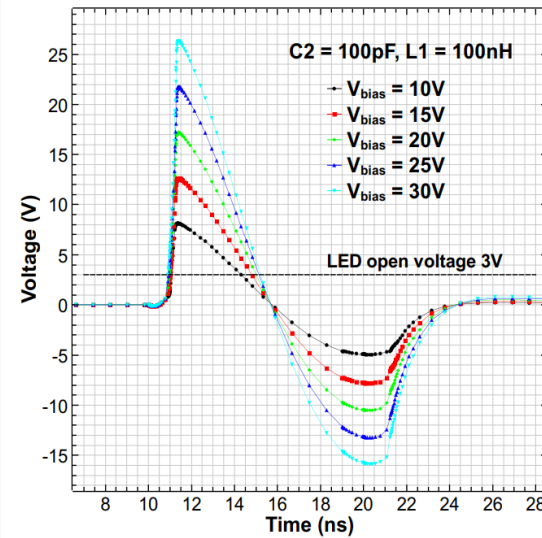


DAC插件

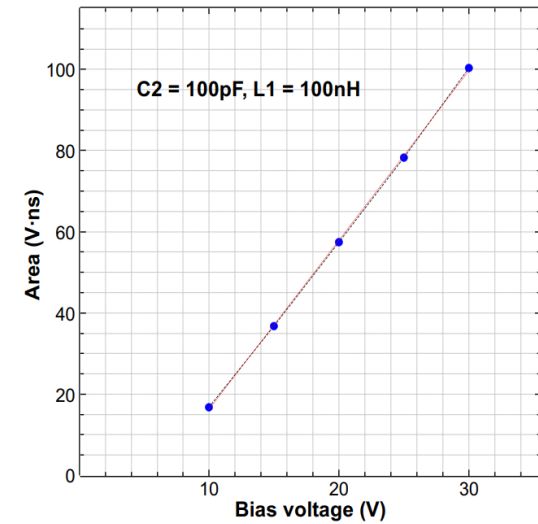


LED板

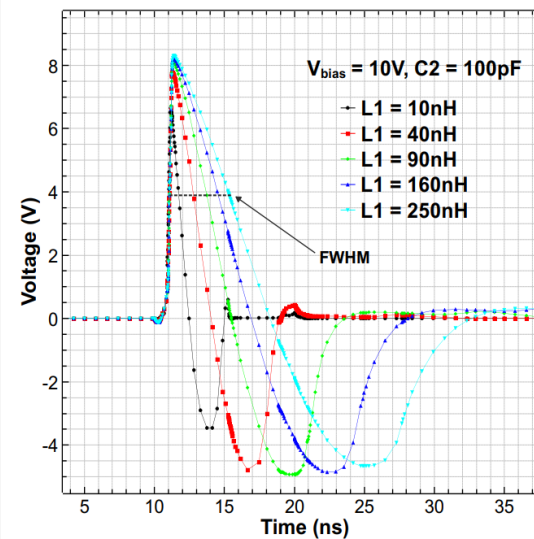
- 脉冲发光：
 - 基于Kapustinsky脉冲电路
 - 高压DAC提供0V - 30V电压调整发光强度
 - 脉冲宽度小于10ns
- 恒定发光：
 - 每种波长5个LED串联



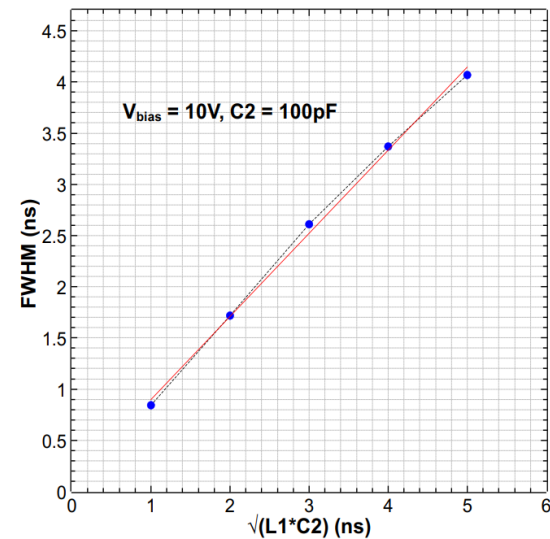
(a) Pulse shapes with five different bias voltages.



(b) Light intensity with respect to bias voltages.



(c) Pulse shapes with five different inductor $L1$.

