

基于 ZumMesh 7020-27 的蜂群无人机协同 数据链技术方案

产品型号： ZumMesh 7020-27 无线图数自组网电台

方案类型： 蜂群协同数据链系统

编制单位： 北京比特威电讯科技有限公司

日期： 2026 年 9 月

1 方案概述

1.1 编制目的

本方案针对中小型无人机集群（蜂群）执行分布式协同任务的通信保障需求，基于 ZumMesh 7020-27 无线图数自组网电台，给出蜂群协同数据链的组网架构、链路设计、容量规划、抗干扰体系与部署配置方案，为蜂群通信系统的选型论证与工程实施提供技术依据。

1.2 核心逻辑

蜂群的价值不在于单机性能的叠加，而在于"无中心、自组织、可容损"的协同能力。这种协同能力对通信系统提出了三个硬性要求：

协同需求	对通信的刚性要求	7020-27 对应能力
任一节点失效不影响整体	通信不能依赖单点	无中心自组网，256 节点
编队形态随时可变	拓扑变化自动收敛	冷启动 40 秒入网，动态路由
复杂电磁环境下可信	抗干扰 + 抗截获	1000 次/秒跳频，智能选频
多源数据实时融合	时延与带宽确定	49 Mbps@20MHz，<10ms 单跳

1.3 方案边界说明

本方案为**通信数据链技术方案**，内容覆盖组网架构、链路预算、带宽与时延指标、抗干扰设计、设备配置与安装要求。**不包含**任务载荷选型、作战战术设计、目标分配算法、毁伤评估方法等作战运用层面内容——这些属于任务系统与指挥控制范畴，需由相应的任务规划系统承担。本方案提供的是支撑上述系统的通信底座。

2 需求分析

2.1 任务场景对通信的需求

中小型无人机集群在中近程任务场景下的典型通信需求可归纳为四类：

(1) 编队协同数据。 各节点需周期性交换位置、速度、航向、任务状态与意图信息，以维持队形与避碰。该数据量小但对刷新率敏感，要求低时延、高可靠、周期性稳定。

(2) 载荷数据回传。 光电/红外载荷的实时视频是态势感知的主要来源。标清视频约 2 Mbps/路，高清视频 4~8 Mbps/路，是多节点组网中最主要的带宽消耗方。

(3) 指挥控制指令。 地面指挥端的任务指令、航线装订、载荷控制指令需要下行传输，要求高优先级、低时延、可确认。

(4) 集群状态汇聚。 全集群健康状态、链路质量、剩余资源等信息的汇聚，用于指挥端的态势显示与决策。

2.2 关键指标要求

指标项	要求值	说明
单跳传输时延	$\leq 10\text{ ms}$	满足编队协同实时性
端到端时延（3 跳内）	$\leq 50\text{ ms}$	含中继转发累计
单架业务带宽	$\geq 2.5\text{ Mbps}$	含遥测、视频、协同数据
组网规模	20 ~ 30 架	中队级编队
入网时间	$\leq 40\text{ s}$	满足快速部署
抗干扰	支持跳频与自动选频	应对复杂电磁环境
节点功耗	$\leq 10\text{ W}$	适配中小型无人机供电
节点重量	$\leq 100\text{ g}$	减少对载荷能力挤占

3 7020-27 产品能力分析

3.1 基本技术参数

ZumMesh 7020-27 采用软件无线电（SDR）架构，支持低频 MESH 无中心自组网，是面向无人机、机器人、无人船等无人平台设计的轻量化图数一体自组网电台。

射频特性

参数	规格
频率范围	608-678MHz / 790-820MHz / 1300-1400MHz / 1350-1450MHz / 1420-1530MHz / 1660-1710MHz / 2200-2300MHz / 2400-2500MHz / 3300-3500MHz / 3500-3700MHz / 3800-4000MHz / 4000-4200MHz
带宽	1.25 / 2.5 / 5 / 10 / 20 MHz 可配置
调制方式	QPSK / 16QAM / 64QAM / 256QAM（自适应）
峰值业务速率	49 Mbps @20MHz
发射功率	1.6 W（32 dBm）
接收灵敏度	-109 dBm @1.25MHz

