

海上无人船蜂群

无线自组网解决方案

有人—无人协同·母船中继·蜂群自组织

让每一艘无人船都在线，让整个蜂群像一个整体一样行动

北京比特威电讯科技有限公司

技术支撑部

2026 年 9 月

★ 本方案解决的核心问题

海上无人船蜂群的通信，难点不在于“单船能不能连上”，而在于海面强反射造成的多径衰落、船体摇摆带来的天线姿态变化、以及数十艘船同时上报数据时的空口争抢。本方案以有人母船作为空中优势节点与指挥中枢，以 ZumMesh 7100 系列 MIMO 设备应对海面多径，以 7020 系列轻量化终端装备中小型无人船，构建一张无中心、自组织、自愈的蜂群数据链，同时承载协同控制遥测与视频载荷回传两类业务。

目录

CONTENTS

第一章 场景分析与需求定义

- 1.1 有人—无人协同的作业模式 母船 + 蜂群的编成
- 1.2 海上通信的四项特殊挑战 多径 / 摇摆 / 盐雾 / 无遮挡无阻挡
- 1.3 两类业务的差异化需求 协同控制遥测 vs 视频载荷回传
- 1.4 需求量化 带宽、时延、并发、节点规模

第二章 设计思路与产品选型

- 2.1 总体设计思路 三层角色、两类业务、一张网
- 2.2 产品线全景与适配性分析 从 7020 到 7100 的选型逻辑
- 2.3 核心选型决策 母船 / 中型艇 / 小型艇的型号分配
- 2.4 为什么必须用 IP65 盐雾环境的硬约束

第三章 系统详细设计

- 3.1 网络总体架构 母船为核、蜂群为网、岸基为延伸
- 3.2 母船节点设计 指挥中枢与中继枢纽
- 3.3 蜂群节点设计 中小型无人船的终端配置
- 3.4 抗多径设计：MIMO 的价值 海面反射的针对性解法
- 3.5 业务分流与优先级设计 控制优先、视频可控
- 3.6 频率规划与抗干扰 智能选频与双频策略
- 3.7 时间同步与定位协同 蜂群协同的基础
- 3.8 供电与结构安装 船载环境的适应性设计

第四章 设备配置清单

- 4.1 配置清单总表 三类平台的设备构成
- 4.2 关键设备技术参数 手册核心指标

第五章 典型编成配置案例

- 5.1 案例一：小型蜂群（8—12 艘） 近岸测绘/巡检
- 5.2 案例二：中型蜂群（20—30 艘） 区域协同作业
- 5.3 案例三：大型蜂群（50 艘以上） 大规模协同

第六章 实施与联调

- 6.1 实施流程 五阶段交付
- 6.2 码头联调要点 陆地先验证再出海
- 6.3 海上测试与验收 必须实测的项目
- 6.4 关键参数配置建议 手册参数的工程取值

第七章 运维保障

- 7.1 出航前检查清单 标准化作业
- 7.2 常见故障排查 海上快速定位

第八章 风险与边界

- 8.1 技术风险 哪些情况方案会受限
- 8.2 合规与安全 频率与海上作业安全

第九章 结论

第一章 场景分析与需求定义

海上蜂群通信到底难在哪

1.1 有人—无人协同的作业模式

本方案针对的是

有人母船 + 无人船蜂群的协同作业模式。这是当前海上无人系统最主流的编成方式，也是工程上最务实的路径。

角色	平台类型	数量	职责	对通信的要求
指挥中枢	有人母船 (或大型无人艇)	1 艘	任务规划、蜂群调度、数据汇聚、与岸基/指挥中心回传	高带宽、高可靠；需要同时接入大量蜂群节点；需要远距离回传能力
蜂群节点	中小型无人船	数艘至数十艘	执行测绘、巡检、侦察、采样等任务	中等带宽、低功耗、轻量化；需要与母船及彼此保持连接
岸基/后方	岸基站或指挥中心	1 处	远程监控、任务下达、数据归档	通过母船中继接入；对实时性要求相对宽松

这种编成的优势在于：有人母船提供了天然的高度优势与能源优势，可以作为蜂群的移动基站与指挥节点；而无人船蜂群则承担前出、危险区域、长时间值守等任务。

1.2 海上通信的四项特殊挑战

海上环境与陆地环境差异极大。理解这四项挑战，是正确选型的前提。

挑战一：海面强反射导致的多径衰落（最核心）

这是海上通信区别于陆地的最大特点。海面是一个近乎理想的反射面，电磁波在海面上传播时，除了直射路径外，还会产生强烈的海面反射路径。两路信号到达接收端时相位不同，会相互叠加或抵消，形成频率选择性衰落。

⚠ 这是海上链路最主要的失效原因

- 在平静海面，反射信号甚至可能与直射信号强度相当，形成深度衰落（信号相互抵消）。
- 随着浪高变化，反射路径的长度持续变化，衰落深度和位置也在快速变化——这表现为接收信号强度的快速起伏。
- 单天线系统对此几乎无能为力。这正是本方案在关键节点采用 MIMO 分集接收的根本原因。

挑战二：船体摇摆导致天线姿态持续变化

无人船在海上受波浪影响持续摇摆、起伏、偏航。这带来两个问题：

- 天线的指向会随船体姿态变化，破坏原本对准的链路；
- 在极端情况下，天线可能短暂指向水面或天空，造成链路瞬时中断。

这意味着海上链路不能依赖精确的天线对准，而应该采用分集接收与较宽的波束设计。

挑战三：盐雾腐蚀与浪溅

海上环境盐分高、湿度大，加上浪溅，对设备的防护等级提出了硬性要求。普通 IP20 设备直接暴露在海上环境中会迅速腐蚀失效。

★ 这一条是硬约束，不能妥协

所有安装在露天位置（甲板、桅杆、船舷）的设备，必须选用 IP65 防护等级型号；或至少安装在具备防护的舱内，并将天线通过馈线引至舱外。本产品线中明确提供 IP65 的型号包括：7020-33 PTT+WIFI+GPS 版、7020-37-IP65、7020-40-IP65、7030-35/40（IP20/IP65 可选）、7100-2T4R-38 与 7100-4T4R-42（IP20/IP65 可选）。

挑战四：无遮挡带来的"双刃剑"效应

海上没有建筑物和地形遮挡，这既是优势也是挑战：

- 优势：视距条件极好，同样功率下通信距离远大于陆地；
- 挑战：没有遮挡意味着蜂群内部所有节点都可能互相“听见”，空口争抢比陆地更严重；同时也更容易受到远处同频干扰。

