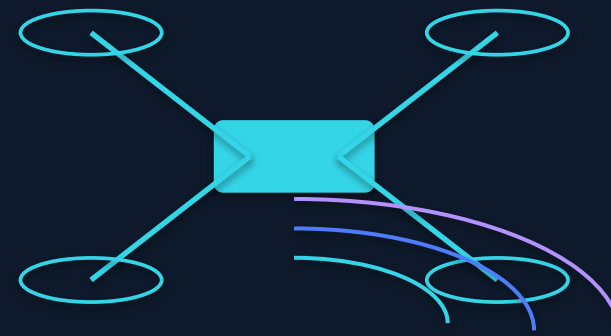


无人机相关法规 与无人机数据链

从“能飞”到“可证明地安全运行”

法规边界 × C2/CNPC × 可靠性 × 网络安全 × 工程验证



39

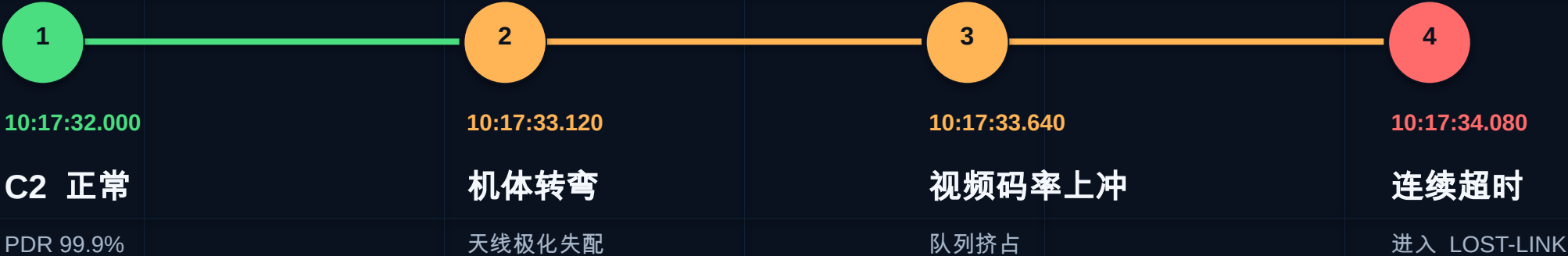
页内完成闭环

2026.08

法规快照

两秒钟：从满格到失联

先不要问‘信号有几格’，先问：失联后系统会做什么？



真正的问题：谁定义 C2 的优先级、失联门限、回退动作、证据链与批准边界？

法规给出‘必须做什么’；数据链工程回答‘怎样在最坏场景仍然做到’。

四个学习成果，一条工程主线

理解 → 设计 → 验证 → 运行

01 判合规

把机型、场景、空域、链路、数据放进同一决策图

02 读链路

从 dB、时延、PDR 与 AoI 判断真实裕量

03 做架构

将 C2、载荷、运行识别分流并设计失效安全

04 能验收

用场景化测试把‘可靠’变成可复现证据

法规是约束

链路是能力

运行是证据

课程主线：把三者闭环

无人机不是一架飞行器，而是一套分布式系统

法规定义已经把遥控台、任务载荷和控制链路纳入系统



关键判断：物理上‘一张网’，逻辑上仍必须分业务、分优先级、分密钥、分失效策略。

五层规则，决定同一个任务的不同问题

不要用一份“飞行许可”覆盖所有合规义务

法律	《民用航空法》 数据、测绘、保密等法律	主体责任 / 权利义务
行政法规	第 761 号《暂行条例》	分类、空域、申请、责任
部门规章	CCAR-92 无线电管理暂行办法	运行许可 / 频率与电台
强制标准	GB 42590 / 46750 / 46761	安全、识别、登记激活
动态约束	UOM、地方公告、任务批复、运营规范	时间地点与具体限制

课堂原则 先判断适用法域与任务性质，再判断机型、运行类别、空域、链路、人员和数据。

2024 建框架，2026 把“可识别、可追溯”推向强制

版本校准截至 2026-08-15 ；生效日不等于所有存量设备同日切换



2026.08 当前窗口 GB 46750 : 无识别发送功能 → 不应运行 | 已有部分能力存量 → 关注 2026.11.01 | 加装模块 → 自实施起 36 个月过渡