参数	规格
跳频特性	1000 次/秒（定制功能）
加密	可选 AES256
抗干扰	智能选频 + 收发异频率 + 收发异频宽

组网能力

参数	规格
组网方式	点对点、点对多点、无中心自组网
节点规模	2 / 4 / 8 / 12 / 16 / 32 / 64 / 128 / 256 节点
跳数	1 / 2 / 3 / 4 / N 跳
组网时间	冷启动 40 秒入网
网络拓扑	无中心多点网络、链式网络
网络透传	支持 IP / MAC 网络透传

物理与环境

参数	规格
工作电压	9-30 V
外形尺寸	≤ 44 × 61 × 20 mm

参数	规格
整机重量	≤ 65 g
整机功耗	≤ 10 W ± 2 (常发) / 4.5 W ± 1 (待机)
工作温度	-40°C ~ +55°C
存储温度	-55°C ~ +125°C
防护等级	IP20

接口

- 射频接口：SMA × 2
- 电源/网口：HX15006-8AWB (VCC、VCC、GND、GND + 10/100M LAN: TX+、TX-、RX+、RX-)
- 串口：HX15006-12AWB (双 RS232: T0/GND/R0、T1/GND/R1; TTL3.3V: T2/GND/R2; SBUS: T3/GND/R3)
- 指示灯：LED1 电源、LED2 建链状态、LED3 网口状态

3.2 传输距离与带宽特性

规格书给出的实测带宽-距离特性如下：

通信距离	可用带宽	适用编队间隔

通信距离	可用带宽	适用编队间隔
2 km	47 Mbps	~20 m
5 km	37 Mbps	~30 m
10 km	30 Mbps	~60 m
20 km	15 Mbps	~200 m
30 km	5 Mbps	~500 m

工程解读： 该表揭示了一个关键约束——**随着通信距离增加，可用带宽快速衰减**。在 10 km 以内，单跳带宽尚有 30 Mbps 以上，足以支撑多路视频回传；但到 20 km 处带宽降至 15 Mbps、30 km 处仅剩 5 Mbps，此时仅能维持遥测指令与协同数据，视频回传能力大幅受限。

结论： 7020-27 的合理运用区间是**簇内短距 (30~200 m) = 高带宽**，长距骨干 (10 km 内) = 中带宽。这决定了蜂群必须采用**"近距离分簇 + 簇间中继"**的两级组网架构，而非简单星形或全对等扁平组网。

3.3 轻量化适配性

特性	数值	对无人机的意义
重量	≤ 65 g	对 5~25 kg 级中小型无人机，载荷挤占可忽略
功耗	≤ 10 W 常发	低于同类图传+数传双设备方案

特性	数值	对无人机的意义
尺寸	≤ 44×61×20 mm	可内置于机身或挂载于机腹
供电	9-30 V	直接取用机载 3S~6S 电池
接口	网口 + 双 RS232 + TTL + SBUS	同时对接飞控 (SBUS/TTL) 与任务载荷 (网口/RS232)

图数一体是 7020-27 在蜂群场景下的重要优势：**一路电台同时承载串口指令数据与音视频数据**，替代了传统“图传电台 + 数传电台”的双链路方案，减少了设备数量、重量、功耗与天线数量。

4 网络架构设计

4.1 架构选型依据

基于 3.2 节的带宽-距离分析，对 26 架规模的编队做容量测算：

业务带宽需求

业务类型	单架/单项带宽	说明
飞控遥测指令	0.05 Mbps	50 kbps, 100 Hz 级刷新
载荷状态回传	0.20 Mbps	载荷健康与状态
编队协同数据	0.30 Mbps	位置/速度/意图, 10 Hz 广播

业务类型	单架/单项带宽	说明
光电载荷视频	2.00 Mbps	标清，可降至 1 Mbps
单架合计	2.55 Mbps	—
指挥节点高清视频	4.00 Mbps	单路高清
目标指示/态势融合	1.00 Mbps	集群级共享

