CETC 中国电科

毫米波云雷达和微波辐射计联合探测应用

曹俊武 蒋秋菲 卞真稳 陈晓辉 汪旭东 苏 涛

安徽四创电子股份有限公司

二〇二一年一月

研究背景

探测性能分析

联合探测应用

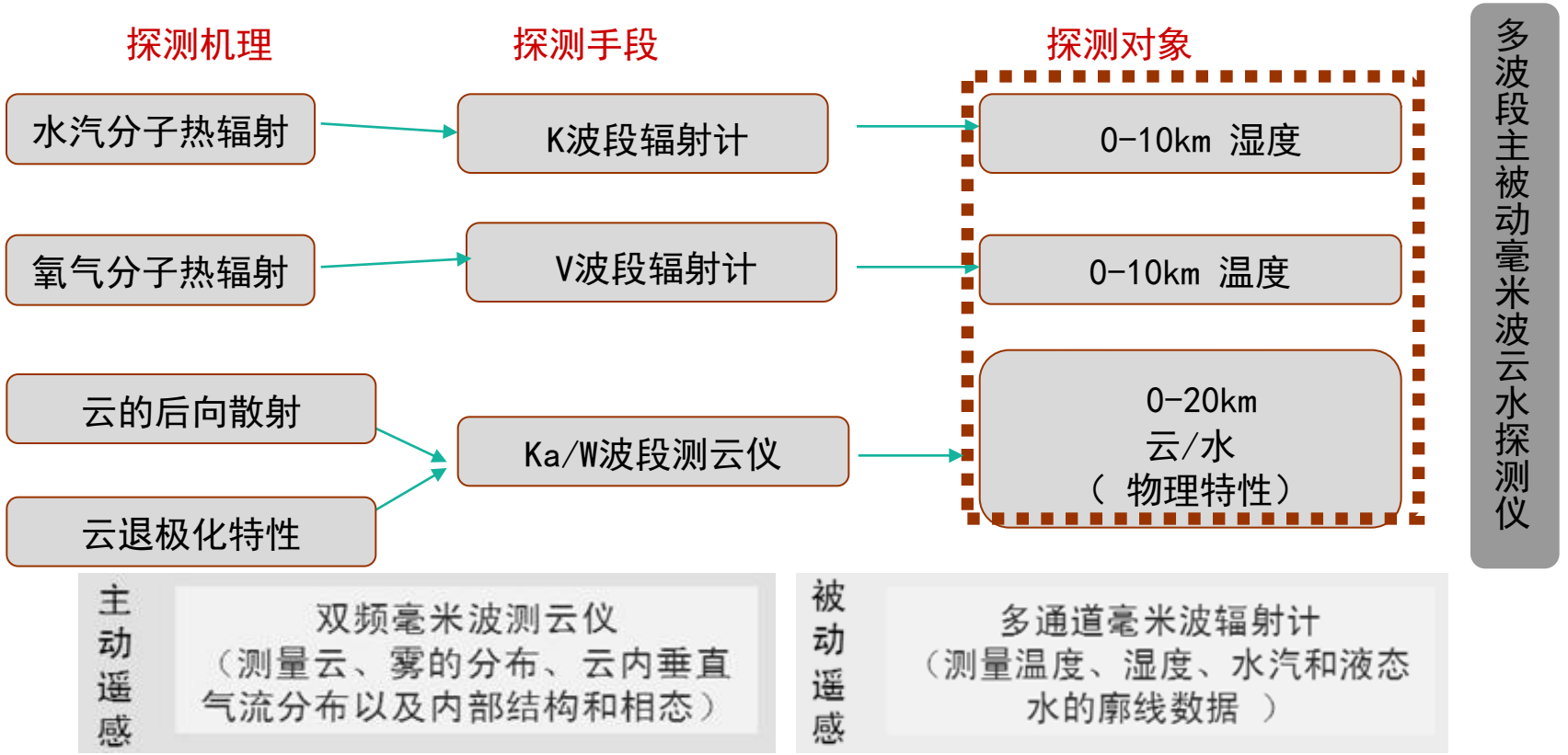
多波段、主被动云水探测仪（2014年国家重大科学仪器设备开发专项）

多仪器、多波长、主被动综合观测和反演

主动与被动遥感的充分结合、相互补充与约束







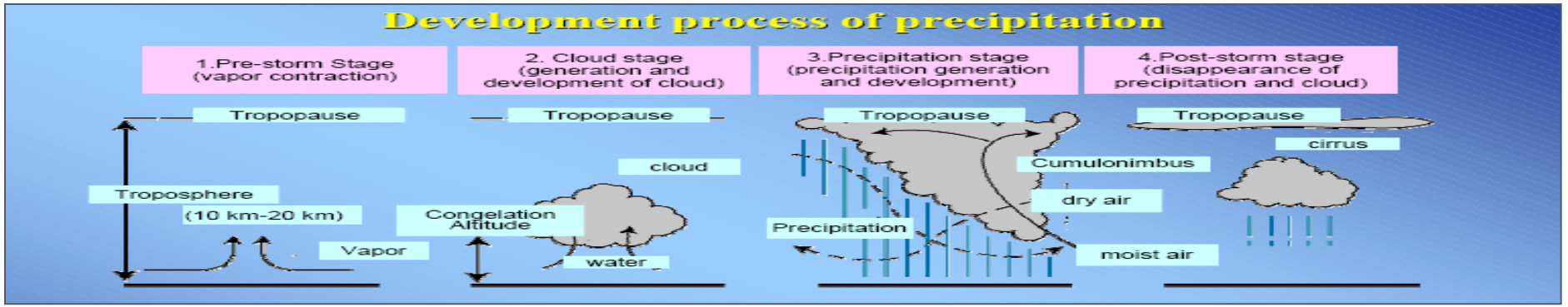
主动遥感：双频毫米波测云仪（测量云、雾的分布、云内垂直气流分布以及内部结构和相态）

被动遥感：多通道毫米波辐射计（测量温度、湿度、水汽和液态水的廓线数据 ）

- 测云仪采用双频共面天线，设备紧凑，测量一致性好；
- 国内（外）首部主被动毫米波云水探测仪。

科学意义

- 完整降水过程：水汽凝结和聚集→云的形成→降水→云的消散；
- 当前技术水平：对降水探测采用天气雷达，技术成熟；对水汽聚合到云的过程的探测缺乏有效手段。



晴空探测　云水探测　降水探测　云水探测

3mm（W波段）　可用于观测直径小于350μm的粒子，即观测卷云

8mm（Ka波段）　可用于观测直径小于800μm的粒子，即观测非降水云、毛毛雨以及弱降水云系

设备不仅可以对云和降水的形成发展和状态分布提供长期有效的观测，

还能对其内部结构和相态分布提供连续有效的数据，弥补常规探空的不足；

试验案例（Ka和W）



双频毫米波测云雷达	
工作频率：	Ka波段（35GHz） W波段（94GHz）
天线型式：	卡式双频共面天线
天线口径：	1.5m
天线增益：	Ka≥51dB,W≥58dB
波瓣宽度：	Ka≤0.45°,W≤0.2°
副瓣电平：	Ka≤-23dB,W≤-20dB
发射峰值功率：	Ka≥3kW ， W≥1.5kW
接收机噪声系数：	Ka≤4.5dB,W≤5dB
输出产品：	强度、径向速度、谱宽、线性退极化比、强度差、速度差

