

光伏场站无线传输解决方案

——基于比特威 ZumMesh 自组网与 ZumBridge 网桥产品的分层无线组网设计

一、方案概述

1.1 背景

集中式地面光伏电站的通信需求，长期被"光纤+4G"两套传统方案覆盖：场区集电线路沿线敷设光纤，或者依赖运营商 4G 公网传输。两者在实践中各有明显短板。

光纤方案的短板：光伏方阵在建设期即完成布局，但电站投运后仍有扩容、改线、检修堵点治理的需求，每一次动土开沟敷设光纤的成本与工期都难以承受；场区内的汇流箱、箱变、逆变器分布在数平方公里范围内，光纤到点的综合造价（沟槽开挖、保护管、熔接、回填）往往高于设备本身。更关键的是，光纤一旦在施工或农机作业中被挖断，故障定位困难、恢复周期长。

4G 公网方案的短板：偏远地区（西北戈壁、山地、滩涂）公网覆盖质量不稳定，且 4G 传输无法满足厂区视频监控的带宽与实时性要求；公网链路存在数据出园区的合规风险，电力生产数据的安全等级保护要求通常不接受此类架构；一旦发生极端天气导致运营商基站掉电，全场通信同时中断，而极端天气恰恰是电站最需要监控的时刻。

1.2 方案定位

本方案以**无线自组网（MESH）**为技术底座，针对光伏场站**视频带宽密集、控制数据稀疏、移动装备巡检**三类差异化业务，构建一张**分层承载、互为备份**的场区无线传输网络：

- **视频层：**以 ZumBridge 宽带网桥为载体，承担周界视频、云台视频的大带宽稳定回传；

- **控制层**：以 ZumMesh 自组网为载体，承担逆变器、汇流箱、箱变、气象站的遥测与遥控数据；
- **移动层**：以 ZumLink 点对多点图数传为载体，承担巡检机器人、无人机在移动过程中的视频与控制回传。

三层共用一套管理平台，物理频段相互隔离，单层故障不影响其他层业务。

1.3 方案边界说明

本方案聚焦**无线传输通道的设计与选型**，包括组网架构、频点规划、链路预算、设备配置、安装部署与实施建议。以下内容不在本方案范围内，需由电站主体工程或专业承包方另行设计：

- 光伏方阵电气主接线、逆变器与箱变的电气保护配置；
- 视频监控摄像机的选型、点位设计与 AI 算法配置；
- 升压站二次系统（保护、测控、计量）的内部组网；
- 与电网调度数据网（安全 I/II 区）的接入方案与安全防护。

本方案所提供的数据链仅作为**承载通道**，不改变原有业务系统的接口协议与安全边界。

二、需求分析

2.1 典型场景假定

本方案以一座 **100 MWp 级集中式地面光伏电站**为设计基准，参数假定如下（实际项目须以施工图为准）：

项目	假定值	备注
装机容量	100 MWp	集中式地面电站

项目	假定值	备注
场区尺寸	约 3 km × 3 km	约 9000 亩量级
光伏方阵（区块）数量	24 个	每方阵约 4 MWp
单方阵逆变器台数	8 台	组串式逆变器
逆变器总数	192 台	24 × 8
汇流箱/箱变/气象站	48 个	每方阵 2 个
周界摄像机	60 路	沿场区周界布设，4 Mbps/路
云台摄像机	8 路	6 Mbps/路
巡检机器人/无人机	1~2 套	移动巡检，6 Mbps/路

2.2 带宽需求测算

（1）数据类业务

单台逆变器上送遥测参数（直流侧电压电流、交流侧三相电压电流功率、功率因数、内部温度、发电量、告警字）约 60 字节/帧（含协议头），按 1 秒周期上送：

$$\text{单台逆变器带宽} = 60 \text{ 字节} \times 8 \text{ bit} / 1 \text{ s} = 480 \text{ bps}$$

$$192 \text{ 台合计} = 192 \times 480 = 0.092 \text{ Mbps}$$

辅控设备（汇流箱监测、箱变测控、环境监测仪）每台按 2 kbps 估算，48 台合计 0.096 Mbps；
升压站中控与场区的管理数据按 200 kbps 预留。

$$\text{数据类合计} = 0.092 + 0.096 + 0.200 = 0.388 \text{ Mbps}$$

(2) 视频类业务

周界摄像机 = 60 路 × 4 Mbps = 240 Mbps

云台摄像机 = 8 路 × 6 Mbps = 48 Mbps

视频类合计 = 288 Mbps

(3) 需求结论

全场业务需求 = 0.388 + 288 = 288.4 Mbps

其中视频类占比 = 288 / 288.4 = 99.9%

关键结论一：光伏场站的无线传输需求**几乎 100% 由视频业务驱动**，控制类数据量小到可以忽略。这决定了方案的主线必须是"如何高效回传视频"，而不是"如何组一张超大规模的遥测网"。