总体测算

- 26 架 × 2.55 Mbps + 5.00 Mbps（共享） = **71.30 Mbps**

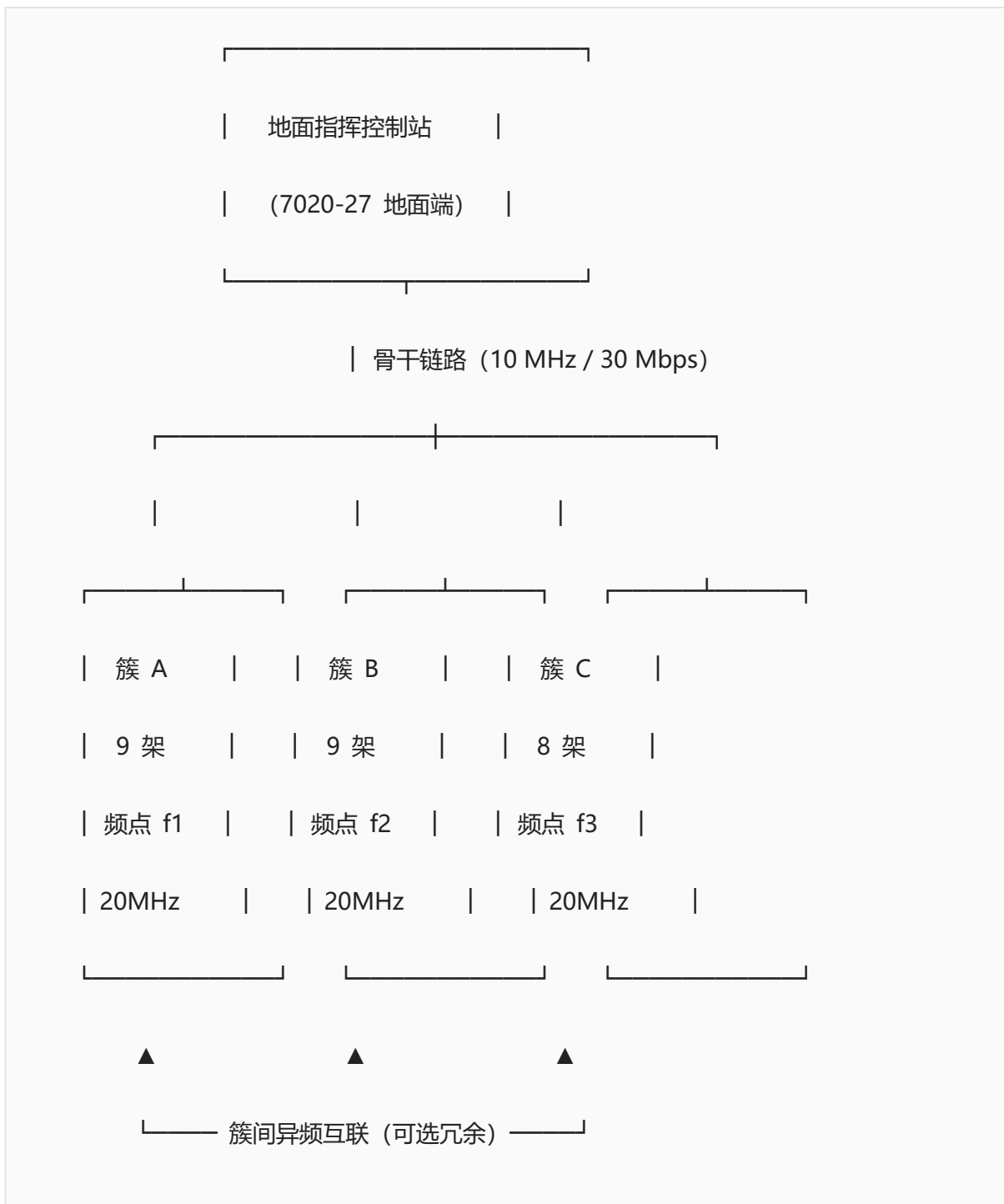
可用带宽（考虑协议开销与中继转发损耗）

转发跳数	效率系数	可用带宽	判定
单跳直连	0.90	44.1 Mbps	不足
1~2 跳中继	0.60	29.4 Mbps	不足
3~4 跳中继	0.45	22.1 Mbps	不足

