

民航运行中甚高频通信覆盖优化方案研究

刘家琿¹ 何 怡²

LIU Jiahui HE Yi

摘 要

甚高频 (VHF) 通信是民航地空话音通信的核心手段, 其覆盖质量直接关系到飞行的安全与效率。针对其面临的覆盖盲区、信号干扰及可靠性等挑战, 文章提出一套综合优化方案, 从增强链路传输、抑制干扰信号、规划天馈系统与台站、网络化冗余架构四个维度设计, 融合链路预算精确计算、基于 VoIP 的多重传输冗余等关键技术。分析表明, 该优化方案能有效扩展通信视距、提升信号质量, 为民航 VHF 通信网络的升级改造提供可行的技术路径。

关键词

民航运行; 甚高频通信; 优化方案

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.04.016

0 引言

民航 VHF 通信主要承担空地指挥任务, 是空管运行链路中的基础通信手段。《民用航空通信监视设备开放与运行管理规定》与《中国民用航空无线电管理规定》均将甚高频通信设备运行可靠性纳入管理要求, ICAO Doc 9718 (《民用航空无线电频谱需求手册》) 亦对 VHF 频率指配和有害干扰防护提出统一准则。但在航班密度上升且复杂电磁环境叠加条件下, 现有 VHF 系统覆盖边缘衰减、邻频侵入与互调落频等问题仍较突出, 通信覆盖优化随之转化为链路传播、干扰识别抑制与站网配置的协同分析问题^[1]。覆盖优化现有 VHF 通信网络, 对于保障民航安全、提升运行效率具有现实意义。

1 甚高频通信组成

VHF 地空通信系统是面向视距语音联络构建的专用通信网络, 其总体架构由地面台站、传输网络和监控管理三部分组成, 三者共同支撑空地语音信号的接入、传输、调度与运行监视, 典型物理及网络拓扑如图 1 所示。

地面台站子系统处于系统前端, 承担射频信号的发射与接收任务, 布设于机场塔台区域及航路遥控地空通信台 (RCAG) 等节点^[2]。该子系统中心为 VHF 收发信机, 工作频段为 118~137 MHz, 采用双边带调幅 (double sideband amplitude modulation with carrier, DSB-AM (C), ITU 标识 A3E) 体制, 满足民航地空语音通信对实时性的要求。就设备性能而言, 发射机额定输出功率为 10~100 W, 调制度可达到 85%; 接收机灵敏度则优于 -100 dBm, 同时还须具备较高的邻道选择性、

杂散抑制能力, 进而保证在复杂电磁环境下维持稳定的接收质量, 相关技术指标如图 2 所示。

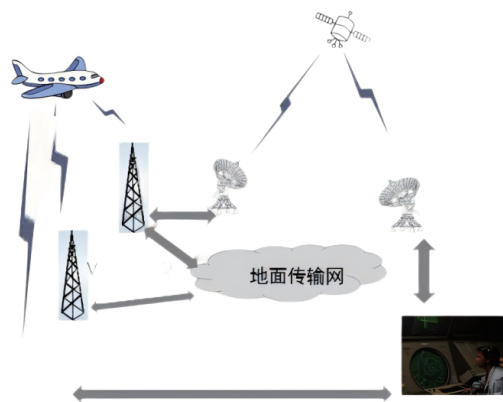


图 1 民航地空通信系统示意图



图 2 民航地空 VHF 通信系统构成

一个基本的地面基站可由一部收发信机与天线组成半双工通信单元。信号经由合路器/分路器、功率放大器 (HPA) 及低噪声放大器 (LNA) 等处理, 经天线辐射或接收。传输网络子系统负责将远端台站与管制中心互联, 采用民航专用 TDM 或 IP 网络 (如 FA16), 以双路由热备方式高可靠地承载遥控信号与话音业务^[3]。集中监控管理子系统是系统的控制中枢, 基于网管软件达成对全网设备的远程配置、状态监控与故障诊断, 保障系统可用性的关键指标。