任何把光伏通信简单理解为"采集逆变器数据"的方案，都会在视频需求面前失效。

2.3 与风电场场景的差异

同为新能源场站，光伏与风电的通信形态存在本质区别，选型思路不能简单套用：

维度	风电场景	光伏场景
设备分布	风机沿山脊/海岸线 条带状分散 ，间距 500 m~数 km	方阵 面状集中 ，场区连续成片
传输距离	常需 20~100 km 级骨干	场区内 1~4 km 即可全覆盖
带宽压力	单机数据 + 少量视频，中等	周界视频密集， 大带宽
地形条件	山地/海上，视距条件差，多径严重	开阔平地， 视距条件好

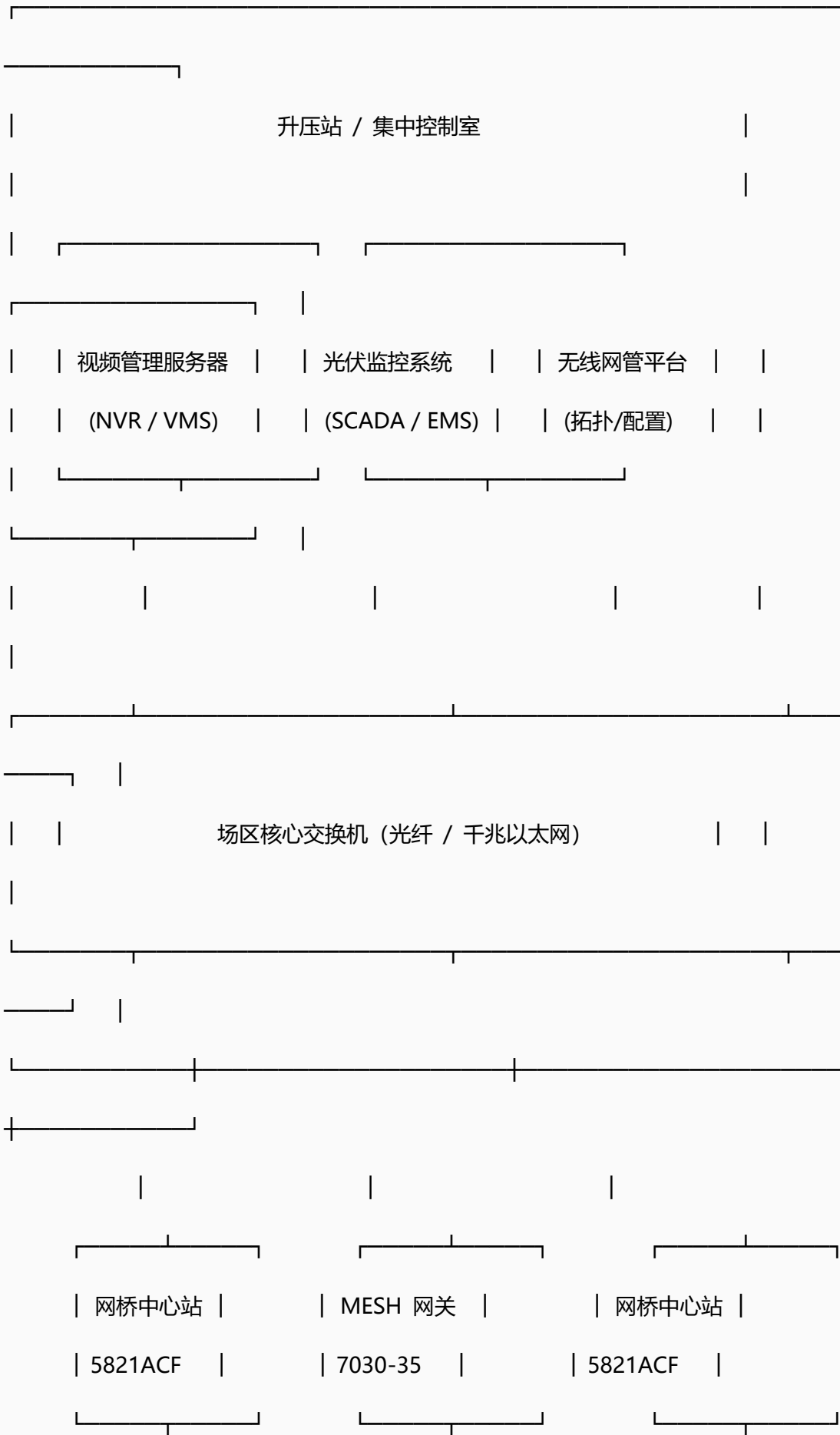
维度	风电场景	光伏场景
主要难点	长距回传、绕射、防雷	视频汇聚、覆盖均匀、施工便利

