

打通船舱"最后一米"：大连某港客货滚装船智能化改造无线自组网应用案例

几十台无人作业设备、多层密闭船舱、20 毫秒时延红线。当港口自动化从码头前沿推进到船舱内部，最先撞上的不是机械难题，而是一道无线通信的墙。

关键词： 智慧港口、MESH 自组网、无人集卡、船舱覆盖、低时延专网

一、项目背景：一座中韩客货滚装码头的转型压力

大连某港承担中韩客货滚装船运输业务，每日固定一班客货滚装船到港、离港，作业流程分为客运与货运两条主线：客运侧是到港旅客下船、新旅客登船，人员流动密集；货运侧则由船舱集装箱卸船、外部集装箱装船、正面吊港内外转运接驳、叉车舱内及港区短途转运四个环节串联而成。

长期以来，这套流程全部依靠"人工 + 有人驾驶车辆"完成。随着人口红利消退与港口业务量增长，三重压力日益凸显：



- **人力依赖成为结构性负担。** 叉车司机、装卸工、现场指挥手构成生产系统的核心驱动，也是唯一的柔性环节。高强度、高风险的现场作业对年轻一代吸引力持续下降，“招工难、用工荒”从季节性问题的演变为结构性困局，人工成本逐年攀升。更关键的是，作业能力被锁定在“人的生理极限”这个天花板下——想增产，就得成比例地加人。
- **午间停摆制造效率黑洞。** 司机午间高温时段、夜间疲惫时段必须休息，一个完整的作业日被切成两段。对每日固定一班的班轮而言，船舶在港的每一分钟都直接对应泊位利用率和船期准班率。午间数小时的全面停工，会连锁引发外部集卡排队加长、港内设备利用率下降、后期被迫抢工导致质量与安全风险上升。
- **船舱是长期被忽视的高风险作业场。** 空间密闭、金属结构密集、作业面狭窄，车辆尾气易积聚，高温季节中暑风险高；装卸工人与集卡、叉车在咫尺之间协同，完全依赖个人经验与手势指挥。一旦发生挤压、碰撞事故，不仅是个人的灾难，更直接导致作业中断。



二、真正的难题：船舱，无线信号的“坟墓”

如果说港口通信的难点在地面，那么“死穴”就在船舱。客货滚装船的船舱由多层厚钢板围成，本质

上是一个巨大的半封闭金属腔体，对无线电信号形成极强的反射、屏蔽与衰落。传统宏基站信号一入舱便急剧衰减，堪称"信号坟墓"。具体可拆为四个维度：

1) 金属屏蔽：从"信号衰减"到"覆盖盲区"

钢板舱壁、集装箱体、车辆金属外壳构成的环境，产生的不是普通衰减，而是接近"法拉第笼"的效应。电磁波遇到大面积金属表面时主要以反射而非穿透的方式传播，其结果不是信号变弱，而是在金属背面形成大片深衰落区甚至完全盲区。这从根本上否定了"用大功率硬穿金属层"的传统思路——功率再大也无法有效穿透层层钢铁，唯一的出路是把"穿透"改成"绕射"与"接力"。

2) 多层结构：垂直维度的信号隔离

船舱一甲、三甲、五甲分层布局，每层甲板本身就是一道厚重的金属屏障，层间穿透损耗通常在数十分贝以上，几乎等同于信号被完全阻隔。这意味着部署在某一层的基站无法自然覆盖另一层，必须在每层独立规划中继节点，形成垂直方向的"中继链"；同时层间有限的开口通道成为必须精确覆盖的"信号咽喉"，要靠可靠的纵向一跳把各层水平覆盖串联成三维网络。

3) 移动性：网络拓扑的持续高频震荡

无人集卡、机器人、正面吊全程移动作业，这些大型金属运动体本身就是移动的屏蔽体与反射面。一辆满载集装箱的集卡驶过，瞬间就会改变局部空间的信号传播路径，原本畅通的链路可能即刻劣化。网络拓扑处于持续的高频震荡之中，对漫游切换时延提出了极高要求。

4) 电磁环境：信噪比的持续恶化

港区大型电机、起重设备变频系统、船舶自身电气设备持续产生宽频带电磁干扰，抬高了整个空间的底噪水平。在链路预算中，"干扰余量"必须从配角变为主角——它直接压缩有效带宽、抬高误码率与时延。