因此海上蜂群更需要空分复用与有效的资源调度机制，而不是单纯加大功率。

1.3 两类业务的差异化需求

根据确认的需求，蜂群承载两类业务。它们的特性截然不同，必须在架构层面区分对待。

业务类别	具体内容	数据量	技术特性	优先级
协同控制与遥测	位置、姿态、航向、航速、电量、任务状态上报；航线指令、编队指令、任务指令下发	小数据包 (每船数 kbps 级)	高频次、强实时、不允许丢失； 对时延敏感；是蜂群协同的命脉	★★★ 最高
视频与载荷回传	光电吊舱视频、雷达/声呐数据、测绘数据、环境监测数据	大流量 (单路数 Mbps 级)	带宽消耗大；可容忍适度压缩与延迟；可择机回传	★★ 高

⚠ 最常见的设计错误：把两类业务混在同一条通道上

- 如果控制指令与视频数据不加区分地争抢同一空口，视频的大流量会把控制指令挤在队列里，造成指令延迟甚至丢失。
- 对蜂群而言，控制指令丢失的后果远比视频卡顿严重——可能导致编队混乱、任务失败甚至碰撞。
- 本方案在架构层面对两类业务做优先级分离，并通过设备的优先级配置功能实现关键数据优先传输。

1.4 需求量化

1.4.1 带宽测算

按一个典型编成（1 艘母船 + 24 艘无人船）测算：

业务	单节点	规模	合计带宽
协同控制遥测	约 50—100 kbps	24 艘	1.2—2.4 Mbps
视频回传（标清/720P）	2—4 Mbps/路	4—8 路并发	8—32 Mbps
视频回传（1080P）	4—8 Mbps/路	2—4 路并发	8—32 Mbps

雷达/声呐/测绘载荷	1—5 Mbps/路	按需	5—20 Mbps
合计（典型峰值）	—	—	约 30—70 Mbps

这个量级意味着：若采用 7020 系列（峰值 49 Mbps）承载全部业务，在视频路数较多时会比较紧张；而 7030 系列（峰值 96 Mbps）或 7100 系列（MIMO 峰值 252 Mbps）则更为从容。具体选型见第二章。

1.4.2 节点规模与时延

指标	要求	说明
节点规模	支持 2—256 节点	产品线支持 2/4/8/12/16/32/64/128/256 节点配置；7100 系列为 2—64 节点
组网时间	冷启动 40 秒入网	蜂群快速出动，设备开机后应能快速完成组网
控制指令时延	越低越好，需实测确认	蜂群协同时对时延敏感，多跳会增加时延
移动性	支持高速移动与拓扑重构	无人船持续移动，网络拓扑不断变化

第二章 设计思路与产品选型

为什么是这套组合

2.1 总体设计思路

本方案的总体设计可以概括为：

三层角色、两类业务、一张网。

层次	角色	定位	关键能力要求
第一层 指挥层	有人母船	蜂群的移动基站与指挥中枢	高带宽、多节点接入能力、远距离回传、抗多径（MIMO）
第二层 蜂群层	中型无人船	骨干节点，兼具执行与中继	中等带宽、稳定连接、可为小型艇中继
第三层 末梢层	小型无人船	任务执行单元	轻量化、低功耗、够用即可

两类业务在这一张网上通过优先级机制分流：协同控制遥测走高优先级通道，确保实时可靠；视频与载荷数据走普通通道，在带宽紧张时可降级或择机回传。

2.2 产品线全景与适配性分析

比特威 2026 产品手册包含四大系列。针对海上无人船蜂群场景，适配性分析如下：

系列	代表型号	核心特征	海上蜂群适配性
ZumMesh 7020 系列	7020-27 / 30 / 33 / 35 / 37 / 40 / 46 7020-双频-30 / 双频-40 7020-33-PTT+WIFI+GPS	峰值 49 Mbps @20 MHz； 功率 1.6 W ~ 80 W 梯度； 重量 65 g ~ 2200 g； 支持 256 节点	主力适配。 轻量化型号适合小型无人船； 大功率型号适合母船与岸基； 双频型号适合强干扰环境
ZumMesh 7030 系列	7030-35 / 40 / 46	峰值 96 Mbps @20 MHz （支持 40 MHz 频宽）； 功率 6 W / 20 W / 80 W； 灵敏度 -110 dBm	高带宽场景适配。 适合视频路数多、载荷数据大的编成； 7030-40（20 W）适合母船
ZumMesh 7100 系列	7100-2T4R-38（2发4收） 7100-4T4R-42（4发4收）	MIMO 分集/复用； 峰值 252 Mbps @40 MHz （分集 ≥112 Mbps）； 1024QAM；TDD-COFDM	抗海面多径的最优解。 MIMO 分集接收可有效对抗海面反射造成的衰落； 适合作为母船节点
ZumMesh SDR 系列 （应急自组网）	SDR-HT / SDR-MT / SDR-DSP 手持 / 背负 / 室外 / 车载	点对点峰值 70 Mbps； 支持 32 节点以上； 即开即用	辅助/应急适配。 适合岸基临时指挥、人员携带、应急补点

2.3 核心选型决策

2.3.1 母船节点：为什么推荐 7100 系列 MIMO

母船是整个蜂群的核心，其通信能力直接决定整个系统的上限。推荐采用

ZumMesh 7100-4T4R-42 或 7100-2T4R-38，理由如下：

决策因素	分析	结论
多径对抗能力	海面反射造成频率选择性衰落，是海上链路最主要的失效原因。MIMO 多天线可同时接收多个独立路径，通过分集显著改善衰落环境下的接收质量	MIMO 是针对性解法，单天线系统无解
天线姿态变化	船体摇摆导致天线指向持续变化。多天线分集可降低对单一天线指向的依赖	MIMO 比单天线更适应摇摆
带宽需求	母船需汇聚全部蜂群的视频与载荷数据。7100-4T4R-42 峰值可达 224 Mbps @80 MHz；7100-2T4R-38 达 252 Mbps @40 MHz（2x2 MIMO）	带宽充裕，远超 7020 系列的 49 Mbps
调制能力	7100 系列支持 1024QAM 自适应调制（7020/7030 系列为 256QAM）	近距离高质量链路下速率更高
接口	7100 系列提供 1000 M 以太网口 ×2（7020/7030 系列为 10/100 M）	千兆口更适合汇聚多路视频

★ 关于 7100 系列的选型权衡

7100-4T4R-42（4 发 4 收）性能最强，常发功耗 ≤105 W，重量 ≤460 g；7100-2T4R-38（2 发 4 收）常发功耗 ≤68 W，重量 ≤360 g，更为均衡。若母船供电充足且追求极致性能，选 4T4R-42；若希望功耗与重量更可控，选 2T4R-38。两者均支持 IP65，满足海上防护要求。需注意：7100 系列节点规模为 2—64 节点，若蜂群规模超过 64 艘，母船宜采用 7020/7030 系列（支持 256 节点）进行大规模组网，或将蜂群分组接入。

