基于AI算力的中国无线电管理

研发技术手册

本手册面向研发、测试与系统集成人员，覆盖数据模型、算法推导与公式、AI 工程实现、PDF 文档引擎、安全审计、质量保障与接口规范。所有公式与阈值均为系统代码中的实际取值，可直接对照源码核验。

文档名称：研发技术手册（含算法与公式）

版本：v1.0（测试阶段）

编制：郭烁恒 / BG5UMG

读者对象：研发、测试、集成与运维人员

代码基线：PHP 8.2 + MySQL + Redis；前端零构建；独立子站点 /rm/

> 阅读约定：文中以 d 表示公里、以 MHz 表示兆赫、以 μs 表示微秒；公式中的希腊字母采用工程惯用符号。所有阈值在源码中均为常量，可按本省口径调整。

第一章 系统总览与运行环境

1.1 技术栈与目录组织

层	技术选型	说明
运行环境	PHP 8.2 / MySQL(InnoDB) / Redis	Redis 用于缓存与限速；未启用时自动降级为数据库直算
前端	原生 HTML/CSS/JS，零构建	不引入打包链；地图按需加载 Leaflet，双 CDN 互为备份
模块入口	rm/index.php 及子目录 /rm/<module>/	每个子模块一个入口；API 统一在 rm/api.php 分发
公共库	inc/rm.php（核心）、rm_biz.php、rm_biz2.php、rm_sites.php、rm_siting.php、rm_equip.php、rm_pdf.php、rm_font.php	按职责拆分；由 inc/bootstrap.php 统一引入
数据层	独立前缀 rm_，与业余无线电业务表零混用	身份、会话、缓存键均独立命名空间

1.2 请求生命周期

一次业务请求的典型路径为：进入 rm/api.php 统一入口，读取动作名并路由；除登录、单位申请、统计等少数动作外，先经 rm_require_login() 解析身份（依次尝试专业账号令牌、站点登录用户、游客体验身份），再由 rm_require_can() 按岗位校验该动作是否被允许；业务函数执行写入前一律先写审计；返回统一 JSON 结构（code/msg/data）。导出类接口（设计方案 PDF、白皮书）绕过 JSON 包装，直接以 application/pdf 输出，并在入口处关闭错误显示，避免任何告警文本污染二进制响应。

1.3 缓存与限速

缓存按"键 + 内容 + 版本"三段构造，键中包含提示词版本或算法版本，版本变化即自动失效，避免读取旧结构。地形高程按 110 米网格（经纬度取三位小数）缓存 30 天；AI 结果按"材料内容摘要"缓存 24 小时；占用度与选址分析不缓存（输入便宜、结果要求实时）。限速分两类：AI 调用按身份（注册用户每日 60 次，游客按来源地址每日 3 次）；外部数据接口按 1 次/秒节流，并在批量取数时按 100 点/批分组。

第二章 数据模型与数据结构

2.1 表结构总览

表	职责	关键字段与设计取舍
rm_units / rm_users	使用单位与专业人员（认证制）	岗位字段决定权限矩阵；账号唯一索引；单位状态参与登录校验
rm_stations	台站执照库（被管对象）	核准频率上下限 + 核准功率为比对基准；频率建联合索引以支持范围匹配；来源字段区分录入/导入
rm_records	监测记录	保留原始测量值（电平/场强/带宽/位置/方位/时间/设备）；verdict 为派生字段，可重算
rm_sites	监测资源库（我方站点与能力）	位置 + 能力（频段段、可测带宽、噪底、测向体制与精度、TDOA 同步精度、功率测量、远控、值守、在线）；demo 标记实现演示数据隔离
rm_tasks / rm_case_steps / rm_case_docs	任务与办案过程	流程节点与文书均独立成表，便于审计与回溯；文书存 SHA-256
rm_scans / rm_scan_bins	频谱扫描与采样点	批次与采样点分离，避免单表膨胀；采样点按批次与频率双索引
rm_interference	干扰工单	steps 字段保存排查时间轴 JSON；状态机驱动业务
rm_audit	审计留痕	动作/对象/详情 JSON/来源地址指纹/时间；按时间与用户建索引