1. 中国民航飞行学院 四川成都 611431

2. 四川省机场集团有限公司成都天府国际机场分公司
四川成都 641419

2 民航运行中甚高频通信覆盖优化方案设计

2.1 天线系统优化与站点规划

基于电磁辐射基本原理, 天线在远场的辐射强度由其方向性系数 D 和效率 η 共同决定, 即增益 $G=\eta D$ 。民航 VHF 地空通信采用垂直极化的半波对称振子或其变形作为基础辐射单元, 其自由空间增益约为 2.15 dBi。机场终端区等需 360° 覆盖的场景, 采用此类全向天线阵以提升垂直面增益^[4]。针对线状航路或特定扇区的深度覆盖需求采用定向天线, 利用其引向器和反射器结构将能量集中辐射至预设方位角 (如水平波束宽度 60°) 与俯仰角范围。为在特定方向实现超远距或盲区覆盖, 可采用全向与定向天线合装的复合阵列, 其总辐射方向图 $F(\theta, \phi)$ 由阵列因子 $AF(\theta, \phi)$ 与单元方向图 $f_e(\theta, \phi)$ 的乘积决定:

$$F(\theta, \phi) = f_e(\theta, \phi) \cdot \sum_{n=1}^N I_n e^{j(k\hat{r} \cdot \mathbf{r}_n + \beta_n)} \quad (1)$$

式中: I_n 和 β_n 分别为第 n 个单元的激励电流幅度与相位; k 为波数; $\mathbf{r}_n$ 为其位置矢量。优化 β_n (相位调谐), 可使阵列在目标方向 (θ_0, ϕ_0) 上同相叠加, 获得远高于单一天线的指向性增益。

甚高频通信覆盖受传播几何条件约束, 标准大气折射条件下通常采用等效地球半径法, 取地球半径为 $R_e=8\,500\text{ km}$ 计算近似值。收发天线之间的理论视距可表示为:

$$d_{\text{LOS}} \approx 3.57 \times \sqrt{h_t} + \sqrt{h_r} \text{ (km)} \quad (2)$$

式中: h_t 、 h_r 为收发天线海拔 (m)。

结合 ITU-R P.528 等航空无线电传播模型, 将站点坐标、工作频率、天线三维方向图以及高精度数字高程数据输入仿真环境, 计算路径损耗 L_{path} 形成不同高度层上的覆盖等值线图^[4]。该模型能将地形遮挡、绕射损耗和大气折射等因素纳入分析, 更符合民航运行场景下的实际传播条件。

站址筛选过程中, 第一菲涅尔区净空分析是判断链路可用性的关键。其半径可表示为:

$$r = 17.3 \times \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f \cdot D}} \text{ (m)} \quad (3)$$

式中: d_1 、 d_2 为障碍物至收、发两端的距离; D 为链路总长度 (km); f 为频率 (MHz)。

基于不同候选站址的覆盖仿真结果、航路关键点场强水平及时间可用度, 比较各方案站点数量、运行维护成本差异, 进而确定满足运行指标约束的最优站址组合。

2.2 VHF 通信链路传输距离

受地球曲率影响, 地空通信不具备超视距传播特性, 其最大传播边界由收发两端天线高度决定。考虑标准大气折射后的等效地球半径 R_e , 理论视距可表示为:

$$d = \sqrt{2R_e h_1} + \sqrt{2R_e h_2} \quad (4)$$

式中: d 为理论视距距离; h_1 和 h_2 分别为地面天线与机载天线的高度 (单位: m)。

该值反映通信链路在理想传播条件下的物理上限, 而实际运行中的可靠通信距离还需满足接收电平、系统损耗和衰落余量等条件约束^[5]。链路可达性的判定通常以接收机输入功率 P_r 为核心指标, 其计算关系为:

$$[P_r] = [P_t] + [G_t] + [G_r] - [L_{fs}] - [L_{sys}] \quad (5)$$

式中: $[P_t]$ 为发射功率; $[G_t]$ 、 $[G_r]$ 为收发天线增益; $[L_{sys}]$ 为馈线、合路器等系统损耗; $[L_{fs}]$ 为自由空间路径损耗。