2.3.2 中型无人船：7030-35 或 7020-33 PTT 版

型号	功率	峰值速率	重量	防护	适用判断
7030-35	6 W	96 Mbps (40 MHz)	≤250 g	IP20/IP65	视频路数多的中型艇首选。96 Mbps 带宽充裕，重量仅 250 g，功耗 ≤40 W
7020-33 PTT+WIFI+GPS	4 W	49 Mbps	≤105 g	IP65	需语音/定位/地图功能时首选。集成语音、WIFI、GPS 北斗、地图显示；重量仅 105 g，适合小型平台
7020-35	6 W	49 Mbps	—	—	功率适中，适合中等距离
7020-37	10 W	49 Mbps	≤1500 g	IP20/IP65	功率更大、距离更远，但重量 1500 g 偏大，适合较大型平台

2.3.3 小型无人船：7020-27 / 7020-30 / 7020-双频-30

小型无人船对重量与功耗极为敏感，选型应以轻量化、低功耗为第一优先级：

型号	功率	重量	功耗	尺寸	特点与适用
7020-27	1.6 W	≤65 g	≤10 W 常发	≤44×61×20 mm	最轻最小。适合微型/超小型无人船；供电 9—30 V 宽压，适应性强
7020-30	3 W	≤180 g	≤15 W 常发	≤93×81×22 mm	功耗与性能均衡，适合一般小型无人船
7020-双频-30	0.8—1.6 W	≤80 g	≤8 W 常发	≤64×46×20 mm	双频智能选频，自动躲避干扰；功耗仅 8 W，适合强干扰环境的小型艇
7020-33	4 W	≤150 g	≤20 W 常发	≤95×60×22 mm	功率略高，距离更远，可选 PTT+WIFI+GPS 版本

2.3.4 岸基/远距离回传：7020-40 / 7020-46 / 7030-40

型号	功率	速率	视距	适用
7020-40	20 W	42@20 km; 28@50 km; 19@100 km; 7@200 km	≤300 km (IP20)	岸基站标准配置, 可选 IP65
7030-40	20 W	80@20 km; 65@50 km; 36@100 km; 12@200 km	≤300 km	岸基高带宽配置, 视频回传 量大时首选
7020-46	80 W	46@20 km; 36@50 km; 26@100 km; 8@500 km	≤500 km	超远距离。岸基超远距离回 传; 常发功耗极高, 需充足 供电
7030-46	80 W	46@20 km; 36@50 km; 26@100 km; 8@500 km	≤300 km	超远距离 + 高带宽; 常发功 耗 ≤240 W
7020-双频-40	10 W	40@20 km; 30@50 km; 20@100 km	≤200 km	双频智能选频, 抗干扰能力 强

2.4 为什么必须用 IP65

这一条在本方案中**不是建议，是硬约束**。

安装位置	环境暴露	防护要求	说明
甲板、桅杆、船舷 等露天位置	直接暴露: 盐雾、浪 溅、雨水、阳光直射	必须 IP65	任何 IP20 设备直接暴露都会在短期内腐蚀失效
舱内/设备舱	相对封闭, 但仍有湿气 与盐雾	可选用 IP20, 但需做好舱内防 护	天线必须通过馈线引至舱外高处; 注意馈线接口的 防水处理
岸基站	户外长期运行	必须 IP65	岸基设备长期暴露, 维护不便, 更应强调防护

△ 海上部署的三个防护要点

- 设备本身的防护等级只是第一层。射频接口、网口、电源接口的防水处理同样重要——手册中多款设备采用 SMA-K 或 MMCX 接口, 接头处必须做防水胶带与密封处理。
- 即使选用 IP65 设备, 也建议安装在有遮挡的位置 (如桅杆背风侧、舱檐下), 减少直接浪溅与暴晒。
- 长期海上运行后, 应定期检查接头的腐蚀情况, 这是海上设备最常见的故障点。

第三章 系统详细设计

可落地的工程方案

3.1 网络总体架构

整体架构采用「母船为核、蜂群为网、岸基为延伸」的结构：

组成	设备配置	部署位置	职责
母船节点 (核心层)	ZumMesh 7100-4T4R-42 或 2T4R-38 (IP65)	母船桅杆高处	蜂群指挥中枢；汇聚全部数据；MIMO 抗多径；千兆口接入船载网络；向岸基 回传
中型无人船 (骨干层)	ZumMesh 7030-35 或 7020-33-PTT+WIFI+GPS (IP65)	各中型无人船	执行任务；承载较高带宽业务；可为附 近小型艇提供中继
小型无人船 (末梢层)	ZumMesh 7020-27 / 7020- 30 / 7020-双频-30	各小型无人船	执行任务；上报遥测；按需回传视频
岸基节点 (延伸层)	ZumMesh 7020-40 或 7030- 40 (IP65)	岸边高地或岸基站	远距离回传；连接指挥中心；母船超出 视距时的地面延伸

数据流示意：

小型无人船 →（自组网）→ 中型无人船/母船 →（自组网）→ 母船汇聚
→（自组网或专线）→ 岸基 → 指挥中心

3.2 母船节点设计

3.2.1 设备选型与安装

- 主设备：ZumMesh 7100-4T4R-42（4 发 4 收）或 7100-2T4R-38（2 发 4 收）；
- 防护等级：必须选 IP65；
- 安装位置：桅杆尽可能高处。高度对海上通信距离影响显著——天线越高，视距越远，受海面反射的影响相对越小；
- 天线：7100 系列提供 SMA-K × 4 接口，需配置 4 面天线（4T4R）或按需配置（2T4R 为 2 发 4 收）；建议天线间保持足够间距以实现空间分集；
- 接口：7100 系列提供 1000 M 以太网口 × 2，适合接入船载交换机汇聚多路视频；另有双 RS232 与 TTL 串口可对接船上其他设备。

3.2.2 供电设计

型号	常发功耗	待机功耗	供电要求
7100-4T4R-42	≤105 W ±20	20 W ±1	工作电压 24—30 V
7100-2T4R-38	≤68 W ±20	13 W ±1	工作电压 21—28 V

母船通常有较为充足的供电条件，但仍需注意：7100 系列常发功耗较高（68—105 W），应按最不利工况（全部通道常发）配置电源容量，并预留一定余量。

3.2.3 母船作为中继枢纽的价值

母船在架构中承担三重角色，这是本方案的关键设计：

- **高度优势：**母船天线架设高度远高于无人船，视距条件最好，天然成为蜂群的“基站”；
- **减少跳数：**母船可直接与多数蜂群节点建立链路，减少多跳中继，从而降低时延与带宽收敛损失；
- **汇聚出口：**母船是蜂群与岸基/指挥中心之间的唯一出口，所有远距离回传都经由母船。因此母船节点的可靠性至关重要，建议考虑冗余配置。