GB 46761 : 新生产机 → 2026.05.01 起执行 | 已售在用存量机 → 12 个月过渡，2027.05.01 起执行

先分机型：重量只是起点，能力条件同样关键

条例中的五类无人驾驶航空器

类别	重量阈值	速度 / 高度关键条件	能力条件
微型	空机 < 0.25 kg	真高≤ 50 m ； ≤ 40 km/h	微功率；全程可介入
轻型	空机≤ 4 kg 且 MTOW≤7 kg	≤100 km/h	空域保持 + 可靠被监视 + 可介入
小型	空机≤ 15 kg 且 MTOW≤25 kg	—	空域保持 + 可靠被监视 + 可介入
中型	MTOW≤150 kg （ 排除前三类 ）	场景决定运行风险	适航 / 运行要求显著提升
大型	MTOW >150 kg	场景决定运行风险	高风险场景进入审定类

误区：‘25 kg 以下 = 随便飞’。正确判断还要叠加运行类别、空域、操控员、运营许可、保险与申请触发条件。

再分场景：开放类、特定类、审定类不是重量标签

CCAR-92 的核心是“面向场景、基于风险”



工程含义：链路完整性、失效安全和验证深度必须随场景风险上升。

一项任务至少有六个责任接口

把“谁负责”写进流程，而不是留在微信群里

任务提出

业务目标 / 数据范围

运行人

运营许可 / 风险评估

操控员

机型等级 / 现场决策

技术负责人

适航状态 / 链路参数

合规与空域

申请 / 公告 / 留痕

数据安全

采集 / 存储 / 出境

最低组织控制：任务单唯一编号 | 批准人 | 机体 / 链路配置基线 | 异常升级路径 | 数据回收与归档责任

六道门：不是每项都要证，但每项都要判断

建议将结果固化为“一任务一清单”



输出不是“都要 / 都不要”，而是每道门的适用依据、证据、有效期和责任人。

120 米不是万能通行证：先看‘管制空域’，再看‘适飞空域’

空域状态以一体化平台、UOM 与当期公告为准



真高 120 m 以上：原则上属于应划管制空域的范围之一

适飞空域（概念）

并不自动豁免识别、行为规范、地方限制或特殊场景申请

管制空域（概念）

机场、军事 / 重要设施、重大活动等周边可能有更严格限制

现场动作：查平台 → 查地方公告 → 查任务批复 → 起飞前复核

‘适飞空域内无需申请’有五类重要反转条件

通信基站 / 互联网中继，是最容易被技术团队忽略的触发项

通常无需提出申请的入口

- ◆ 微型 / 轻型 / 小型在适飞空域
- ◆ 常规农工作业
- ◆ 部分专门部门驻地训练等法定情形

仍须满足其他义务

遇到以下任一项 → 反转为需要申请

- ① 通信基站 / 互联网中继飞行
- ② 危险品或投放物品（农用例外）
- ③ 飞越集会人群上空
- ④ 移动交通工具上操控
- ⑤ 分布式操作或集群飞行

申请时点：通常拟飞前 1 日 12 时前；紧急任务有专门时限。

法规把数据链参数直接写进飞行活动申请

C2 不是后台技术细节，而是可审查的运行能力

01 单位 / 操控员 / 资质

02 机型 / 数量 / 登记

03 任务性质 / 飞行方式

04 起降与备降场地

05 航线 / 高度 / 速度 / 空域

06 通信联络方法

07 C2 无线电频率 + 占用带宽

08 通信 / 导航 / 被监视能力

09 监视设备与代码 (如适用)

