WANLAN ANYMESH · TUNNEL CONSTRUCTION COMMUNICATION

隧洞开挖机器人自组网通信解决方案

多跳Mesh中继 · 90°拐弯穿透 · 1km+非视距20Mbps

北京万蓝科技有限公司 · AnyMesh产品事业部

2026年10月 · 技术方案V1.0

目录

CONTENTS

01 隧洞施工场景与需求
开挖隧洞、移动平台、洞外控制台

02 通信环境难点分析
90°拐弯、非视距、混凝土屏蔽

03 系统总体架构
洞内多跳Mesh + 拐弯中继节点

04 多跳中继部署方案
拐弯处补点、间距规划、天线选型

05 链路预算与带宽分析
1km+多跳链路、20Mbps带宽保障

06 关键技术体系
SDR + COFDM + Mesh协议

07 施工推进中继前移
随开挖进度中继节点逐步前移

08 成功案例与方案总结
隧洞施工通信落地实践

开挖隧洞1km+非视距通信，90°拐弯处补点

01 · 隧洞施工场景与需求

作业场景

- 洞内移动平台：凿岩台车、挖掘机、出渣车等作业机械
- 洞外控制台：洞口调度室，监控洞内画面和设备状态
- 隧洞走向：非直线，有十几度小转弯，也有90°垂直拐弯
- 传输内容：洞内摄像头视频、设备传感器数据、语音对讲

最大通信距离

>1km

最低带宽要求

⩾20Mbps

典型拐弯场景

隧洞走向非直线，存在两种拐弯：小半径转弯（十几度）——电磁波绕射可部分穿透，但信号衰减大；90°垂直拐弯——完全非视距（NLOS），直射信号被混凝土壁完全遮挡，必须在拐弯处部署中继节点进行信号转接。