对于工作频率为 f (MHz)、传播距离为 d (km) 的 VHF 链路, 自由空间路径损耗用公式表示为:

$$[L_{fs}] = 32.44 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d \quad (6)$$

合规范范围内, 采用更大功率的发射机与更高增益的定向天线, 提升等效全向辐射功率。接收机前端应用低噪声放大器以降低系统噪声系数, 并选用高灵敏度接收机, 降低可解调的最小信号门限 $[P_{\text{sens}}]$, 链路余量 $[M]=[P_r]-[P_{\text{sens}}]$ 则要求在实际传播衰落 (如多径、大气波动) 下仍能满足解调要求 (通常余量 $\geq 10\text{ dB}$)。

2.3 干扰信号识别与抑制

VHF 通信干扰主要源于有限频谱资源下的电磁兼容矛盾, 可分为外部侵入干扰与系统自身产生的互调干扰两大类^[6]。外部干扰包括非法同频信号、邻道泄漏及工业宽带噪声; 系统内部干扰主要由共址多部发射机的非线性特性引发, 产生高阶互调产物, 其频率可落入接收信道, 其强度与发射信号功率及非线性度直接相关。三阶互调产物的频率为 $2f_1 - f_2$ 或 $f_1 + f_2 - f_3$, 若此结果落在在用频点 f_r , 即 $(2f_1 - f_2) - f_3 \leq B$ (B 为接收带宽), 将形成难以滤除的内部干扰。部署基于软件无线电 (SDR) 的自动频谱监测网络, 连续扫描与特征分析智能识别干扰并进行分类。结合到达时间差 (TDOA) 定位算法, 可精确定位干扰源。

射频前端采用高 Q 值腔体滤波器或可调谐预选滤波器, 提供陡峭的带外抑制, 从根本上阻断强邻频干扰^[7]。系统互调关键在于优化频率规划, 计算并规避互调产物落入敏感频段, 选用高线性度功放以降低互调电平。信号处理层面可在接收机基带采用自适应干扰抵消 (AIC) 技术, 该算法通过估计干扰信号参数 $\hat{j}(t)$ 并从接收信号 $y(t)$ 中减去, 即 $s(t) = y(t) - \hat{j}(t)$, 有效抑制同频带内的稳态干扰。

2.3.1 布设监测点

监测范围 (R) 需考量发射机功率 (P) 与天线特性, 以台站天线为中心, 将中心半径 1 km 以内的区域划定为核心监测区, 此区域需实现网格化布点, 覆盖居民区、学校、医院等电磁敏感目标。核心区外根据地形和主要干扰传播路径, 在主导方向上延伸设置若干个背景监测点。点位选址需规避高层建筑、高压输电线等可能造成二次反射或遮挡的物体, 优先选择开阔地带。监测仪器选用 Narda SRM-3006 或 R&S FSH 系列手持式频谱分析仪, 其频率范围需覆盖 100 kHz~3 GHz 以上, 分辨率带宽 (RBW) 调至 1 kHz 以下。

现场测量时, 天线探头应距地 1.5~2 m, 模拟人体接收高度并远离操作者身体 0.5 m 以上, 减小人体对测量的影响。每个监测点进行不少于 5 次的独立采样, 每次测量时长不低于 2 min, 以统计平均场强值(单位: V/m 或 dBμV/m)并记录频谱瀑布图, 捕捉间歇性干扰。基于对背景噪声电平、信号占用度、异常谱峰等特征的长期监测, 建立台站电磁环境本底数据库, 为干扰的自动识别、门限预警与趋势预测提供数据基础。