10 应急处置程序 / 特殊保障

建议附件：链路架构图 | 覆盖预测 | 失联逻辑 | 频率 / 设备合规证据 | 测试报告 | 配置基线

三条直连频段 + 公众移动通信 + 卫星：许可逻辑不同

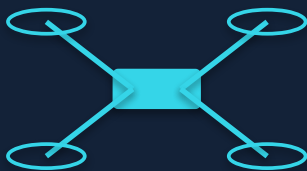
2015 年频率通知已废止；以 2024 年起施行的新办法为准

资源	用途 / 边界	许可与执照（概要）	工程提醒
2400–2476 MHz	直连 C2/ 遥测 / 信息	无需频率许可 / 台执照	共享频谱；不得造成有害干扰
5725–5829 MHz	直连 C2/ 遥测 / 信息	无需频率许可 / 台执照	路径损耗更高；设备须合规
1430–1444 MHz	遥测与信息下行	需频率许可 + 台执照	1430–1438 警用；其他主体 1438–1444
公众移动通信	C2/ 遥测 / 信息	依法使用境内服务 + 专用 SIM	网络 QoS/ 覆盖不是航空安全承诺
卫星通信	中继 / BLOS	相应频率许可 + 台执照	时延、波束遮挡与合法服务体系

微型机只能使用 2400–2476 / 5725–5829 MHz ，并按微功率短距离管理要求执行。

2026：广播式让周边‘看得见’，网络式让监管‘汇得拢’

运行全过程主动报送身份、位置、速度、状态等信息



发送端

身份 | 位置 | 速度 | 状态

运行全过程

广播式



本地接收与区域感知

网络式

UOM / 接收处理系统

集中接收、处理与监管

2026.08：无发送功能 → 不应运行 | 已有部分能力存量 → 关注 2026.11.01 | 加装模块 → 自实施起 36 个月过渡

适用例外：仅室内；仅在民航管制空域运行且具备准入 CNS 能力的大型系统。

飞得合法，不等于采得、存得、传得合法

对国企 / 央企任务，数据边界必须在起飞前定义



四条红线 涉密场所违法拍摄 | 非法采集个人 / 单位信息 | 无资质测绘 | 国家秘密或重要数据违法外传

控制动作：任务数据清单 + 禁采区 + 本地化策略 + 密钥与介质管理 + 删除 / 归档证明

把合规做成 8 个可签字的放行门

技术、运行、合规、数据安全共同闭环

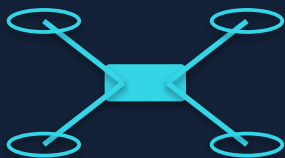


放行记录最少包含 任务编号 · 配置版本 · 机体序列号 · 操控员 · 频段 / 链路 · 失联策略 · 批准人 · 起降时刻

No evidence, no flight.

30 km 电力巡检：一条‘5G 在线’描述远远不够

把一个真实工程任务拆成可审查问题



任务画像

- ◆ 小型机 | 30 km 线性走廊 | BVLOS
- ◆ 公网蜂窝主链 + 直连备链
- ◆ 可见光 / 红外；跨行政区域
- ◆ 运营单位执行，周期性任务

