

特高压线路施工工地

无线自组网通信解决方案

把 5G 信号牵进大山深处

让每一座塔基上的工人都能上网、都能打通微信语音

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

特高压线路的塔基往往选址在远离村落的山区，施工队驻地在山谷之中，公网信号被地形完全遮挡。本方案以 ZumMesh 7020-40 作为主干链式中继、ZumMesh 7020-37 作为工地侧接入，在有 5G 信号的位置架设接收点，经山谷间逐跳中继，把公网“搬”到施工工地；工地侧再通过 Wi-Fi 覆盖营区与作业面，让工人手机正常联网、微信语音通话与日常上网均可使用。

目 录

CONTENTS

第一章 场景分析与需求定义

- 1.1 特高压线路施工的作业特征 塔基分布与施工组织
- 1.2 “没有信号”的三种成因 地形遮挡 / 距离过远 / 无基站
- 1.3 工地通信需求的真实画像 先搞清楚工人到底需要什么
- 1.4 需求量化：带宽、时延、并发 把感性需求变成工程指标

第二章 设计思路与技术选型

- 2.1 总体设计思路：把公网“搬”进山 信号延伸而非重新建网
- 2.2 设备选型依据 7020-40 与 7020-37 的分工逻辑
- 2.3 为什么用 Wi-Fi 做末端覆盖 最后一公里的技术选择
- 2.4 方案整体架构 三级结构：公网接入 / 山谷中继 / 工地覆盖

第三章 系统详细设计

- 3.1 公网接入点（山口节点）设计 CPE 与 7020-40 的配合
- 3.2 山谷中继链路设计 链式拓扑与中继选点原则
- 3.3 工地侧接入与 Wi-Fi 覆盖设计 7020-37 + AP 组网
- 3.4 语音业务承载设计 微信语音为什么能通
- 3.5 IP 地址与路由规划 全网统一编址
- 3.6 太阳能供电系统设计 野外长期自主供电
- 3.7 防雷与接地设计 山区高塔位的必修课

第四章 设备配置清单

- 4.1 配置清单总表 三类节点的设备构成
- 4.2 关键设备技术参数 数据手册核心指标

第五章 典型场景配置案例

- 5.1 案例一：单跳直达（ ≤ 20 km） 最经济配置
- 5.2 案例二：两跳到三跳（20—60 km） 最常见工况
- 5.3 案例三：多跳长链（60 km 以上） 深山区长距离

第六章 施工与实施

- 6.1 实施流程 六步交付
- 6.2 现场勘察要点 决定成败的关键工作
- 6.3 安装与调测要点 天线对准与链路调优
- 6.4 验收测试方法 可量化的验收标准

第七章 运维保障

- 7.1 日常巡检与远程维护 降低上山运维频次
- 7.2 常见故障排查 快速定位方法
- 7.3 扩容与迁移 随施工进度调整

第八章 风险与注意事项

- 8.1 技术风险 哪些情况可能导致方案不成立
- 8.2 合规与安全注意事项 频率使用与用电安全

第九章 结论

第一章 场景分析与需求定义

为什么施工队在大山里没有信号

1.1 特高压线路施工的作业特征

特高压输电线路（1000 kV 交流 / ± 800 kV 及以上直流）的施工具有几个鲜明的特征，这些特征直接决定了通信方案的设计约束：

- 线路长度通常数百至上千公里，途经大量山区、丘陵、峡谷；
- 塔基数量极多，一个标段往往包含数十至数百基铁塔；
- 塔基选址受线路走向约束，常常落在山脊、半山腰、甚至需要开山修路的无人区域；
- 施工队以班组为单位分散作业，驻地随施工进度推进而前移；
- 单基铁塔的施工周期从数天到数周不等，整个标段施工周期可达数月甚至跨年。

这些特征带来的直接后果是：

施工驻地与作业面，恰恰是公网覆盖最薄弱甚至完全没有的区域。

1.2 "没有信号"的三种成因

在制定方案前必须区分清楚：施工队“没有信号”到底是哪一种原因造成的。三种成因对应三种完全不同的解法。

成因类型	典型表现	技术本质	对应解法
地形遮挡型	手机显示有信号格，或在某个高坡上能打电话，下到工地上就没信号了	基站存在且距离不远，但山体遮挡了视距传播路径	本方案最适用的场景——在可见基站的高点架设接收设备，经自组网绕开山体遮挡引入谷地
距离过远型	手机完全无信号，附近没有任何基站覆盖	最近的基站距离数十公里以上，超出蜂窝有效覆盖半径	同样适用本方案——但需要确认“有信号的那个位置”距离工地多远，以决定中继跳数
无基站型	周边数十公里内运营商完全没有建设基站（极偏远无人区）	没有可延伸的源信号	本方案不成立——需要改用卫星通信或运营商临时基站，自组网可作为卫星链路的延伸段使用

△ 方案成立的前提条件（必须在勘察阶段确认）

- 必须存在一个“可到达且有可用公网信号”的接入位置——通常是附近山脊、高处、公路边或附近村落。
- 该位置到施工工地之间，需要存在可用于架设中继的制高点，或能够建立视距链路。
- 如果周边完全没有公网信号，本方案需要改为卫星链路的延伸段，不能作为公网延伸方案使用。

1.3 工地通信需求的真实画像

明确“工人要什么”是方案设计的前提。施工工地的通信需求可以分为四类，它们的重要性与技术要求差异很大：

需求类别	具体内容	使用频次	技术指标要求	优先级
语音通话	微信语音/视频通话、普通电	每天，集中在晚间	带宽需求极低（语音约 100	★★★

	话、与家人联系	休息时段	kbps/路），但对时延与抖动敏感；通话中断体验极差	最高
移动上网	刷短视频、看新闻、使用社交软件、收发图片	每天，晚间为高峰	有一定突发带宽需求；可容忍一定缓冲；高峰期并发集中	★★★ 高
办公与业务	项目部与业主/监理的邮件往来、施工资料上传、进度报表报送、安全巡查打卡	工作日，办公时段	数据量不大但不能丢失；需要稳定连接	★★★ 高
视频监控	工地安防监控、关键工序记录、远程技术指导	7×24 小时（监控）；按需（技术指导）	带宽消耗最大；可通过本地存储+择机回传优化	★★ 中

1.3.1 一个容易被忽略的现实：需求是“脉冲式”的

工地通信需求有一个非常显著的特征——

需求在时间上高度集中。

施工班组白天在塔基作业，晚间回到营地休息。这导致：视频通话、短视频、社交软件的使用集中爆发在晚间 19:00—23:00 这四五个小时；而白天时段带宽几乎闲置，主要用于办公数据与视频监控回传。

★ 这个特征对方案设计有直接影响

方案不需要按“峰值持续并发”设计容量，而应按“晚高峰并发”设计，并通过合理的带宽管理策略（白天优先保障业务数据与监控，晚间优先保障语音与上网体验）来提升整体满意度。这可以显著降低设备配置量，控制投资。

1.4 需求量化：带宽、时延、并发

1.4.1 语音业务的带宽测算

微信语音通话采用 Opus 等低码率语音编码，单工码率约 16—24 kbps，双向合计约 32—48 kbps，叠加 IP/UDP/RTP 封装开销后约 42—62 kbps。工程上按