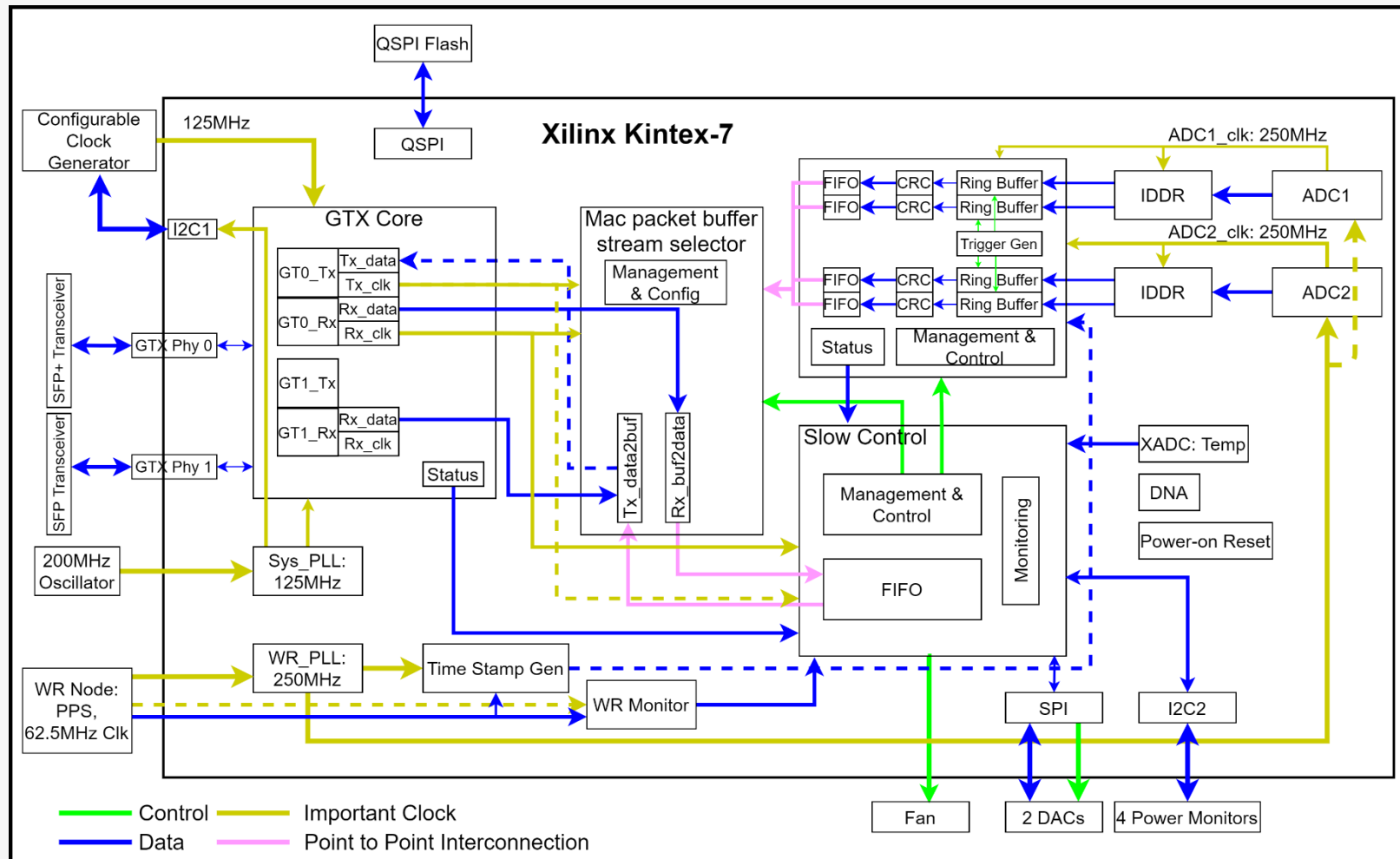


(d) Pulse FWHM with respect to $\sqrt{L1 \cdot C2}$.

FPGA固件设计



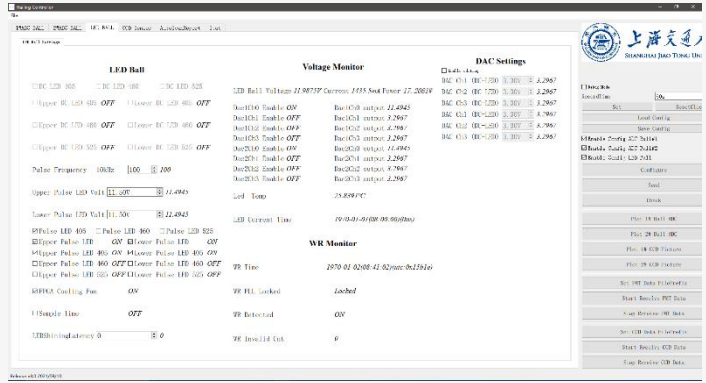
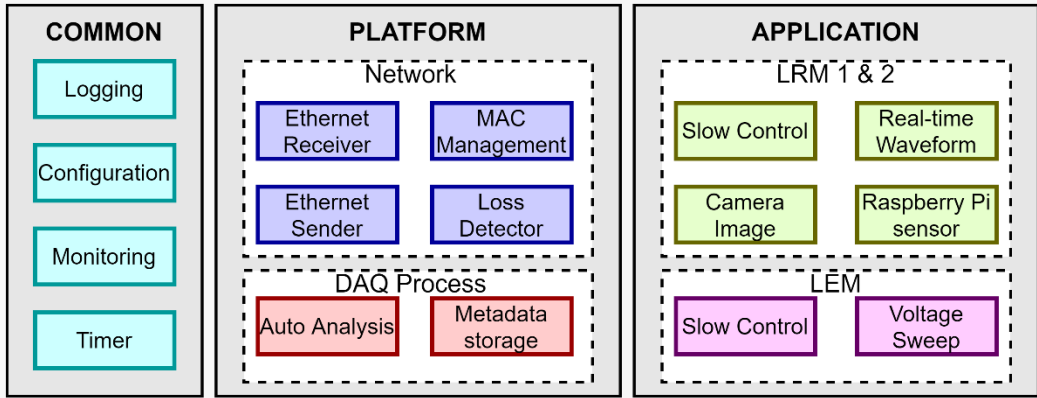
上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