空域与申请

基站 / 互联网中继是否触发申请？跨区权限？

资质与运营

操控员等级、运营合格证、责任保险？

无线电与识别

备链频段、设备核准、双模式运行识别？

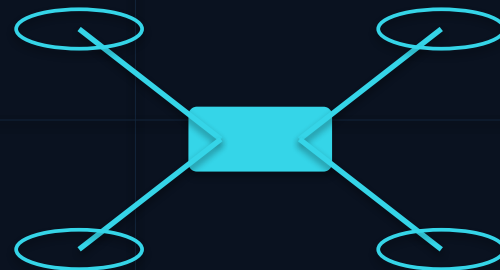
数据与工程

测绘 / 涉密边界、失联策略、验收证据？

输出：一页“批准条件 + 技术证据 + 失效处置”清单

无人机数据链

不是“连得上”，而是以可证明的方式承载安全意图



可靠到达

PDR / outage / coverage

及时到达

latency / jitter / AoI

可信到达

auth / integrity / anti-replay

数据链 = 电磁传播 × 协议栈 × 网络 × 安全 × 运行程序

一张链路图要画出：端、网、云、监管与失效边界

先区分业务平面，再讨论承载技术



链路不是一个 KPI：每类业务的‘失败’含义不同

以下数值为教学设计区间，不是法规最低值

业务	典型方向	设计量级（示例）	优先指标	拥塞时动作
C2 指令	下行	10–100 kbps	时延 / 完整性 / 连续性	保留；抢占其他业务
飞行遥测	上行	20–200 kbps	AoI / PDR / 抖动	降采样但保关键状态
运行识别	上行 / 广播	低码率周期信息	连续可见 / 时效	独立资源与监控
视频 / 点云	上行	4–30+ Mbps	吞吐 / 画质 / 端到端时延	降码率 / 降帧 / 缓存
日志 / 文件	上行	突发或离线	完整性 / 可追溯	延迟传输

调度原则：安全关键业务按最坏拥塞设计；载荷业务按剩余能力自适应。

把‘能通信’写成一条可审计的 dB 账本

算例：2.4 GHz、10 km 视距直连；仅用于教学

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{\text{path}} - L_{\text{misc}}$$