关键结论二：光伏场区开阔平坦、视距良好，且距离短。这意味着**不需要动用风电方案里的长距大功率骨干设备**（如 7030-40 的 20W/300 km 级），而应把选型重点放在**带宽容量与部署密度**上。用长距设备做短距覆盖，是为不需要的能力付费。

三、总体架构设计

3.1 分层组网架构

方案采用**"接入层—汇聚层—核心层"**三层架构，按业务性质分层承载：



各层职责：

层级	载体	业务	拓扑
核心层	场区光纤 / 铠装网线	全业务汇聚	星型
汇聚层	ZumBridge 网桥 (视频) + ZumMesh 7030-35 (控制)	分段回传	点对点定向 / 自组网
接入层	ZumLink LTE 系列 + ZumMesh 7020 系列	视频前端 / 控制终端	点对多点星型 / 自组网

3.2 分层选型的理由

为什么视频走网桥、控制走 MESH，而不是用一种设备打全场？这是本方案的核心设计判断，理由如下：

(1) 业务特性不同

业务	带宽	位置	实时性	最适配技术
周界/云台视频	大 (每路 4~6 Mbps, 合计数百 Mbps)	固定	高 (要求 ≤ 500 ms)	点对点定向网桥
逆变器/辅控遥测	极小 (全场 < 0.4 Mbps)	固定	中 (秒级)	自组网 / 数传电台

业务	带宽	位置	实时性	最适配技术
巡检机器人/无人 机	中 (6 Mbps)	移动	高	点对多点图数传

(2) 技术适配性不同

ZumBridge 系列采用 802.11ac 2×2 MIMO，峰值 867 Mbps，配 21 dBi 高增益双极化定向天线、IP68 金属壳体、内置 16 KV 防电涌模块、工作温度 -50~85 °C——这是一套**为户外固定点位长距大带宽专设**的产品定位。用 MESH 设备去承担数百 Mbps 的视频汇聚，会立刻触及其 96 Mbps 的能力上限。

反之，ZumMesh 系列的 256 节点自组网、1000 次/秒跳频、智能选频、收发异频是**为移动装备、抗干扰、无中心自愈**专设的能力——它用来传几百 kbps 的遥测数据时，余量高达百倍，可靠性优势反而能充分发挥。

(3) 容量验算的实证

若强行用 MESH 设备承载全部视频业务：

全场视频需求 = 288 Mbps

ZumMesh7030-35 (峰值 96 Mbps) 1 跳有效吞吐 = $96 \times 0.60 = 57.6$ Mbps

分 4 段后单段需求 = $288 / 4 = 72$ Mbps > 57.6 Mbps → 容量不足

即使分 6 段：单段 48 Mbps < 57.6 Mbps，但余量仅 9.6 Mbps (17%)，

无法应对突发码率与信道效率波动，工程上不可接受

而改用 ZumBridge 5821ACF：

峰值 867 Mbps, 1 跳有效吞吐 = $867 \times 0.60 = 520$ Mbps

分 4 段后单段需求 72 Mbps → 占用率仅 13.8%, 余量 6.2 倍

单条链路理论上可承载 130 路 4 Mbps 摄像机

关键结论三：分层选型不是“混搭降级”，而是**按业务性质把设备能力与需求对齐**。每一层都留足余量，整网才具备工程可实施性。

3.3 分段与区域划分

将 3 km × 3 km 场区按周界走向划分为 **4 个传输段**（约每段 750 m~1.5 km 周界范围），每段承载：

- 摄像机 15 路 ($60 \div 4$)
- 云台 2 路
- 巡检机器人/无人机 1 路（按段共享）
- 该段内 6 个方阵的逆变器与辅控数据

单段业务量：

$$\begin{aligned} & 15 \times 4 \text{ Mbps} + 2 \times 6 \text{ Mbps} + 1 \times 6 \text{ Mbps} + \text{数据 } 0.097 \text{ Mbps} \\ & = 60 + 12 + 6 + 0.097 \approx 78.1 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