3.3 蜂群节点设计

3.3.1 中型无人船节点

配置项	内容	说明
主设备	7030-35（IP65）或 7020-33-PTT+WIFI+GPS（IP65）	若需语音/定位/地图，选 7020-33 PTT 版； 若需高带宽视频，选 7030-35
天线	SMA × 2（7030-35） 或 NK × 2（7020-33 PTT 版）	尽量架高； 摇摆环境下不宜使用过窄波束天线
接口利用	7030-35：2 网口 + 双 RS232 + TTL 7020-33 PTT 版：网口 + 手咪接 口 + GPS + WIFI	RS232/TTL 可对接船载飞控、 传感器
供电	7030-35：≤40 W 常发，24—30 V 7020-33：≤20 W 常发，24—30 V	按船载电源条件配置

3.3.2 小型无人船节点

- **主设备：**7020-27（≤65 g）/ 7020-30（≤180 g）/ 7020-双频-30（≤80 g），按船体大小与供电能力选择；
- 若采用 7020-27，其工作电压为 9—30 V 宽压，对船载电源适应性最好；
- **天线：**7020-27/30/双频-30 均为 SMA × 2（双频-30 为 SMA × 4）；小型船空间有限，天线布局需避免相互遮挡；
- **供电：**7020-27 常发≤10 W、7020-30≤15 W、双频-30≤8 W，对小型船的电源系统压力较小。

★ 小型无人船的选型建议：按续航倒推

小型无人船的电池容量有限，通信设备功耗直接影响任务续航。建议先确定可接受的最大通信功耗，再反推可用型号：

- 若允许 ≤10 W：选 7020-27（≤65 g，最轻）
- 若允许 ≤15 W：选 7020-30
- 若干扰环境复杂且功耗需 ≤8 W：选 7020-双频-30

在功耗预算允许时，适当提高发射功率可显著改善链路余量。

3.4 抗多径设计：MIMO 的价值

这是本方案针对海上环境最核心的技术设计，值得单独说明。

3.4.1 海面多径的物理机制

电磁波在海面传播时，接收端会收到多径信号：

- 直射路径（直射波）；
- 海面反射路径（反射波）；
- 在涌浪较大时，还可能有多多个不同角度的散射路径。

这些路径长度不同，到达接收端时相位不同。当两路信号相位相反时，会相互抵消，形成深度衰落——这就是海面链路信号突然跌落的主要原因。

3.4.2 MIMO 如何解决问题

机制	原理	对海面多径的效果
空间分集	多天线同时接收。由于多根天线在空间上分离，它们经历的衰落相互独立——不太可能所有天线同时处于深衰落	显著降低深度衰落概率。这是 MIMO 在海面上最重要的价值
空间复用	利用多径环境（而非对抗它）并行传输多路数据	提升吞吐量。7100 系列可达 252 Mbps @40 MHz（2x2 MIMO）
波束赋形/自适应	多天线可自适应调整收发权重	改善信噪比，并降低对天线精确指向的依赖

★ 为什么母船必须用 MIMO，而小型艇可以不用

母船是全网汇聚点，其链路质量决定整个蜂群的上限，且母船供电与空间条件允许，因此应采用 7100 系列 MIMO。

小型无人船受重量、功耗、空间限制，难以部署多天线系统；但它们只需与母船或邻近节点通信，链路距离短，可通过就近中继规避长距离多径影响。

这是性能与约束之间的合理取舍，而非妥协。

3.5 业务分流与优先级设计

3.5.1 两类业务的分离策略

业务	优先级	承载策略	拥塞时的处理
协同控制指令	最高	高优先级队列；可通过设备优先级配置功能，按端口/IP/协议设置优先级顺序	绝对优先，不受其他业务影响
遥测状态上报	高	高优先级；周期性上报，数据量小	保证基本上报频率
视频回传	中	普通队列；按需开启，非全部船只同时回传	可降级：降低码率/分辨率，或改为择机回传
载荷数据	中低	普通队列；大块数据建议本地存储后择机回传	可延迟：优先本地存储，回到母船附近或任务间隙再回传

3.5.2 视频回传的并发控制

多路视频同时回传会迅速耗尽带宽。建议采取以下策略：

- **按需开启**：并非所有船只都需要持续回传视频。可按任务需要，仅开启关键船只或关键时刻的视频回传；
- **本地存储 + 择机回传**：非关键视频先在船端本地存储，待任务间隙或靠近母船时再高速回传；
- **自适应码率**：根据链路质量动态调整视频码率——链路好时提高清晰度，链路差时自动降码率保流畅；
- **并发路数限制**：建议限制同时回传的视频路数，具体路数需根据实测带宽确定。

3.6 频率规划与抗干扰

3.6.1 频段选择

产品线支持多个频段。海上场景的频段选择建议：

频段	特点	海上适用性
L 波段 (1.3—1.5 GHz)	绕射能力较强，传播损耗较小；天线尺寸适中	推荐首选。适合中远距离、海况一般的场景；7100 系列工作在 1350—1450 MHz
2.3—2.4 GHz	波长较短，天线更小；带宽资源相对丰富	适合短距离、小型平台；但海面反射更明显
低频段 (635—675 MHz / 790—820 MHz)	绕射能力最强，传播距离远	适合超远距离；但天线尺寸大，小型船不便部署
高频段 (3.3—4.2 GHz)	带宽大，天线小	适合近距离高带宽；但传播损耗大，海面多径影响更明显

3.6.2 抗干扰机制

- **智能选频**：设备自动检测并规避受干扰频点；
- **收发异频率**：发射频点与接收频点不一致，避免自发自收干扰；
- **收发异频宽**：发射带宽与接收带宽不一致，进一步提升可靠性；
- **1000 次/秒跳频（定制功能）**：强干扰环境下的终极手段；
- **双频型号（7020-双频-30/40）**：通过两个频段动态实时频谱检测，各节点根据所处电子环境、干扰等因素，在预先设定的频率列表中智能动态调整自身工作频率，实现智能动态同频组网、异频组网、跨频段组网，有效自动躲避干扰。这是干扰环境复杂时的优选方案。
- **AES256 加密**：保障蜂群数据安全，防止链路被截获或注入虚假指令。

3.7 时间同步与定位协同

3.7.1 定位能力

蜂群协同需要精确的位置信息。本产品线中，

7020-33-PTT+WIFI+GPS 版本明确支持 GPS 北斗与地图显示功能：

- 设备提供 GPS 接口（MMCX × 1），接入 GPS 天线后可实现地图上显示设备的具体经纬度及位置信息；

- 网页管理界面提供地图页面，可直观查看各节点位置；配合网络拓扑界面，可同时看到在线设备 ID、链路状态信息与链路组网拓扑图。

3.7.2 蜂群协同的基础要求

蜂群协同（如编队保持、任务分配、避碰）依赖于：

- 各节点的实时位置与姿态；
- 统一的时间基准；
- 低时延的状态交换。

自组网本身提供 IP/MAC 网络透传功能，可透明承载各类协同协议；配合 GPS/北斗定位与设备的低时延特性，可支撑典型的蜂群协同应用。需注意：多跳会增加时延，对时延极度敏感的协同算法应尽量减少跳数或采用预判机制。