2.3.2 硬件处理

在射频端口, 石英晶体滤波器等高选择性预选器工作于 117.975~137.000 MHz 业务频段, 典型 3 dB 带宽为 30 kHz, 插入损耗 ≤4.3 dB, 中心频率 ±50 kHz 和 ±500 kHz 处阻带衰减分别达到 40 dB 和 80 dB 量级, 品质因数 $Q=f_0/B_{3\text{dB}}$ 处于 $10^3\sim10^4$ 区间, 保证通带幅频特性平坦的同时实现对邻道及带外干扰的陡峭抑制(如表 1 所示)。

表 1 石英晶体滤波器典型技术指标

指标	技术参数范围	说明
频率范围	117.975~137.000 MHz	覆盖民航 VHF 通信业务频段
中心频率	固定于指定工作信道	按频率指配确定
3dB 带宽	30 kHz	满足 25 kHz/8.33 kHz 信道需求
插入损耗	≤4.3 dB	保证链路损耗在可接受范围内
阻带衰减	≥40 dB(±50 kHz)	有效抑制首邻道干扰
	≥80 dB(±500 kHz)	抑制远端带外及强干扰信号
反向损耗	≥20 dB	改善端口匹配, 减少反射
功率容量	≥5 W (约 37 dBm)	满足地面发射机输出等级要求

位于接收链路中的抑制器以 DSP 为处理核心, 分析经预选后的信号进行功率谱、频率与时间特征并提取以干扰成分为主的参考分量 $j(t)$, 通过自适应滤波器权值向量的迭代更新, 实时运算接收信号 $y(t)$, 输出干扰抑制后的有效信号 $s(t)=y(t)-j(t)$, 在同频及邻频稳态干扰存在时提高等效载干比^[8]。屏蔽与隔离部分基于金属机箱、局部屏蔽罩、屏蔽电缆、隔离变压器和专用隔离放大器结构形成电磁屏蔽与电气隔离路径, 将高功率、强辐射单元与低电平敏感级在物理空间和电路拓扑上分离, 限制外部场和内部串扰沿线缆与地网的耦合传播, 使 VHF 前端在射频域和空间域对干扰完成前置削弱。

2.3.3 软件算法智能处理

于阵列信号模型与空域信号分离理论, 对多径和同频干扰进行精细抑制。设地面 VHF 阵列天线包含 M 个阵元, 窄带平面波模型下的接收量表示为:

$$X(t) = \mathbf{a}_s(\theta_s)s(t) + \sum_{k=1}^K \mathbf{a}_k(\theta_k)j_k(t) + n(t) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{a}_s(\theta_s)$ 、 $\mathbf{a}_k(\theta_k)$ 分别为直达信号与第 k 个干扰的导向矢量; $n(t)$ 为加性噪声。阵元间距通常取约 0.5λ , 按 130 MHz 中心频率计, 电磁波波长 $\lambda \approx 2.31$ m, 阵元间距约 1.15 m, 可在地

面站尺寸约束内获得较窄主瓣和受控旁瓣。基于 N 个快拍数据构造样本协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t) \quad (8)$$

采用 RELAX、MUSIC 等高分辨率谱估计算法得到 θ_s 、 θ_k 及相对幅度估计, 并据此构造约束矩阵:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{a}_s(\theta_s), \mathbf{a}_1(\theta_1), \dots, \mathbf{a}_K(\theta_K)], \quad \mathbf{f} = [1, 0, \dots, 0]^T \quad (9)$$

该框架下, 波束形成权值向量 $\mathbf{w}$ 由线性约束最小方差 (LCMV) 准则用公式表示为:

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{w} \quad \text{s.t. } \mathbf{B}^H \mathbf{w} = \mathbf{f} \quad (10)$$

其闭式解为:

$$\mathbf{w} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{B}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{f} \quad (11)$$