每路语音 100 kbps 预留（含冗余）进行测算：

并发语音路数	所需净带宽	说明
5 路	约 0.5 Mbps	小规模班组
10 路	约 1 Mbps	典型班组规模
20 路	约 2 Mbps	中型施工队
30 路	约 3 Mbps	较集中驻地
50 路	约 5 Mbps	大型驻地 + 项目部

★ 关键结论：语音对带宽的要求极低，真正的瓶颈不在带宽

即使 50 路语音同时通话，也只需要约 5 Mbps 净带宽。而 ZUMESH 7020-40 在 20 km 距离上仍能提供 42 Mbps，在 100 km 距离上仍有 19 Mbps。也就是说，带宽本身远远不是约束。真正决定语音体验的是：链路时延是否稳定、空口调度能否保证语音包的优先与及时转发、以及是否存在严重的丢包与抖动。这也是选择具备确定性调度能力的自组网设备、而非普通网桥的根本原因。

1.4.2 综合带宽需求

业务类型	单用户/单点带宽	并发规模（晚高峰）	合计带宽
------	----------	-----------	------

微信语音通话	约 0.1 Mbps	10—30 路	1—3 Mbps
移动上网（浏览/社交）	0.5—2 Mbps	20—50 人	10—40 Mbps
短视频/视频通话	2—4 Mbps	5—15 人	10—40 Mbps
办公与业务数据	—	—	1—3 Mbps
视频监控回传	2—4 Mbps/路	2—6 路	4—24 Mbps
合计（晚高峰典型）	—	—	约 30—70 Mbps

这个测算结果说明：

主干链路的容量选择是方案经济性的关键。

如果按 30—70 Mbps 的高峰需求设计，则主干每一跳的可用带宽必须显著高于这个数字（考虑多跳递减与协议开销）。ZunMesh 7020-40 在 20 km 提供 42 Mbps、50 km 提供 28 Mbps，单跳即可满足；但在多跳链式结构中，带宽会随着跳数增加而逐跳递减（后文 3.2 节详细分析），这时就需要通过带宽管理策略来控制并发。

⚠ 多跳链路的带宽收敛效应（必须提前认识）

- 自组网在多跳链式拓扑下，中继节点需要同时接收和转发，空口资源被相邻链路共享，因此每增加一跳，端到端可用带宽会明显下降。
- 这不是设备缺陷，而是无线多跳网络的固有特性（吞吐量随跳数衰减）。
- 因此本方案在 6 跳以内建议控制在合理并发规模，并通过 AP 侧的带宽限速与优先级策略，确保语音与办公业务的体验不受上网流量挤占。

第二章 设计思路与技术选型

为什么选这套组合

2.1 总体设计思路：把公网“搬”进山

本方案的核心思路可以用一句话概括：

不在山里重新建网，而是把山外的公网“搬”进来。

具体来说，分三步：

- **取信号：**第一步，在有 5G 信号的位置（山脊、高处、公路沿线、附近村落）架设一个接入点，通过 5G CPE 把公网信号“取”下来，转换成标准以太网信号；
- **传信号：**第二步，用 ZumMesh 7020-40 组成链式无线中继链路，沿山谷间的制高点逐跳把信号传递到施工工地。7020-40 的 20 W 发射功率与 200 km 视距能力，正是为了应对山区长距离、跨山谷的传输需求；
- **用信号：**第三步，在工地侧用 ZumMesh 7020-37 作为接入节点，下挂 Wi-Fi AP 覆盖营地与主要作业面，工人的手机通过 Wi-Fi 接入，即可正常使用微信、上网、打语音电话。

★ 为什么“沿用公网”比自己建网更合适

施工工地的通信需求本质上是“接入公网”，而不是“建立一个独立网络”。工人需要的是微信、是家人的电话、是能刷到新闻——这些服务都在公网上。因此正确的做法是把公网信号延伸进来，而不是在工地内部自建一套只能内部互通的网络。这也决定了本方案的核心设备是“信号中继链路”而非“基站”。

2.2 设备选型依据

方案选用 ZumMesh 7020-40 与 7020-37 两款无线图数自组网电台。两者同属 7020 系列，采用相同的 SDR 架构与组网协议，但在发射功率、体积重量、功耗上形成梯度，恰好对应主干与接入两种角色。

2.2.1 两款设备关键参数对比

参数项	ZumMesh 7020-40	ZumMesh 7020-37
定位	主干 + 山谷中继	工地侧接入（用户端）
发射功率	20 W @ANT1+ANT2	10 W @ANT1+ANT2
接收灵敏度	-109 dBm @1.25 MHz	-109 dBm @1.25 MHz
峰值业务速率	49 Mbps @20 MHz	49 Mbps @20 MHz
20 km 传输速率	42 Mbps	34 Mbps
50 km 传输速率	28 Mbps	17 Mbps
100 km 传输速率	19 Mbps	14 Mbps
150 km 传输速率	12 Mbps	—
200 km 传输速率	7 Mbps	—
视距通讯距离	200—300 km	≤150 km
频宽支持	1.25 / 2.5 / 5 / 10 / 20 MHz	1.25 / 2.5 / 5 / 10 / 20 MHz
调制方式	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM（自适应）	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM（自适应）
组网能力	点对点、点对多点、无中心自组网	点对点、点对多点、无中心自组网
节点跳数	2/4/8/12/16/32/64/128/256 节点；1—N	2/4/8/12/16/32/64/128/256 节点；1—N

	跳	跳
组网时间	冷启动 40 秒入网	冷启动 40 秒入网
整机功耗	≤80 W ±20 @常发; 7 W ±1 @待机	≤45 W ±10 @常发; 6 W ±1 @待机
外形尺寸	≤265 × 191 × 48 mm	≤201 × 176 × 44 mm
整机重量	≤2200 g	≤1500 g
工作电压	24—28 V (DC24V)	24—28 V (DC24V)
工作温度	-40℃ ~ +55℃	-40℃ ~ +55℃
存储温度	-55℃ ~ +125℃	-55℃ ~ +125℃
防护等级	IP65	IP65
接口	2 个网口、2 个 RS232、1 个 TTL/SBUS	2 个网口、2 个 RS232、1 个 TTL/SBUS

2.2.2 选型逻辑：为什么主干用 -40，接入用 -37

这个分工不是随意指定的，而是由两者的能力梯度与角色需求共同决定的：

决策维度	主干/中继 (7020-40)	接入端 (7020-37)	理由
发射功率需求	需要 20 W 大功率	10 W 已足够	主干链路要跨越数十公里的山谷，需要更大功率克服自由空间损耗与雨衰；接入端与 AP/用户距离仅数百米
传输距离需求	需支持 100 km 以上	50 km 以内	-40 在 200 km 仍有 7 Mbps，-37 最佳工作距离在 50 km 以内
链路重要性	主干中断 = 全网中断	单点中断影响局部	主干需要更强的链路余量以应对雨雾衰减，大功率带来更高信噪比余量
供电约束	中继点位可用太阳能 + 大容量电池	工地侧供电条件更好	-40 常发功耗 ≤80 W，对太阳能系统要求更高；工地侧可用市电或发电机
重量与安装	2200 g，需固定杆塔	1500 g，可灵活部署	中继点通常在无人山顶，需一次性固定安装；接入点可能随工地移动