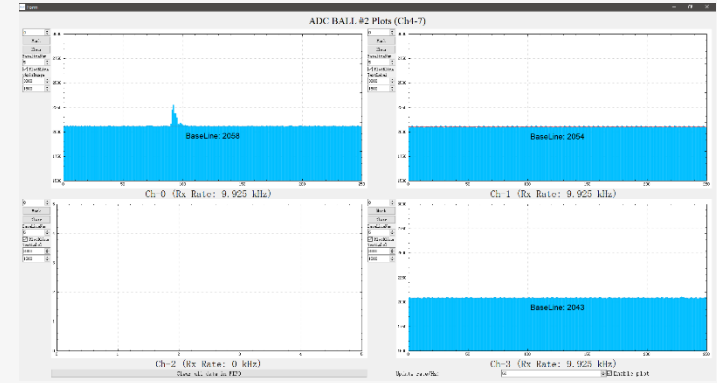
- WR CLK产生采样时钟，WR PPS产生时间戳
- ADC数据处理
- 树莓派数据转发（相机系统）
- 千兆MAC协议端对端传输
 - 带宽超过400Mbps
 - 单模组1us采样窗口配置支持40kHz总触发率
- 慢控配置并监测系统状态
 - 采数模式配置
 - DAC配置
 - 温度监测，电源监测