隧洞施工通信四大挑战：拐弯遮挡 + 多径衰减

02 · 通信环境难点分析

90°拐弯遮挡

垂直拐弯处混凝土壁完全遮挡直射波，单跳无法穿透，信号衰减>40dB。

混凝土多径反射

隧洞内壁混凝土反射形成多径效应，符号间干扰严重，普通调制无法解调。

长距离衰减

隧洞纵深远超1km，即使直道自由空间损耗随距离平方增长，单跳无法覆盖。

施工机械遮挡

挖掘机、出渣车等金属机械随时移动，临时遮挡链路，需自动绕行。

AnyMesh解决路径

拐弯处中继
90°拐弯前部署中继节点，信号转接

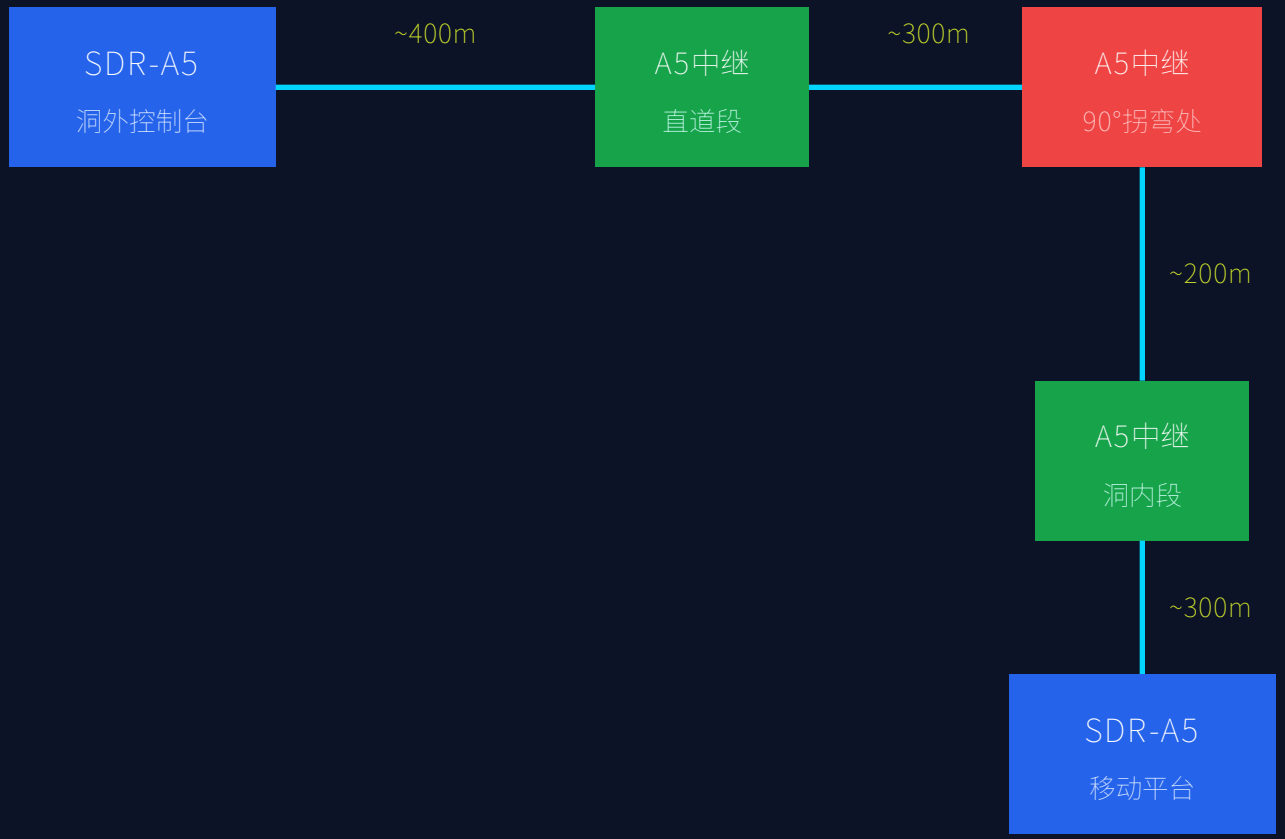
COFDM抗多径
正交频分复用对抗混凝土反射

多跳接力
每300-500m一跳，逐段延伸

Mesh自愈合
机械遮挡自动重路由

系统架构：洞外控制台 → 多跳中继 → 洞内移动平台

03 · 系统总体架构



架构要点

- 洞外控制台：洞口调度室，SDR-A5 10W
- 直道中继：每300-500m一台SDR-A5
- 拐弯中继：90°拐弯前/后各设一台，信号转接
- 移动平台：凿岩台车/挖掘机载SDR-A5
- 总跳数：约4-5跳，覆盖1.2km+

中继部署：直道300-500m一跳，拐弯处必设

04 · 多跳中继部署方案

直道段中继部署

- 间距：每300-500米部署一台SDR-A5
- 天线：双向板状定向天线，对准前后方向
- 安装：隧洞侧壁壁挂，高度2.5-3m
- 供电：就近取电或蓄电池组

90°拐弯处中继部署（关键）

- 位置：拐弯圆弧外侧墙面，距拐角5-10m
- 天线：两副定向天线分别对准前后直道
- 作用：接收一侧信号，转发至另一侧，完成拐弯转接
- 冗余：小转弯（<15°）可依赖绕射，不强制加站

1km隧洞典型配置清单

节点类型	数量	设备型号	部署位置
洞外控制台	1台	SDR-A5（10W）	洞口调度室
直道中继	2-3台	SDR-A5（10W）	隧洞侧壁壁挂
拐弯中继	1台/拐弯	SDR-A5（10W）	拐弯圆弧外侧墙面
移动平台	1-2台	SDR-A5（10W车载）	凿岩台车/挖掘机顶部

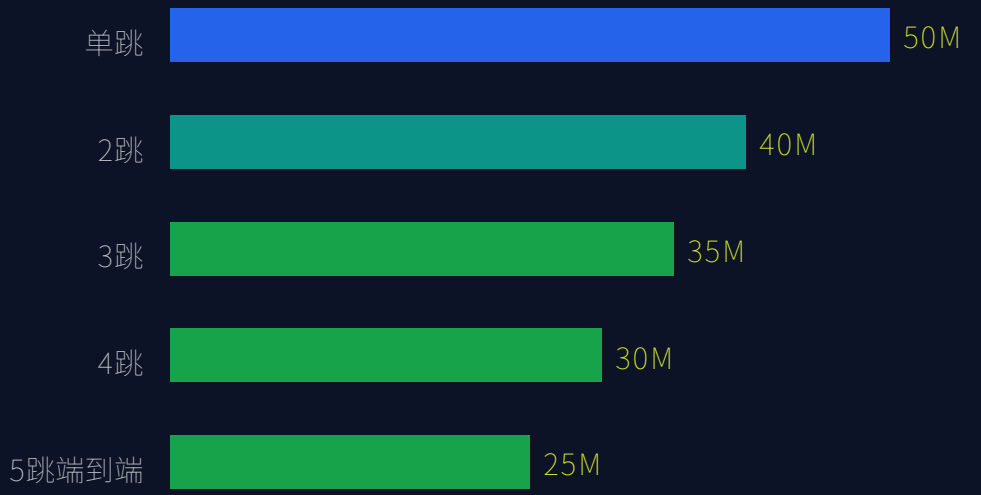
5跳端到端30Mbps，20Mbps需求余量50%

05 · 链路预算与带宽分析

单跳链路预算（300m直道）

参数	数值	备注
发射功率	40 dBm	10W
天线增益（双向板状）	8 dBi	定向
自由空间损耗(300m@2.4G)	80 dB	直射
隧洞壁额外损耗	10 dB	混凝土
接收机灵敏度	-95 dBm	COFDM
单跳链路余量	54 dB	充足