2.2.3 两款设备共同的抗干扰与可靠性能力

山区电磁环境虽然相对干净，但仍面临气象与地形带来的信号起伏。两款设备提供以下共同能力：

- 智能选频技术，可自动规避受干扰或质量下降的频点；
- **抗干扰**：收发异频率与收发异频宽技术（业内独有），大幅提高传输可靠性——这意味着收发可以工作在不同频率与不同带宽上，在链路质量波动时提供更强的适应能力；
- 可定制 1000 次/秒跳频功能，进一步提升抗干扰与抗截获能力；
- 可选择 AES256 加密，保障施工数据与办公通信安全；
- STDM 空间信道复用技术，将网络效率提高约 50%；
- 硬件满足军品级高低温环境要求，工作温度 -40℃ ~ +55℃，适应山区冬季严寒与夏季暴晒。

2.3 为什么用 Wi-Fi 做末端覆盖

方案在工地侧采用 Wi-Fi 作为用户接入方式，而不是让工人手机直接连接自组网电台。这是一个关键的架构决策，原因如下：

对比维度	手机直连自组网电台	Wi-Fi 覆盖（本方案）
------	-----------	---------------

终端兼容性	不可行——手机不支持该空口协议	全兼容——所有智能手机原生支持
用户接入数	不适用	单 AP 可支持数十用户；多 AP 可扩展
部署灵活性	不适用	AP 可随营区调整位置，覆盖灵活
成本	不适用	AP 成本低，可多处部署
管理能力	不适用	可做限速、优先级、接入认证
结论	技术上不可行	唯一可行的用户接入方式

因此，正确的架构是：

自组网负责“把公网引进来”，Wi-Fi 负责“把网络分给每个人”。

两者分工明确：自组网解决的是“点对点长距离传输”问题，Wi-Fi 解决的是“一对多短距离覆盖”问题。这是两个不同层次的问题，需要不同的技术手段，不能混为一谈。

2.4 方案整体架构

综合以上分析，方案的整体架构分为三级，另加供电与防雷两个支撑系统：

层级	名称	设备构成	部署位置	核心职责
第一级	公网接入层 (山口节点)	5G CPE + ZumMesh 7020-40	有公网信号的高处、山脊、公路边、村落	通过 5G CPE 获取公网信号，转换为以太网，送入自组网链路
第二级	山谷中继层 (中继节点 × N)	ZumMesh 7020-40 × N	山谷间制高点、山脊、可建视距链路的位置	链式逐跳中继，把信号从山口传递到工地；绕开山体遮挡
第三级	工地覆盖层 (工地节点)	ZumMesh 7020-37 + Wi-Fi AP	施工营地、项目部、主要作业面	接收中继链路信号，通过 Wi-Fi 覆盖营区；提供用户上网入口
支撑一	供电系统	太阳能板 + 蓄电池 + 控制器	每个野外节点	为 -40 / -37 提供 24 V 直流供电，保障阴雨天连续工作
支撑二	防雷接地系统	避雷针 + 防雷器 + 接地极	每个野外节点	保护设备免受雷击，山区高点是雷击高发区域

数据流向示意：

工人手机 → (Wi-Fi) → 工地 AP → 7020-37 → 7020-40 (中继 1) → 7020-40 (中继 2) → …… → 7020-40 (山口) → 5G CPE → 运营商基站 → 互联网 → 微信服务器

3.1 公网接入点（山口节点）设计

3.1.1 选址原则

山口节点是整个方案的源头。选址是否正确，直接决定方案能否成立。

- **信号可用：**必须实测确认有可用的公网信号（建议至少 -100 dBm 以上，并实测上行速率不低于 10 Mbps ）；
- **具备视距：**该位置到第一跳中继点之间需具备视距条件，或虽有遮挡但距离足够近；
- **可达性：**优先选择可通车或步行可达的位置，便于设备搬运与后续运维；
- **供电条件：**优先选择有市电或可铺设太阳能的位置，山口节点功耗较高（CPE + 7020-40 常发约 80 W ），供电是重点考虑因素；
- **电磁环境：**远离强干扰源（大功率无线电发射塔、高压变电站等），避免引入干扰。

3.1.2 设备连接方式

山口节点的设备连接关系如下：

- 5G CPE 的网口 → ZumMesh 7020-40 的 LAN1 网口；
- 7020-40 的另一网口可用于本地调试或预留；
- CPE 天线尽量架高并对准基站方向，避免被树木或地形遮挡；
- 7020-40 的射频接口（ $\text{NK} \times 2$ ）连接定向天线，对准第一跳中继点方向。

3.1.3 关键配置建议

配置项	建议值	说明
CPE 类型	5G 全网通工业级 CPE	支持多运营商自动切换，优先选信号最强网络
CPE 天线	高增益定向天线	山区弱信号环境，定向天线增益优势明显
7020-40 带宽设置	20 MHz（链路质量好时） 10 MHz（链路较差时）	带宽越大速率越高，但灵敏度与抗扰性略降
7020-40 频段选择	L 波段（1.3—1.5 GHz） 或 2.3/2.4 GHz	低频绕射能力较强，适合山区；高频天线更小、带宽更大
发射功率	按需设置，避免饱和	20 W 为最大能力，近距离链路应适当降低功率以减少干扰
加密	启用 AES256	保障施工数据与办公通信安全

3.2 山谷中继链路设计

3.2.1 链式拓扑的必然性

在山区环境中，为什么必须采用链式中继而不是星型结构？

星型结构要求所有节点都能直接与中心节点建立视距——这在平坦开阔地区可行，但在山区几乎不可能：山体、山脊、峡谷会形成大量遮挡，而施工工地位于谷底时，往往与山口节点之间隔着数道山梁。

因此山区必须采用

链式逐跳中继：把链路拆分为若干段短距离视距链路，每段都架设在相邻的制高点上，数据像接力一样逐跳传递。这样即使山谷蜿蜒曲折，也能通过“走高点”绕开地形遮挡。

3.2.2 中继点选址的三个原则

★ 原则一：每一跳都必须有可靠的视距 (LOS)

这是最重要的原则。中继点之间必须能“互相看见”。在山区，判断视距不能只看地图直线距离，必须考虑地形起伏——建议使用地形高程数据 (DEM) 做剖面分析，并在地面净空不足时，通过提高天线架设高度来恢复视距。同时要为菲涅尔区留出余量 (建议第一菲涅尔区至少 60% 无遮挡)。

★ 原则二：优先选择能架高的制高点

同样的距离，架高 10 米可能就决定了链路能否建立。山区应优先选择：山脊突出点、已有铁塔或通信杆塔 (可协商共用)、视野开阔的山顶。如果无法找到足够高的点，可考虑搭建临时桅杆。

★ 原则三：跳数受控，兼顾带宽与可靠性

每增加一跳，端到端可用带宽会递减，同时故障点和时延累积都在增加。建议在满足视距的前提下，尽量用更少的跳数覆盖更长距离——这正是选择 20 W、200 km 能力的 7020-40 作为主干的价值所在：它让原本需要 4—5 跳的路由缩减到 2—3 跳。