2.2 派生字段与重算原则

监测记录的结论（verdict）与命中台站（station_id）都属于派生字段：它们由原始测量值与台站执照库比对得出，任何时刻都可以重算。这一设计的目的是让"数据"与"判断"分离——原始值不可篡改地保留，判断可以随阈值口径调整而重算，审计日志则记录每次重算的结论与风险分。

2.3 数据分级

类别	敏感度	访问控制
台站执照库	以公开审批信息为主	读：游客及以上；写：审核与管理员
监测记录与疑似清单	业务敏感	读：游客及以上；写：具备 record.add 的岗位
监测资源库（真实站点）	敏感执法资源	真实站点仅对通过工作认证的岗位可见；游客与站点体验身份仅见 demo=1
案件与文书	执法数据	按岗位最小授权；文书哈希可校验
审计留痕	内部管理	仅审核与管理员

第三章 算法与公式

本章给出系统的全部核心算法：每一步的输入、公式、参数取值与边界处理。所有算法均为纯函数实现，可脱离页面用命令行断言验证。

3.1 大地线几何基础

两点间大圆距离（Haversine 形式，地球半径 R = 6371.0088 km）：

h = sin^2(dphi/2) + cos(phi1)cos(phi2)sin^2(dlam/2)

d = 2R * atan2(sqrt(h), sqrt(1 - h))

初始方位角（真北起算、顺时针，用于测向方位与天线指向）：

theta = atan2(sin(dlam)cos(phi2), cos(phi1)sin(phi2) - sin(phi1)cos(phi2)cos(dlam))

局部等距投影（用于交会解算，把球面问题化为平面问题，误差在十公里量级可忽略）：

x = (lam - lam0) * 111.319 * cos(phi0) y = (lat - lat0) * 111.195

3.2 AOA 方位交会：最小二乘解

设有 n 个测向站，第 i 站测得目标方位角 a_i，测向精度（标准差）为 sigma_i。待估目标位置为 P。定义夹角残差：残差等于观测方位角与该站看向估计点的方位角之差，并归一到正负 180 度区间：

r_i = wrap180(a_i - (beta_i(P) + 180))

其中 beta_i(P) 为由估计点 P 指向第 i 站的方位角（注意方位角的方向约定：观测值是"站看目标"，因此需加 180 度）。权重取 w_i = k^2 / sigma_i^2（k 为基准精度，默认 3 度），精度越高的站权重越大；未提供精度的站取 w_i = 1。

目标函数为加权残差平方和：

J(P) = sum_i w_i * r_i(P)^2

采用 Gauss-Newton 迭代求解。由于残差是方位角的非线性函数，雅可比矩阵以有限差分近似，步长 h = 1e-3 km：

J_x[i] = (r_i(Px + h) - r_i(Px)) / h J_y[i] = (r_i(Py + h) - r_i(Py)) / h

法方程与迭代步（W 为对角权重矩阵）：

(J^T W J) * delta = - J^T W r P := P + delta

初值由两两方位线的解析交点加权平均给出。两条方位线在局部平面内以参数式 x = S + t * dir(a) 求交，交角过小（方向向量叉积绝对值小于 0.15，约等于夹角小于 8.6 度）或交点落在测向站反方向（参数 t < 0）的线对直接剔除。迭代收敛判据为步长小于 1e-4 km（0.1 米），上限 40 次；若出现数值发散则报错并提示检查方位角填写方向。

3.3 协方差矩阵与 95% 误差椭圆

收敛后取法方程矩阵的逆作为协方差的形状项：

C0 = (J^T W J)^-1 C = C0 * s^2

s^2 为后验方差因子。此处有一条重要工程约定：s^2 = max(1, chi2 / (n - 2))，即设置下限为 1。原因是若残差恰好为零而直接以 chi2/(n-2) 估计，协方差会塌缩为零，误差椭圆退化为"零误差"，在业务上极具误导性；设置下限后，任何定位结果都保留真实的几何不确定度。