$$\text{FSPL} = 32.44 + 20 \log_{10}(\text{fMHz}) + 20 \log_{10}(\text{dkm})$$

发射功率

+27 dBm

+

天线增益

+5 +8 dBi

+

馈线 / 杂损

-2 dB

-

FSPL

-120 dB

-

接收功率

≈ -82 dBm

表面链路裕量

$$-82 - (-96) = 14 \text{ dB}$$

必须再扣除

衰落 | 姿态 | 极化 | 遮挡 | 干扰 | 实现损失

工程门槛：预算必须分别做上行、下行、主链、备链与最坏姿态。

看得见不等于清得出：菲涅耳区往往先于地平线失败

2.4 GHz、10 km 中点：第一菲涅耳区半径约 17.7 m

17.7 m

中点 r_1

2.4 GHz · 10 km

10.6 m

60% 净空

常用工程目标

4.12

地平线系数

km / $\sqrt{m}$, $k=4/3$

姿态效应

滚转 / 偏航会改变机体遮挡、极化与天线方向图

第一菲涅耳区

$$r_1 = \sqrt{[\lambda \cdot d_1 \cdot d_2 / (d_1 + d_2)]}$$

设计动作：沿航线做数字高程 + 障碍物剖面，不只画地图直线。

无人机链路的敌人，不只是距离

自由空间只是上限；城市、山谷、水面与机体都会改写信道

路径损耗

距离 / 频率

平均功率下降

阴影衰落

地形 / 建筑 / 植被

秒级深衰落

多径快衰落

反射 / 相消

毫秒级波动

多普勒

速度 / 载频

频偏与信道时变

干扰

同频系统 / 邻区

SINR 而非 SNR 决定

机体效应

姿态 / 材料 / 安装

方向图出现盲区

测试要点：丢包若成簇（burst），独立概率模型会严重高估可靠性。

Mbps 很高，仍可能不适合 C2

Shannon 给的是理论上限；安全链路关注低尾部性能

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N)$$

5 MHz

带宽 B

10 dB

SNR

17.3

Mbps 理论上限

≠ 可用吞吐 ≠ 安全 SLA

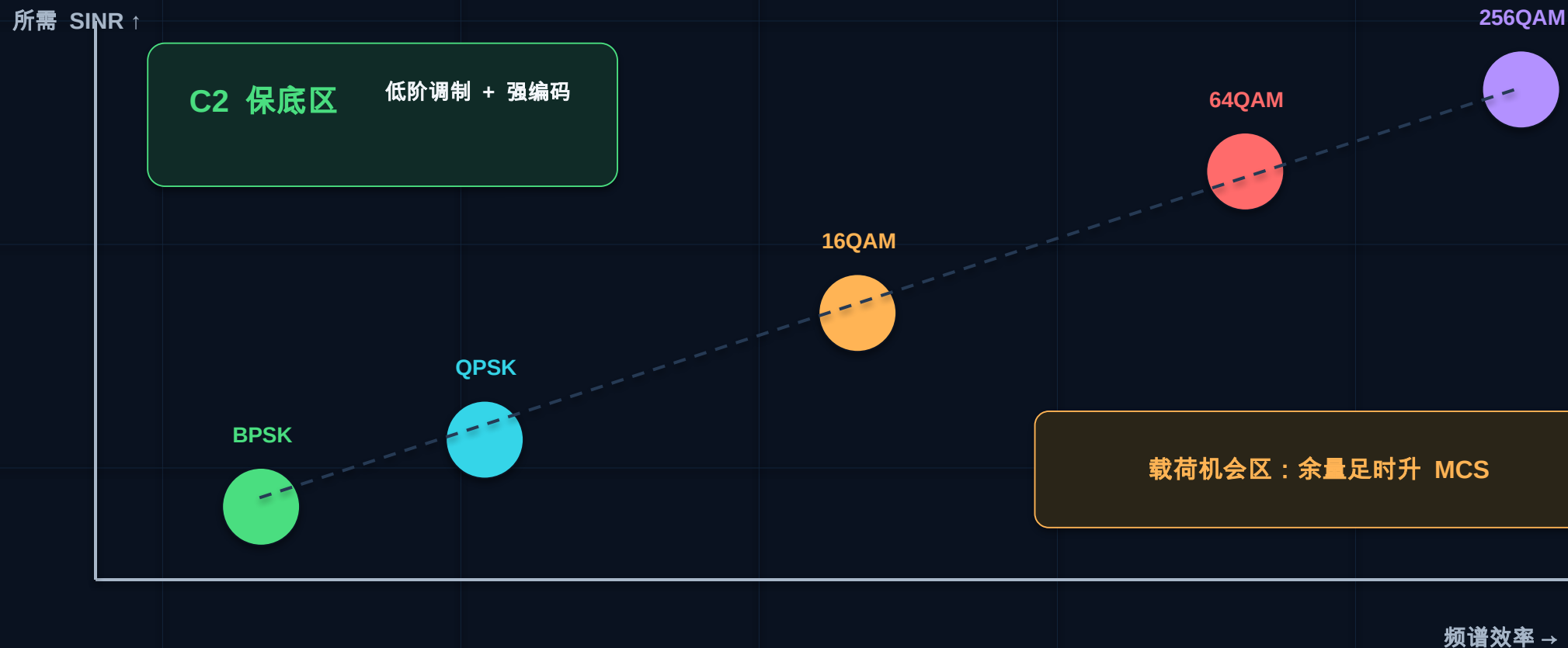
C2 更关心的 4 个尾部指标

- | | | |
|----|----------|-------------|
| 01 | p99.9 时延 | 最坏排队和切换 |
| 02 | 最长连续中断 | 能否触发失联 |
| 03 | AoI 信息年龄 | 状态是不是‘过期真相’ |
| 04 | 恢复时间 | 重连后多久可信可控 |

工程结论：容量决定“装多少业务”，尾部指标决定“敢不敢把安全意图交给这张网”。

调制编码：在效率与鲁棒性之间动态换挡

C2 应保守，载荷可激进；自适应必须有滞回



滞回 + 最小驻留时间 + C2 保留资源，避免“速率振荡”。

谁先发、何时发，决定了确定性

空口拥塞通常先表现为排队与抖动，而不是‘掉线’