上位机软件

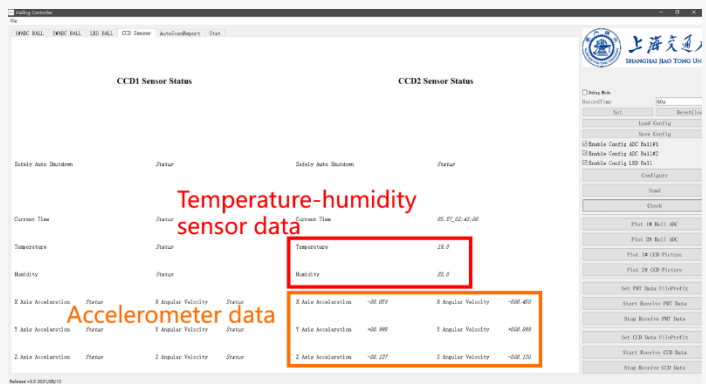


CLB慢控界面



实时波形显示

- 基于C++和QT5
- 主要功能
 - 慢控
 - ADC数据实时分析并显示波形
 - 脉冲LED电压扫描
 - 实时图像显示
 - 数据存储



树莓派慢控界面



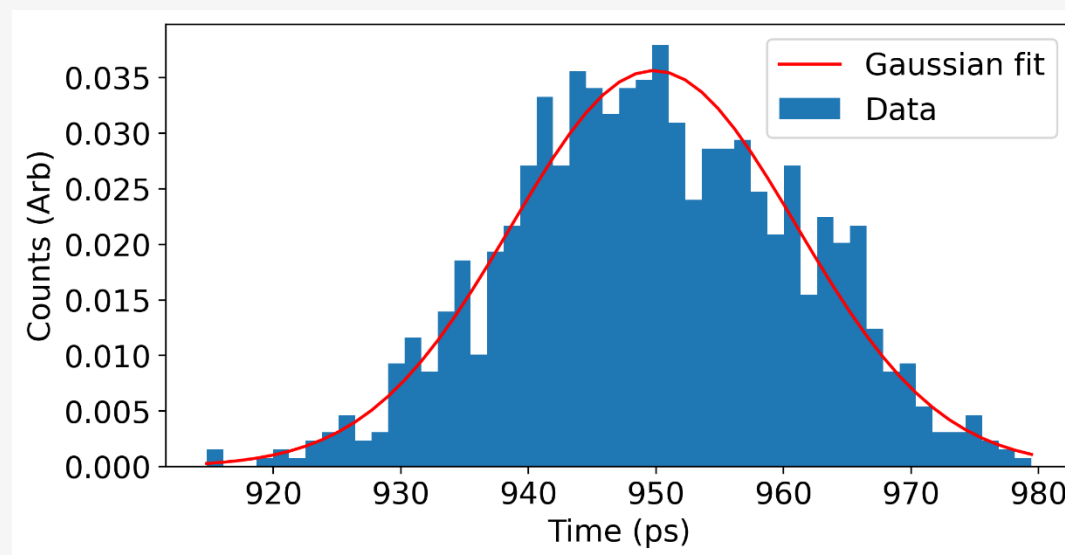
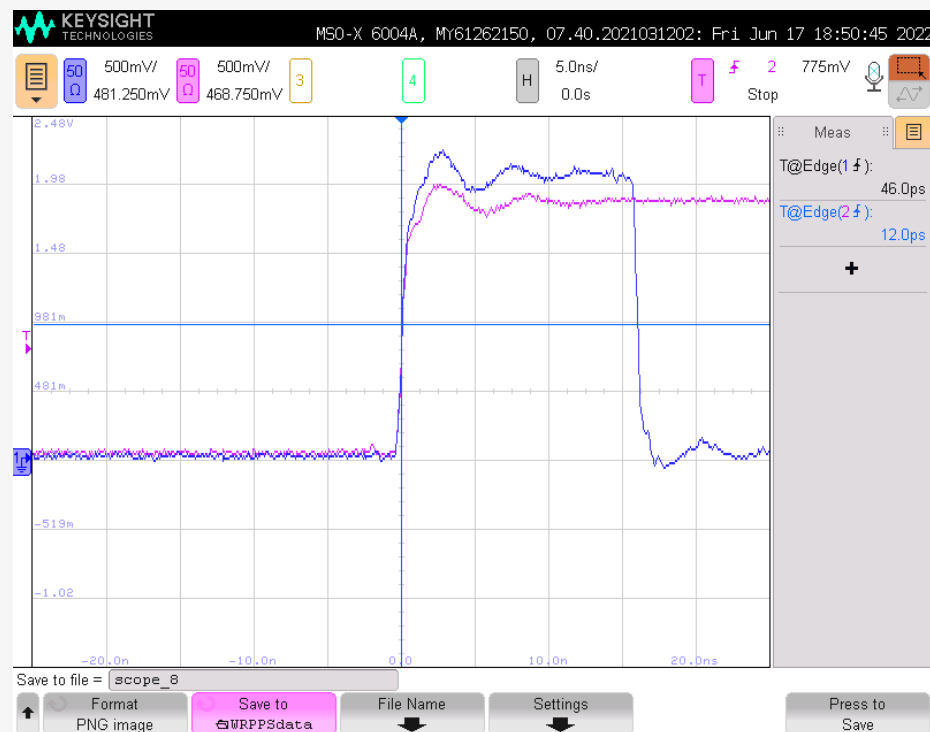
实时图像显示