结论：26 架设备若共用单一频点、单一逻辑网络，需求 71.3 Mbps 远超 7020-27 的 49 Mbps 峰值能力，必然出现拥塞与丢包。

4.2 两级分簇组网架构

基于上述测算，本方案采用“簇内 Mesh 对等 + 簇间骨干中继”的两级架构：



第一级：簇内 Mesh 网络

- 每簇 8~9 架，簇内所有节点地位对等，无中心节点
- 簇内使用独立频点（20 MHz 带宽），实现频率隔离

- 节点间单跳间隔 30~100 m，对应带宽 37~47 Mbps
- 簇内任意节点可直连，也可经 1~2 跳中继到达簇内其他节点

第二级：簇间骨干链路

- 每簇指定 1 架节点作为簇头，同时具备簇内通信与簇间中继能力
- 簇头与地面指挥站之间使用 10 MHz 带宽链路 (30 Mbps@10km)
- 各簇头可按需互联，形成簇间冗余路径

容量复核

项目	数值
单簇规模	9 架
单簇业务需求	$9 \times 2.55 = 22.95 \text{ Mbps}$
单簇可用带宽 (保守 60% 效率)	29.4 Mbps
剩余余量	6.45 Mbps (约 28%)
分簇数量	3 簇 ($9 + 9 + 8 = 26$ 架)
频点需求	3 个簇内频点 + 1 个骨干频点 = 4 个 (7020-27 支持 12 个频段，余量充裕)

单簇 9 架配置下，业务带宽占可用带宽的 78%，保留约 28% 余量用于突发流量与协议控制开销，属工程合理区间。

4.3 网络自愈机制

无中心架构下，网络的可靠性来自拓扑冗余而非单点加固：

故障场景	网络行为	业务影响
单架节点失效	相邻节点自动重选路径，绕开失效节点	该节点业务中断，其余不受影响
簇头失效	簇内节点自动选举新簇头，重建簇间链路	骨干链路短暂中断后恢复
频点受扰	智能选频自动切换至干净频点	切换期间秒级抖动
节点位置变化	动态路由实时更新路由表	业务连续，无需人工干预

这四种自愈行为均为设备内置能力，无需地面站介入，是蜂群"可容损"特性的通信基础。

5 链路预算与通信距离

5.1 链路参数

参数	数值	备注
发射功率	1.6 W（32.0 dBm）	规格书标称
天线增益	5 dBi	标配
系统 EIRP	37.0 dBm	发射功率 + 天线增益

参数	数值	备注
接收灵敏度	-109 dBm	@1.25MHz 带宽
理论链路余量	146 dB	EIRP - 灵敏度

5.2 分场景链路设计

场景	通信距离	带宽配置	实测带宽	主要业务	天线配置
簇内近距	30~100 m	20 MHz	47 Mbps	全业务（含视频）	全向 5 dBi
簇内中距	1~2 km	20 MHz	47 Mbps	全业务	全向 5 dBi
簇内远距	5 km	20 MHz	37 Mbps	全业务	全向 5 dBi
簇间骨干	10 km	10 MHz	30 Mbps	协同+视频 (降码率)	定向增益至 12~15 dBi
远程回传	20 km	5 MHz	15 Mbps	遥测+协同+ 单路视频	定向
极限回传	30 km	2.5 MHz	5 Mbps	遥测+协同指 令	定向

重要说明： 表中实测带宽为规格书给出的无遮挡标称值。实际部署中受地形、天线安装、机体遮挡、姿态变化等影响，应预留 3~6 dB 链路余量。建议在方案实施前进行现场拉距测试，以实测结果校核设计值。

5.3 中继跳数与性能衰减

多跳中继扩展了覆盖范围，但每一跳都会带来资源开销：

跳数	覆盖半径（30 m 间隔）	效率系数	可用带宽	端到端时延
1 跳（直连）	~100 m	0.90	44.1 Mbps	~10 ms
2 跳	~200 m	0.72	35.3 Mbps	~20 ms
3 跳	~300 m	0.60	29.4 Mbps	~30 ms
4 跳	~400 m	0.45	22.1 Mbps	~40 ms