分段的作用有三：① 把大带宽需求拆解到单链路可承接的规模；② 每段独立回传，单段故障不影响其他段；③ 频点可按段隔离，邻段之间无同频干扰。

四、设备选型

4.1 视频层：ZumBridge 宽带网桥

型号	关键指标	本方案用途
ZumBridge 5821ACF	867 Mbps / 20 km / 21 dBi 集成定向天线 / 1300 mW / IP68 / 2×1000M RJ45 + 1× SFP / -50~85 °C / 16 KV 防雷	主力型号，4 段视频汇聚回 传
ZumBridge 5825AC	300 Mbps / 30 km（视距） / 25 dBi 双极化定向 / IP68 / -50~80 °C	场区对角长距点位、地形受限 点位

5821ACF 的关键特性：

- **802.11ac 2×2 MIMO，峰值 867 Mbps**，频宽 5/10/20/40/80 MHz 可配置；
- **集成 21 dBi 高增益双极化定向天线**，无需另配天线，减少现场安装误差与馈线损耗；
- **内置 16 KV 防电涌模块**，通过静电放电抗扰度与射频电磁场辐射抗扰度试验，符合 GB/T 17626.2 空气放电要求——光伏场区处于空旷地带，雷击与感应过电压风险高，这一项是刚需；
- **IP68 防护 + 金属壳体（ETSI 300-019-1.6）+ 工作温度 -50~85 °C**，适应西北高温差、风沙、雨雪环境；
- **1×1000 Mbps RJ45（支持 PoE 输入）+ 1×SFP（1.25 G）**，SFP 光口便于远距离下挂设备或级联；

- **支持 Polling 轮询、TDMA 时分多址、DRA 延迟速率协商、DFS 动态频点选择**，在视频密集场景下保证时延稳定；
- **FREE-A 专有算法**，提升链路稳定性。

4.2 控制层：ZumMesh 自组网

型号	关键指标	本方案用途
ZumMesh7030-35	6 W / 峰值 96 Mbps / 90 Mbps@5 km / 60 Mbps@20 km / 256 节点 / 1500 g / -40~55 °C	各段控制数据汇聚节点
ZumMesh7020-37-IP65	10 W / 峰值 49 Mbps / 45 Mbps@10 km / 256 节点 / IP65	方阵内逆变器、汇流箱接入

核心能力（两型号共通）：

- **无中心自组网**：无需中心基站，任一节点退网不影响其他节点，网络自动重路由；
- **256 节点 / N 跳**：最大支持 256 个节点组网，跳数 1/2/3/4/N 可选，覆盖整个场区；
- **冷启动 40 秒入网**：全场节点加电后 40 秒内完成组网；
- **智能选频 + 收发异频率 + 收发异频宽**：三层抗干扰机制，自动规避干扰频点；
- **1000 次/秒跳频**（定制功能）：单跳驻留 1 ms，抗跟踪干扰能力强；
- **AES256 加密**；
- **STDM 空间信道复用技术**：官方称可提升网络效率约 50%；
- **支持 IP/MAC 网络透传**：对上层业务系统透明，无需改造原有协议。

为什么控制层也要用自组网而非简单数传？ 光伏场区的逆变器分布在数平方公里内，若用点对点
数传，需要为每一路规划独立的频率与链路。而自组网让所有节点自动形成一张网，新增或迁移节
点时无需重新规划——这对电站后期扩容与检修换位有实际价值。

4.3 移动层：ZumLink 点对多点图数传

型号	关键指标	本方案用途
ZumLink LTE2412-30	1 W (30 dBm) / 峰值 25 Mbps / 20 Mbps@20 km / 15 Mbps@30 km / 10 Mbps@50 km / 星型 16 节点	云台摄像机、巡检机器人
ZumLink LTE1212-25	0.3 W (25 dBm) / 峰值 25 Mbps / 20 km / 星型 16 节点 / 60 g	周界摄像机前端接入

核心特性：支持**上下行速率控制**，默认上行 5 Mbps（控制数据）、下行 20 Mbps（视频/数
据），支持 4 级带宽调整——这一特性非常适合"机器人上行少量控制指令、下行大量视频"的典
型业务方向；支持自动频率选择、自动功率调整、AES256 加密；体积 67×59×12 mm、重量
<60 g，便于集成到机器人或摄像机侧。