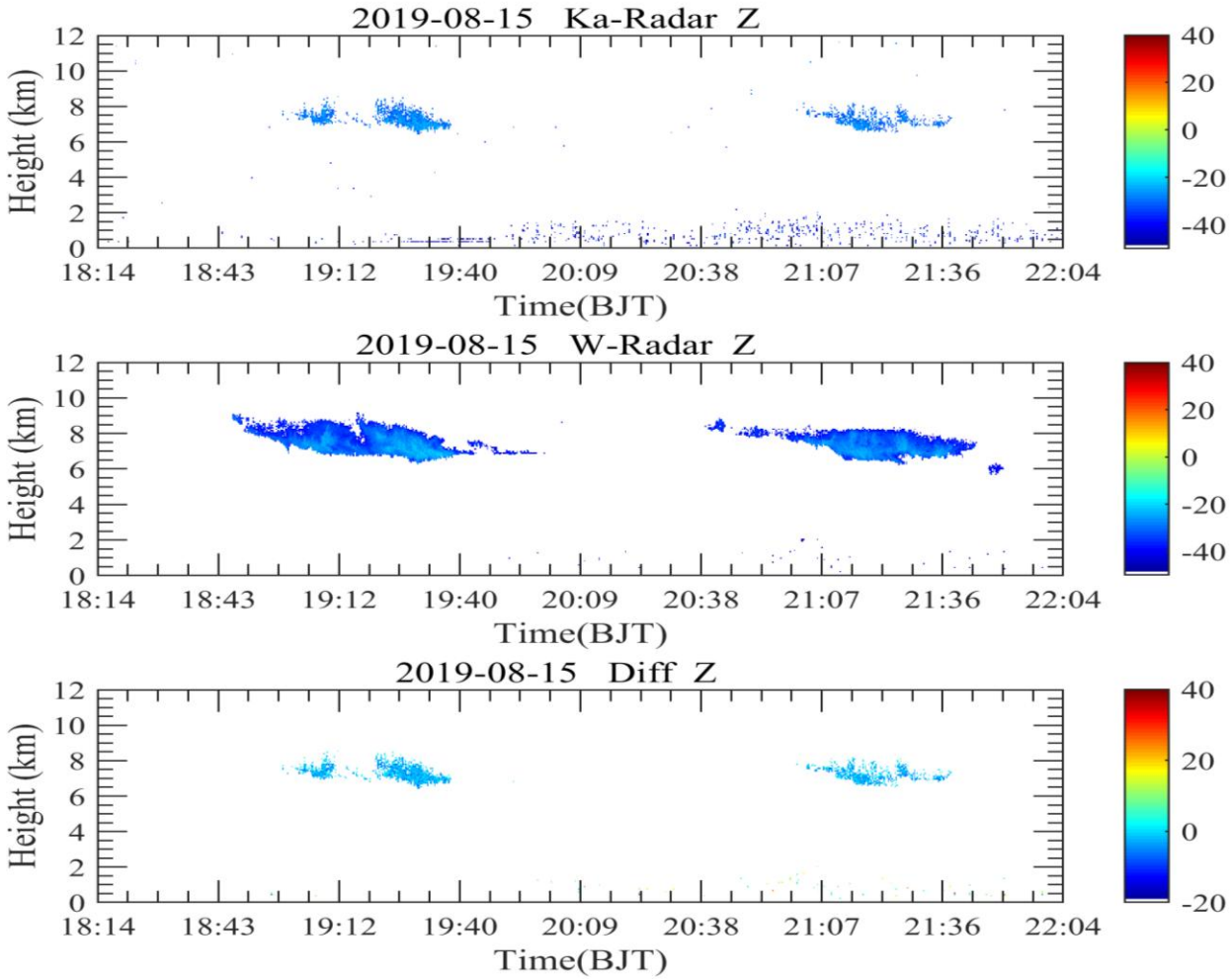


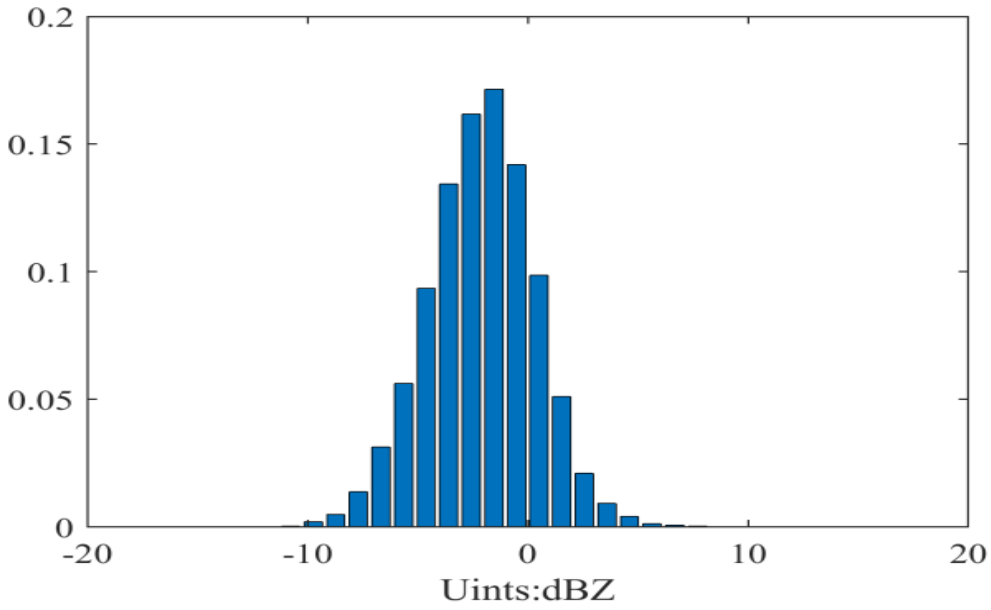
2019年8月，西藏羊八井宇宙线观测站（海拔4300m）
“青藏高原大气多要素垂直结构的高分辨率综合探测及对大气层上下层相互作用的重要机制研究”

2018年3月，广东龙门国家气象观测站
“2018年华南季风/台风强降水协同观测试验”