对协方差矩阵作特征分解，得到主方向与两个特征值：

tr = C11 + C22 diff = sqrt((C11 - C22)^2 + 4*C12^2)

lam1 = (tr + diff) / 2 lam2 = max(eps, (tr - diff) / 2)

rot = 0.5 * atan2(2*C12, C11 - C22)

95% 置信椭圆按卡方分布 2 自由度、置信水平 0.95 的分位数 K = 5.991 缩放：

a95 = sqrt(K * lam1) b95 = sqrt(K * lam2)

r95 = sqrt(K * (lam1 + lam2) / 2) GDOP = sqrt(tr)

其中 a95 与 b95 为椭圆半长轴与半短轴（公里），r95 为等效圆半径，GDOP 为几何精度因子。系统同时输出各站方位残差，便于判断是"几何差"还是"某站数据错"。

3.4 定位误差的量级关系

单站测向在距离 D 处的横向定位误差可近似为（小角近似）：

epsilon = D * tan(sigma) 约等于 D * sigma_rad

系统据此把"需求精度 + 候选点到区域最远距离"换算为可判读的米级误差，用于判断单站 AOA 是否满足要求。例如 D = 12.74 km、sigma = 2 度时 epsilon 约等于 445 m。多站时差定位的误差与授时同步精度相关

：

TDOA 测距误差 = c * dt 约等于 0.3 km/us * dt(us)

即 0.1 μs 的同步误差对应约 30 m 的测距误差。系统在设备配置推导中使用该关系，给出"是否必须组网、需要多高的授时精度"的判断。

3.5 地形视距判定（含地球曲率与菲涅尔余隙）

视距判定不采用"直线通即可通"的简化。对候选点与目标点之间的路径按等距采样地形高程，逐点计算余隙：

F1 = 17.32 * sqrt(d1 * d2 / (f * d))

bulge = 0.0785 * d1 * d2

h_los = hA + (hB - hA) * t - bulge

clear = h_los - h_terrain - 0.6 * F1

其中 d1、d2 为采样点到两端的距离（公里），d 为总距离（公里），f 为频率（MHz），F1 为第一菲涅尔半径（米），bulge 为等效地球半径因子 4/3 下的路径中点下坠（米），hA、hB 为两端天线高度。判据为整条路径上最小余隙大于零即视为可通。该判定体现了两个物理事实：频率越低、菲涅尔区越大，对地形起伏越敏感；路径越长、曲率下坠越大，越容易被中间地形遮挡。

边界处理：若路径中间点高程数据缺失，函数返回"未知"而不是"可通"。这一点是特意保留的——早期实现把空数据当作可通，导致覆盖度恒为 100%，在改进后覆盖度才反映真实地形。

3.6 覆盖度与选址五维评分

覆盖度定义为视距可见代表点占可比对代表点的比例：

Cov = N_visible / N_total * 100%

综合评分由五项加权求和（权重之和为 1）：

S = 0.40*Cov + 0.20*H + 0.15*R + 0.15*N + 0.10*D

项	含义	计分口径
Cov	覆盖度	视距可见比例；数据不足时按经验中值参与，不计满分
H	相对高度优势	H = clamp(50 + 1.5 * (h_cand - h_median), 0, 100)
R	半径符合度	最远点距离不超过需求半径记 100；超出按超出比例线性扣分
N	与现有网互补	与最近站点距离 <1 km 记 20，1–3 km 记 45，3–15 km 记 90，15–30 km 记 70，>30 km 记 55
D	测向几何	与现有测向站能否在 40 km 内形成基线：能则按基线长度计分，不能记 30