4.4 采集层：ZumLink FHS900 数传电台

对于无法布线、数据量极小的点位（电表计量、箱变温度、消防水位等），可采用 **ZumLink
FHS900-40 数传电台：**

- 902~928 MHz 频段, FHSS 跳频扩频, 2FSK 调制;
- 发射功率 10 W (40 dBm) , 通讯距离可达 100~200 km (视距) ;
- 空口速率 57.6~276.4 kbps, 串口波特率最高 921.6 kbps;
- **256 位物理层加密**, 16 位 CRC + ARQ + Reed-Solomon 纠错;
- 功耗 <35 W, 重量仅 137 g, 工作温度 -40~85 °C;
- 工作模式: 点对点、点对多点、有中心的 MESH。

为何单独保留 900 MHz 数传通道? 电表、水表等计量点位数据量极小 (几十 bps 级) , 但数量可能上百。用 900 MHz FHSS 数传可以极低成本完成覆盖, 且该频段绕射能力强、穿透植被与建筑性能优于 1.4 GHz / 5.8 GHz, 与视频层、控制层物理隔离, 互不干扰。

4.5 设备清单

序号	设备型号	用途	数量
1	ZumBridge 5821ACF	视频段汇聚回传 (4 段, 每段 1 对)	8 台
2	ZumBridge 5825AC	长边/对角远距视频回 传	2 台
3	ZumMesh7030-35	各段控制数据汇聚节 点	8 台
4	ZumMesh7020-37- IP65	方阵内逆变器/汇流箱 接入	24 台
5	ZumLink LTE2412-	云台摄像机、巡检机	8 台

序号	设备型号	用途	数量
	30	器人图数传	
6	ZumLink LTE1212-25	周界摄像机前端接入	15 台
7	ZumLink FHS900-40	箱变/电表/计量采集	12 台
合计	77 台		

注：以上数量基于本方案第 2.1 节的场景假定。实际项目须根据方阵布置图、摄像机点位图、供电点分布重新核算。摄像机接入数量按"每台 LTE 图数传汇聚 4 路摄像机"估算，现场可依实际点位密度调整。

五、频点规划与抗干扰设计

5.1 频段分配原则

本方案使用三个物理隔离的频段，各层互不干扰：

层级	频段	选择理由
视频层	4900~6100 MHz (5.8 GHz)	带宽大、天线增益高、设备体积小；光伏场区开阔，视距条件好，可充分发挥其带宽优势
控制层	1300~1530 MHz (1.4 GHz)	兼顾绕射能力与天线尺寸；可穿透方阵支架阵列，实现方阵内非视距覆盖

层级	频段	选择理由
采集层	902~928 MHz	绕射能力最强，适合密集低矮点位；物理隔离，避免与上两层互扰

5.2 频点规划

视频层：4 个传输段各占一组独立频点，相邻段之间频率间隔 ≥ 20 MHz；网桥支持 DFS 动态频点选择，遇到干扰自动切换。

控制层：ZumMesh 支持智能选频，各节点自动在预设频率列表中选取最优工作频点。建议将场区按方阵划分为 4 个频点组，跨频段组网时由智能选频自动协调。

采集层：FHSS 跳频扩频在 902~928 MHz 内跳变，天然具备同频共存能力，无需人工规划。

5.3 抗干扰机制

层级	主要抗干扰手段
视频层	DFS 动态频点、Polling 轮询 + TDMA 时分多址（避免竞争碰撞）、DRA 延迟速率协商
控制层	智能选频 + 收发异频率 + 收发异频宽三重机制、1000 次/秒跳频、AES256 加密
采集层	FHSS 跳频扩频、16 位 CRC + ARQ + Reed-Solomon 纠错、256 位物理层加密

"收发异频率 + 收发异频宽"的含义：设备在发送与接收时使用不同的频率与不同的频宽，使干扰

方难以通过单一频点的特征识别并压制链路。这是比特威自组网产品的核心抗干扰设计之一。

5.4 电磁兼容与防雷

光伏场区的电磁环境具有特殊性：大量逆变器产生开关频率谐波（通常 16~20 kHz 及其倍频），直流侧电弧检测装置、组串监测设备也可能产生宽带噪声。

应对措施：

1. **天线与逆变器保持距离**：控制层天线安装位置应远离逆变器柜体 ≥ 3 m，避免近场谐波耦合；
2. **频段避让**：优先选用 1.4 GHz 与 5.8 GHz，避开逆变器开关谐波集中的低频段（ < 1 MHz）及开关电源噪声较强的频段；