探测数据分析（Ka和W）

高云回波数据分析

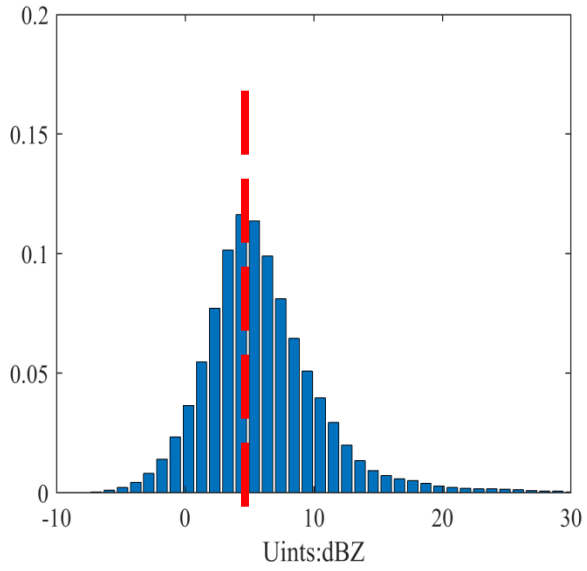


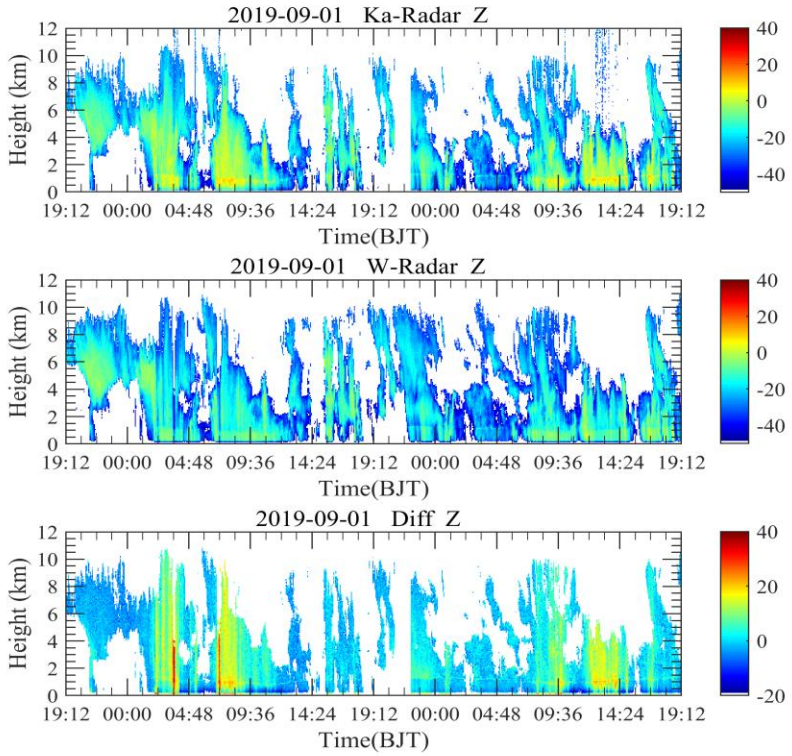


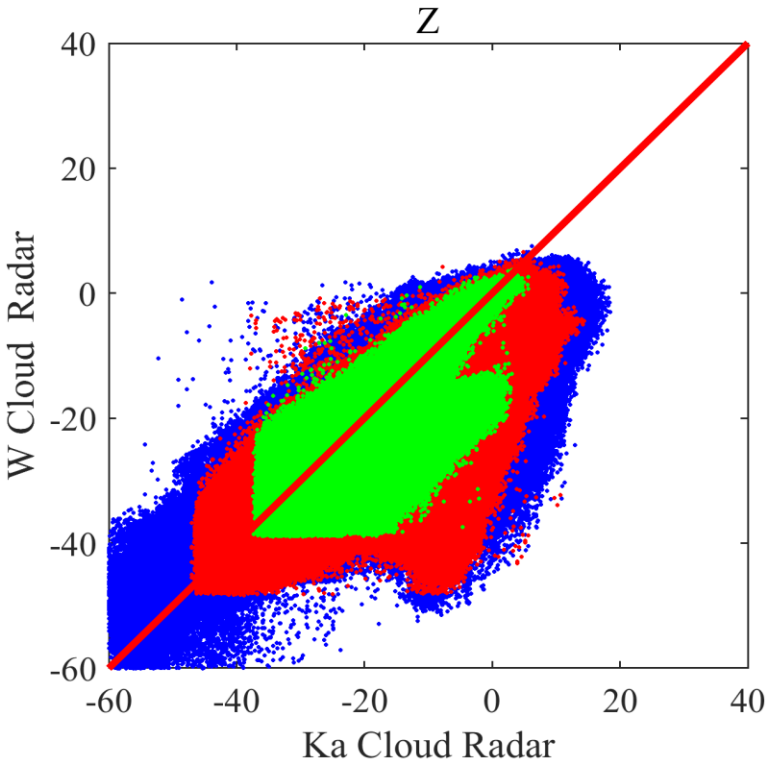
Ka和W波段反射率差的概率分布

探测数据分析（Ka和W）

混合型多次降水过程







- 双波长测云雷达（Ka和W）探测云的整体结构非常一致，灵敏度高
- 6km以上高层冰相云，W波段因灵敏度比Ka波段的灵敏度高，存在一些反射率低于-32dBZ的弱云，W波段能够探测到，而Ka波段探测不到
- 在非降雨时，两频段的反射率差值的峰值在0dB左右；在降雨时，由于衰减不同，两频段的反射率差值的峰值在5dB左右，最大可达到30dB左右，后期可以利用双频雷达衰减特性进行微物理参数反演

试验案例（微波辐射计）



**积冰云探测试验现场（遵义）



**积冰云探测试验现场（当阳）



**六合场站试验现场



国庆70周年阅兵保障现场

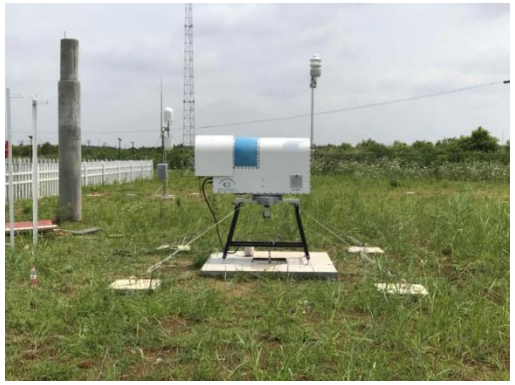




宿州市气象局大城市观测试验　安庆市国家基本气象观测站



云南丽江泸沽湖机场数据采集现场

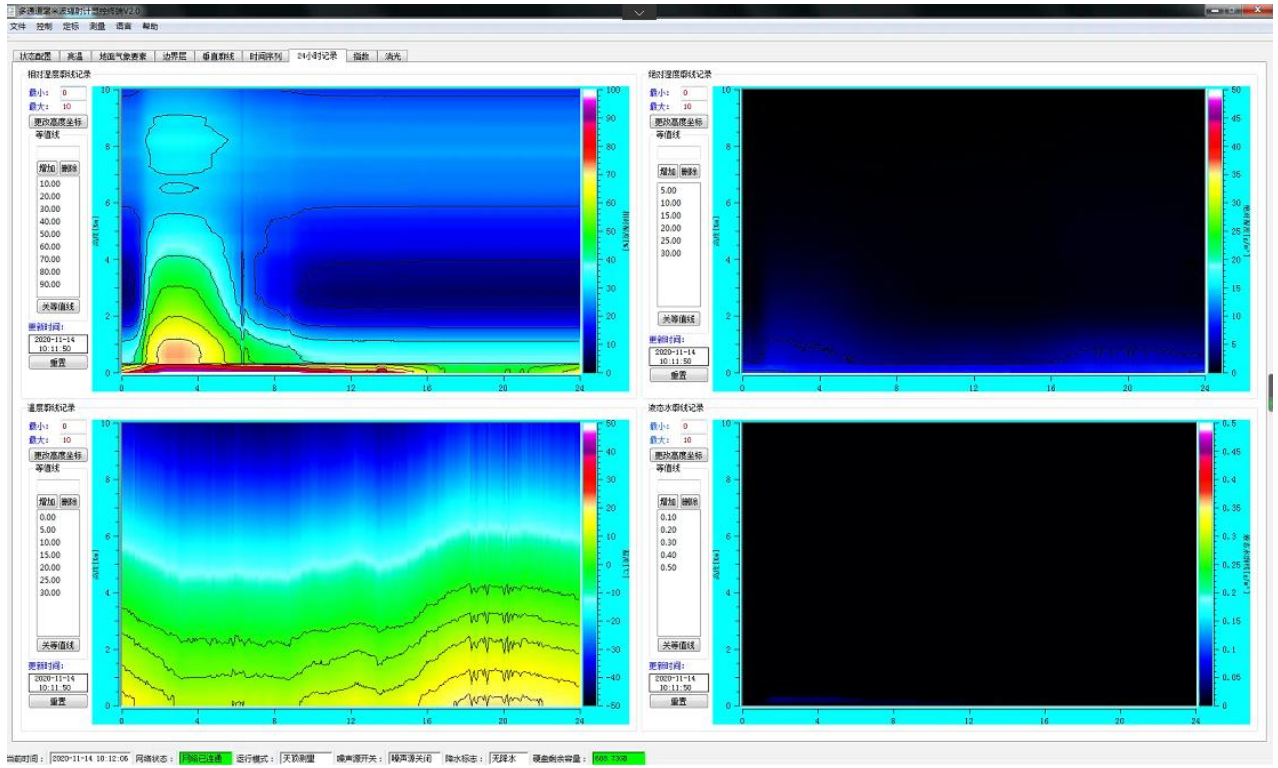


合肥市气象局人工增雨改善空气质量现场（合肥市气象局）



合肥市气象灾害监测预警现场（巢湖市气象局）

典型观测结果（大雾）



2020年11月14日10时合肥微波辐射计观测的一次大雾过程

刘建忠等分析了雾期间边界层物理场时空分布特征，发现雾生成前后低层湿度大，中高层湿度低，空气干燥有利于地面长波辐射，而过程中后期雾的维持主要与边界层的湿度增加有关系；雾刚生成并没有液态水，过1 h 后就开始出现液态水，随后向下和向上扩展。