候选点生成采用"区域内网格 + 区域外环"两段策略：区域网格保证均匀覆盖，外环按六个方位在 1.2 倍半径处布点，因为制高点往往落在区域之外。采样点总数与候选点总数均设上限，超限时等间隔抽稀，以控制外部高程接口的调用量。

3.7 占用度统计与占用段合并

对扫描采样点序列，先以门限 T 判定超限点，再按采样步长合并相邻超限点为"占用段"：

O = N_over / N_total * 100%

段合并判据： f(i+1) - f(i) <= 2.5 * step

每个占用段输出中心频率、上下边界、占用带宽（kHz）、峰值电平、均值电平与点数；同时输出按 1 MHz 分段的占用度与峰值。实现上有一处必须注意：分段键必须使用字符串而非浮点数——PHP 中浮点数数组键会被截断为整数，145.1 MHz 与 145.2 MHz 会落进同一个键，导致分段统计整体失真并触发精度丢失告警。

3.8 调制与业务粗判

在缺少解调能力时，用带宽启发式结合频段业务映射给出候选判断，并明确标注为"粗判"。规则例如：占用带宽不大于 8 kHz 判为窄带数字业务；8–16 kHz 判为 12.5 kHz 信道栅格的窄带对讲；16–30 kHz 判为 25 kHz 栅格的模拟对讲；30–200 kHz 判为广播或宽带业务；大于 200 kHz 判为宽带信号（图传、数据链、电视）。同时按频段给出候选业务（如 118–137 MHz 航空通信、144–148 MHz 业余业务、400–470 MHz 公众对讲与数字对讲、806–960 MHz 集群通信），并在备注中出现"数字""广播"等关键词时对结论进行加权修正。

3.9 设备配置推导

设备建议由规则推导而非自由生成，四条主要推导链如下：由频段推导接收机带宽与滤波需求（VHF/UHF 建议瞬时带宽不小于 10 MHz 以支持扫频与占用度统计，HF 需预选与带通滤波抑制强台）；由精度与距离推导单站横向误差（见 3.4），若超出目标定位误差则建议多站交会或时差定位，并给出站间距 5–15 km 与交角 30–150 度的几何要求；由地形最小余隙推导天线架设高度，出现负余隙时给出额外加高量；由现有网体制推导兼容性要求，避免新站无法与既有站联合交会与统一校准。

3.10 哈希固定与审计指纹

文书生成后立即计算 SHA-256 全文哈希并随文存档，查看接口重新计算并比对，任何改动都可被检出，用于证据链固定。审计记录中的来源地址不保存明文，而保存 SHA-1 截断指纹（前缀 + 固定盐），既支持同类事件的关联分析，又不落入个人可识别信息的存储风险。

第四章 AI 工程实现

4.1 材料构造与提示词结构

AI 调用统一采用"材料 + 任务"两段式：材料段由代码严格构造，只包含本库统计、阈值口径、候选排序与规则推导结果；任务段给出固定输出小节与字数上限。这样做的目的是把"事实"与"表述"分离——事实由代码给出，AI 只负责组织语言与取舍分析。

以选址研判为例，材料段包含需求原文与解析结果、区域采样点数与高程统计（中位数与分位差）、前五个候选点的分项数据、现有监测网摘要、地形数据来源与视距判定口径、以及设备配置推导逐项结论。输出小节固定为：首推与理由、备选取舍、布点组合、设备配置建议、现场核查清单、局限与不确定性。

4.2 护栏的工程实现

护栏	实现方式
只依据材料	提示词限定"不得引用材料之外的结论"；材料中不提供未经验证的事实（道路、供电、价格等）
必须给依据	输出结构强制包含依据小节；法规类回答必须给出条文名称与条号
拒绝越界	对规避监管、隐瞒违规、超功率不被发现、代他人发射等请求，提示词要求明确拒绝并给出后果与正确做法
不许编造	推荐型号只能引用目录中已有条目；目录由代码维护，AI 无权增删
必须声明局限	生成后代码检查是否包含免责或边界声明，缺失则自动追加