白兔子时钟系统测试

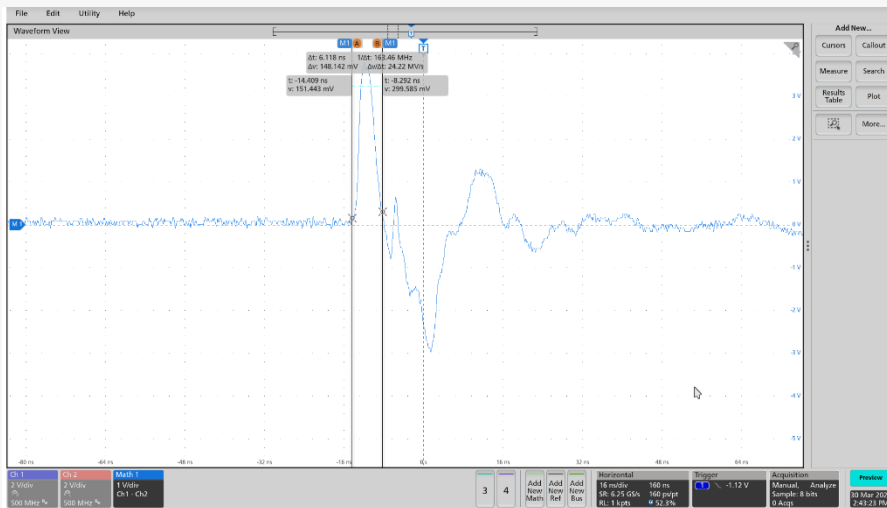
船上主缆的光纤，DAQ段光纤和水下探测单元光纤分开标定

实现亚纳秒系统时钟同步，PPS偏移的RMS为11ps

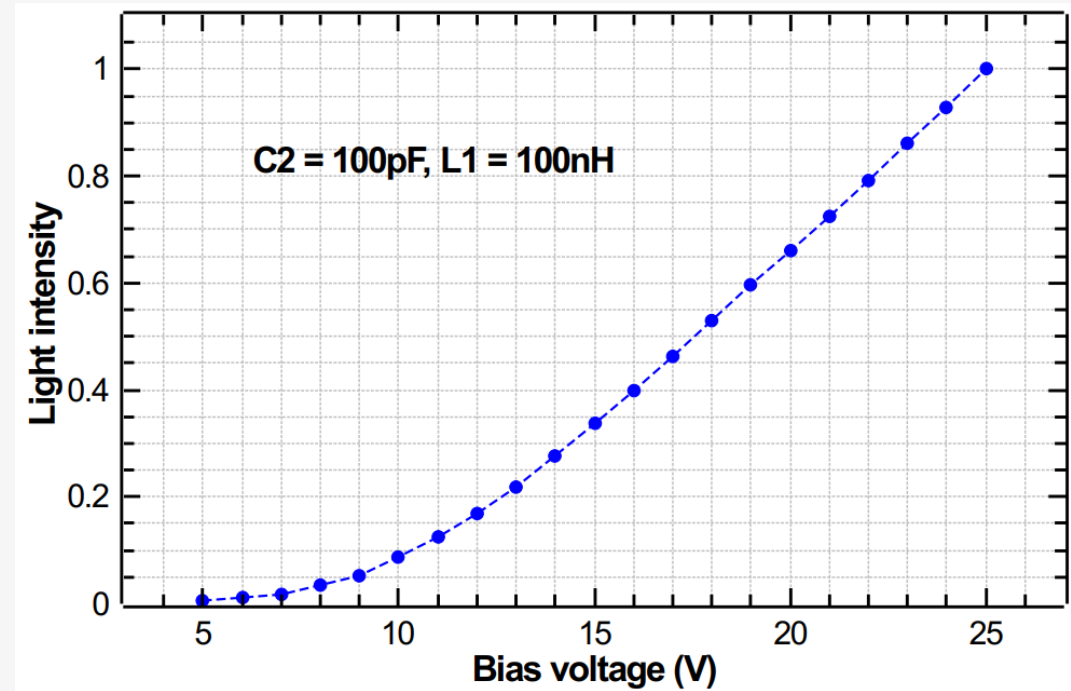




三种波长恒定发光



脉冲LED驱动电路实际输出波形

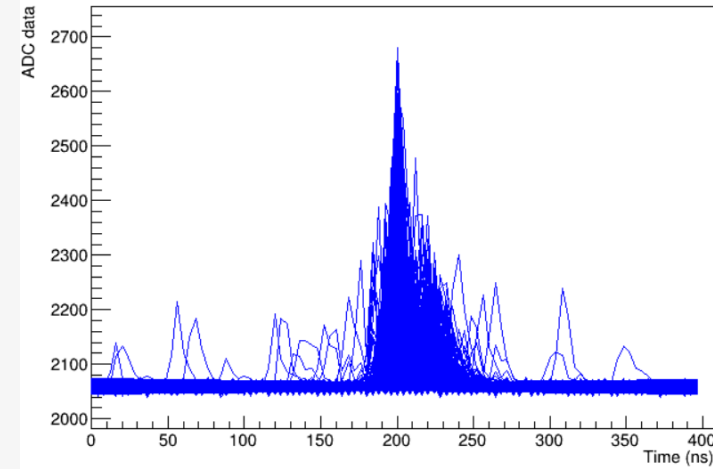
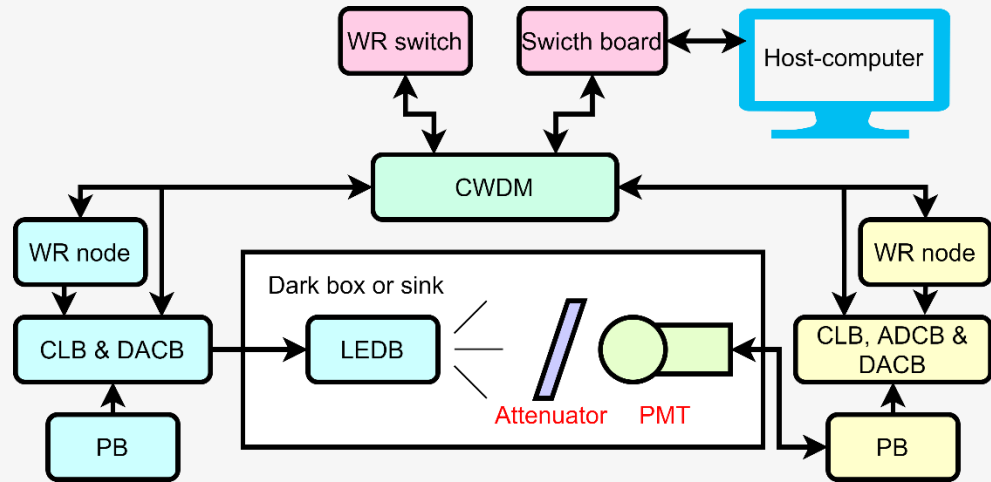