娄淑娟等观测表明，雾顶上下的水汽密度突变，雾顶以上没有液态水，水汽密度向上递减，雾顶以下有液态水存在。水汽大，接近饱和。

如何利用微波辐射计做好大雾的监测和预警工作？

探测精度分析

数据来源

SC-HTP1微波辐射计（安庆、合肥、巢湖）：

- 高度层：201层
- 高度分辨率：50m
- 时间分辨率：1秒

L波段探空仪（安庆）：

包括02:00、08:00、14:00、20：00的探测数据

分析方法：时间点与空间点一一对应的分析方法

- 提取微波辐射计所在站点垂直高度上201层的高度为参照高度。
- 提取探空气球升空后最接近参照高度的201个探空高度，该高度上的时间作为201个探空参照时间；
- 提取微波辐射计最接近201个探空参照时间的观测时间，提取相应高度上的微波辐射计数据。

探空数据与微波辐射计数据在时间与高度上的一致性

探测精度分析

湿度观测值比较（合肥）

日期	观测时间	均方根误差（%）	相关系数
2020.1.23	3:00-3:30	22.98	0.5316
2020.1.25	2:00-2:30	24.09	0.4223
2020.2.10	2:00-2:40	23.59	0.4038
2020.2.19	2:00-2:41	27.75	0.4690
2020.2.24	2:00-2:33	17.78	0.7222
平 均		22.26	0.5275

温度观测值比较（合肥）

日期	观测时间	均方根误差（°C）	相关系数
2020.1.23	3:00-3:30	4.55	0.9954
2020.1.25	2:00-2:30	1.62	0.9949
2020.2.10	2:00-2:40	1.82	0.9975
2020.2.19	2:00-2:41	2.64	0.9952
2020.2.24	2:00-2:33	3.64	0.9964
平 均		2.854	0.996

设备与国际上同类设备的探测效果相当

MP-3000A型地基微波辐射计与邻近三站探空的比较表明，温度和相对湿度的均方根偏差大约分别为3.2℃和29%，相关系数分别在0.98以上和0.5左右。。。。。。

韩珏靖等：《MP-3000A型地基微波辐射计的资料质量评估和探测特征分析》，气象，Vol(41)，No(2)

均方根差 $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}$

相关系数 $R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}}$

1）辐射计与探空均具有较好的一致性和相关性。MWR-G 及 MWR-C 晴空温度平均误差不超过±1℃，前者以负偏差为主，后者以正偏差为主，MWR-A 偏差较大为－1.8℃。3 台辐射计温度均方根误差随高度递增，MWR-G，MWR-A 与 MWR-C 的均方根误差分别为 2.2℃，3.0℃和 3.8℃。云天条件下，3 台辐射计的平均误差廓线与晴空条件下表现相似，均方根误差较晴空增加约 0.5℃。

2）相对于温度，相对湿度的误差整体偏大。辐射计相对湿度多数为正偏差，且呈现在晴天条件下较小，云天条件下较大。晴空条件下 MWR-A 及 MWR-C 平均误差在±10%以内，低于 MWR-G。MWR-G，MWR-A 和 MWR-C 辐射计均方根误差分别为 25%，15%和 18%左右。在有云条件下，3 台辐射计均方根误差均超过 25%，云的存在较大程度上影响到辐射计相对湿度的观测。

王志诚、张雪芬等：《不同天气条件下地基微波辐射计探测性能比对》，应用气象学报，Vol(29)，No(3)

数据观测特性分析（与探空资料对比）

- 通过国内外相关文献分析，设备与国际上同类设备的探测效果相当；
- 通过对微波辐射计与常规气象探空获取的数据比对，温度的探测结果具有较高的可靠性和准确性；
- 相对湿度廓线则具有一定的不确定性；

  由于常规探空在相对湿度探测方面也存在一些误差，对两者差别原因的分析有一些难度。
- 运行正常、稳定、可靠；
- 微波辐射计温湿探测的准确性受多方面因素影响，硬件工艺、反演算法和天气条件等是影响辐射计探测性能的主要原因。