多跳带宽衰减



结论：5跳端到端约25-30Mbps，高于20Mbps需求阈值，余量25%-50%。

拐弯损耗：拐弯中继为有源转接，不增加净衰减，仅增加一跳时延（<8ms）。

计算假设：1.4GHz频段、单跳300m、混凝土壁损耗10dB、COFDM 10MHz带宽 · 实际值以现场测试为准

COFDM抗多径 + SDR灵活配频 + Mesh多跳自愈合

06 · 关键技术体系

SDR软件无线电

- FPGA全可编程架构，频率/带宽软件可配
- 1.4GHz/600M/2.4GHz频段可选
- 10W大功率发射，覆盖300m+单跳
- 全国产化芯片，自主可控
- 支持功率自适应调节

COFDM调制

- 256子载波并行，抗隧洞壁多径反射
- 保护间隔对抗混凝土反射回波
- 非视距(NLOS)环境稳定解调
- 支持移动平台高速移动下通信
- 卷积+RS级联编码纠错

Mesh自组网协议

- 无中心自组织，40秒内自动成网
- OLSR路由，链路质量感知
- 支持8跳以上中继扩展
- 节点增减自动重路由<100ms
- 带宽自适应，链路差时降速保通

三重技术协同：SDR大功率保障单跳距离 · COFDM对抗混凝土多径 · Mesh协议实现拐弯多跳自愈合

随开挖进度动态前移：中继节点逐段跟进掌子面

07 · 施工推进中继前移

阶段一：开挖初期（<300m）

- 洞外控制台直接覆盖掌子面
- 无需中途中继，单跳即可
- 设备：洞外A5 + 车载A5
- 组网时间：<40秒

阶段二：开挖中期（300m-1km）

- 每前进300-500m增设一台中继
- 拐弯处立即补设拐弯中继
- 设备：洞外A5 + 2-3台中继 + 车载A5
- 新节点上电自动入网，<40秒

阶段三：开挖后期（>1km）

- 5-6跳链式中继覆盖掌子面
- 最前端中继距掌子面<300m
- 设备：洞外A5 + 4-5台中继 + 车载A5
- 全程带宽保持≥20Mbps

中继前移作业流程

① 开挖推进
掌子面前进500-800m

② 新站安装
侧壁壁挂新中继，接电

③ 自动入网
Mesh自发现邻居，40秒成网

④ 链路验证
端到端带宽时延测试

隧洞/隧道施工通信已有多个落地项目

08 · 成功案例

西部山区引水隧洞施工

3km长隧洞施工，洞内多跳中继，掌子面视频回传至洞口调度室。SDR-A5 10W车载型。

高铁隧道施工通信

隧道开挖期安全监控与人员定位，多跳Mesh覆盖洞内2km范围。

城市地下综合管廊

管廊内巡检机器人与手持终端Mesh组网，拐弯处补点实现全覆盖。

森林防火应急通信

山区复杂地形单兵Mesh + 瞭望塔中继，与隧洞非视距场景技术同源。

特警城市反恐演练

建筑内部非视距传输，与隧洞拐弯遮挡场景类似，技术方案可复用。

西北光伏电站巡检

巡检车车载Mesh + 场区固定中继，多跳组网技术与本方案一致。

以上案例均为万蓝通信已交付项目，隧洞/隧道施工场景有多个成功落地经验

方案核心优势

SOLUTION SUMMARY

01 拐弯必通：90°拐弯有源转接

拐弯处中继节点两副定向天线，信号无损转接

02 带宽充足：5跳端到端≥25Mbps

高于20Mbps需求线，余量25%以上

03 随挖随通：中继前移40秒入网

新中继上电自动组网，不影响施工进度

04 抗毁自愈：机械遮挡自动绕行

Mesh无中心架构，故障100ms自动重路由

05 成熟可靠：多个隧洞施工项目验证

引水隧洞、高铁隧道、地下管廊等项目落地，技术方案可直接复用