科学技术与教育 2026年第10期
ISSN: 3079-4455

超短波通信距离预估方法的优化设计

赵利*，杨新宇
中国西南电子技术研究所，四川成都，中国
*通讯作者

【摘要】超短波通信技术广泛应用于军事、民用通信领域，精准的通信距离评估是保障通信系统稳定、高效运行的关键。针对传统超短波通信距离预估方法误差较大的问题，本文摒弃仅依托电台参数、天线及馈线等常规参数的传统评估方法，系统研究地形障碍物、大气、天气、环境干扰等多元影响因素，逐一构建对应的通信距离修订方法，并结合实际工程案例完成通信距离核验与评估。本研究成果为超短波通信系统的设计优化、可靠通信提供了技术支撑，具备较高的工程应用价值。

【关键词】地形与障碍物；大气与天气；外界干扰与平台干扰；装机接收灵敏度；通信距离

1.引言

军用超短波通信主要工作在108～400MHz频段，具有信号稳定、可用带宽宽、通信容量大、抗干扰能力强、技术成熟等特点，被广泛应用于飞机、舰船、地面站点/车辆/单兵等平台之间的地-地、地-空、空-空话音/数据通信[1]。通信距离是一项直接关乎战场感知、指挥控制、作战协同作用范围的关键战术指标，其性能预估的准确度对超短波通信系统的合理性设计至关重要。天线高度、天线增益、发射功率、接收灵敏度、调制方式等多个参数是影响超短波通信距离的重要因素，相关文献一般只分析研究单个或多个参数对通信距离的影响[2]，没有考虑地形与障碍物、大气与天气、综合干扰及噪声等影响因素[3]，导致通信距离预估结果存在一定偏差。本文通过分析超短波通信时影响通信距离的各种因素，提出超短波通信距离预估的修订方法，并将该方法应用在实际工程应用中，为超短波通信系统地空/空空通信距离预估与优化设计提供参考。

2.通信距离的主要影响因素

超短波通信以视距传播为主要传输方式，通信距离受多重条件共同制约，核心影响因素可归纳为电台参数、天线与馈线、地形与障碍物、大气与天气、外界及平台干扰五大类。

a) 电台参数

电台参数是决定通信距离的基础条件。发射功率直接影响信号强度，功率越大通信距离越远，同时需符合行业标准与电磁兼容约束，不得超限使用。接收灵敏度决定设备对远距离微弱信号的解调能力，灵敏度越高，有效通信距离越远。合理的调制方式可提升信噪比与抗干扰性能，间接提升通信传输距离与稳定性。

b) 天线与馈线

天线与馈线是影响通信传输效能的关键环节。超短波依赖视距传输，天线高度越高，有效视距范围越大，通信距离上限越高。天线增益直接决定信号收发效率，增益越高，射频信号强度越强，通信传输能力越好。不合理的天线布局易引发设备自干扰、邻频干扰，造成接收灵敏度下降，限制通信距离。此外，馈线长度与损耗呈正相关，工程中需选用低损耗电缆并尽量缩短馈线，减少信号衰减。

c) 地形与障碍物

地形与障碍物是制约超短波通信距离的直观因素。受地球曲率影响，超短波直线传播特性使其无法突破固有视距限制。山体、建筑、植被等障碍物会对信号产生遮挡与绕射损耗，障碍物体量越大、分布越密集，信号衰减越严重，通信距离越短。同时，地面反射会引发多径干扰，造成信号衰落、接收功率降低，大幅降低通信稳定性。平坦光滑地面、水面、硬化路面的反射效应更强，更易造成通信误码甚至中断；粗糙地面与植被山地的负面影响相对较弱。

d) 大气与天气

大气与天气条件是造成通信距离动态波动的主要原因。大气通过折射、吸收、散射等效应影响信号传输质量，折射率的垂直变化会改变电磁波传播轨迹：标准大气下信号可实现常规视距传输；逆温层、湿度分层等气象条件

易形成大气波导与超折射效应[4]，实现超视距传输、大幅延长通信距离；负折射现象则会压缩视距范围，缩短有效通信距离。雨雪、云雾、沙尘、雷电等天气会产生附加传输损耗，降低接收信号功率。超短波频段雨衰效应虽弱于微波，但长距离传输下的累积损耗仍会降低通信可靠性、缩短通信距离。

e) 外界干扰与平台干扰

电磁干扰会通过降低接收机信噪比、恶化接收灵敏度，直接压缩有效通信距离。外界电磁干扰、人为干扰与宽带底噪，会根据干扰强度不同造成通信性能衰减：强干扰会导致接收机饱和阻塞，造成通信中断、距离骤降；常规频段内干扰会降低信噪比，随干扰强度增大，通信距离持续缩短。同时，车载、舰载、机载等通信平台自身的电机、雷达、供电及各类电子设备，会产生固有电磁噪声与耦合干扰，恶化局部电磁环境，降低通信稳定性与有效传输距离。