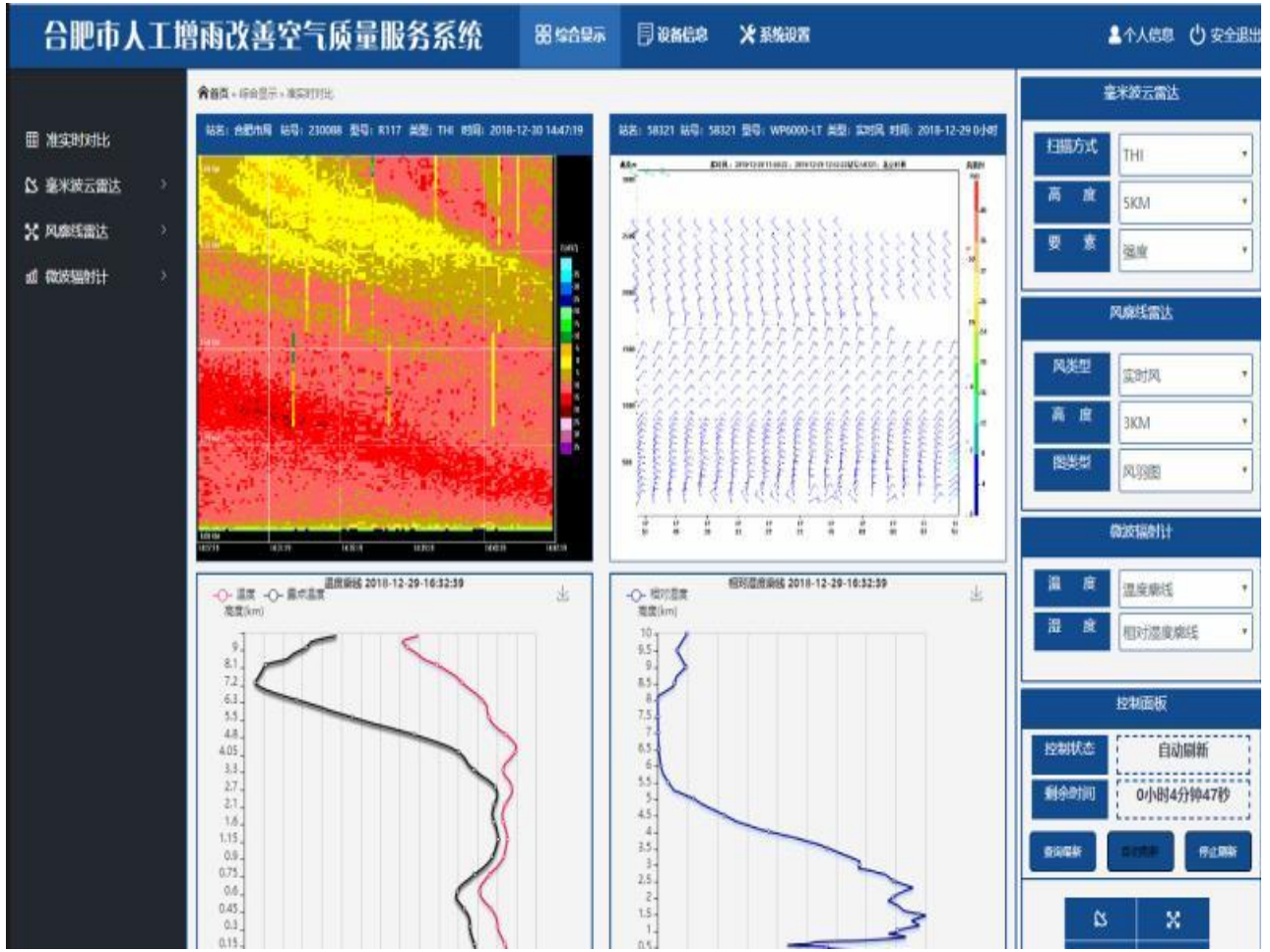
试验案例（合肥市人工增雨改善空气质量服务系统）



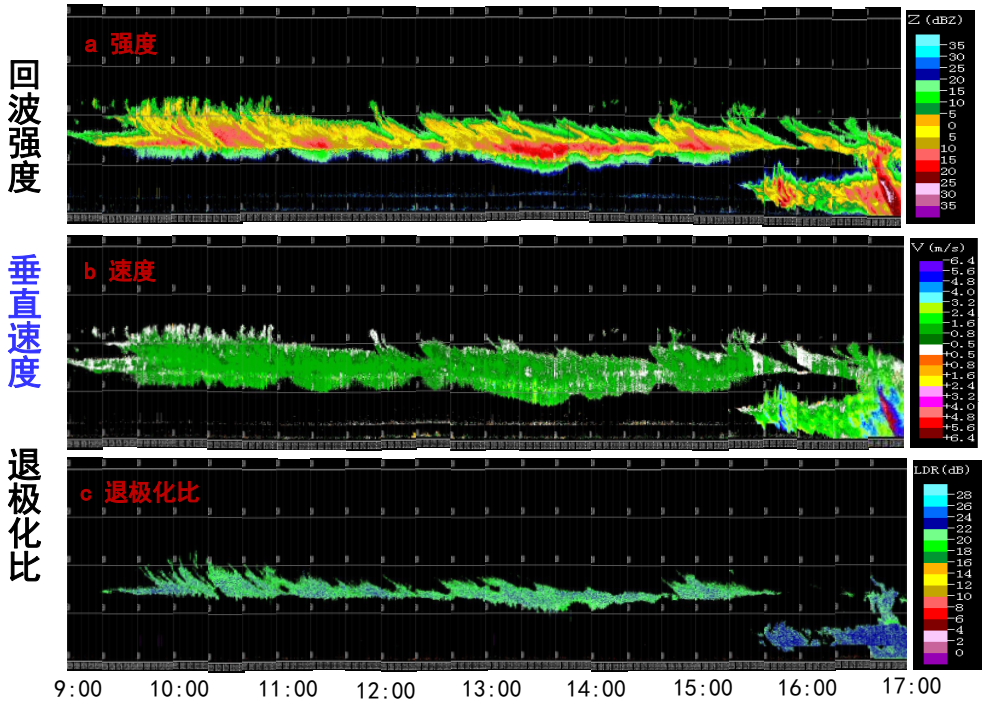


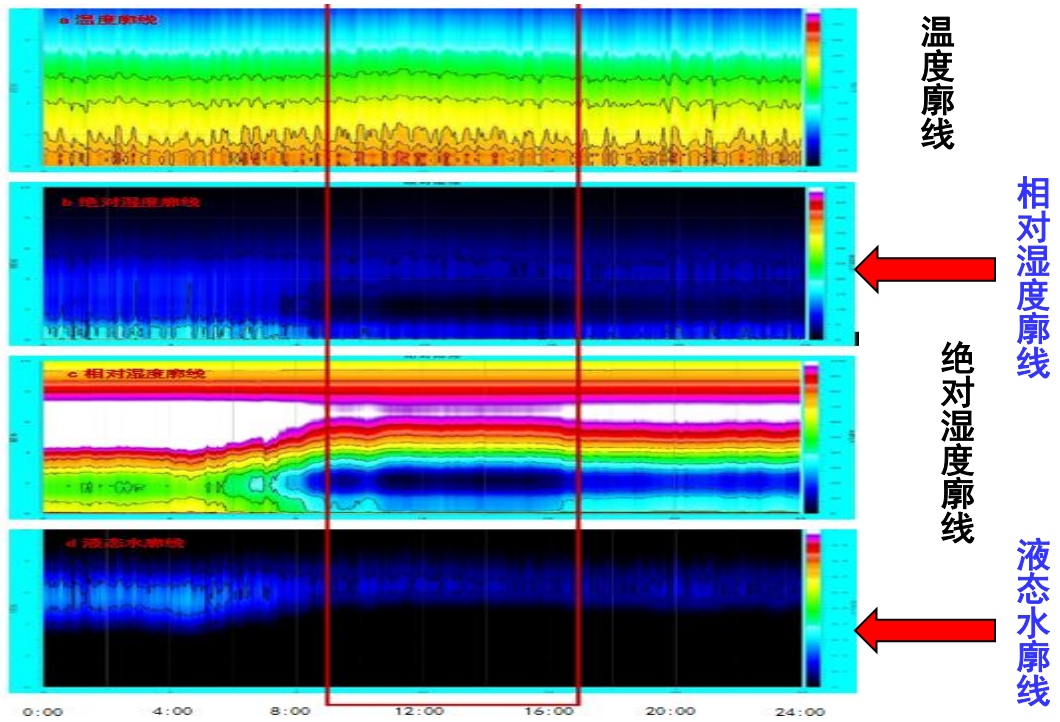


观测设备	测量要素
毫米波雷达	云水信息
风廓线雷达	垂直、水平风场
微波辐射计	温度、湿度廓线
自动站	地表风、温、湿、压
综合软件系统	采集、处理、存储、检索、发布