设计原则： 簇内业务尽量控制在 2 跳以内，以保留带宽与时延余量；需要长距覆盖时，通过增加簇头（骨干节点）数量缩短跳数，而不是依赖多跳接力。

6 抗干扰与安全性设计

6.1 跳频抗干扰

7020-27 支持 1000 次/秒跳频（定制功能），单跳驻留时间 1 ms。

参数	数值	抗干扰意义
跳频速率	1000 次/秒	跳频间隔 1 ms
单跳驻留	1 ms	干扰方须在 1 ms 内完成检

参数	数值	抗干扰意义
		测-干扰-再检测
可用频段	12 个频段	跳频图案空间大
带宽配置	1.25~20 MHz	带宽可调，适应不同干扰环境

对窄带干扰，干扰方需覆盖全部工作带宽才能有效压制；对宽带压制式干扰，智能选频机制可自动切换至干净频段。

6.2 智能选频

设备内置频谱感知功能，实时监测各频点的干扰与底噪水平，在链路质量下降时自动切换至干净频点。这一机制的价值在于：**抗干扰能力不依赖固定的频率规划，而是网络对环境的自适应。**

6.3 收发异频率与异频宽

7020-27 的独有技术，发射与接收使用不同频率、不同带宽：

- **收发异频率**：干扰方难以同时压制收发两个方向；即使上行被干扰，下行指令仍可到达
- **收发异频宽**：收窄发宽（或反），提升对特定干扰型式的规避能力

6.4 加密与通信安全

- 支持 AES256 加密（可选配置）
- 网络透传支持 IP / MAC 层，可与上层加密体系叠加

- 无中心架构下无集中认证点，建议在应用层增加节点身份认证机制

安全设计建议： 本方案提供链路层加密能力。对于需要更高安全等级的任务，建议叠加应用层加密与节点身份管理，形成"链路层 + 应用层"的双层防护。

7 设备配置方案

7.1 单机配置

组件	型号/规格	数量	说明
自组网电台	ZumMesh 7020-27	1	图数一体，含网口/串口/SBUS
天线	5 dBi 全向	2	SMA 接口，分集配置
供电线束	9-30V	1	直接取用机载电源
数据线束	HX15006-8AWB + 12AWB	1 套	网口 + 串口 + SBUS

安装要求

- 天线安装于机体下方，避免被机身遮挡，两天线保持最大间距以形成空间分集
- 电台本体安装于机体内部，注意散热与减振
- 天线馈线尽量短，减少馈线损耗（每米馈线损耗建议控制在 0.2 dB 以内）

- SBUS 接口接飞控，网口/串口接任务载荷

7.2 编队配置总表 (26 架)

序号	节点角色	数量	频点	带宽	天线	说明
1	簇头/中继节点	3	骨干频点 (可切换)	10 MHz	全向+定向	兼簇内通信 与簇间中继
2	任务节点 (簇 A)	8	f1	20 MHz	全向	视频+遥测+ 协同
3	任务节点 (簇 B)	8	f2	20 MHz	全向	视频+遥测+ 协同
4	任务节点 (簇 C)	7	f3	20 MHz	全向	视频+遥测+ 协同
5	地面指挥端	1	骨干频点	10 MHz	定向	与簇头建立 骨干链路
合计	27	4 个频点	—	—	26 架机载 + 1 地面	

7.3 频点规划

频点	用途	建议频段	带宽	干扰隔离

频点	用途	建议频段	带宽	干扰隔离
f1	簇 A 簇内	1420-1530 MHz	20 MHz	与 f2、f3 物理隔离
f2	簇 B 簇内	1350-1450 MHz	20 MHz	与 f1、f3 物理隔离
f3	簇 C 簇内	1660-1710 MHz	20 MHz	与 f1、f2 物理隔离
f4	簇间骨干	2200-2300 MHz	10 MHz	与其他频点隔离

L 波段优势： 1420-1530 MHz、1350-1450 MHz 均属 L 波段，绕射能力优于 2.4G/5.8G，在复杂地形与低空突防场景下链路更稳定，且与常见商用通信设备频段错开，背景干扰低。