这四类因素将无线系统逼入一个“极限三角”：强遮挡带来覆盖极限，高移动带来重建极限，强干扰带来容量极限，三者同时在船舱这一封闭空间内高密度叠加，传统的“覆盖—容量—移动性”平衡被完全打破。这也决定了本项目绝不可能靠通用商用 Wi-Fi 或蜂窝设备应对，必须是一套为工业极端环境设计的专用自组网系统。



三、方案设计：三级架构 + 双频双模分组

针对上述场景，本项目构建“中心总基站 + 船舱分层磁吸式中继基站 + 终端移动站”的三级无线 Mesh 自组网架构，采用 1.3GHz / 1.4GHz 双频物理隔离分两组承载业务。

3.1 三层网络架构

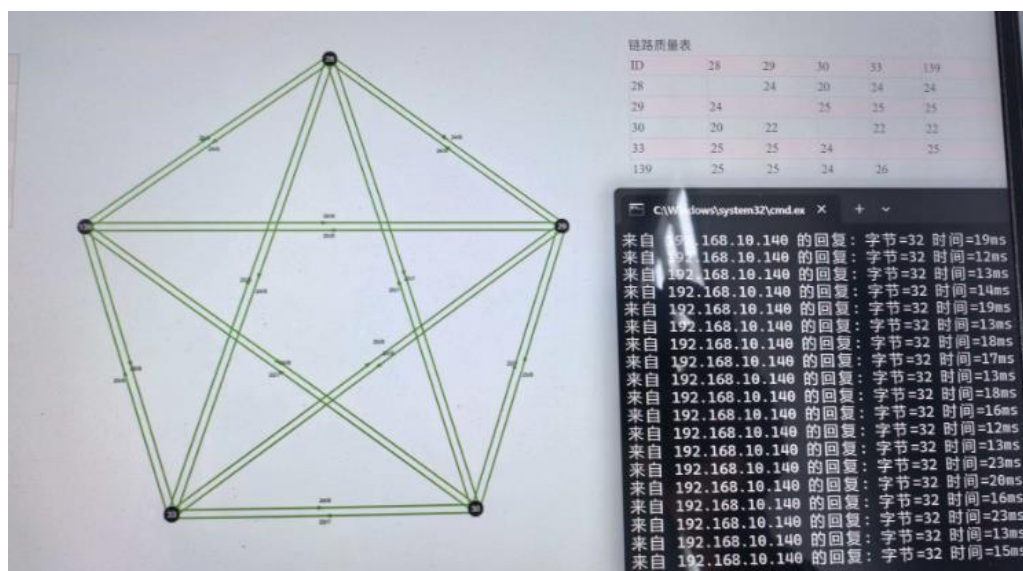
层级	设备	数量	定位与功能
核心汇聚层	多频基站	2 台	部署于指挥调度机房楼顶制高点，全网核心节点、数据汇聚中心与对外接口，同时支持 1.3GHz / 1.4GHz 双频工作
中继转发层	双频中继基站	5 套	分别部署于船舱和岸边码头和堆货区，负责区域信号中继、盲区补盲与多层转发，层间亦可互相中继
终端接入层	无线自组网移动站	30 台	30 台无人设备各搭载 1 台，采集运行数据与实时视频上传，接收并下达控制指令

业务传输路径清晰：上行方向为"移动站 → 就近中继基站/总基站 → 机房总基站 → 港口调度管控平台"；下行方向为"调度平台指令 → 总基站 → 中继基站/直连链路 → 移动站 → 设备执行"。

设备在港区开阔区域直连总基站，驶入船舱后自动无缝切换至就近层位的中继基站，通信不中断；

任意中继基站故障时，自动切换至其他层中继或直连总基站。

3.2 为什么一定是自组网



无线 Mesh 自组网"无中心、自组织、动态拓扑、多跳中继"的特性，恰好与船舱场景严丝合缝：

- **自中继破解遮挡。** 每一个节点都既是终端又是路由器，吸附在舱壁的中继站、车载移动站可互为中继，自动寻找最优路径把数据多跳传出舱外——不是硬穿金属层，而是绕开、层递穿透。
- **自发现自修复匹配动态节奏。** 客滚船每日固定一班，船只姿态、货物堆叠、水位线每天都在变，每一次靠港通信环境都是一次"变形"。自组网可在设备开机后自动完成拓扑识别与重构，某节点被遮挡或移位时整网立即自主修复，无需人工重新勘测布点。
- **无中心消除单点故障。** 网络生命力不依赖任一节点，这是 7×24 小时不间断运行的基石；后续新增设备只需开机入网即可自动接纳扩容。