辐射计和云雷达的联合探测分析



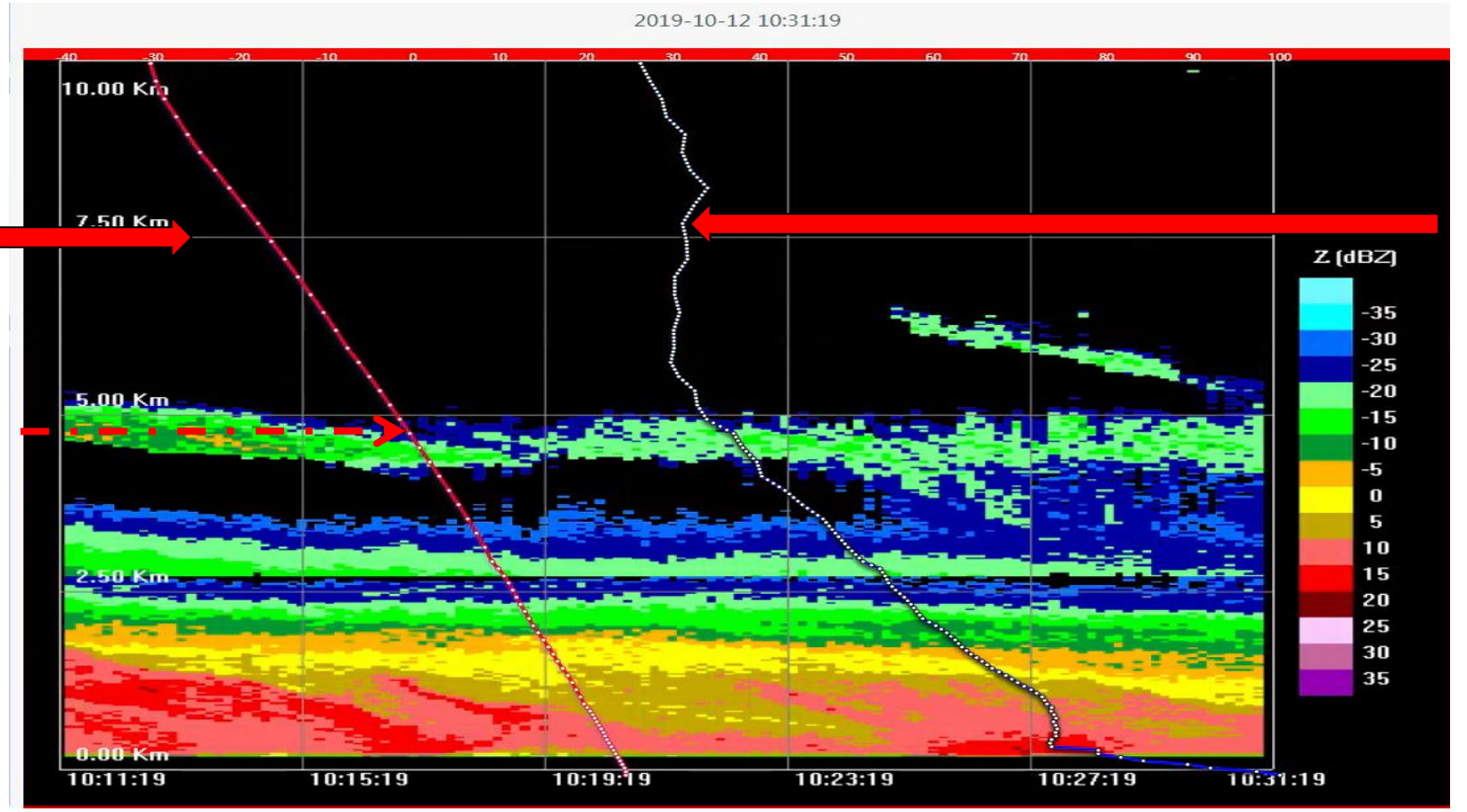


毫米波云雷达（左）与微波辐射计（右）联合探测结果比较（2019年8月31日09:00至17:00，合肥）

辐射计和云雷达的联合探测分析

温度线

零度层对应的高度



湿度线

微波辐射计与的毫米波云雷达融合显示（辐射计显示的对应时间为10:27）

- 微波辐射计零度层温度与云雷达测得的零度层亮带较为接近，偏差较小；
- 微波辐射计相对湿度与实际情况相差较大，在有降水的强回波区，RH相对偏小。

试验案例（积冰云探测）



积冰对飞行影响

- 机翼和尾翼的积冰：使飞机重量增加，改变表面流型，影响稳定性和操纵性，严重时可导致飞行事故。
- 螺 旋 桨 积 冰：使流过桨叶的气流变得紊乱，拉力减小，甚至可能造成失速。
- 空速管和静压孔积冰：使空速表和气压表及升降速度表等重要仪表的指示失真，甚至完全失效。
- 天线和风挡玻璃积冰：严重时影响飞行员与指挥员之间的联络和目视飞行。
- 发 动 机 积 冰：可改变空气动力特性，危及飞行安全。

试验案例（积冰云探测）

$$I_c=2\times(Rh-50)\times[T\times(T+14)/(-49)]/10$$

其中，Rh 为相对湿度，T 为温度。表 1 给出了积冰强度与 Ic 的对应关系。

I_c 值	积冰强度
$I_c<0$	无积冰
$0\leqslant I_c<5$	轻度积冰
$5\leqslant I_c<8$	中度积冰
$I_c\geqslant 8$	重度积冰

判别指数法

假霜点判别法[5]除了考虑所在飞行高度上的温度和湿度条件外，也把飞机飞行速度考虑在内，就此给出了假霜点温度 T_{fi}，如式 1 所示。

$$T_{fi}=-0.05\left(\frac{V}{100}\right)^2(T-T_d) \quad (1)$$

有无积冰的判别条件为：

$$T_{fi}-T\leqslant -0.05\left(\frac{V}{100}\right)^2 \quad \text{无积冰}$$

$$T_{fi}-T>-0.05\left(\frac{V}{100}\right)^2 \quad \text{有积冰}$$

$$T_{fi}-T>0 \quad \text{中度以上积冰}$$

假霜点判别法

统计分析提出了判断有无积冰的标准[10]：当某一层次满足 $-8℃<T<0℃$，且 $T-Td\leqslant 2℃$ 时；或 $-16℃<T\leqslant -8℃$，且 $T-Td\leqslant 3℃$ 时；或 $-22℃<T\leqslant -16℃$，且 $T-Td\leqslant 4℃$ 时；则此层有积冰。

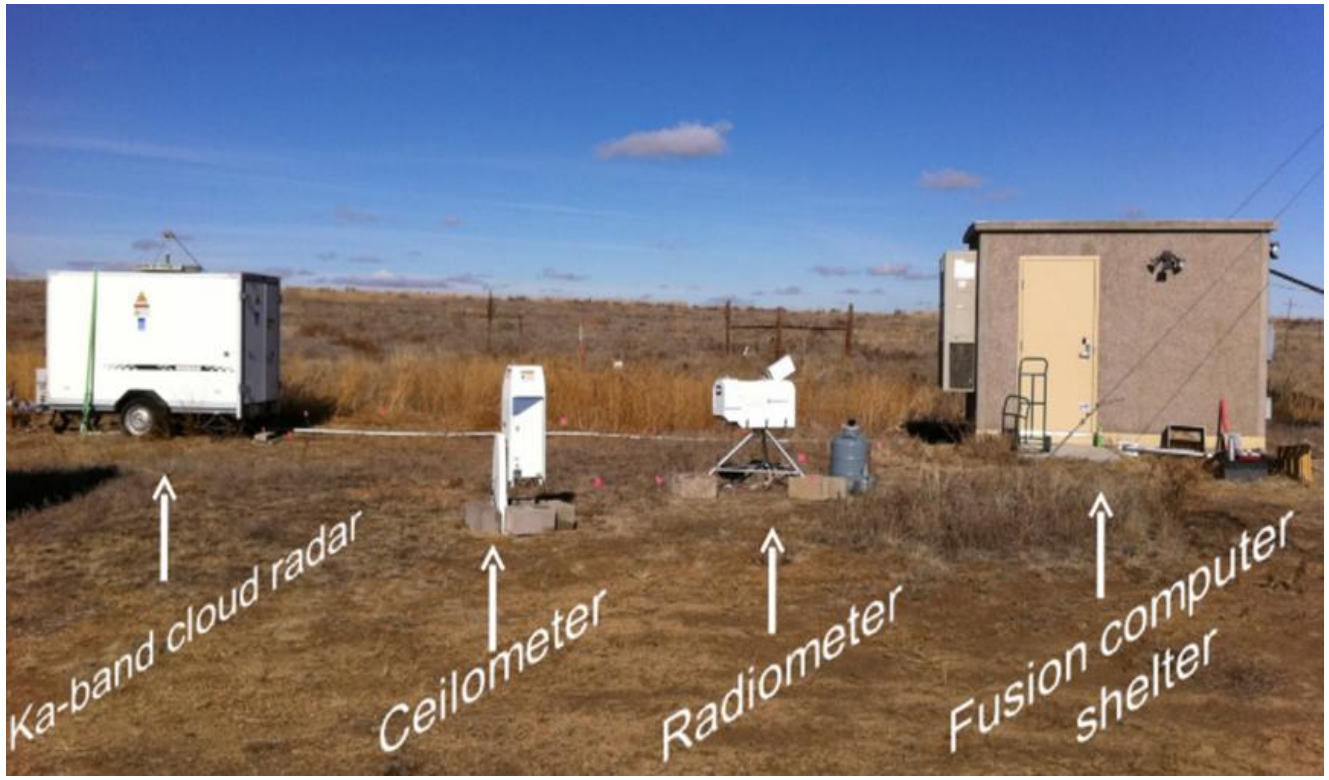
统计分析法

第35卷第5期 2017年9月 西安航空学院学报 Journal of Xi′an Aeronautical University Vol. 35 No. 5 Sep. 2017