SiPM标定脉冲LED发光强度与偏置电压的关系

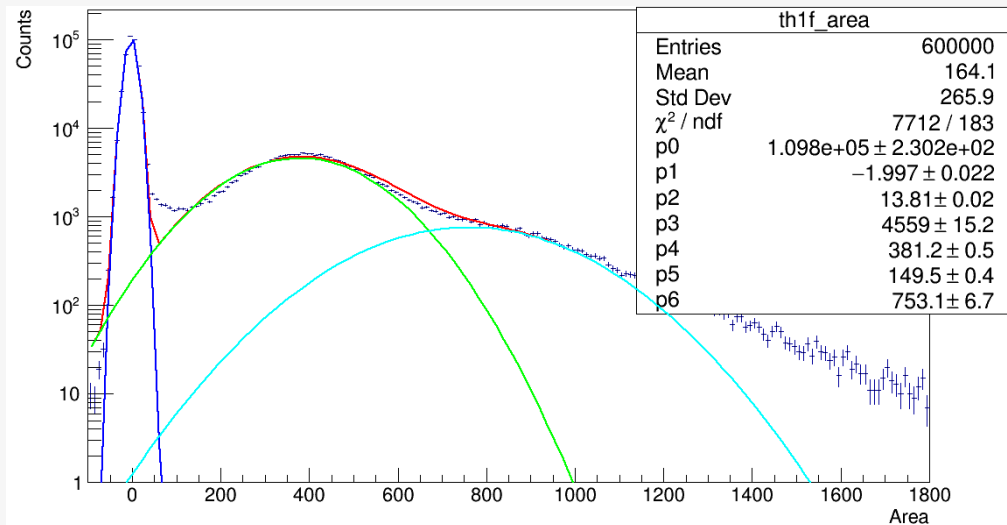
PMT系统联调测试



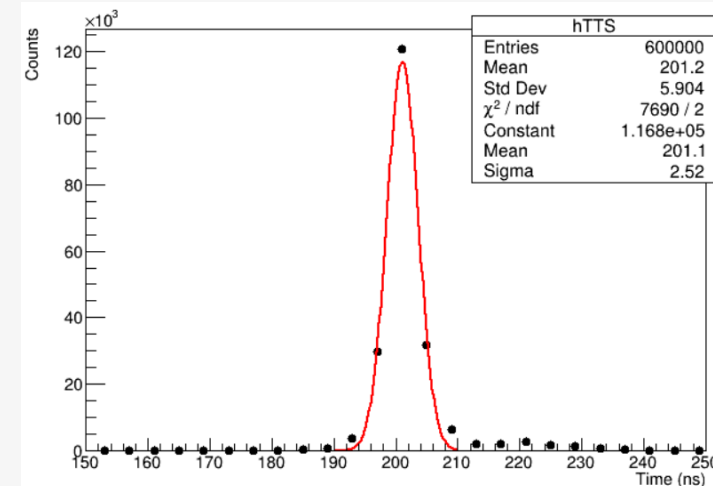
上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