3.8 供电与结构安装

3.8.1 供电设计要点

平台	典型功耗	供电建议
母船（7100 系列）	68—105 W 常发	船电充足，按最不利工况配置；建议独立供电回路
中型无人船 （7030-35 / 7020-33）	20—40 W 常发	按船载电源配置；注意电池容量对续航的影响
小型无人船 （7020-27 / 30 / 双频-30）	8—15 W 常发	轻量化设计；7020-27 支持 9—30 V 宽压，适应性最好

3.8.2 结构安装要点

- 天线尽可能架高，远离金属船体与其他设备的遮挡；
- 多天线（MIMO）之间应保持足够间距，以实现有效的空间分集；
- 小型船空间有限，天线布局需避免相互遮挡；9020-27 重量仅 65 g、尺寸 44×61×20 mm，安装灵活性最好；
- 设备应固定牢靠，海上颠簸与冲击远大于陆地；
- 所有外露接口（SMA/MMCX/NK、网口、电源口）必须做防水密封处理。

第四章 设备配置清单

按平台类型给出配置

4.1 配置清单总表

平台类型	推荐型号	数量	关键配置	备选型号
母船 (指挥中枢)	ZumMesh 7100-4T4R-42 (IP65)	1 套	4 发 4 收; SMA-K × 4; 1000 M 网口 × 2; ≤460 g; 24—30 V; 峰值 224 Mbps @80 MHz	7100-2T4R-38 (≤360 g, ≤68 W, 252 Mbps @40 MHz); 7030-40 (IP65, 96 Mbps, 20 W)
中型无人船	ZumMesh 7030-35 或 7020-33-PTT+WIFI+GPS (均为 IP65)	按艇数	7030-35: 6 W, 96 Mbps, ≤250 g, 24—30 V, ≤40 W 7020-33 PTT 版: 4 W, 49 Mbps, ≤105 g, 24—28 V; 含语音/WIFI/GPS/地图	7020-35 (6 W); 7020-37 (10 W, ≤1500 g)
小型无人船	ZumMesh 7020-27 / 7020-30 / 7020-双频-30	按艇数	7020-27: 1.6 W, ≤65 g, 9—30 V, ≤10 W 7020-30: 3 W, ≤180 g, ≤15 W 双频-30: 0.8—1.6 W, ≤80 g, ≤8 W	7020-33 (4 W, ≤150 g)
岸基站	ZumMesh 7020-40 或 7030-40 (IP65)	1 套	20 W; 7020-40: 49 Mbps 峰值 7030-40: 96 Mbps 峰值	7020-46 / 7030-46 (80 W, 500 km 级)
应急/临时	ZumMesh SDR-HT / SDR-MT (手持/背负/室外/车载)	按需	点对点 70 Mbps; 32 节点以上; 即开即用	—

4.2 关键设备技术参数

4.2.1 ZumMesh 7100 系列 (母船 MIMO)

参数项	7100-2T4R-38	7100-4T4R-42
架构	2 发 4 收 (2T4R)	4 发 4 收 (4T4R)
发射功率	4 W/通道, 双发四收	4 W/通道, 四发四收
峰值速率	252 Mbps @40 MHz (2x2 MIMO) 分集 ≥112 Mbps @40 MHz	峰值 224 Mbps @80 MHz 252 Mbps @40 MHz (2x2 MIMO)
调制方式	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM/1024QAM (自适应)	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM/1024QAM (自适应)
带宽	1.25/2.5/5/10/20/40 MHz	1.25/2.5/5/10/20/40/80 MHz
频率范围	1350—1450 MHz	1350—1450 MHz
接收灵敏度	-109 dBm @1.25 MHz	-109 dBm @1.25 MHz
传输距离	城区 2 km / 郊区 4 km / 视距 ≤100 km	城区 3 km / 郊区 6 km / 视距 ≤150 km
节点跳数	2/4/8/12/16/32/64 节点; 1—N 跳	2/4/8/12/16/32/64 节点; 1—N 跳
组网时间	冷启动 40 秒入网	冷启动 40 秒入网
射频接口	SMA-K × 4	SMA-K × 4
网口	1000 M 以太网 PH2.0-8 × 2	1000 M 以太网 PH2.0-8 × 2

串口	双 RS232 + TTL 3.3 V	双 RS232 + TTL 3.3 V
整机功耗	≤68 W ±20 @常发; 13 W ±1 @待机	≤105 W ±20 @常发; 20 W ±1 @待机
外形尺寸	≤103×80×35 mm	≤103×92×38 mm
整机重量	≤360 g	≤460 g
工作电压	21—28 V	24—30 V
工作温度	-40℃ ~ +55℃	-40℃ ~ +55℃
防护等级	IP20/IP65	IP20/IP65

4.2.2 ZumMesh 7030 系列 (高带宽)

参数项	7030-35	7030-40
发射功率	6 W @ANT1+ANT2	20 W @ANT1+ANT2
峰值速率	96 Mbps @20 MHz	96 Mbps @20 MHz
传输速率	90@5 km; 70@10 km; 60@20 km; 25@50 km; 20@100 km	80@20 km; 65@50 km; 36@100 km; 22@150 km; 12@200 km
带宽	1.25/2.5/5/10/20/40 MHz	1.25/2.5/5/10/20/40 MHz
调制方式	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM (自适应)	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM (自适应)
接收灵敏度	-110 dBm @1.25 MHz	-110 dBm @1.25 MHz
传输距离	城区 4 km / 郊区 6 km / 视距 ≤150 km	城区 3 km / 郊区 6 km / 视距 ≤300 km
节点跳数	2—256 节点; 1—N 跳	2—256 节点; 1—N 跳
组网时间	冷启动 40 秒入网	冷启动 40 秒入网
射频接口	SMA × 2	SMA × 2
网口	10/100 M LAN1、LAN2	10/100 M LAN1、LAN2
整机功耗	≤40 W ±8 @常发; 5 W ±1 @待机	≤80 W ±20 @常发; 7 W ±1 @待机
外形尺寸	≤110×88×25 mm	≤175×106×28 mm
整机重量	≤250 g	≤520 g
工作电压	24—30 V	24—28 V
防护等级	IP20/IP65	IP20/IP65