一次飞机积冰过程分析及不同预报方法的准确性对比

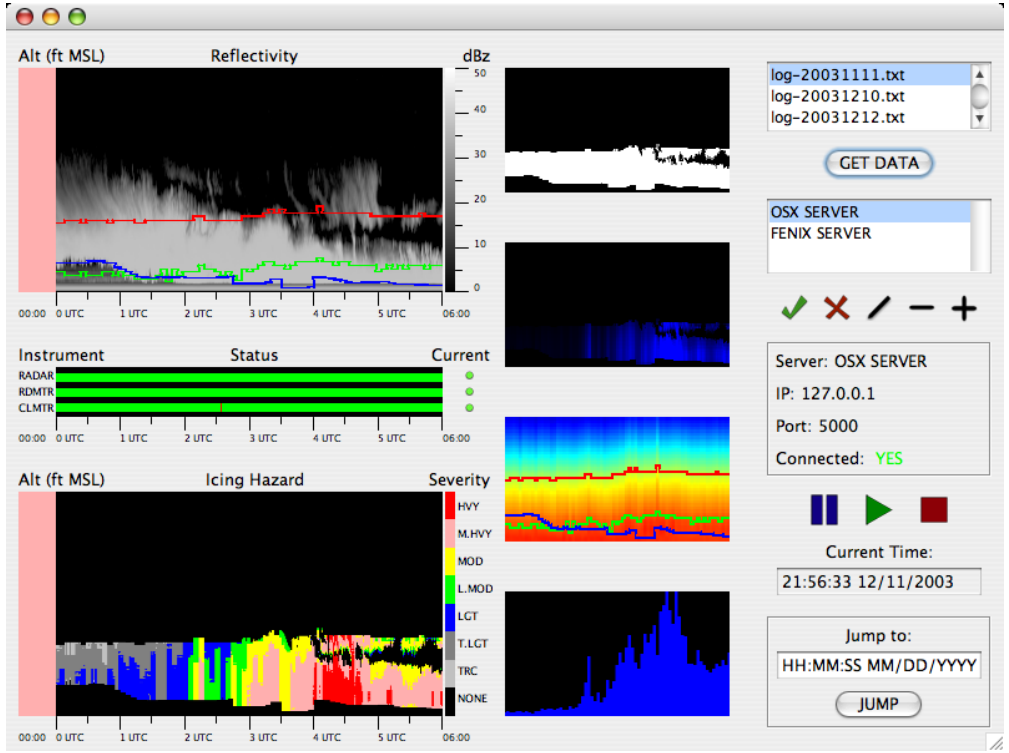
白 婷，张 凡

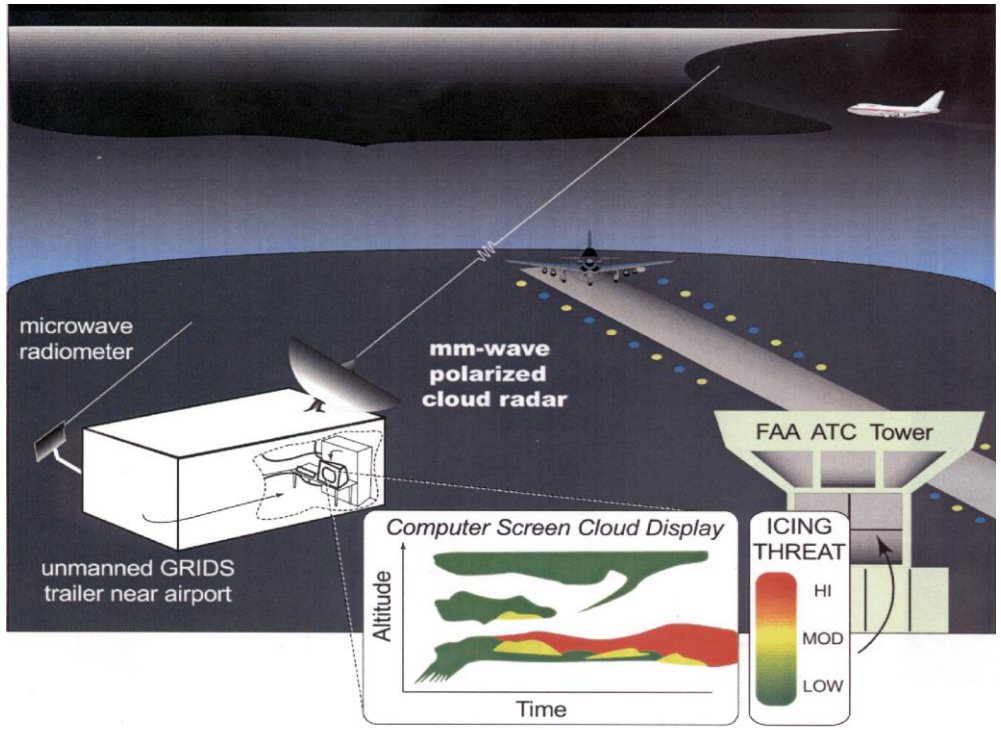
（2）结合 2015-2016 年作业期间记录的飞机积冰事例，对比三种不同算法的预报准确性发现，国际民航组织推荐的飞机积冰判别指数较好地反映了此次发生积冰的区域及强度，假霜点判别法预报程度偏重、分级不明显，而统计温度、温度露点差的经验公式预报效果最差。