阵列输出表示为:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{X}(t) \quad (12)$$

在该权值下, 直达信号方向获得单位增益, 干扰方向输出功率在二次型意义下被压制, 实现空域零陷与主瓣保持并存。对于经空域处理后仍残留的窄带稳态干扰, 基带侧构建自适应干扰抵消结构, 引入以干扰成分为主的参考信号 $u(t)$, 采用 LMS 或 RLS 算法更新权值向量 $\mathbf{w}_a$, 误差信号表示为:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}(t) - \mathbf{w}_a^T u(t) \quad (13)$$

此时, 均方值收敛到最小, 可削弱残余干扰分量。25 kHz 信道条件下, 基带采样率通常不低于 50 kS/s, 协方差估计快拍数 N 取数百至上千即可获得稳定特征分解结果, 保证波束方向图与自适应滤波器收敛特性满足 VHF 通信对载干比与可用度的工程指标约束。

2.4 网络化协同与冗余覆盖

航空器发射信号后, 处于其不同方位和距离的 N 个地面 RCAG 站会同时接收。设第 i 个台站接收到的复基带信号为:

$$r_i(t) = h_i s(t) + n_i(t) \quad (14)$$

式中: h_i 为表征该路径衰落的复信道系数; n_i 为加性高斯白噪声^[9]。

各支路的瞬时信噪比为:

$$\gamma_i = |h_i|^2 E_s / N_0 \quad (15)$$

信号经由独立、冗余的传输链路被送至中央信号择优器, 择优器采用最大比合并等算法进行信号处理。MRC 下合并后的输出信噪比为各支路信噪比之和为:

$$\gamma_{\text{MRC}} = \sum_{i=1}^M \gamma_i \quad (16)$$

对于独立同分布的瑞利衰落信道, 系统的中断概率近似为:

$$P_{\text{out}} \approx (\gamma_{\text{th}} / \bar{\gamma})^M / M! \quad (17)$$

式中: $\bar{\gamma}$ 为平均信噪比。

上述公式表明中断概率随参与协同的台站数量 M 呈幂律

下降，获得的分集增益 $G_d = M$ 。

冗余覆盖则通过多层级的备份架构设计，保证单一故障不引发服务中断。在传输层，为每个远端台站至控制中心配置至少两条不同物理路由的传输链路，构成“双路由”热备。设单条传输链路的可用性为 A_i ，则双路由并联的传输子系统可用性提升至 $A_{T\text{-}sys} = 1 - (1 - A_i)^2$ 。在设备与站点层，VoIP 媒体网关、信号择优器等关键网元采用 $N+1$ 集群化部署，实现负载均衡。在覆盖层，当主用台站因故障失效时，网络控制中心可自动指令备用台站启动覆盖补盲程序，通过动态提升其发射功率 ΔP 或调整天线波束指向来接管服务。所需功率补偿量 ΔP 可由链路预算方程反推确定：

$$[P_{r, \min}] = [P_{t, \text{new}}] + [G_L] - [L_{\text{path}}(d_{\text{new}})] + [G_r] \quad (18)$$

式中： d_{new} 为备用站至目标覆盖区的距离； $[P_{r, \min}]$ 为维持通信所需的最低接收功率。优化控制 ΔP 可在确保覆盖连续性的同时，有效管理系统间的同频干扰^[10]。

3 甚高频通信覆盖优化方案效果分析

为评估前述优化方案的综合效能，研究设计基于仿真与实测对比的实验分析：相同的典型航路环境下，对比部署优化措施前后，系统在覆盖距离、通信质量及可靠性三项关键指标上的差异。利用 WinProp 无线规划软件，输入优化前后两种配置的天线方向图数据、站点坐标及地形数据，进行覆盖仿真，生成信号场强等值线图并量化覆盖范围的扩展^[11]。在此基础上组织实际飞行测试，在目标航路上采集关键点的接收信号电平、信噪比及 MOS 值。网络化协同的效果可通过模拟主用站点故障，测试备用站点接管通信的切换时间和通话连续性来验证（如表 2 所示）。