3. **防雷与接地**：

网桥设备内置 16 KV 防电涌模块，仍需在馈线进入设备前加装同轴避雷器；

抱杆与支架、设备外壳、避雷罩做**等电位连接**，共用接地网，接地电阻 $\leq 4 \Omega$ ；

天线塔杆处于方阵支架群中时，应纳入场区原有防雷系统的保护范围，不得高出场区最高点而未做防护；

4. **供电防护**：设备供电回路加装浪涌保护器（SPD），电源线与射频线分开走线，避免共模干扰。

六、链路预算

6.1 视频层链路预算（5.8 GHz）

计算条件：ZumBridge 5821ACF，发射功率 1300 mW（31 dBm），内置天线增益 21 dBi，接收灵敏度 -100 dBm，自由空间传播模型。

自由空间损耗公式：

$$L_{fs}(dB) = 32.44 + 20 \cdot \lg(d_km) + 20 \cdot \lg(f_MHz)$$

距离	自由空间损耗	接收电平	相对灵敏度余量	可用性
1 km	107.7 dB	-34.7 dBm	65.3 dB	可用
4 km	119.7 dB	-46.7 dBm	53.3 dB	可用
10 km	127.7 dB	-54.7 dBm	45.3 dB	可用
20 km	133.7 dB	-60.7 dBm	39.3 dB	可用

6.2 视频层链路预算 (5.8 GHz, 5825AC)

计算条件：500 mW (27 dBm) ， 25 dBi 双极化定向天线，灵敏度 -100 dBm。

距离	自由空间损耗	接收电平	相对灵敏度余量	可用性
4 km	119.7 dB	-42.7 dBm	57.3 dB	可用
10 km	127.7 dB	-50.7 dBm	49.3 dB	可用
20 km	133.7 dB	-56.7 dBm	43.3 dB	可用
30 km	137.3 dB	-60.3 dBm	39.7 dB	可用

工程余量校核：光伏场区实际传输距离为 1~4 km，上述余量（53~65 dB）远超工程所需的 20~30 dB（含雨衰、多径、天线对准误差、老化衰减）。**余量充足意味着两点：**① 可以用更低的发射功率换取更低功耗与更长寿命；② 在极端天气（暴雨、沙尘）下仍能保持链路可用，这是光伏电站最需要通信的时刻。

6.3 控制层链路预算 (1.4 GHz)

计算条件: ZumMesh7030-35, 发射功率 6 W (约 37.8 dBm) , 配 6 dBi 全向/定向天线, 接收灵敏度 -110 dBm (@1.25 MHz) 。

距离	自由空间损耗 (1400 MHz)	接收电平	相对灵敏度余量	可用性
1 km	95.3 dB	-45.5 dBm	64.5 dB	可用
3 km	104.9 dB	-55.1 dBm	54.9 dB	可用
5 km	109.3 dB	-59.5 dBm	50.5 dB	可用
10 km	115.4 dB	-65.6 dBm	44.4 dB	可用

多径余量说明：光伏场区地面为裸土或砾石，方阵支架为金属结构，存在较强地面反射与散射。

1.4 GHz 频段在开阔平地的多径衰落通常预留 10~15 dB 即可，上表余量（44~65 dB）仍有充足裕量。

6.4 带宽容量校核

层级	设备峰值	效率系数	有效吞吐	实际需求	占用率
视频层（单段）	867 Mbps	0.60	520 Mbps	78.1 Mbps	15.0%
控制层（全场）	96 Mbps	0.50（3 跳）	48 Mbps	0.388 Mbps	0.8%
移动层（单	25 Mbps	0.60	15 Mbps	6 Mbps	40.0%

层级	设备峰值	效率系数	有效吞吐	实际需求	占用率
点)					

效率系数说明：无线自组网的实际有效吞吐低于标称峰值，原因包括协议开销、多节点竞争、跳数衰减。本方案按 1 跳 0.60、3 跳 0.50、6 跳 0.45 取值，属工程保守估计。

关键结论四：三层均留有充足余量。视频层占用率 15%，意味着后续可平滑扩容至 3~4 倍摄像机数量；控制层占用率不足 1%，意味着场区可扩容至现有规模数十倍而无需更换设备。