4.2.3 ZumMesh 7020-33-PTT+WIFI+GPS (语音/定位/图传一体)

参数项	规格
特色功能	支持语音、WIFI、GPS 北斗、地图显示
发射功率	4 W @ANT1+ANT2
峰值速率	49 Mbps @20 MHz
传输速率	45@5 km; 35@10 km; 27@20 km; 10@50 km; 7@100 km
带宽	1.25/2.5/5/10/20 MHz 可配置
调制方式	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM (自适应)
接收灵敏度	-109 dBm @1.25 MHz
传输距离	城区 3 km / 郊区 3 km / 视距 ≤150 km
节点跳数	2/4/8/12/16/32/64/128/256 节点; 1—N 跳
组网时间	冷启动 40 秒入网
射频接口	自组网射频口 MMCX × 2; GPS 接口 MMCX × 1
手咪接口	TX+, TX-, RX+, RX-, 5V, PTT, LINE_IN, GND, SPL+, SPK-
供电接口	自上往下 GND, GND, GND, VCC, VCC, VCC
外部灯+串口	LED_R, GND, LED_G, TX1, GND, RX1, TX2, GND, RX2

工作电压	24—28 V
外形尺寸	≤83×60×10 mm
整机重量	≤105 g
整机功耗	≤80 W ±20 @常发；7 W ±1 @待机
工作温度	-40℃ ~ +55℃
防护等级	IP65

4.2.4 ZumMesh 7020 轻量化系列（小型无人船）

参数项	7020-27	7020-30	7020-双频-30
发射功率	1.6 W	3 W	0.8—1.6 W（1—1.6 W @ANT1+ANT2）
峰值速率	49 Mbps @20 MHz	49 Mbps @20 MHz	49 Mbps @20 MHz
传输速率	45@2 km；35@5 km； 30@10 km；5@20/30 km	45@5 km；34@10 km； 29@20 km；7@50 km；6@100 km	40@5 km；20@20 km；10@30 km
接收灵敏度	-109 dBm @1.25 MHz	-109 dBm @1.25 MHz	-106 dBm @1.25 MHz
传输距离	城区 3 km / 郊区 6 km / 视距 ≤50 km	城区 2 km / 郊区 4 km / 视距 ≤100 km	城区 2 km / 郊区 3 km / 视距 ≤300 km
整机功耗	≤10 W ±2 @常发 4.5 W ±1 @待机	≤15 W ±5 @常发 5 W ±1 @待机	≤8 W ±2 @常发 4.5 W ±1 @待机
外形尺寸	≤44×61×20 mm	≤93×81×22 mm	≤64×46×20 mm
整机重量	≤65 g	≤180 g	≤80 g
工作电压	9—30 V（宽压）	20—28 V	9—30 V（宽压）
射频接口	SMA × 2	SMA × 2	SMA × 4
节点跳数	2—256 节点	2—256 节点	2—256 节点
防护等级	IP20	IP20	IP20
特点	最轻最小， 宽压供电	功耗与性能均衡	双频智能选频， 自动躲避干扰

⚠ 关于 IP20 型号的部署限制 (重要)

- 7020-27、7020-30、7020-双频-30 的防护等级均为 IP20，不具备防水防尘能力。
- 若用于海上小型无人船，必须解决防护问题，可选方案：
 - (1) 安装在船体密封舱内，天线通过馈线引至舱外；
 - (2) 外加防水机箱（需注意散热与天线引出）；
 - (3) 若条件允许，优先选用提供 IP65 的型号。
- 切勿将 IP20 设备直接暴露在海上露天环境中。

第五章 典型编成配置案例

三种规模，三套配置

5.1 案例一：小型蜂群（8—12 艘）

适用场景

近岸测绘、港口巡检、环境监测等小规模任务。作业半径通常在 10—20 km 以内。

配置方案

平台	型号	数量	说明
母船	7100-2T4R-38（IP65）	1	2 发 4 收；≤360 g；≤68 W； 252 Mbps @40 MHz；千兆口
中型无人船	7030-35（IP65）	2—4	96 Mbps；≤250 g；≤40 W
小型无人船	7020-27 或 7020-30	6—8	按船体大小与供电选择； 需注意 IP20 防护
岸基	7020-40（IP65）	1（可选）	母船超出岸基视距时配置

能力评估

指标	评估	说明
节点总数	约 9—13 个	远低于 256 节点上限，无压力
带宽	充裕	母船 252 Mbps 峰值，可支撑多路视频
跳数	1—2 跳	小型蜂群多为星型接入母船，跳数少，时延低
多径应对	母船 MIMO 已覆盖	关键链路有保障

5.2 案例二：中型蜂群（20—30 艘）

适用场景

区域协同测绘、大面积巡检、多任务并行作业。作业半径可达 30—50 km。

配置方案

平台	型号	数量	说明
母船	7100-4T4R-42（IP65）	1	4 发 4 收；≤460 g；≤105 W； 224 Mbps @80 MHz；千兆口
中型无人船	7030-35 或 7020-33-PTT+WIFI+GPS	6—10	7030-35 用于高带宽； 7020-33 PTT 版用于需语音/定位的艇
小型无人船	7020-30 或 7020-双频-30	14—20	双频-30 适合干扰环境； 均需注意 IP20 防护
岸基	7030-40（IP65）	1	96 Mbps 高带宽回传

关键设计考虑

- 中型蜂群开始出现多跳场景，部分远处小型艇可能需要经由中型艇中继；
- 应启用业务优先级，确保控制指令不受视频回传挤占；
- 视频回传应限制并发路数，建议优先保障关键船只；
- 若使用 7020-33 PTT 版，可利用其语音功能实现船—船、船—岸的语音互通，以及通过地图页面查看各艇位置。

5.3 案例三：大型蜂群（50 艘以上）

适用场景

大规模协同作业、广域侦察、分布式探测。节点数量多，对网络的并发承载能力提出挑战。

配置方案

平台	型号	数量	说明
母船	7100-4T4R-42（IP65） + 7030-40（IP65）	各 1	7100 负责蜂群接入与抗多径； 7030-40 负责远距离回传
中型无人船 （分组骨干）	7030-35（IP65）	10—15	作为分组骨干， 承担组内汇聚与中继
小型无人船	7020-30 / 7020-双频- 30 / 7020-27	35+	按船型与供电分散配置
岸基	7030-46 或 7020-46	1（可 选）	80 W，500 km 级超远距离； 注意 7030-46 常发功耗 ≤240 W

△ 大规模蜂群的三个关键约束（必须提前认识）

- 节点规模上限：7100 系列支持 2—64 节点；7020/7030 系列支持 2—256 节点。若蜂群超过 64 艘，母船若只配 7100 系列将无法全部接入，需要配合 7020/7030 系列进行分组组网，或采用多母船/多接入点架构。
- 带宽收敛：节点越多、跳数越多，空口争抢越激烈，端到端可用带宽会明显下降。大规模蜂群应严格控制视频并发路数，大部分数据建议本地存储后择机回传。
- 同频干扰：海上无遮挡，所有节点互相可闻，大规模蜂群的空口协调难度显著高于陆地。此时应充分发挥 STDM 空间信道复用技术（可将网络效率提高约 50%）与智能选频的作用。