4.3 缓存、限额与故障转移

缓存键由"问题文本或材料摘要 + 提示词版本"构成，提示词版本变化即失效。限额按身份分级：注册用户每日 60 次，游客按来源地址每日 3 次，计数存于键值存储，跨请求有效。AI 接口层支持多接口配置并按序尝试，任一接口超时或报错自动切换下一个，切换过程对业务透明；每次调用（含缓存命中）均写审计，便于

成本核算。

第五章 PDF 文档引擎实现

为避免任何第三方依赖，系统自研了 PDF 生成器与中文字体内嵌链路。本章给出实现要点与必须遵守的规范约束。

5.1 对象模型与交叉引用

生成器按对象号顺序组织：目录对象、页面树对象、字体对象（Type0 与后代 CIDFont）、字体描述符、字体文件流、ToUnicode 映射流，页面与内容流从固定号之后成对分配。内容流不使用压缩，长度精确写入 /Length；交叉引用表每条固定 20 字节（10 位偏移 + 5 位世代 + 状态符 + 结束符），trailer 中给出 /Size 与 /Root，文件以 startxref 与 %%EOF 收尾。对象号分配必须与页面对象号严格错开，否则内容流会指向错误对象导致页面空白。

5.2 中文字体内嵌全流程

步骤	技术要求
抽取单字体	系统字体多为集合格式（TTC）。需读取集合头得到各字体目录偏移，读取该字体的表目录（tag/checksum/offset/length），重建为独立 TTF：重排表偏移、按 4 字节对齐、按规范移除数字签名表 DSIG
解析字符映射	解析 cmap 表并优先采用平台 3、编码 10 的 format 12 子表，其次 format 4。注意所有子表偏移都是相对 cmap 表起点的相对偏移，必须加上表起点才是文件绝对偏移（漏加会导致读到错误位置、解析结果为空）
读取字宽	按 hhea 的 numberOfHMetrics 与 maxp 的 numGlyphs 读取 hmtx，宽度按 1000/unitsPerEm 归一，供排版与 PDF 的 /W 数组使用
写出字体对象	字体以 Type0 + 后代 CIDFontType2 内嵌：编码 Identity-H，CIDToGIDMap 取 Identity（即 CID 等于字形索引），/W 数组按 CID 升序给出各字形宽度，并生成 ToUnicode 映射使文本可检索可复制
重算校验和	重打包后必须把 head 表中的 checkSumAdjustment 置零，按 4 字节累加计算整字体校验和，再写入 0xB1B0AFBA 减去该和的差值。严格字体引擎（如 macOS CoreText、浏览器内置渲染器）会因校验和不符而拒绝加载字体，表现为整页无字

5.3 版式算法

排版以字符宽度累加为基础：有内嵌字体时使用字体真实字宽（1/1000 em 归一后乘以字号），无字体时按中日韩字符 1 倍字号、西文 0.6 倍字号估算。换行按宽度上限逐字累加、超限回退；表格按列权重分配宽度并对单元格独立换行，行高由该行最多行数决定；分页以"当前纵坐标减去所需高度小于页脚安全线"为条件触发，并在新页重绘页眉与页脚。

5.4 兼容性约束

页面绘图运算被限制在最通用的子集：文字（BT/ET + Tj）、直线（m/l/S）、颜色（rg/RG/w）。工程实践中发现，个别阅读器对矩形填充与路径裁剪的处理不一致，一旦页面出现这类构造便可能整页不渲染；因此表格改用"文字 + 表头线 + 行分隔线"表达，提示框改用"左侧色条 + 文字"表达。这一约束换来的是跨阅读器的一致可见性。

5.5 验证方法

手段	命令或实现	判读

字体是否内嵌	pdffonts file.pdf	emb 列应为 yes；应显示 CID TrueType 与 Identity-H
页数与元信息	pdfinfo file.pdf	Pages 与 Title 符合预期
文本可提取	pdftotext file.pdf -	中文可提取即说明 ToUnicode 与字形映射正确
视觉复核	pdftoppm -png -r 100 file.pdf out	逐页渲染，检查是否有空白页或串列
结构自校验	解析内容流统计 q/Q 与 BT/ET 是否配对、是否含被禁算子、文字纵坐标是否落在页内	任何一项不符即判定为异常页