3.传统通信距离预估方法

3.1 视距预估方法

视距是接收和发射两点之间处在可视范围之间，能互相“看见”的距离[5]，即电磁波沿直线传播的最大距离。

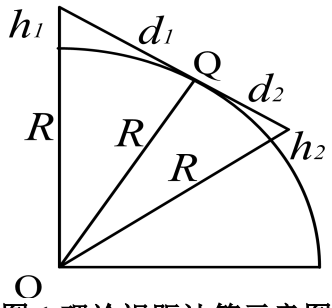


图 1.理论视距计算示意图

不考虑地形的影响并近似认为地球为半径为 R 的理想球形，考虑通信双方为点对点通信，可将视距计算简化为如图 1 所示平面模型。设通信双方的天线高度为 h1 和 h2，则理论视距为双方天线刚好切着地平线看到对方时的距离[6]，即图中的 d1+d2，则理论视距 r 可表示为

$$r=d_1+d_2=\sqrt{2Rh_1+h_1^2}+\sqrt{2Rh_2+h_2^2}$$

考虑 h_1、h_2 远小于 R，上式可近似为：

$$r=\sqrt{2R}\left(\sqrt{h_1}+\sqrt{h_2}\right) \quad (1)$$

其中：R 为地球半径，6370km；h1 和 h2 为收、发天线的高度（单位 m）。

不同高度条件下，地空通信的理论视距如表 1 所示。

表 1.地空通信的理论视距（km）

地面天线高度	0.5 km 机载天线高度条件下的视距	2 km 机载天线高度条件下的视距	4 km 机载天线高度条件下的视距	8 km 机载天线高度条件下的视距	10 km 机载天线高度条件下的视距
5m	87km	167 km	233 km	327 km	364 km
10m	91 km	170 km	237 km	330 km	368 km
15m	93 km	173 km	239 km	333 km	370 km

对于地-空通信来说，通常地面天线架高有限且远小于飞机飞行高度，从表 1 中可看出，飞机飞行高度对视距的影响较为显著。空-空视距与上述计算方法相同，只需将另外一架飞机的飞行高度代入 h2 即可[6]。

3.2 通信距离预估方法

接收功率传统计算公式为：

$$P_r = P_t + G_t + G_r - (L_p + L_t + L_r) \quad (2)$$

其中，Pt：发射机输出功率（dBm）；

Gt：发射机天线增益（dB）；

Gr：接收机天线增益（dB）；

Lt：发射机馈线损耗（dB）；

Lr：接收机馈线损耗（dB）；

Lp：自由空间传播损耗（dB）。

上式中与通信距离 d 和工作频率 f 密切相关的是[7]自由空间传播损耗 Lp，表达式为：

$$L_p = 92.45 + 20\lg f(\mathrm{GHz}) + 20\lg d(\mathrm{Km}) \quad (3)$$

在已知发射功率、接收灵敏度、收/发端天线增益、线损以及工作频率条件下，通过式（2）和式（3）可计算通信距离 d，结合式（1）可得出不同天线高度下的通信距离。

不过，从式（2）和式（3）可以看出，该通信距离计算方法未考虑地形与障碍物、大气与天气以及外界干扰与平台干扰的影响。在地-空/地-地环境、恶劣天气、强外界干扰或平台干扰情况下，传统通信距离计算方法会存在较大误差。

4.通信距离预估的优化设计

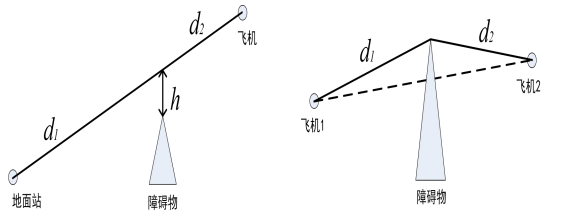
4.1 针对地形与障碍物影响的通信距离修订方法

山地丘陵、沟壑林地、高大建筑、山体遮挡等地形障碍物会阻断直射传播路径，电磁波只能依靠绕射、散射方式继续传输，产生额外绕射损耗；同时地形起伏改变收发天线等效高度，进一步压缩几何视距，是低空超短波通信距离受限的主要地面因素[8]。在通信距离修订前，可先用菲涅尔校验判断链路是否视距通畅，根据初判结果决定选用哪种损耗模型，计