CSMA / 竞争接入

先听后发

- + 简单 | 低负载有效
- 高负载碰撞、尾时延不可控

TDMA / 预约时隙

时间切片

- + 确定性 | 资源可保留
- 同步、时隙利用率与组网复杂

蜂窝调度

基站分配资源

- + 覆盖 / 移动性 / 鉴权体系
- 空中干扰、切换与公网负载

一个可执行的队列策略

P0 C2

P1 遥测 / RID

P2 视频

P3 日志

按优先级：限速、丢弃、抢占

不要让 4K 视频的一次 1 帧，挤掉一条 40 字节的制动指令。

FEC 买确定性，ARQ 买效率；交织把突发错误摊开

每增加一层保护，都要用时延预算支付

FEC

发送冗余，接收端纠错

+ 时延可预测

- 占用带宽

ARQ

错误后请求重传

+ 信道好时效率高

- 尾时延 / 失联时无效

HARQ

FEC + 软合并重传

+ 折中性能

- 实现和调度复杂

交织

打散突发错误

+ 对 burst 有效

- 增加缓存时延

设计思路

C2：短包 + 强 FEC + 有限重传 + 严格过期丢弃

载荷：自适应编码 + 更深重传 + 缓存补传

关键反直觉：过期的控制包即使最终送达，也可能比丢弃更危险。

100 ms 不是空口指标，而是一条跨域预算

脱敏测试示例：时延分位数与连续中断时长必须分开统计



验收不要只写‘平均 < 100 ms’；必须同时限定分位数、最长中断和超时比例。

99.9% PDR : 听起来很好, 可能每 50 秒仍丢一个包

以 20 Hz 控制包为例; 独立丢包假设只用于解释

20 Hz

控制更新率

99.9%

单包 PDR

≈ 50 s

平均一次丢包

burst

真正危险

连续中断而非散点

$P(\text{loss})^5$

仅在独立时成立

包级指标

- ◆ PER / PDR / burst length
- ◆ p99.9 latency / jitter
- ◆ AoI / out-of-order / duplicate

任务级指标

- ◆ 最长失控时段 / 每小时中断次数
- ◆ 失联状态触发与恢复成功率
- ◆ 任务窗口可用性 / 共同原因故障

可靠性不是一个百分数, 而是一条从“包”到“任务后果”的映射。

两条链路只有在故障足够独立时，才等于更可靠

示例： $A_1=99.9\%$ ， $A_2=99\%$ → 理想并联系统 99.999%

$$A = 1 - (1-A_1)(1-A_2)$$

链路 A

99.9%

链路 B

99%

理想并联

99.999%

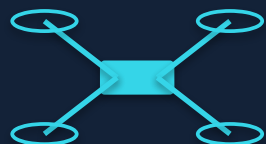
共同原因故障：一票否决理想公式

- 01 同一电源 / 射频前端 / 天线遮挡
- 02 同一运营商核心网 / 回传路由
- 03 同一协议栈、证书、时钟与配置
- 04 同一干扰源或大范围管制