第六章 安全、权限与审计

6.1 身份与令牌

专业模块使用独立签名令牌：登录成功后生成随机令牌，值存于服务端键值存储并映射用户与单位，客户端持有 HttpOnly 的 Cookie，路径限定为模块目录，有效期 12 小时。令牌校验时重新查询用户与单位状态，单位被停用即拒绝访问。该设计不与站点会话共用任何字段，避免权限串扰。

6.2 权限矩阵

岗位	典型允许动作
监测员	读台站与记录、录入记录、单条研判、任务查看
分析员	在监测员基础上增加批量研判、AI 研判
执法人员	读数据、建案与案件维护、AI 研判
审核	增加台站库写入、审计查看、单位认证审核
管理员	全部动作
体验 / 游客	只读与测算类动作；不包含任何写库动作；游客的 AI 按来源地址限 3 次/日

6.3 审计字段与用途

审计记录包含操作人、单位、动作、对象、详情 JSON、来源地址指纹与时间。典型的可回答的问题包括：某条监测记录是谁在什么时候录入的；某份文书是谁生成的、哈希是多少；某个单位的账号最近的登录与操作情况；某次 AI 调用消耗在哪个问题上。审计表只增不改，写入失败不影响主业务，但会记录到错误日志以便排查。

第七章 质量保障与缺陷案例库

7.1 验证分层

层次	做法	代表性结论
算法层	命令行数学断言；构造精确解、带噪解、退化解三类输入	精确方位交会误差小于 20 m；2 度精度下 300 m 量级；近平行观测被判为精度不足
几何层	多边形内外判定、面积计算、网格采样与抽稀	多边形面积与理论值误差小于 6 平方千米级；抽稀后分布均匀
接口层	按页面实际请求的 URL 形状逐个验证鉴权与返回	游客可读不可写；越权动作在服务端被拒
界面层	真实浏览器端到端操作并断言页面状态	登录、录入、研判、建案、文书、选址、导出全流程可走通
文档层	字体与结构校验（见 5.5）	字体已内嵌；无空白页；文本可提取

7.2 缺陷案例与根因

案例一（数据失真）：占用度分段以浮点数作为数组键，语言的隐式类型转换把相邻频段合并，统计结果整体错误。根因是语言层面对数组键类型的隐式转换未被察觉。修法是显式使用字符串键，并对同类分组统计建立检查习惯。

案例二（统计误导）：交会解算在完美拟合时以残差估计后验方差，协方差塌缩为零，误差椭圆退化为零，输出"零误差"的假象。根因是缺少边界条件分析。修法是给后验方差因子设置下限，保证几何不确定度不被残差掩盖。

案例三（交付格式）：内嵌字体在重打包后未重算整体校验和，宽松渲染器正常、严格渲染器拒绝加载，表现为部分页面完全无字；随后又发现个别阅读器对矩形与裁剪构造处理不一致，同样导致整页不渲染。根因是二进制格式的规范约束被忽略，且验证手段只看"在自己环境能否显示"。修法是按规范重算校验和，并把绘图运算限制到最通用子集，同时把 pdffonts 与逐页结构自校验纳入验收流程。

案例四（链路断裂）：页面内请求参数拼接时判断对象错误（判断了动作名而非基础地址是否已含问号），导致所有带参数的请求被服务端判为未知动作；而不带参数的请求仍然正常，掩盖了问题。根因是"部分可用"造成的误判。修法是统一包装请求构造，并按页面实际请求形状做接口链路验证。