PMT波形



测量PMT增益



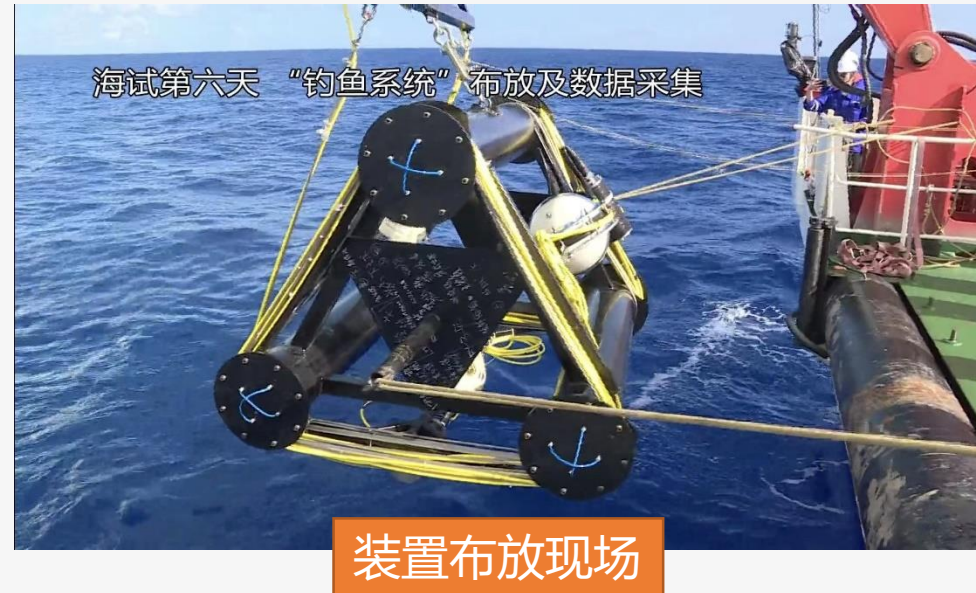
测量PMT TTS



海试 2021.9



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

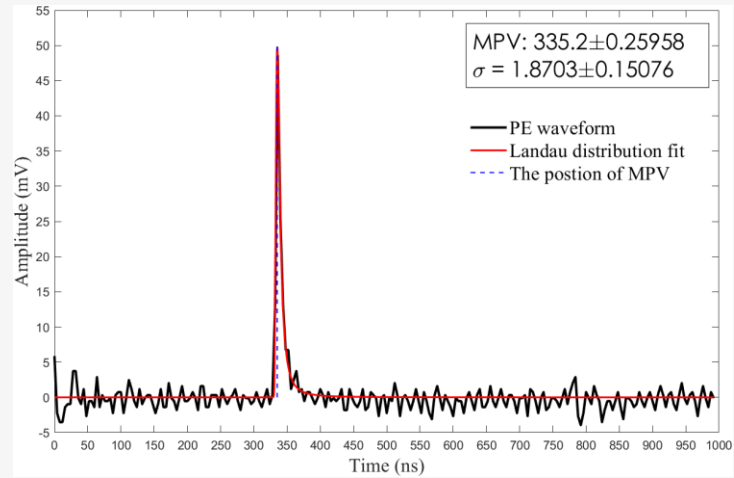


探测装置于2021年9月在中国南海成功释放，顺利完成实验取数后成功回收

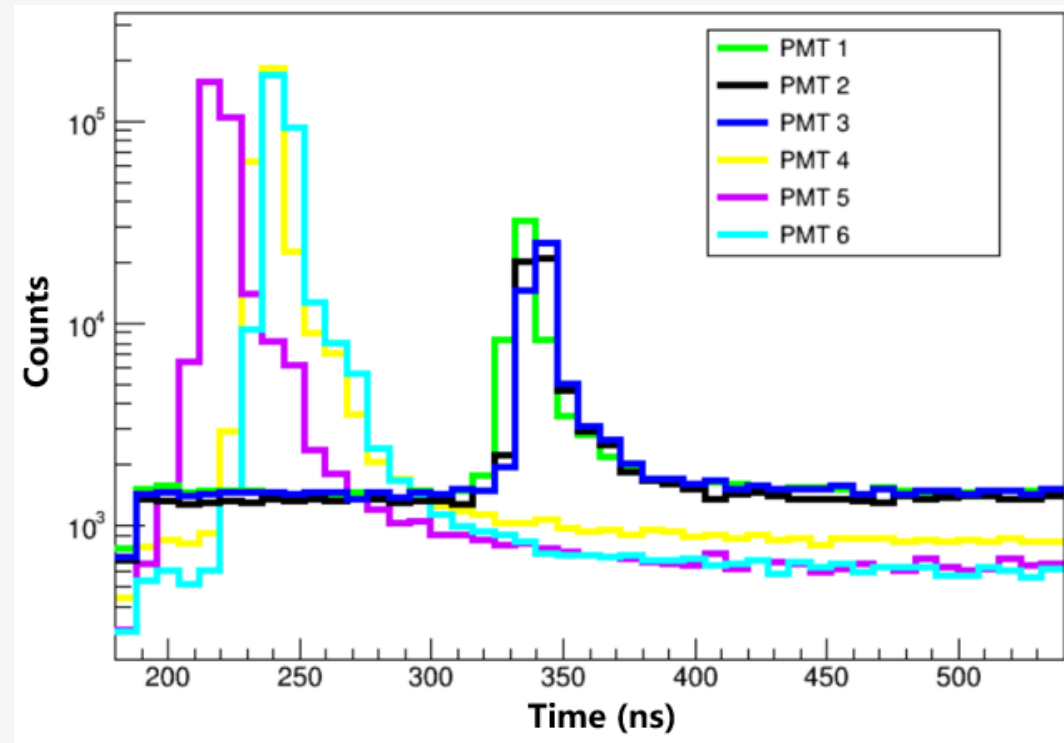
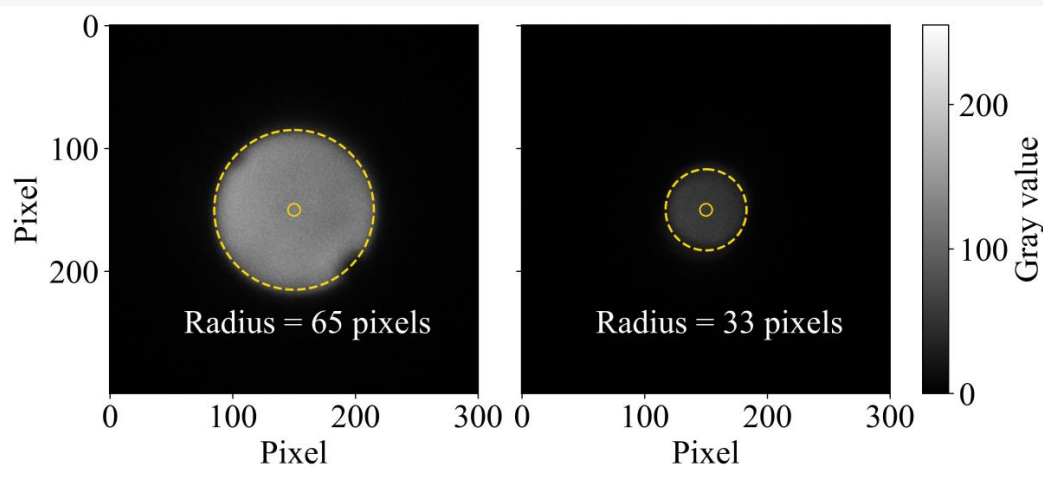
海试 2021.9