七、部署与安装要点

7.1 站点布置原则

网桥站点：

- 每个传输段设 1 组网桥（中心站 + 远端站），优先利用场区已有的**升压站屋顶、综合楼、围墙立柱、独立的监控立杆**作为安装点；
- 网桥为定向天线，安装时须保证**两端视线通畅**，避开方阵支架、树木、储存罐等遮挡物；
- 天线安装高度建议 $\geq 6\text{ m}$ ，高于方阵支架顶部（光伏支架最高点通常 $2.5\sim 3\text{ m}$ ），避免支架边缘绕射；
- 抱杆安装需考虑**风载荷**：场区天线的风振比建筑环境更严重，抱杆直径与基础配重须按当地 50 年一遇基本风压校核。

MESH 节点：

- 汇聚节点（7030-35）设于每个方阵的箱变/汇流箱附近，利用场内已有的**箱变立柱或方阵检修通道立杆**；
- 接入节点（7020-37-IP65）就近安装于逆变器柜旁，通过网口接入逆变器通信口；

- 自组网拓扑需保证**任意节点至少存在 2 条可达路径**，避免单点故障导致方阵数据丢失；
- 节点间距按 300~500 m 设计，兼顾覆盖与冗余。

移动层站点：

- LTE 图数传的中心站（基站侧）设于网桥所在立杆，共用抱杆与供电；
- 远端模块集成于摄像机箱或机器人本体，注意天线方向与本体金属结构的隔离（ ≥ 200 mm）。

7.2 供电方案

设备	功耗	供电方式
ZumBridge 5821ACF	≤ 4.5 W	DC 6~30 V 或 12~24 V PoE 或 AC 220 V
ZumBridge 5825AC	≤ 4.5 W	DC 24 V PoE 或 AC 220 V
ZumMesh7030-35	≤ 45 W@常发 / 6 W@待机	DC 24~28 V
ZumMesh7020-37-IP65	≤ 45 W@常发 / 6 W@待机	DC 24~28 V
ZumLink LTE2412-30	≤ 11 W	DC 12 V

推荐做法：

5. **就近取电：**方阵内的 MESH 节点直接从逆变器/汇流箱的辅助电源取电（需确认其容量余量），避免长距离敷设电源线；
6. **PoE 供电优先：**网桥支持 PoE 输入，可由带 PoE 的交换机或注入器集中供电，便于远程重启（网桥掉电重启是现场复位的最有效手段）；
7. **电源冗余：**升压站侧汇聚设备配置 UPS，保障市电中断时核心链路不中断；
8. **待机功耗优势：**ZumMesh 系列待机功耗仅 6~7 W，与常发 45 W 相比差异显著。若业务允许，可通过"平时低功率待机、事件驱动唤醒"的方式降低能耗与热负荷。

7.3 安装注意事项

1. **天线极化一致**：网桥两端天线极化方向须一致（双极化天线需按设备说明对应连接），极化不一致会带来 20 dB 以上额外损耗；
2. **馈线长度控制**：尽量缩短射频馈线（推荐 $< 3\text{ m}$ ），避免使用劣质转接头；每增加 3 m 馈线，按 1~1.5 dB 损耗预留；
3. **接地连续性**：避雷器、设备外壳、抱杆、接地扁铁之间用 $\geq 16\text{ mm}^2$ 铜编织带连接，所有连接点做防腐处理；
4. **防水处理**：IP68 设备的射频接头与网口处仍需做防水胶带三层缠绕（自粘胶带 + 防水胶泥 + 绝缘胶带），现场接头是防水最薄弱环节；
5. **调试顺序**：先单个网桥点对点对准（用设备自带的信号强度指示灯与频谱扫描功能），再逐段接入，最后联调全场；
6. **验收测试**：逐链路测试吞吐量（iPerf）、时延（Ping 大包）、丢包率；建议验收标准为**吞吐量 $\geq$ 实际业务量的 3 倍、单向时延 $\leq 50\text{ ms}$ 、24 小时丢包率 $\leq 0.1\%$** 。

7.4 施工期与投运期的差异优势

光纤方案的一个隐性成本是**施工窗口**：光伏电站一旦并网发电，场区内任何开挖作业都需停电配合，直接影响发电量。

无线方案的优势在于：

- **无需开挖**：所有链路为空中传输，安装作业通过抱杆、屋顶完成，不触碰场区地面；
- **可加装**：对于已投运电站的通信改造，无线方案可以在**不停电、不停机**的条件下完成安装与调试；
- **可迁移**：若后续方阵调整，设备的安装位置与天线方向可以重新规划，无需废弃线路投资。