8 部署与实施

8.1 部署流程

阶段	内容	输出
1. 需求确认	编队规模、任务剖面、载荷配置、航程要求	需求确认书
2. 现场勘测	任务区域地形、电磁环境普查、干扰源定位	勘测报告

阶段	内容	输出
3. 频率规划	频点分配、带宽配置、跳频图 案规划	频率规划表
4. 地面联调	地面通电测试、入网测试、拉 距测试	联调记录
5. 装机测试	装机后地面测试、地面站链路 验证	装机测试报告
6. 飞行验证	分阶段飞行测试（单机→双机 →分簇→全编队）	飞行测试报告
7. 交付培训	操作规程、维护要点、故障处 置培训	培训记录 + 操作手册

8.2 关键测试项目

测试项	测试方法	合格判据
入网时间	全编队冷启动计时	$\leq 40\text{ s}$
单跳时延	环回时延测试	$\leq 10\text{ ms}$
端到端时延	端到端业务测试	$\leq 50\text{ ms}$ (3 跳内)
带宽验证	逐段吞吐量测试	满足分场景设计值

测试项	测试方法	合格判据
拉距测试	逐距离点测试至 20/30 km	记录实际带宽衰减曲线
自愈测试	主动关断节点/簇头	网络自动恢复，业务中断 < 10 s
抗干扰测试	加扰条件下的链路保持能力	跳频与选频功能正常动作
分簇隔离测试	验证簇间频率隔离度	邻簇无互扰

8.3 风险与对策

风险项	影响	对策
实际带宽低于标称值	视频卡顿、协同数据延迟	提前拉距测试；视频码率可降至 1 Mbps；必要时减少单簇节点数
机体遮挡导致链路中断	姿态变化时丢包	天线安装于机腹；双天线分集；姿态剧烈时自动降码率
编队规模超出单簇容量	拥塞、丢包	按 9 架/簇上限分簇，规模扩展时增加簇数而非单簇节点数
复杂电磁环境	链路质量下降	启用跳频与智能选频；任务前完成电磁环境普查

风险项	影响	对策
供电波动	电台复位、掉网	确认机载电源在 9-30 V 区间稳定；加装滤波

9 方案优势总结

9.1 技术优势

优势项	具体体现
无中心架构	无单点故障，任一节点失效不影响全网，天然适配蜂群的可容损需求
大容量组网	支持 256 节点、N 跳，本方案 26 架仅用其容量的 10%，扩展余量充足
图数一体	一路电台同时承载串口指令与音视频，替代双链路方案，减重减耗
强抗干扰	1000 次/秒跳频 + 智能选频 + 收发异频，多重机制叠加
轻量化	65 g / 10 W，对中小型无人机载荷能力挤占极小
快速部署	冷启动 40 秒入网，无需预设基础设施

优势项	具体体现
多频段可选	12 个频段覆盖 UHF 至 C 波段，便于频率规划与干扰规避

9.2 工程价值

(1) 为蜂群协同提供确定性通信底座。 通过分簇组网与频点隔离，将 26 架规模的通信需求分解为可计算的单元，避免了大编队扁平组网必然出现的拥塞问题。

(2) 边界清晰、可实施。 方案的每一项指标都对应产品实测参数，每一项设计都给出了容量验证依据，不存在无法验证的性能承诺。

(3) 具备规模扩展路径。 从 26 架扩展到 100 架以上时，只需增加簇的数量（每簇保持 8~9 架），架构不变、频点按 4 个一组的粒度扩展，7020-27 的 12 个频段与 256 节点能力可支撑至大队级规模。

10 结语

蜂群的本质是"分布式协同"，而分布式协同的前提是"每一架都能被可靠地连接"。

ZumMesh 7020-27 以 65 g 的重量、10 W 的功耗与 1.6 W 的发射功率，提供了 49 Mbps 的图数一体承载能力、256 节点的无中心组网规模与 1000 次/秒的跳频抗干扰手段。在本方案设计的两级分簇架构下，它能够 为 26 架规模的中队级编队提供时延可控、带宽充足、抗干扰可信的协同数据链。

通信不是蜂群作战的全部，但它是蜂群之所以成为"群"的那个前提。

北京比特威电讯科技有限公司

www.bitwave.com.cn

本方案中的设备参数引自 *ZumMesh 7020-27* 产品规格书；场景测算基于标称值推算，实际部署性能需以现场测试结果为准。