7.3 发布纪律

凡修改前端脚本或样式，必须同步提升引用版本号，避免浏览器缓存旧文件（站点静态资源缓存 12 小时）；凡修改算法或提示词结构，必须提升相应缓存键版本，避免读取旧结构；凡交付二进制文档，必须同时执行字体与结构校验，并保留校验输出作为发布记录。

第八章 接口规范摘要

接口统一使用 GET 或 POST，动作名经 a 参数传入；除公开动作外，均需身份与岗位校验。返回结构为 code（0 为成功）、msg（可读信息）、data（业务数据）。以下按业务域列出主要动作。

业务域	主要动作	权限
身份与统计	登录、退出、当前身份、统计、单位申请	公开或登录
台站执照库	列表、保存	读：登录；写：审核/管理员
监测记录	列表、新增、单条研判、批量扫描	读：登录；写：具备录入权限的岗位
频谱分析	批次列表、批次详情、保存、转入疑似记录	读：登录；写：具备录入权限的岗位
监测资源库	站点列表、覆盖评估选站、保存、批量导入、生成演示网	写：审核/管理员；游客仅读
选址助手	综合分析、AI 研判、加入台账	分析：登录；写入台账：审核/管理员
干扰与案件	工单增改与推进、案件增改、流程推进、文书生成与查看	按岗位
报表与导出	区间汇总、月报、频谱交换导出、记录导出、设计方案 PDF、技术文档 PDF	读：登录；文档：公开
管理端	单位审核、人员岗位调整、台站批量导入	管理员

附录 A 常量与阈值一览

常量	取值	含义
频率匹配容差	0.005 MHz	判定监测频点是否落在某台站核准频段内的容差

频段外延伸容差	1.0 MHz	超出核准频段但在该范围内视为"疑似超频段"，需人工确认主体
功率容差倍数	1.20	实测功率超过核准功率该倍数视为疑似超功率
设置区域阈值	30 km	实测位置与台址距离超过该值视为疑似超区域
风险分权重	高 60 / 中 35 / 低 15	疑似项按级别加权，结论取最高级别项
基准测向精度	3 度	未标注精度时的权重基准
卡方分位数	5.991	95% 置信椭圆缩放系数（2 自由度）
地球半径	6371.0088 km	球面距离计算
曲率系数	0.0785	等效地球半径 4/3 下路径中点下坠系数
菲涅尔系数	17.32	第一菲涅尔半径系数（f 单位 MHz，d 单位 km）
余隙判据	0.6 * F1	视距可通所需最小余隙
地形缓存网格	0.001 度（约 110 m）	高程缓存粒度
地形缓存时长	30 天	地形数据有效期
AI 缓存时长	24 小时	相同问题或材料的缓存有效期
AI 日限额	注册 60 次 / 游客 3 次	按身份分级；游客按来源地址
登录令牌有效期	12 小时	专业模块令牌

附录 B 符号表

d 距离（公里）；f 频率（MHz）；phi 纬度；lam 经度；theta 方位角；alpha 观测方位角；sigma 测向标准差（度）；w 权重；J 雅可比矩阵；W 权重对角阵；C 协方差矩阵；lam1、lam2 协方差特征值；K95 卡方分位数；F1 第一菲涅尔半径（米）；t 路径归一化位置；h 天线高度（米）；mu 微（10^-6）。

附录 C 术语

AOA 到达角测向；TDOA 到达时间差定位；GDOP 几何精度因子；CEP 圆概率误差；DEM 数字高程模型；SRTM 航天飞机雷达地形测绘数据；ITU-R SM.1809 频谱监测数据交换建议书；TTC 字体集合格式；CID 与 GID 分别指字符标识与字形索引；OpenType 校验和指字体整体校验和，其规范值为 0xB1B0AFBA。

结语

本手册记录的不是"能做什么"，而是"每一步怎么算、为什么这样算、边界在哪、怎么证明它对"。工程系统最终的可信度来自可复算的公式、可追溯的数据与可核查的交付物。

研发与实现：郭烁恒 / BG5UMG　（本文档为测试阶段版本，随代码迭代更新。）