3.2.3 跳数与带宽的关系

自组网在链式多跳结构下，端到端吞吐会随跳数增加而下降，原因是中继节点需要同时接收与转发，相邻链路共享同一空口资源。以下是基于链路速率的工程估算 (实际值需现场测试)：

跳数	单跳可用带宽参考 (以 50 km 计)	端到端可用带宽工程估算	可支撑业务规模
1 跳	28 Mbps	约 20—25 Mbps	全部业务，含 6 路监控 + 大量上网
2 跳	28 Mbps	约 12—15 Mbps	语音 + 上网 (限速) + 2—3 路监控
3 跳	28 Mbps	约 8—10 Mbps	语音 + 上网 (限速) + 1—2 路监控
4 跳	28 Mbps	约 5—7 Mbps	语音 + 基础上网 (中高限速)
5 跳	28 Mbps	约 4—5 Mbps	语音优先 + 基础上网 (严格限速)
6 跳及以上	28 Mbps	约 3 Mbps 以下	仅保障语音与办公数据，上网需严格限速并按需开放

上表为工程估算，实际带宽受地形、气象、天线增益、干扰情况影响，应以现场实测为准。但可以看出一个明确的设计导向：

跳数应尽量控制在 4 跳以内，最好在 3 跳以内。

3.2.4 中继节点的设备配置

配置项	内容	说明
主设备	ZumMesh 7020-40	20 W 大功率，适合长距离中继
天线	两端各 1 面定向天线（NK 接口）	两跳方向各一面；若为链式中间点则为前后各一面
天线架设高度	视地形而定，优先争取更高	架高是恢复视距最有效的手段
供电	太阳能板 + 蓄电池 + 控制器	详见 3.6 节
防护	设备本身 IP65；机箱需防雨防尘	山区风沙与雨雪
避雷	避雷针 + 电源/信号防雷器 + 接地极	详见 3.7 节

3.3 工地侧接入与 Wi-Fi 覆盖设计

3.3.1 工地节点构成

工地节点是工人实际接入的地方，由自组网接入设备与 Wi-Fi 覆盖设备组成：

- **自组网接入：**ZumMesh 7020-37：接收来自最后一个中继节点的信号，向上连接中继链路，向下连接本地网络；
- **无线覆盖：**Wi-Fi AP（无线接入点）：连接 7020-37 的网口，向工人手机提供 Wi-Fi 接入；
- **本地汇聚：**千兆交换机：用于连接多个 AP、办公电脑、监控 NVR 等设备；
- **本地存储：**可选：本地监控存储（NVR），监控视频优先本地存储，择机回传。

3.3.2 Wi-Fi 覆盖设计要点

覆盖区域	AP 部署建议	覆盖目标	说明
施工营地	1—2 台 AP，部署在营地中央或地势较高处	宿舍区、食堂、活动区	工人主要活动区域，晚间并发最高，需重点保障
项目部办公区	1 台 AP	办公室、会议室	业务数据与视频会议，可设置较高优先级
主要作业面	按需部署，可用室外型 AP	塔基作业点	视施工需要灵活部署；可用定向 AP 覆盖固定作业区
材料场/仓库	1 台 AP（可选）	物资管理区	用于物资扫码、出入库管理

覆盖设计注意：

- 室外 AP 需选用工业级、宽温、防水防尘型号，建议 IP66 以上；
- **频段选择：**2.4 GHz 频段绕射能力较强，覆盖范围大，但干扰较多；5 GHz 频段带宽高但穿透差。建议双频 AP，营地内用 5 GHz 保证体验，室外扩展用 2.4 GHz；
- 同一区域多台 AP 应合理规划信道，避免同频干扰（2.4 GHz 建议使用 1/6/11 三个非重叠信道）；
- **信道规划：**山区营地可能有金属结构（集装箱房、板房），对信号有屏蔽，AP 位置应避免被金属结构包裹。

3.3.3 带宽管理与公平使用策略

考虑到多跳链路带宽有限，而晚间上网需求集中，必须通过技术手段做带宽管理：

策略	配置建议	目的
----	------	----

语音优先	识别 VoIP/实时业务流量并标记为最高优先级	确保微信语音不通话中断，这是工人最敏感的需求
单用户限速	每用户上行/下行各限制在合理区间	防止少数用户占满带宽，保障多数人可用
分时段策略	白天：优先业务数据与监控；晚间：优先语音与上网体验	匹配需求的脉冲式特征
视频限速	限制视频监控回传码率，或改在低峰时段回传	避免监控挤占人员上网带宽
接入认证	Wi-Fi 设置密码，或采用 MAC 白名单	避免外部人员占用带宽

3.4 语音业务承载设计

3.4.1 为什么微信语音能通

很多用户会担心：自组网是多跳链路，能否支撑实时语音？答案是肯定的，但需要理解其中的技术要点。语音业务的技术特征是：

带宽需求极小（约 100 kbps/路），但对时延与抖动敏感。

这意味着：从带宽角度，即使是 5 跳链路剩余的 4—5 Mbps 也足以支撑数十路语音；但在多跳链路上，如果空口调度不合理，语音包可能被大数据包（如下载、视频）阻塞，导致通话出现断续。

3.4.2 保障语音体验的四项措施

- **措施一：业务优先级标记**在 Wi-Fi AP 与交换机上启用 QoS，将语音流量标记为最高优先级。这是最有效的一项措施。
- **措施二：利用空口调度机制**选择 STDM 空间信道复用与资源调度能力较强的自组网设备。ZumMesh 7020 系列的 STDM 技术可将网络效率提高约 50%，在并发场景下能更有效地调度业务。
- **措施三：控制并发大流量**建议将语音通话高峰时段的上网速率适当限制（如每人 2—4 Mbps），避免大流量下载挤占整个链路。一般用户的语音通话体验对限速并不敏感，但对通话断续极为敏感。
- **措施四：合理配置频宽**将语音链路的频宽设置为较小的值（如 5 MHz），可获得更好的灵敏度与抗扰能力，虽然峰值速率降低，但语音本来也不需要大带宽。

★ 实践建议：建议在试点阶段做一次语音通话实测

在工地实际环境中，安排 10—20 人同时进行微信语音通话，观察是否出现断续、延迟、掉话。这是最直接的验证方法，比理论估算更可靠。如果体验不达标，优先调整 QoS 策略与限速参数，而非直接增加设备。

3.5 IP 地址与路由规划

ZumMesh 7020 系列支持 IP/MAC 网络透传功能，即自组网对上层业务是透明的，整个链路在逻辑上相当于一根“无形的网线”。因此网络规划相对简单：

项目	建议规划	说明
自组网网段	192.168.10.0/24	用于自组网设备管理
设备管理地址	192.168.10.11 起顺序分配	每台 7020 一个固定管理地址
工地用户网段	192.168.20.0/24	Wi-Fi 用户网段，由 AP 或路由器做 NAT
山口侧网段	由 5G CPE 分配或固定	建议 CPE 开启 DHCP，对下提供地址