分组架构建议

对于 50 艘以上的大规模蜂群，建议采用分组架构：

层级	构成	职责	优势
接入层	小型无人船（7020 系列）	就近接入所属分组	分散空口压力
汇聚层	中型无人船（7030-35）	作为分组组长， 汇聚组内数据	减少直接接入母船的节点数
核心层	母船（7100 系列）	汇聚各组数据， 统一回传	MIMO 抗多径， 高带宽

第六章 实施与联调

从码头到海上

6.1 实施流程

阶段	工作内容	交付物	周期参考
一、需求确认	明确蜂群规模、船型、业务类型、作业半径、供电条件	《需求确认表》	3—5 天
二、方案设计	网络架构设计、型号选型、频率规划、供电与结构设计	《方案设计书》 《设备清单》	1 周
三、码头安装	设备上船安装、天线布放、供电接线、防护处理	《安装记录》	1—2 周
四、码头联调	陆上/港内完成组网与业务测试	《联调报告》	3—5 天
五、海上测试	出海实测、参数优化、验收	《海试报告》 《验收报告》	1—2 周

6.2 码头联调要点

★ **核心原则：能在陆地解决的问题，不要带到海上**

海上测试成本高、受天气与海况制约、且问题定位困难。因此必须在码头/港内完成尽可能充分的验证，把海上测试留给真正需要海上环境才能验证的项目。

码头联调应完成以下验证：

验证项	方法	合格标准
设备通电与自检	逐台通电，观察指示灯	电源灯（LED1）绿色常亮；设备正常启动
组网建立	全部设备上电，观察建链指示灯	建链指示灯（LED3）绿色；网络拓扑页面可见全部节点
网络拓扑确认	登录网页管理界面，查看网络拓扑	可看到在线设备 ID、链路状态信息、链路组网拓扑图
链路质量检查	查看拓扑图中的 SNR 与 MCS 指示	链路边上的数值表示接收 SNR 与对应 MCS；确认 SNR 处于合理水平
频谱扫描	使用频谱扫描功能	查看各节点的环境噪声 RSSI 平均值、突发干扰 RSSI 平均值和突发干扰比例
业务连通性	ping 测试、业务系统联调	控制指令与遥测数据收发正常
视频回传测试	开启多路视频回传	观察带宽占用与流畅度
GPS/地图功能（如配置）	接入 GPS 天线，查看地图页面	可显示设备经纬度与位置信息

6.3 海上测试与验收

海上测试需覆盖以下项目，这些是陆地无法完全验证的：

测试项目	测试方法	关注点
不同距离下的链路	蜂群按不同距离展开，记录各距离	确认实际通信距离是否满足作业半

质量	下的 SNR、MCS、实际速率	径要求
多径影响实测	在不同海况（浪高）下测试，观察信号起伏	验证 MIMO 分集对衰落的改善效果
移动中的链路保持	船只在机动状态下测试	拓扑重构是否平滑，有无频繁断链
多跳时延	测试不同跳数下的端到端时延	确认是否满足协同控制的时延要求
并发承载	全部节点同时上报 + 多路视频回传	观察带宽与优先级机制是否生效
极限距离	逐步拉远至链路临界	确认实际可用边界，为任务规划提供依据

△ 海试必须做满一个完整海况周期

- 海面反射特性随浪高显著变化，平静海况下的测试结果不能代表高海况下的表现。
- 建议在不同海况（至少包含一次较高浪高）下分别测试，摸清链路质量随海况的变化规律。
- 这对任务规划至关重要——需要知道在什么海况下通信可能受限，从而提前制定应对预案。

6.4 关键参数配置建议

基于手册中的参数说明，给出以下工程配置建议：

参数	建议	说明
Mesh ID	全网统一，推荐出厂默认	Mesh ID 一致才能组网
工作模式	智能选频；强干扰环境可选双频型号	默认有漫游、智能选频、单频点可选；可升级支持自适应跳频
频宽	带宽需求大：20 MHz (7030/7100 可用 40 MHz) 链路较差：10 MHz 或更小	频宽大则速率高，但灵敏度略降；10/20/40M 模式下建链设备会自行选择带宽
距离参数	按实际最远距离设置	距离设置越远，设备延迟越大；不宜盲目设大
异频/异带宽收发	链路质量不稳定时开启	默认关；开启后发射与接收可使用不同频点/带宽
MCS 门限	出厂默认 9 即可	设置高于 9 对最大带宽没有提升
断链信噪比	默认 -10	信噪比低于此值设备不会建链
优先级配置	启用，设置控制指令优先	可按端口、IP、协议设置优先级顺序，实现关键数据优先传输
加密	启用 AES256	可选不加密/AES256/DES；秘钥支持中文、长度不限
多跳增强	多跳场景按需开启	默认不开启，开启需 licence 升级支持
发射功率	按需配置，不宜盲目开最大	功率修改后立即生效；过大会增加干扰

第七章 运维保障

长期可用性

7.1 出航前检查清单

建议将以下检查标准化，每次出航前执行：

检查项	检查内容	方法
供电	电源电压在标称范围内；接线牢固	测量电压；检查接口
设备启动	所有节点正常启动	观察电源指示灯
组网	全部节点入网	登录管理界面查看网络拓扑
链路质量	SNR、MCS 处于正常水平	查看拓扑图数值
天线	天线牢固，无松动、无遮挡	目视检查
防护与密封	接口防水密封完好；无腐蚀迹象	目视检查接头；重点检查盐雾腐蚀
业务连通	控制指令、遥测、视频正常	业务系统联调
GPS（如配置）	定位正常，地图显示正确	查看地图页面

7.2 常见故障排查

故障现象	可能原因	排查方法
设备无法启动	供电故障、电压超出范围、接线错误	测量供电电压是否在标称范围内（注意各型号不同：7020-27 为 9—30 V，7100-2T4R-38 为 21—28 V 等）；检查电源口线序
无法建链	Mesh ID 不一致、频点/频宽配置不一致、距离过远、信噪比低于断链门限	核对 Mesh ID 与频率配置；检查断链信噪比设置（默认 -10）；缩短距离测试
链路时通时断	海面多径衰落、天线松动、供电不稳、干扰	检查天线紧固；使用频谱扫描查看干扰情况；启用智能选频；严重时考虑 MIMO 或双频型号
速率明显下降	距离增加、海况恶化、并发过多	查看 SNR 与 MCS；减少视频并发路数；检查是否有干扰
控制指令延迟	跳数过多、带宽被视频挤占、优先级未生效	减少跳数；检查优先级配置；限制视频带宽
设备腐蚀/进水	IP20 设备暴露、密封失效	立即更换为 IP65 型号或改善安装防护；检查所有接口密封