真正的冗余：异构承载 + 独立故障域 + 连续健康探测 + 可验证切换 + 防脑裂状态同步

高空 LOS：覆盖可能更远，干扰也可能更多

公网 4G/5G 是强大承载，不是天然航空安全链路



空中终端同时‘看见’更多小区

优势

广覆盖、移动性、鉴权、回传与运维体系

空中特性

多邻区 LOS → 干扰上升；天线倾角 → 旁瓣服务

风险

切换中断、拥塞、上行视频挤占、网络策略变化

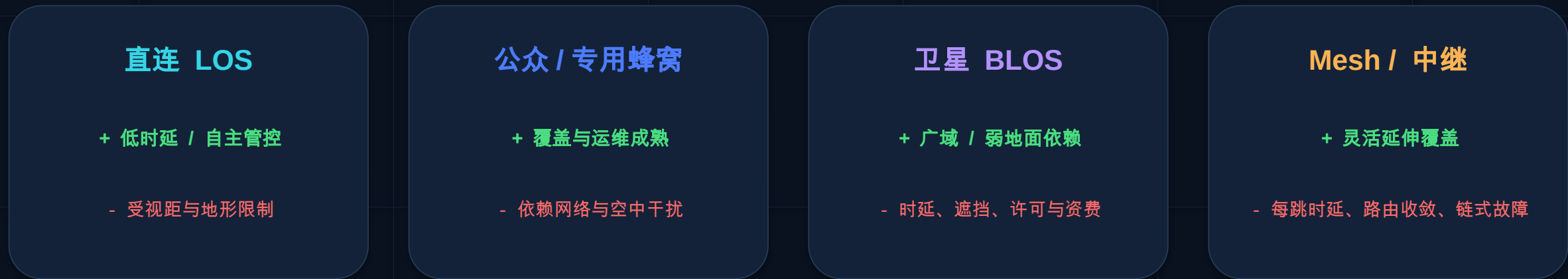
工程控制

专用 SIM/QoS、双 PLMN 或专网、航线预测、实飞尾部测试

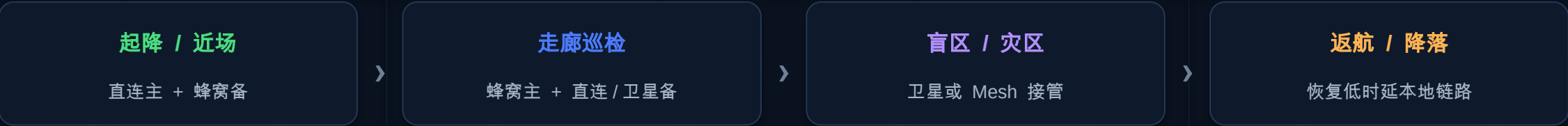
法规回勾：基站 / 互联网中继飞行属于申请触发项之一。

BLOS 的代价：时延、遮挡、拓扑与故障域更复杂

混合架构应按任务阶段切换，而不是永远全开



任务阶段化选择



切换策略必须进入测试：何时切、谁决定、切换时是否重复 / 乱序、恢复后如何同步状态。

先感知、再降级、后切换：抗干扰是一套闭环

防御性工程方法；不得非法设置或使用反制设备



合规红线：不得把“抗干扰测试”变成未经授权的干扰发射或反制设备使用。

攻击者不必压制射频；伪造一条‘合法’指令也足够危险

目标：机密性 + 完整性 + 真实性 + 新鲜性 + 可追溯



原则：C2、遥测、载荷分别用密钥 / 策略；网络位置或设备所有权不等于可信。

一帧控制消息：先证明‘谁、何时、哪一条’，再执行‘做什么’

AEAD 保护机密性与完整性；CRC 不提供身份真实性



接收端安全闸



密钥生命周期

制造注入 → 注册绑定 → 会话派生 → 定期轮换 → 吊销 / 转移 → 报废销毁

关键禁忌：同一密钥跨业务复用；GCM nonce 重复；断电回卷序列号；失败后明文降级。

Lost Link 不是一个动作，而是一台可验证的状态机

门限与动作须由场景风险批准；图中时序仅为方法示意



验收必须注入：单向失联、双向失联、假恢复、抖动重连、主备分裂、GNSS 异常与低电量叠加。

从实验室到航线：用故障注入证明系统边界

测试不是找一个最好数字，而是找到会失败的组合

L1 部件 / 射频台架 灵敏度、阻塞、带外、温度、电源

L2 HIL / 网络仿真 时延、丢包、乱序、切换、攻击

L3 受控场地 距离、高度、姿态、遮挡、干扰

L4 代表性航线 地形、天气、运营网络、人员流程

验收指标板

链路	PDR / burst / outage	时延	p95 / p99.9 / max
新鲜度	Aol / time sync	切换	interrupt / failover
安全	auth fail / replay / audit	任务	lost-link / recovery / completion

课堂收官练习 为“30 km 电力巡检”写出 3 条可量化放行标准：C2 尾时延 | 最长中断 | 主备切换 + 失联动作。

把一项无人机任务做成“可批准、可运行、可复现”

五句话带回单位；本页核心来源可点击，完整 URL 映射见随附讲师手册

- 01 合规从场景开始，不从重量结束
- 02 C2、载荷、运行识别可共网，不可混责
- 03 平均吞吐不代表尾部可靠性
- 04 冗余必须跨故障域，恢复必须重新建立信任
- 05 没有故障注入与可复现日志，就没有可靠性证据

核心权威来源

R1 新修订《民用航空法》	R2 第761号《暂行条例》
R3 CCAR-92	R4 无线电管理暂行办法
R6 GB 46750 运行识别	R9 GB 46761 登记激活
T1 ITU-R M.2171	T5 3GPP TS 22.125 Rel-19
T8 NIST SP 800-38D	

最终工程问题：当链路、网络、云或人中的任意一个失效时，系统是否仍保持安全意图，并留下足够证据解释发生了什么？

法规会更新 | 参数要复核 | 结论要留痕