这两点对**存量电站的通信升级改造**尤为关键，也是无线方案在光伏存量市场的主要竞争力。

八、方案优势总结

8.1 技术优势

优势	具体体现
带宽分层对齐	视频用 867 Mbps 网桥，控制用 96 Mbps 自组网，各层余量充足；没有为不需要的能力付费，也没有让任何一层超负荷
抗干扰能力强	控制层 1000 次/秒跳频 + 智能选频 + 收发异频率/异频宽三重机制，视频层 DFS + TDMA + Polling
物理隔离	三套频段（5.8 G / 1.4 G / 900 M）物理隔离，任一频段受干扰不影响其他层
无中心自愈	MESH 层无中心节点，任一节点退网自动重路由，无单点故障
环境适应性强	网桥 IP68 / -50~85 °C / 内置 16 KV 防雷；MESH 设备 -40~55 °C / IP65
实施不扰动生产	无线部署无需开挖，支持存量电站不停电改造
扩展性好	控制层占用率 <1%，视频层占用率 15%，

优势	具体体现
	均有数倍至数十倍的扩容余量

8.2 经济性分析（定性）

无线方案与光纤方案的对比：

维度	光纤方案	本无线方案
初期投资	设备 + 沟槽开挖 + 保护管 + 熔接 + 回填，单位造价随 距离快速上升	仅设备与安装，无土建
施工周期	长，需与土建交叉作业	短，独立作业面
对生产影响	存量改造需停电配合	无需停电，可在线加装
扩容成本	需重新开挖敷设	增加节点即可，无需土建
故障恢复	断点定位困难，熔接需专业设 备	自动重路由（MESH），或更 换设备即可
雷击风险	光纤本身免疫，但供电线路仍 需防护	需做好天线防雷与等电位连接

说明：具体的投资对比金额需依据项目实际距离、地貌、土建单价测算，本方案不给出通用结论。但从"可在线改造"与"可平滑扩容"两项看，无线方案在**存量电站改造与分期建设电站**两类场景中的综合成本优势明显。

8.3 可扩展方向

1. **接入储能系统**：储能 PCS、BMS 的遥测数据可直接接入控制层自组网，与光伏同一张网管理；
2. **接入无人化巡检**：巡检机器人、无人机、机器狗可通过移动层 LTE 图数传回传视频与点云数据；
3. **多能互补场站**：同一张无线网可同时覆盖光伏、风电、储能的通信需求，避免各专业分头建设；
4. **应急通信备份**：在公网中断或光纤故障时，无线网可作为电站的应急指挥通道；
5. **融合 4/5G 与星链**：对于极偏远场站，可在核心层通过 4/5G 或卫星链路实现远程接入，形成"场内无线自组网 + 场外公网/卫星回传"的完整链路。

九、结语

光伏场站的无线传输需求，本质上是一个**"视频带宽密集型"**的通信问题——控制数据量占比不到 0.1%，而视频需求决定了整网的技术走向。认清这一点，是选型不犯错的前提。

本方案给出的答案是：**不追求用一种设备解决所有问题，而是把业务按性质分层，让每类设备发挥其定位所长的能力**。视频交给为长距大带宽而生的 ZumBridge 网桥，控制与遥测交给为自愈抗干扰而生的 ZumMesh 自组网，移动巡检交给为点对多点图数传而生的 ZumLink 系列。三层物理频段隔离、共用一套管理平台。

方案在每一层都留足了余量：视频层占用率 15%，控制层占用率不足 1%。这不是保守，而是给电站未来 5~10 年的扩容与业务变化留出空间——光伏电站的生命周期是 25 年，通信网不该成为其中的短板。

北京比特威电讯科技有限公司专注于无线通讯产品的研发与销售，产品覆盖无线自组网 MESH、低频图数传输、数传电台、无线高频传输基站、4/5G 及星链传输，最远传输距离可达 500 公里，

广泛应用于机器人控制、无人机蜂群组网、机器狗组网、无人船组网等无人装备数据链，并在消防、公安、港口、边防、部队、环保、森林、水文、矿山、隧道、公路等行业持续提供无线通讯解决方案。

北京比特威电讯科技有限公司

电话：13910066158 | 网址：www.bitwave.com.cn | 邮箱：wht6066@163.com

地址：北京市海淀区知春路甲 48 号盈都大厦 C 座