DCHP	工地侧由本地路由器统一分配	便于管理
------	---------------	------

路由方面：由于 7020 系列支持网络透传，自组网内部的路由由设备自动完成（无中心自组网协议），用户侧无需配置静态路由。工地侧的 AP/路由器只需将默认网关指向自组网设备即可。

3.6 太阳能供电系统设计

3.6.1 为什么必须用太阳能

山谷中继点通常位于无人山顶，没有市电，也很少具备拉电条件。太阳能 + 蓄电池是野外长期自主供电的标准方案。

3.6.2 功耗测算

节点类型	设备构成	常发功耗	日耗电量 (按 24 h 计)
山口节点	5G CPE + 7020-40	CPE 约 10—20 W + 7020-40 约 80 W 合计约 90—100 W	约 2.2—2.4 kWh
中继节点 (7020-40)	7020-40	≤80 W ±20 @常发; 7 W ±1 @待机	约 1.9 kWh (按常发 80 W) 实际因业务空闲会自动降低
工地节点	7020-37 + AP + 交换机	7020-37 约 45 W + AP 约 15—30 W + 交换机约 10 W 合计约 70—85 W	约 1.7—2.0 kWh (工地侧通常有市电或发电机, 太阳能为备用)

△ 关于功耗的重要提醒

- 7020-40 的常发功耗 ≤80 W ±20，是设计中功耗最高的设备，直接决定太阳能板与蓄电池的配置规模。
- 实际运行中，设备在业务空闲时会进入较低功耗状态（待机约 7 W），因此实际日耗电量通常低于按常发估算的值。
- 但方案设计必须按最不利工况（连续阴雨天 + 满负荷运行）计算，否则会出现雨雪天气链路中断的问题。

3.6.3 太阳能系统配置方法

配置计算遵循以下逻辑：

- **第一步：计算日耗电**按设备的日耗电量（kWh）确定蓄电池容量，并预留连续的阴雨天续航（建议按 3—5 天设计）；
- **第二步：确定电池容量**蓄电池容量 = 日耗电量 × 续航天数 ÷ 放电深度 ÷ 系统电压。例如 7020-40 按 1.9 kWh/天、续航 3 天、铅酸电池放电深度 0.5 计算： $1.9 \times 3 \div 0.5 = 11.4 \text{ kWh}$ ，按 24 V 系统则约 475 Ah。
- **第三步：确定太阳能板**太阳能板功率 = 日耗电量 ÷ 有效日照小时数 ÷ 充电效率。山区有效日照按 3—4 小时（保守取值）计算： $1.9 \div 3.5 \div 0.8 \approx 0.68 \text{ kW}$ ，考虑到冬季衰减与灰尘，建议配置 800 W—1 kW。
- **第四步：选择控制器**选择 MPPT 太阳能控制器，支持 24 V 系统，具备过充、过放、防反接保护。

节点类型	太阳能板 (建议)	蓄电池 (24 V, 建议)	说明
山口节点	1.2—1.5 kW	500—600 Ah	功耗最高, 需最大配置
中继节点	800 W—1 kW	450—500 Ah	按 3—5 天续航设计
工地节点	600 W—1 kW	300—400 Ah	通常有市电/发电机, 太阳能 为备用与过渡

以上为工程估算, 实际配置需根据当地纬度、年均日照时数、冬季最不利工况、以及节点实际业务负载进行调整。
在北方高纬度山区, 太阳能板与电池配置应显著加大。

3.7 防雷与接地设计

山区制高点往往是雷击高发区域, 而中继节点恰恰必须架设在这些位置。防雷是保障长期可靠运行的必修课, 绝不能省略。

防护环节	措施	说明
直击雷防护	架设避雷针, 保护角覆盖天线与设备	避雷针高度需使被保护物处于其保护范围内; 天线应尽量在避雷针保护角内
电源防雷	在直流供电回路加装电源防雷器	太阳能控制器输出与设备之间加装; 建议两级防护
信号防雷	网口与射频口加装信号防雷器	网线进设备前加装网络防雷器; 射频口使用同轴防雷器
接地系统	独立接地极, 接地电阻尽可能低	山区土壤电阻率高, 可采用多根接地棒 + 降阻剂; 建议接地电阻控制在 $10\ \Omega$ 以内
等电位连接	设备外壳、机箱、天线支架、太阳能支架统一接地	避免地电位差损坏设备

⚠ 山区防雷的三条实战经验

- 天线支架、避雷针、设备机箱共用一个接地系统, 不要分开接地——分开接地会形成地电位差, 反而更容易损坏设备。
- 所有进出机箱的线缆 (电源线、网线、射频线) 都必须经过防雷器, 任何一条漏掉都可能成为雷击的入侵通道。
- 接地电阻不是越低越好地无限追求, 山区达到 $10\ \Omega$ 以内即可满足要求, 盲目施工会大幅增加成本。

第四章 设备配置清单

按节点类型给出配置

4.1 配置清单总表

下表给出每类节点的标准配置。实际数量需根据链路跳数与覆盖范围确定。

节点类型	主要设备	辅助设备	数量参考
山口节点 (公网接入)	ZumMesh 7020-40 × 1 5G CPE × 1	定向天线 × 1 太阳能板 + 蓄电池 + 控制器 避雷针 + 防雷器 + 接地极 设备机箱 (防水防尘) 立杆或桅杆	每方案 1 个
中继节点 (山谷中继)	ZumMesh 7020-40 × 1	定向天线 × 2 (前后各一) 太阳能板 + 蓄电池 + 控制器 避雷针 + 防雷器 + 接地极 设备机箱 立杆或桅杆	按链路需求, 约 1—5 个
工地节点 (用户接入)	ZumMesh 7020-37 × 1 Wi-Fi AP × 1—3 千兆交换机 × 1	定向天线 × 1 (对准中继) 全向天线 × 1 (Wi-Fi) 太阳能板 + 蓄电池 (备用) 避雷针 + 防雷器 + 接地极 设备机箱 (可选) NVR 本地存储	每工地 1 套 (AP 按覆盖区域增加)

4.2 关键设备技术参数

4.2.1 ZumMesh 7020-40 (主干/中继)

参数项	规格
架构	软件无线电 (SDR) 架构, 低频 MESH 无中心自组网
发射功率	20 W @ANT1+ANT2
接收灵敏度	-109 dBm @1.25 MHz
频宽	1.25 / 2.5 / 5 / 10 / 20 MHz 可配置
峰值业务速率	49 Mbps @20 MHz
传输速率	42 Mbps@20 km; 28 Mbps@50 km; 19 Mbps@100 km; 12 Mbps@150 km; 7 Mbps@200 km
调制方式	QPSK / 16QAM / 64QAM / 256QAM (自适应)
频率范围	635—675 MHz / 790—820 MHz / 1300—1400 MHz / 1350—1450 MHz / 1420—1530 MHz / 1660—1710 MHz / 2200—2300 MHz / 2400—2500 MHz / 3300—3500 MHz / 3500—3700 MHz / 3800—4000 MHz / 4000—4200 MHz
组网能力	点对点、点对多点、无中心自组网
节点跳数	支持 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
网络拓扑	无中心多点网络、链式网络
网络透传	支持 IP / MAC 网络透传功能
抗干扰	智能选频 + 收发异频率 + 收发异频宽