表 2 优化方案关键性能指标对比分析

评估指标	单一全向 天线站	优化方案	性能提升说明
最大可靠 通信距离	约 280~300 km (以 119.3 MHz 为例)	约 380 km (相同频率)	通过方向性增益将特 定方向覆盖距离延伸 80~100 km，有效消除 远距离盲区。
关键航路 点信号质 量(MOS)	3.0~3.5 (可接 受,偶有断续)	4.0~4.5 (良 好,清晰稳定)	网络择优机制选择最 优信号，对抗衰落与干 扰，提升语音稳定性。
系统 可用性	99.9% (单站单路由)	>99.99% (双站双路由 冗余)	通过传输与设备冗余， 将系统中断概率降低 一个数量级以上。
抗局部故 障能力	站点或路由故 障导致通信完 全中断	无缝切换	依托异地备份与网络 化架构，单一节点故障 不影响整体服务。

表 2 所示结果表明，优化方案的远端航路盲区大幅压缩，语音由基本可辨、偶有断续变为清晰稳定，说明网络择优对衰落具有较好的抑制作用。系统中的单站单路由结构理论值约为 99.9%，而双站双路由冗余架构可提升至 99.99% 以上，系统中断概率下降一个数量级以上。局部站点或传输路径故

障条件下，原系统将出现通信中断，而优化后系统能无感知切换业务，表明网络化协同与异地备份机制已具备较高的连续运行能力^[12]。

4 结论

民航运行对地空通信可用性的要求极高，甚高频覆盖优化不只是通信距离补偿问题，而是保障终端区指挥和应急处置顺畅衔接的基础条件。现有系统在复杂地形且高密度频率使用条件下，容易出现边缘弱覆盖、干扰叠加等现象，说明靠经验设台或静态扩容难以适应精细化运行需求。分析表明，影响覆盖效果的关键因素十分复杂，在分析传播机理的基础上，以链路预算校核有效场强，站址和天线方向设计可提升关键空域覆盖，监测识别抑制降低干扰影响，网络化冗余则可提高故障条件下的通信连续性，形成与民航高可靠运行要求相匹配的甚高频通信保障体系。

参考文献：

[1] 高池,李明巧.民用航空甚高频通信无线电干扰监测与预防措施[J].中国宽带,2025,21(11):133-135.
[2] 焦洋.民航甚高频通信站无线电干扰分析及应对措施[J].中国高新科技,2024(18):26-28.
[3] 赵国督.民航甚高频通信干扰及处理措施研究[J].无线互联科技,2024,21(10):17-20.
[4] 徐亚军,吴红洪,曾葆鸿,等.基于数字高程模型的民航甚高频地空通信信号覆盖仿真[J].科学技术与工程,2024,24(1):95-103.
[5] 廖铮.民航甚高频通信中互调干扰的对策[J].电子技术与软件工程,2021(20):1-2.
[6] 孔令帝,裴湜.民航地空甚高频通信系统分析及测试[J].计算机与网络,2024,50(2):111-115.
[7] 谢文泽.民航甚高频地空通信系统运行原理与常见故障维护[J].仪器仪表用户,2024,31(1):25-27.
[8] 郑涑.民航甚高频通信系统的可靠性分析与措施[J].数字技术与应用,2023,41(11):118-120.
[9] 董宴冰.民航甚高频系统某台站某频率无法发射的故障排查及分析[J].中国信息界,2025(3):177-179.
[10] 段长夏.民航甚高频地空通信电台的防干扰措施研究[J].通讯世界,2024,31(5):61-63.
[11] 刘婧.民航甚高频通信干扰现象处理探讨[J].中国宽带,2024,20(6):58-60.
[12] 闫秋芳.甚高频全向天线与定向天线合装应用及性能分析[J].长江信息通信,2024,37(5):175-177.

【作者简介】

刘家琛（1996—），男，重庆铜梁人，本科，初级工程师，研究方向：民航通信导航监视。

（收稿日期：2025-12-19 修回日期：2026-03-26）