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



PMT波形



测量LED发光和PMT接收的时间间隔



总结



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

- ① 海铃探路者实验于2021年9月在选定海域顺利实现
- ② 海铃探路者电子学读出系统满足实验需求，成功完成对深海海水性质的测量
 - PMT系统和相机系统独立测量海水的光学性质
 - PMT系统测量深海环境的放射性
 - 获取约1TB实验数据作离线分析





上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

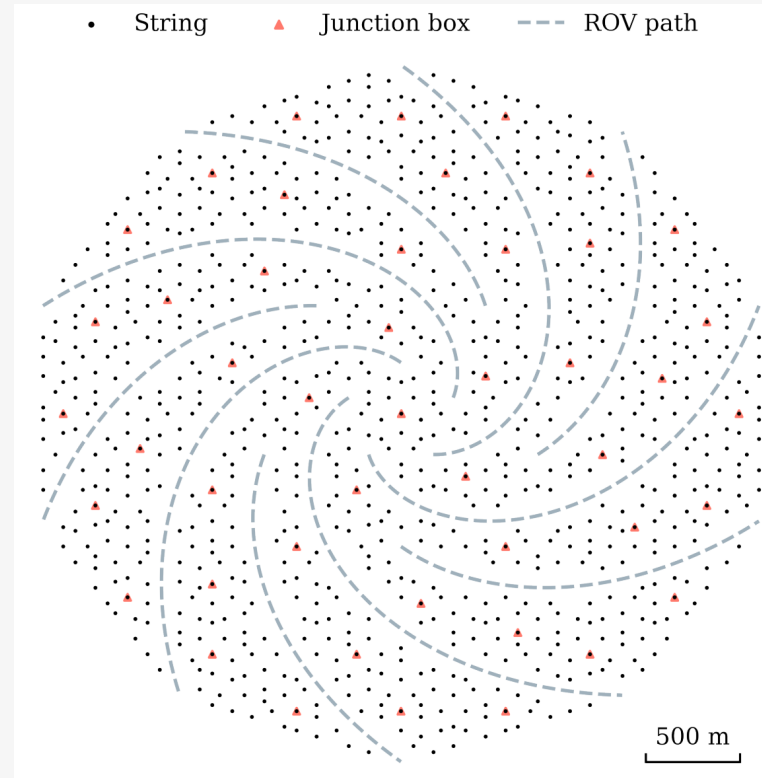
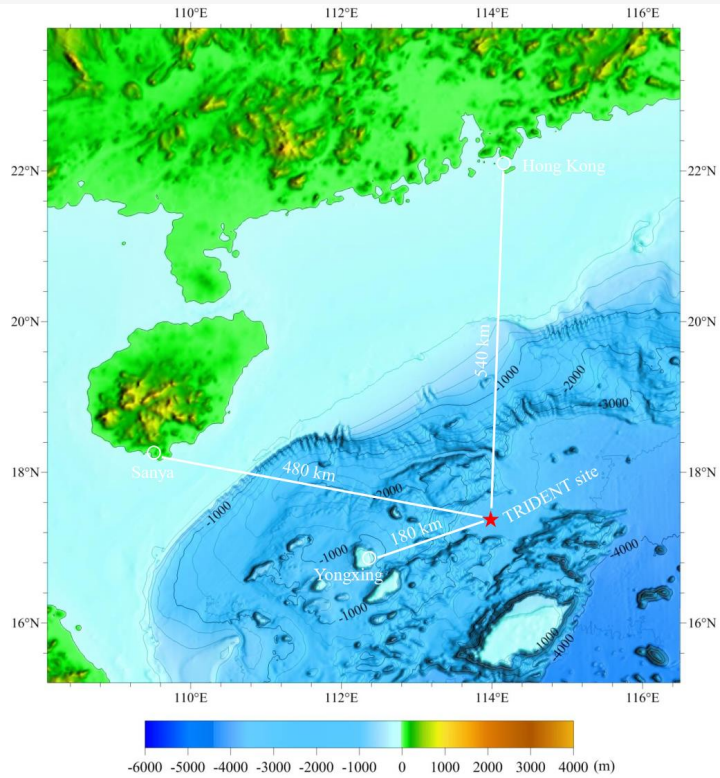
谢谢



backup

海铃计划 TRIDENT

主要科学目标：通过探测切伦科夫光对高能天文中微子溯源



搭载PMT和SiPM的数字光学模组

Z. P. Ye, et al., TRIDENT Collaboration, arXiv:2207.04519

Fan Hu, et al., PoS(ICRC2021)1043 (2021)