跳频特性	1000 次/秒 @智能跳频选频（定制功能）
加密	可选择 AES256 加密
接口	2 个网口（10/100M LAN1、LAN2）、2 个 RS232、1 个 TTL 或 1 个 SBUS
射频接口	NK × 2
工作电压	24—28 V（内部 XT30PW-M，DC24V）
整机功耗	≤80 W ±20 @常发；7 W ±1 @待机
外形尺寸	≤265 × 191 × 48 mm
整机重量	≤2200 g
工作温度	-40℃ ~ +55℃
存储温度	-55℃ ~ +125℃
防护等级	IP65（另有 IP20 可选）

4.2.2 ZumMesh 7020-37 (工地接入)

参数项	规格
架构	软件无线电（SDR）架构，低频 MESH 无中心自组网
发射功率	10 W @ANT1+ANT2
接收灵敏度	-109 dBm @1.25 MHz
频宽	1.25 / 2.5 / 5 / 10 / 20 MHz 可配置
峰值业务速率	49 Mbps @20 MHz
传输速率	45 Mbps@10 km; 34 Mbps@20 km; 17 Mbps@50 km; 14 Mbps@100 km
调制方式	QPSK / 16QAM / 64QAM / 256QAM（自适应）
频率范围	635—675 MHz / 790—820 MHz / 1300—1400 MHz / 1350—1450 MHz / 1420—1530 MHz / 1660—1710 MHz / 2200—2300 MHz / 2400—2500 MHz
组网能力	点对点、点对多点、无中心自组网
节点跳数	支持 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
网络拓扑	无中心多点网络、链式网络
网络透传	支持 IP / MAC 网络透传功能
抗干扰	智能选频 + 收发异频率 + 收发异频宽
跳频特性	1000 次/秒 @智能跳频选频（定制功能）
加密	可选择 AES256 加密
接口	2 个网口、2 个 RS232、1 个 TTL 或 1 个 SBUS
射频接口	NK × 2
工作电压	24—28 V
整机功耗	≤45 W ±10 @常发；6 W ±1 @待机
外形尺寸	≤201 × 176 × 44 mm
整机重量	≤1500 g
工作温度	-40℃ ~ +55℃
存储温度	-55℃ ~ +125℃
防护等级	IP65（另有 IP20 可选）

第五章 典型场景配置案例

三种距离，三套配置

以下三个案例覆盖了特高压施工中最常见的情形。实际项目请根据勘察结果套用并调整。

5.1 案例一：单跳直达（≤20 km）

场景描述

施工工地距离有公网信号的位置较近（20 km 以内），中间地形相对开阔，或工地本身位于山腰有视距条件，不需要设置中继节点。

配置方案

位置	设备配置	说明
山口节点	5G CPE × 1 + 7020-40 × 1 + 定向天线	获取公网信号并送入自组网
工地节点	7020-37 × 1 + Wi-Fi AP × 2 + 交换机 × 1	直接接收山口节点信号，覆盖营地

链路预算

指标	数值	说明
链路距离	≤20 km	—
7020-40 侧速率	42 Mbps	数据手册标称值
7020-37 侧速率	34 Mbps	数据手册标称值
链路瓶颈	34 Mbps	取两端较小值
可支撑业务	语音 + 大量上网 + 6 路监控	带宽充裕，体验接近正常宽带

★ 这是最经济、体验最好的配置

单跳直达没有带宽收敛损失，端到端可用带宽基本等于单跳速率。在这种配置下，工人的上网与语音体验几乎与正常环境无异，甚至可支撑视频通话与短视频流畅播放。如果勘察结果允许，应优先争取单跳方案。

5.2 案例二：两跳到三跳（20—60 km）

场景描述

这是最常见的工况：施工工地位于山谷之中，距离公网覆盖区 20—60 km，中间有 1—2 道山梁遮挡，需要在山脊上设置 1—2 个中继点。

配置方案

位置	设备配置	说明
山口节点	5G CPE × 1 + 7020-40 × 1 + 定向天线	公网接入
中继点 1	7020-40 × 1 + 定向天线 × 2 + 太阳能系统	山脊制高点，朝前后各一面天

		线
中继点 2（如需）	$7020-40 \times 1 + \text{定向天线} \times 2 + \text{太阳能系统}$	第二道山梁
工地节点	$7020-37 \times 1 + \text{Wi-Fi AP} \times 2-3 + \text{交换机} \times 1$	覆盖营地与作业面

链路预算

指标	2 跳配置	3 跳配置	说明
单跳距离	约 20—30 km	约 15—20 km	各跳距离可不等
单跳速率	约 28—42 Mbps	约 34—42 Mbps	视具体距离
端到端估算	约 12—15 Mbps	约 8—10 Mbps	工程估算值
可支撑业务	语音 + 上网（限速） + 2—3 路监控	语音 + 上网（限速） + 1—2 路监控	需配合带宽管理策略

两到三跳是投资与体验的平衡点。在此配置下，建议启用带宽管理：单用户限速、语音优先标记、监控视频改在低谷时段回传。

5.3 案例三：多跳长链（60 km 以上）

场景描述

施工工地位于深山，距离最近可用公网信号 60 km 以上，中间地形复杂，需要 4 跳及以上中继。

配置方案

位置	设备配置	说明
山口节点	$5G \text{ CPE} \times 1 + 7020-40 \times 1$	公网接入
中继点 $\times 4-5$	$7020-40 \times 4-5 + \text{太阳能系统}$	沿山脊依次布设，每点朝前后各一面天线
工地节点	$7020-37 \times 1 + \text{Wi-Fi AP} \times 2-3 + \text{交换机}$	覆盖营地

链路预算与业务策略

指标	数值	说明
跳数	4—6 跳	尽量控制在 6 跳以内
端到端估算带宽	约 3—7 Mbps	工程估算值
语音业务	优先保障，10—20 路可用	语音仅需约 0.1 Mbps/路，带宽不是瓶颈
办公业务	保障，可正常使用	邮件、报表、打卡等
移动上网	严格限速，按需开放	建议每人限速 1—2 Mbps，或设置上网时段
视频监控	改为本地存储 + 择机回传	避免挤占人员业务带宽

⚠

多跳长链的三个注意点

- 建议在条件允许时，用更大功率的 7020-40 与更高增益天线，把 5—6 跳压缩为 3—4 跳——减少一跳的收益远大于优化其他参数。

- 多跳链路的任何一跳中断都会导致整条链路中断，因此必须做好供电冗余（太阳能 + 大容量电池）与防雷，野外节点的可靠性比带宽更重要。
- 多跳配置下应明确业务优先级：语音与办公业务必须保障，上网业务可协商降级。建议提前与工人沟通预期，避免体验落差。

第六章 施工与实施

从勘察到验收

6.1 实施流程

阶段	工作内容	交付物	周期参考
一、需求确认	明确施工标段分布、营地位置、公网可用位置、链路大致距离	《需求确认表》	3—5 天
二、现场勘察	公网信号实测、地形剖面分析、中继点选点、供电条件确认	《勘察报告》 《选点方案》	1—2 周
三、链路设计与仿真	链路预算计算、跳数优化、设备配置确定	《链路设计方案》 《设备清单》	3—5 天
四、设备安装	立杆/桅杆架设、设备固定、天线安装、太阳能与防雷施工	《安装记录》	2—4 周
五、链路调测	逐跳对通、带宽测试、语音与上网实测、参数优化	《调测报告》	1—2 周
六、交付验收	验收测试、运维培训、文档移交	《验收报告》 《运维手册》	1 周