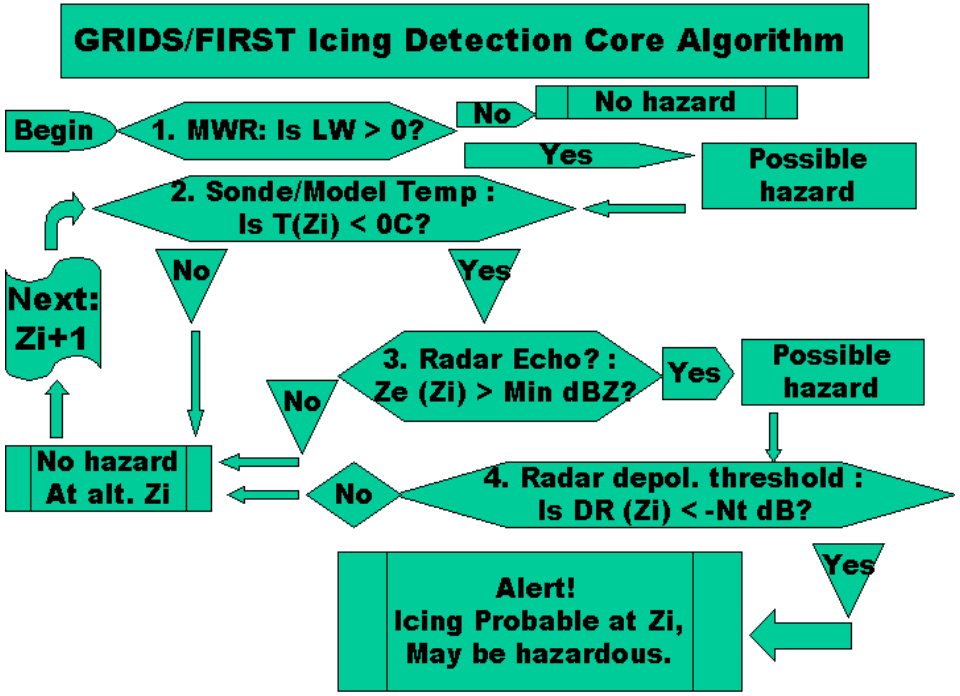


NASA的积冰遥感探测系统(NIRSS) 设备布局

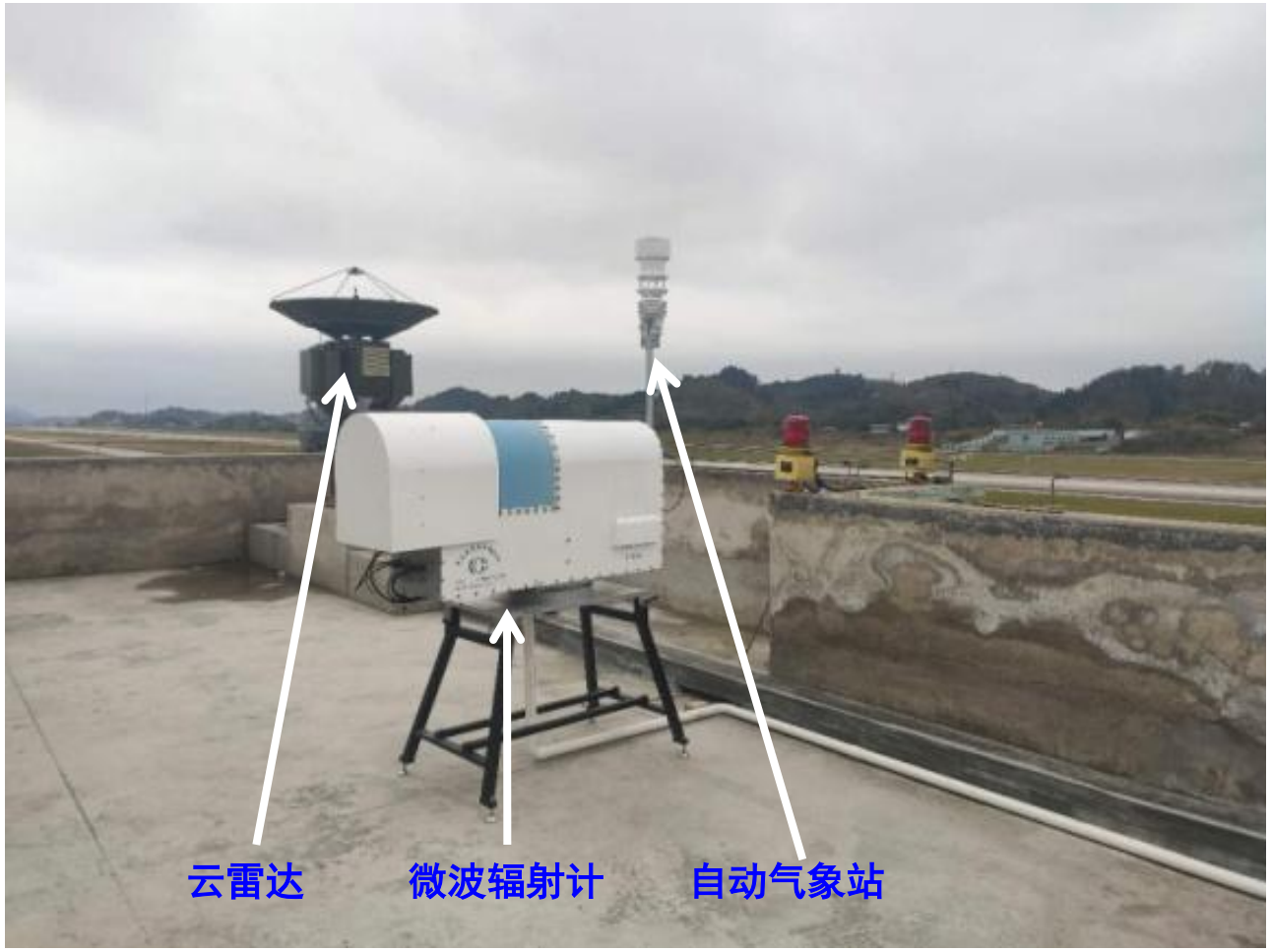
序号	设备	型号	制造公司
1	Ka波段云雷达	MIRA-36	Metek
2	微波辐射计	TP/WVP-3000	Radiometrics
3	扫描微波辐射计	NNMSR	Radiometrics
4	激光云高仪	CT25K	Vaisala







美国大气海洋管理局的环境技术实验室（NOAAETL）提出的地基遥感积冰监测系统（GRID）建设方案



2019年12月-2020年5月　某场站

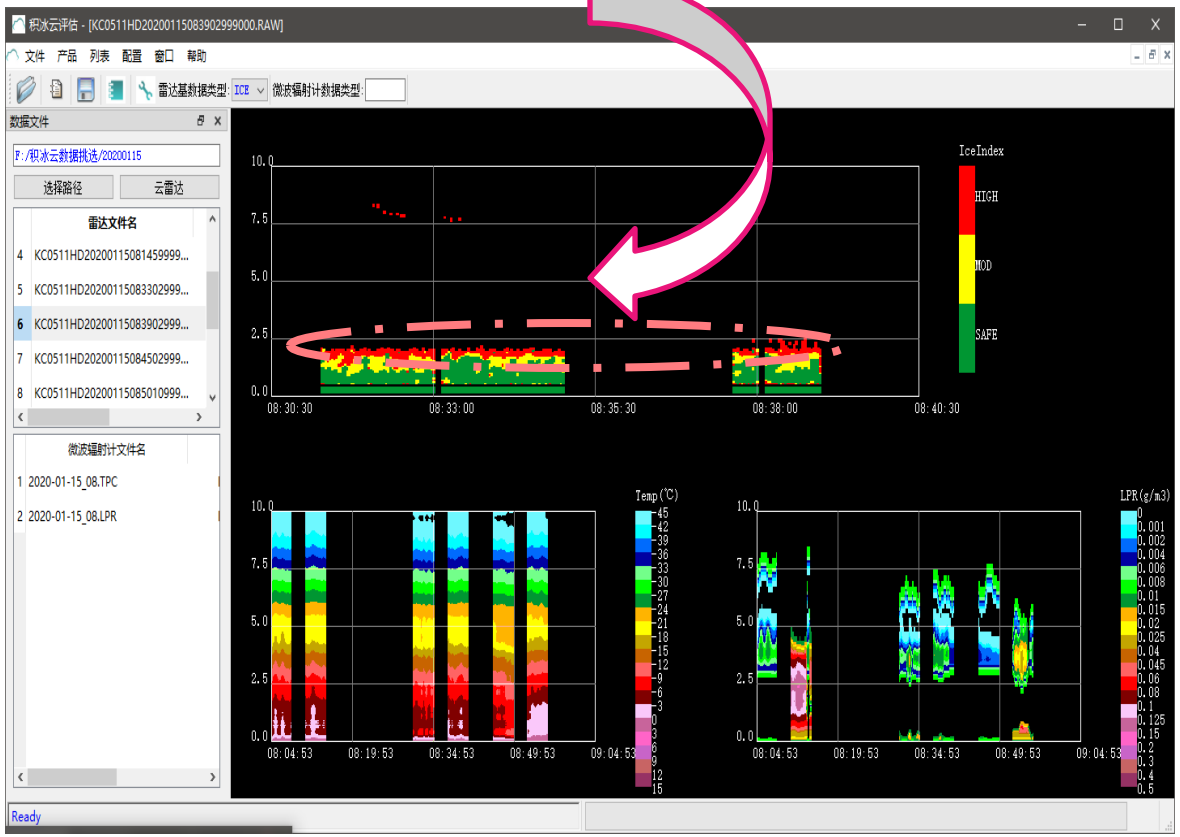
云雷达工作模式：

辐射计工作模式：

探空

飞机报告收集

积冰指数高值区





积冰指数：I1<0 无积冰；0≤I1<5 轻度积冰；5≤I1<8 中度积冰；8≤I1重度积冰

飞机报告：时间：08:20--08:30
机型：IL-76
云的情况：1000--3900米/4500-5100米
天气情况：轻度积冰；
积冰高度：2000-2200米 轻度颠簸
天气位置：**本站
08:30地面观测实况：
10成低云1000米；
小雨，冰粒，轻雾；
能见度2100米；10度风3米/秒；
T：2.1℃；f：94%

研究表明：当湿度满足一定的条件时，对积冰最为有利的温度是在-3℃~-10℃ 之间。

CETC 中国电科

责任 创新 卓越 共享 Responsibility Innovation Excellence Shared