3.4 磁吸式基站：不打一颗螺丝的船舱部署



船舶严禁打孔施工，这是船舱部署的硬约束。方案中船舱中继基站采用一体化强磁底座，直接吸附于船舱金属顶板或侧壁，无需打孔、不破坏船体结构，可通过船舶安全检查；吸附力强，车辆震动与船舶晃动不会脱落；可随装卸进度由机器人或工人灵活移位，快速形成穿透多层甲板的纵向通信链。设备具备防潮、防凝露、防尘能力，适配船舱高湿环境；舱内采用低压安全供电，线路隐蔽敷设。

四、关键指标与带宽验证

指标项	指标值
系统端到端传输时延	≤ 20 ms
单组实际有效带宽	90 Mbps
单台无人设备带宽占用	6 Mbps（极限 10 Mbps）
基站标称吞吐量	100 Mbps
接收灵敏度	-110 dBm @1.25MHz
工作温度	-40°C ~ +55°C
防护等级	IP20 / IP65 可选
连续运行能力	7 × 24 小时

时延保障通过三方面实现：采用低时延自组网协议并优化帧转发时延；本地中继优先转发、减少长距离跳数；引入带宽预留机制控制突发流量。全系统端到端时延稳定控制在 20 ms 以内，满足工业无人设备实时控制标准——这意味着漫游切换、路由重建等所有动作的总耗时，都必须压缩在这一个微小窗口内。

设备层面，自组网设备采用软件无线电（SDR）架构，支持无中心自组网，具备智能选频、收发异频率、收发异频宽等抗干扰机制，可选 1000 次/秒跳频与 AES256 加密，支持串口指令数据与

音视频数据同时传输，可适配无人机、机器人、无人船等多种无人平台。

五、应用价值

从“伪全天候”到真正的 7×24。 无人设备摆脱了对人的生理依赖，也摆脱了对单一中心基站的网络依赖。哪怕某辆集卡驶入信号死角，也能自动寻找周边设备作为中继，把数据跳传回控制中心。

午间高温、夜间疲惫不再成为停工理由，港口得以把“时间就是金钱”的法则发挥到极致。

打通自动化作业的“最后一米”盲区。 稳定可靠的智能作业从码头前沿真正延伸至船舱最深处，以往不敢碰、碰不了的舱内自动化成为现实，同时也解决了舱内作业人员遇险时求救信号发不出的安防短板。

绿色与私密兼得。 系统采用低功耗、低发射功率设计，一方面保护港区复杂的电磁环境，避免干扰船舶导航、通信等关键设备；另一方面降低信号被远距离截获的风险，天然增强网络私密性，为生产安全加码。

重塑人力资本。 无人化并非简单“机器换人”，而是把人力从危险、重复的体力劳动中解放出来。船舱壁上的通信设备、无人车上的移动站与背后的整套系统，需要有人设计部署、监控调优、数据分析——港口工人从握方向盘的司机，转变为监控大屏的调度员与维护机器人的工程师，工作环境从风吹日晒的驾驶室转到明亮的中控室。

一套可复制的样板。 集成了无人设备集群与抗干扰 Mesh 网络的完整系统，是未来“无人码头”的核心模组。它的落地验证了从装备、网络到控制的整套能力，对同类型客货滚装码头及“一带一路”沿线新兴港口的跨越式发展，具备直接的参考价值。

六、结语

智慧港口的竞争，正在从岸桥与堆场的自动化，下沉到船舱这个最恶劣、最复杂的场景。大连某港的实践给出了一条清晰路径：用一套无中心、自中继、自修复的无线 Mesh 自组网，为 17 台无人设备构筑起感知与控制的闭环，把覆盖、带宽与时延三项指标同时做实，再以磁吸式、免打孔的工程方式适配船舶运营规范。

网络不再是交付即结束的工程物，而是与业务共生、可自我维持的持续性服务。这正是比特威（bitwave）在无线自组网领域持续投入的方向——把确定性的连接，送到最需要它的地方。

本文为应用案例介绍，具体设备型号与技术参数以项目最终配置为准。了解更多请访问 www.bitwave.com.cn。