★ 利用管理界面快速定位问题

设备的网页管理界面提供了多项诊断能力，善用它们可以大幅提升排障效率：

- 网络拓扑页面：查看在线设备 ID、链路状态信息、组网拓扑图；节点后的百分比是发射时隙占比；连线上显示的数值（如 12/4）表示接收 SNR 为 12 dB、对应 MCS 为 4。
- 频谱扫描页面：查看环境噪声 RSSI 平均值、突发干扰 RSSI 平均值和突发干扰比例，用于判断是否受干扰影响。
- 地图页面：配合 GPS 天线查看设备位置。

第八章 风险与边界

不回避问题

8.1 技术风险

风险项	说明	应对措施
海面多径导致链路不稳	海面反射造成频率选择性衰落，是海上最主要的失效原因；平静海面反而可能更严重	关键节点采用 MIMO（7100 系列）；利用分集接收；适当提高天线高度
大规模蜂群带宽收敛	节点越多、跳数越多，端到端带宽下降越明显	分组架构；控制视频并发；本地存储 + 择机回传；发挥 STDM 空分复用
节点规模上限	7100 系列支持 2—64 节点， 7020/7030 系列支持 2—256 节点	超过 64 艘时需配合 7020/7030 组网或采用多接入点架构
IP20 型号的防护问题	多款轻量化型号为 IP20，不具备防水防尘能力	舱内安装 + 馈线引出；外加防水机箱；优先选 IP65 型号
功耗对续航的影响	通信设备功耗直接影响无人船续航	按续航倒推可用功耗；选择低功耗型号（7020-27≤10 W、双频-30≤8 W）
供电电压范围差异	各型号工作电压不同（9—30 V / 20—28 V / 21—28 V /24—28 V / 24—30 V）	设计时必须逐型号核对电压要求，避免接错烧毁

8.2 合规与安全

8.2.1 无线电频率使用

△ 频率使用必须合规（重要）

- 产品支持多个频段，但并非所有频段都可以自由使用。
- 在中国境内使用无线电发射设备，必须符合《中华人民共和国无线电管理条例》及国家无线电管理相关规定。
- 部分频段可能需要取得无线电频率使用许可或备案。
- 海上作业还可能涉及海事、渔业等部门的额外管理要求，以及沿海岸基地的协调。
- 在方案实施前，必须确认所选频段与发射功率的合规性，必要时向主管部门申请。建议由我司技术人员协助确认具体要求。

8.2.2 海上作业安全

- 天线安装需考虑抗风，海上风力远大于陆地；
- 桅杆高处作业需遵守高处作业安全规程；
- 设备固定必须牢靠，防止风浪颠簸导致脱落伤人；
- 供电系统需具备防水与短路保护。

8.2.3 数据安全

- 建议启用 AES256 加密，防止链路被截获或注入虚假指令；
- 蜂群控制指令的完整性直接关系到航行安全，必须防范恶意注入；

- 注意作业数据（测绘、侦察数据）的保密管理。

8.3 方案的能力边界

★ 明确说明本方案不做什么

第一，本方案不替代无人船自身的飞控与避碰系统——通信网络提供数据传输通道，不承担安全控制功能，安全必须由独立的控制系统保障。

第二，本方案不承诺在任意海况、任意距离下都能建立链路——海上链路受海况影响显著，实际能力必须经海试确认。

第三，本方案不解决无人船平台本身的供电、推进、导航问题，这些需由平台方解决。

第四，本文中的速率数据均为产品手册标称值（无遮挡理想条件），实际海上性能会低于标称值，具体折损需实测确定。

9.1 核心结论

- 第一，
- 海上蜂群通信的核心难点是海面多径，而非距离。**
- 海面强反射造成的频率选择性衰落是海上链路最主要的失效原因，平静海面下甚至可能更严重。这也是本方案在母船等关键节点采用 MIMO 分集接收的根本原因。
- 第二，
- 母船的高度与能源优势应该被充分利用。**
- 有人母船天然 是蜂群的最佳基站——天线更高、视距更好、供电更足。“母船为核”的架构可以减少跳数、降低时延、缓解带宽收敛。
- 第三，
- 两类业务必须在架构层面分离。**
- 协同控制遥测与视频载荷回传的技术特性截然不同。控制指令丢失的后果远比视频卡顿严重，必须通过优先级机制确保关键数据优先传输。
- 第四，
- IP65 在海上是硬约束，不是选项。**
- 盐雾与浪溅会迅速损坏不具备防护的设备。所有露天安装设备必须选用 IP65 型号，或采取可靠的舱内安装与密封措施。
- 第五，
- 大规模蜂群需要分组架构。**
- 节点规模存在上限（7100 系列 64 节点，7020/7030 系列 256 节点），且节点越多空口争抢越激烈。50 艘以上蜂群应采用“接入—汇聚—核心”分组架构。

9.2 推荐配置速查

平台	首选型号	备选	关键理由
母船	7100-4T4R-42（IP65）	7100-2T4R-38 / 7030-40	MIMO 抗海面多径；千兆口；224 Mbps
中型无人船	7030-35（IP65）	7020-33-PTT+WIFI+GPS	96 Mbps 高带宽 / 语音+定位+地图
小型无人船	7020-27 / 7020-30 / 7020-双频-30	7020-33	极轻（65 g）/ 均衡 / 双频抗干扰；注意 IP20 防护
岸基	7030-40（IP65）	7020-40 / 7030-46 / 7020-46	96 Mbps / 超远距离 500 km 级

9.3 建议的下一步

步骤	动作	预期成果	周期
第一步	确认蜂群规模、船型与供电条件	明确选型约束	3—5 天
第二步	方案设计与设备选型确认	《方案设计书》	1 周
第三步	小批量试点（1 母船 + 3—5 艘）	验证基本架构	2—3 周
第四步	码头联调 + 海试	实测数据，确认选型与参数	1—2 周
第五步	根据海试结果优化配置并规模化部署	完整系统交付	按规模

★ 关键建议：先做小规模海试，再规模化

海上无线链路的实际表现与陆地差异极大，且受海况影响显著。产品手册的速率数据均为无遮挡理想条件下的标称值，海上实际性能必然低于标称。

强烈建议先以小规模编成（1 艘母船 + 3—5 艘无人船）完成一次完整海试，实测不同海况下的 SNR、MCS、实际速率与多径影响，再确定最终选型与参数。

这样可以用很小的代价摸清真实能力边界，避免规模化部署后才发现选型偏差。

（本方案技术参数来源：《比特威自组网产品手册 2026》。文中速率、功耗、重量、防护等级等均为产品手册标称值，速率数据基于无遮挡理想条件，实际海上性能受海况、多径、距离、干扰等因素影响，必须以实测结果为准。无线电频率使用需符合国家相关规定及海事管理要求。）