6.2 现场勘察要点

6.2.1 公网信号勘察（最重要）

- 在候选的接入点位置，用手机或专业设备实测各运营商的信号强度；
- 实测信号质量：RSRP、SINR 等指标，不能只看“信号格数”；
- 实测上行与下行速率（建议用测速工具多测几次取平均）；
- 测试时间应覆盖不同时段，避免只在信号好的时段测量；
- 记录实测位置坐标，便于后续架设时准确复现。

⚠ 公网信号勘察的三个常见错误

- 只看手机信号格数就判断可用——信号格是粗略指示，实际速率可能远低于预期。必须实测速率。
- 只在单一时段测试——蜂窝网络负载随时间变化，晚间高峰可能显著劣化。
- 没有记录具体位置——架设时找不到当初测试的那个“信号好的位置”。必须用 GPS 记录坐标。

6.2.2 地形与视距勘察

- 确认候选中继点的位置、海拔高度、是否具备架设条件；
- 分析各段链路的视距情况，建议使用地形高程数据做剖面分析；
- 现场实地观察：站在候选中继点，能否肉眼看到下一跳位置（天气晴好时）；
- 注意植被：树木生长会遮挡链路，应预留生长余量或选择高于树冠的位置。

6.2.3 供电与施工条件

- 中继点是否可达（步行/车辆/索道），决定设备运输方式；

- 太阳能板的安装朝向与日照条件；
- 土壤条件（影响接地施工难度）；
- 是否需要新建立杆或可利用现有杆塔（如铁塔、通信杆）。

6.3 安装与调测要点

6.3.1 天线对准

天线对准是链路能否建立的关键，尤其在长距离链路上，几度的偏差就可能导致信号显著下降。

- 先用指南针与地图确定大致方位角，再逐步微调；
- 两人配合：一端固定，另一端缓慢转动，通过设备指示灯（LED2 信号强度指示灯）观察信号强度变化——从强到弱依次为绿色、黄色、红色、无；
- 也可以在一端用手机/对讲机与另一端实时沟通，边转边报信号强度；
- 找到最大值后，锁紧天线，再微调俯仰角，反复几次取最优。

6.3.2 参数配置

参数	配置建议	说明
频段	优先选 L 波段（1.3—1.5 GHz）	低频绕射能力强，适合山区非视距场景；若视距良好可选更高频段
频宽	链路质量好：20 MHz 链路较差：10 或 5 MHz	频宽小则灵敏度更高、更抗扰，但速率降低
发射功率	长距离用满功率（20 W） 近距离适当降低	避免过强信号造成邻道干扰
加密	启用 AES256	保障数据安全
路由/跳数	按拓扑配置	链式拓扑需正确配置节点关系

6.4 验收测试方法

验收必须用可量化的指标，而不是“能上网就行”。建议测试以下项目：

测试项目	测试方法	合格标准（建议）
逐跳链路速率	在相邻两节点间用 iperf 等工具测试	达到该距离对应标称速率的合理比例
端到端带宽	从工地节点到山口节点测试	满足业务需求（参考第三章带宽估算）
时延与抖动	连续 ping 测试，记录平均值与波动	平均时延合理，抖动小
丢包率	长时间 ping 测试（建议 1 小时以上）	丢包率低，且无规律性丢包
语音通话实测	组织 10—20 人同时微信语音通话	无明显断续、延迟、掉话
上网体验	实际浏览网页、播放视频	可正常使用，无明显卡顿
稳定性测试	连续运行 24—72 小时，观察是否有掉线	无异常掉线，太阳能供电正常
故障恢复	模拟某一跳断电，恢复后观察重连	自动重连，无需人工干预

★ 验收建议：语音与上网必须做真实场景实测

带宽测试通过不代表体验好。务必在晚高峰时段组织真实用户并发测试——让工人按日常习惯使用（刷视频、打语音），观察是否出现体验劣化。这比任何实验室指标都更能反映真实交付质量。

6.5 实施排期建议

考虑到施工标段本身存在工期压力，通信系统的实施建议按以下节奏推进，尽量与施工进度解耦，避免互相干扰：

时间节点	工作重点	注意事项
开工前 4—6 周	完成勘察、选点、链路设计与设备采购	勘察需避开雨雪封山期；设备采购与运输需预留时间，山区运输可能受天气影响
开工前 2—3 周	完成山口节点与中继节点的土建、立杆、供电与防雷施工	这部分工作在无人山区，应集中完成，减少往返；建议在天气窗口期施工
开工前 1 周	完成链路调测与工地侧 Wi-Fi 覆盖	调测需要多人配合（前后端对准），建议安排充足人力
开工初期	试运行观察，根据实际使用情况优化限速与 QoS 策略	此时用户量逐步上升，是发现问题的好时机
施工期间	按 7.1 节周期巡检；随营地前移迁移工地节点	保持与项目部的沟通，及时响应需求变化

6.6 与项目部、施工队的分工建议

通信系统的建设涉及多方，建议在项目启动时明确分工，避免后期推诿：

工作内容	责任方	说明
需求提出与使用反馈	项目部 / 施工队	明确营地位置、人员规模、作业面分布、业务优先级
勘察与方案设计	我司技术团队	现场勘察、链路设计、设备选型与配置
土建与立杆施工	施工单位（可由我司指导）	立杆基础、桅杆架设、太阳能与防雷施工
设备安装与调测	我司技术团队	设备安装、天线对准、参数配置与链路优化
供电维护	项目部 / 施工队	日常巡检、太阳能板清洁、电池状态检查
设备故障处理	我司技术团队（远程优先）	远程诊断与参数调整；必要时现场处理
Wi-Fi 与用户管理	项目部	Wi-Fi 密码管理、用户登记、违规使用管理

第七章 运维保障

长期可用性

7.1 日常巡检与远程维护

7.1.1 远程维护能力

野外节点的运维成本很高（上山一次可能耗时数小时），因此应尽量发挥远程维护能力：

- 自组网设备支持 IP 网络透传，可从工地侧远程登录到任意中继节点进行状态查询与参数调整；
- 通过设备指示灯状态的远程读取，可初步判断电源、建链、信令状态；
- 建议在山口节点部署远程管理平台，实现全网拓扑可视化与告警。

7.1.2 现场巡检周期

巡检项	建议周期	重点检查内容
太阳能与供电	每月一次	太阳能板清洁、电池电压、接线松动
天线与立杆	每月一次	天线方位是否偏移、立杆是否倾斜、紧固件是否松动
防雷与接地	每季度一次	接地连接是否可靠、防雷器是否失效
设备运行状态	每周（远程）	链路质量、丢包、是否存在异常告警
全面检查	每半年一次	线缆老化、机箱密封、整体链路复测

7.2 常见故障排查

故障现象	可能原因	排查方法
链路完全不通	天线偏移、设备断电、配置错误、严重遮挡	先查供电（LED1 电源灯）；再查建链指示灯（LED3 绿色为建链）；检查天线是否偏移；复核配置
链路时通时断	供电不稳（电池亏电）、天线松动、干扰、雨雾衰减	检查电池电压与充电情况；检查天线紧固；用智能选频功能换频点
带宽明显下降	遮挡增多（植被生长）、干扰增加、并发过大	现场检查是否有新增长高的树木；检查是否有新增干扰源；查看并发用户数
语音断续	无 QoS 优先级、大流量挤占、链路丢包	检查 QoS 配置；启用限速；测试链路丢包率
设备无法启动	供电故障、雷击损坏、电源线断路	逐段测量电压；检查防雷器是否击穿；更换备用设备

★ 建议：为野外节点准备备件

山区运维成本高，建议为每个中继点准备关键备件（尤其是易损件：防雷器、电源线、天线馈线接头），这样一次上山即可完成维修，避免反复往返。同时建议在工地存放 1 台备用 7020-40 与 1 台 7020-37，以应对设备损坏时的快速替换。

7.3 扩容与迁移

7.3.1 随施工进度迁移

特高压施工的塔基是逐基推进的，施工队驻地和作业面会不断前移，通信系统需要有相应的迁移能力：

- 工地节点（7020-37 + AP）设计为可拆卸、可迁移，随营地前移而搬迁；
- 中继节点（7020-40）通常固定，但如需扩展覆盖，可在新位置增设中继点；
- 由于 7020 系列支持无中心自组网，新增节点开机自动入网，无需重新配置全网——这是自组网相对传统点对点网桥的显著优势。

7.3.2 扩容场景

扩容需求	解决方案	说明
覆盖范围扩大	增加中继节点	沿链路方向延伸，自动入网
用户数增加	增加 Wi-Fi AP	接入交换机即可
带宽不足	优化跳数 / 调整频宽 / 启用空分复用	优先减少跳数，收益最大
新增作业面	部署移动式工地节点	可用便携电源 + 车载/拖车安装

第八章 风险与注意事项

不回避问题

8.1 技术风险

风险项	说明	应对措施
找不到合适的中继点	山区地形复杂，可能确实找不到能建立视距链路的制高点	提高天线架设高度（立杆/桅杆）；改用绕行路线增加跳数；协商共用现有铁塔/通信杆
视距受植被影响	树木生长会逐渐遮挡链路，初期可用但后期劣化	选点时预留植被生长余量；必要时定期清障
公网信号不稳定	山口节点的公网信号可能随时间波动，晚间高峰劣化	优先选择信号余量较大的位置；考虑双运营商 CPE 自动切换；实测多个时段
多跳带宽不足	长距离多跳导致端到端带宽下降明显	优化跳数（减少一跳收益最大）；启用带宽管理与限速；明确业务优先级
供电无法保障	连续阴雨天导致太阳能供电不足	按最不利工况设计；加大电池容量（3—5 天续航）；关键节点可考虑双路供电
雷击损坏	山区制高点雷击风险高	完整的防雷接地设计；准备备用设备；购买设备保险

8.2 合规与安全注意事项

8.2.1 无线电频率使用

⚠ 频率使用必须合规（重要）

- ZumMesh 7020 系列支持多个频段，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（如 2.4 GHz）属于免许可频段，可在规定功率内使用；其他频段可能需要取得无线电频率使用许可。
- 在方案实施前，必须确认所选频段与发射功率的合规性，必要时向当地无线电管理机构申请。建议由我司技术人员协助确认具体频段的合规要求。

8.2.2 用电安全

- 野外节点的直流供电系统（太阳能 + 蓄电池）的安装需由专业人员完成；
- 蓄电池应放置在通风、防止雨水浸泡的机箱内；
- 太阳能板与支架的安装需考虑抗风能力；
- 立杆/桅杆的架设需评估基础与抗风，避免倾倒伤人。

8.2.3 施工与安装安全

- 山区作业本身存在跌落、滑坡等风险，安装作业应遵守施工安全规程；
- 设备重量（7020-40 约 2.2 kg，加上天线、太阳能板等）需考虑人力搬运的可行性；
- 高空作业（立杆、天线安装）需满足高处作业安全要求。

8.2.4 信息与网络安全

- 建议启用 AES256 加密，保护施工数据与办公通信；
- Wi-Fi 应设置强密码，避免未经授权接入；
- 注意施工资料、进度数据等敏感信息的管理。

第九章 结论

方案总结

9.1 方案核心逻辑

本方案的核心逻辑可以概括为三句话：

把公网“搬”进山，用链式中继“绕过”地形遮挡，用 Wi-Fi 把网络“分”给每个人。

- **取信号：**在有 5G 信号的高处架设接收点，用 5G CPE 把公网信号取下来；
- **传信号：**用 ZumMesh 7020-40（20 W、200 km 视距能力）沿山谷制高点组成链式链路，把信号逐跳传到工地；
- **用信号：**在工地用 ZumMesh 7020-37 接入，下挂 Wi-Fi AP 覆盖营区，工人手机正常上网、微信语音正常通话。

9.2 方案的关键优势

优势	说明
设备选型合理	7020-40 承担主干与中继（大功率、长距离），7020-37 承担工地接入（够用、省电、轻便），梯度配置避免过度投入
山区适配性强	L 波段频率绕射能力强；智能选频 + 收发异频率 + 收发异频宽，适应山区复杂电磁与气象环境；-40℃ ~ +55℃ 宽温
部署灵活	无中心自组网，节点开机自动入网（冷启动 40 秒），无需中心基站；新增节点即插即用；支持链式拓扑适应山谷走向
语音体验有保障	链路带宽远超语音需求（语音仅约 0.1 Mbps/路）；配合 QoS 优先级与带宽管理，可稳定支撑数十路并发语音
投资可控	需求呈脉冲式（集中在晚间），可按晚高峰而非持续峰值设计容量；一次投入长期使用，无流量费用

9.3 建议的下一步

步骤	动作	预期成果	周期
第一步	确认施工标段分布与公网可用位置	明确方案适用范围	3—5 天
第二步	现场勘察：公网信号实测 + 中继点选点	《勘察报告》，确认方案可行性	1—2 周
第三步	链路设计与设备配置	《链路设计方案》与设备清单	3—5 天
第四步	先建 1 个试点链路（山口 + 1 中继 + 工地）	验证实际链路质量	1—2 周
第五步	语音与上网实测，根据结果调整配置	确认交付体验达标	1 周
第六步	完整部署与验收	整条链路交付使用	按规模确定

★ **关键建议：先做一段试点链路**

山区无线链路的不确定性很高——同样 30 km，地形不同结果可能差异极大。强烈建议先建一段单跳或两跳的试点链路，用实测数据验证可行性，再决定全线的配置规模。试点投入很小，但可以避免全线部署后才发现链路不通的风险。

（本方案技术参数来源：ZumMesh 7020-40-IP65 与 ZumMesh 7020-37-IP65 产品数据手册。方案中的带宽估算、功耗测算、太阳能配置等为基于手册参数的工程估算值，实际性能受地形、气象、电磁环境、天线配置等因素影响，必须以现场勘察与实测结果为准。无线电频率使用需符合国家相关规定。）