算出附加损耗，再折算实际通信距离[9]。

4.1.1 菲涅尔校验

超短波地-空或超低空通信场景如图 2 所示。



(a) 地-空通信　　(b) 超低空空-空通信

图 2.超短波地-空或超低空通信场景示意图

根据通信场景，结合第一菲涅尔半径（F_1）和菲涅尔余隙（h）判断通信距离是否需要修订。

a) 第一菲涅尔半径

电波不是直线传播，是以收发连线为轴心的椭球状空间通道，通道最粗处的半径即为第一菲涅尔半径。

$$F_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1+d_2}} \quad (4)$$

其中：

1) d_1、d_2：收/发端到障碍物的距离（单位 m）；

2) λ：工作波长（单位 m）。

b) 菲涅尔余隙

收发端之间的连线为视线直线，障碍物顶端到视线直线的垂直高度即为菲涅尔余隙 h。

1) $h \geq 0.6F_1$：无遮挡，空隙足够，电波绕射损耗很小，不用缩距，按传统预估方法计算；

2) $0 \leq h < 0.6F_1$：部分遮挡，小幅缩距，附加 3～12dB 损耗；

3) $h < 0$（障碍物高出视线路径）：遮挡，必须绕射损耗修订、大幅压缩通信距离。

4.1.2 绕射损耗修订

按照 ITU-R P.526 标准，障碍物主要分为单刃形障碍物（山体、墙体、孤立建筑）、多刃/连续山地（多障碍物串联）和圆顶/平缓山丘/大型建筑三类。

4.1.2.1 单刃形障碍物

归一化绕射参数v：

$$v = h\sqrt{\frac{2(d_1+d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (5)$$

其中，h 为菲涅尔余隙的绝对值。绕射损耗L_d（dB）分段近似：

a) $v \leq -1$　　$L_d = 0$

b) $-1 < v \leq 0$ $L_d = 20\lg(0.5 - 0.62v)$

c) $0 < v \leq 1$ $L_d = 20\lg(0.5e^{-0.95v})$

d) $1 < v \leq 2.4$ $L_d = 20\lg(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1v)v})$

e) $v > 2.4$　$L_d = 20\lg(0.225/v)$

修订方法：

总损耗=自由空间损耗L_p+L_d，用链路余量反算最大可用通信距离。

4.1.2.2 多刃/连续山地

逐点计算每处绕射损耗（dB）叠加，即：

$$L_{d总} = \sum L_{di} \quad (6)$$

4.1.2.3 缓丘浅山/缓丘浅山/深山密林

在刃形损耗基础上，加上曲面附加绕射损耗L_{cur}，如表 2 所示，一般在 3～20dB 范围内。具体可按 ITU-R P.526 标准中圆柱绕射修正系数查表增补损耗、缩短距离。

表 2.不同地形遮挡等级附加绕射损耗

地形类型	遮挡等级	附加绕射损耗（dB）	通信距离缩减比例
平坦开阔	无遮挡	0～2	基本无缩减
缓丘浅山	轻微遮挡	3～6	10%～20%
丘陵岗地	中等遮挡	7～12	20%～40%
深山密林	严重遮挡	13～20	40%～60%

4.2 针对大气与天气影响的通信距离修订方法

4.2.1 大气影响下的通信距离修订

4.2.1.1 标准大气压下的通信距离修订

在无大气折射的理想情况（如真空）下，式（1）代入地球半径 R，可得：

$$r = 3.57\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right) \quad (7)$$

式（7）的视距为纯几何视线距离，但标准大气条件下，因大气折射使光线下弯，k 取 4/3，有效视距比几何视距长约 15%。所以，实际工程中，视距 r（单位 km）计算公式修订为：

$$r = 4.12\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right) \quad (8)$$

4.2.1.2 逆温层、湿度垂直分层等气象条件下的通信距离修订

近地面辐射逆温、空气湿度随高度急剧下降时，大气折射率垂直梯度快速负向变化（$\frac{dn}{dh}$<0），诱发超折射与近地大气波导效应。电磁波被约束在低层大气薄层内传播，突破常规几何视距限制，实现超视距通信，有效覆盖距离显著增加。等效地球半径因子k为：

$$k = \frac{1}{1+R_0\frac{dn}{dh}} \quad (9)$$

式中，R_0=6371km 为地球平均半径；$\frac{dn}{dh}$为大气折射率垂直梯度。式（8）可修订为：

$$r = 4.12\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right)\sqrt{k} \quad (10)$$

逆温层、湿度垂直分层等气象条件下，k>4/3，甚至趋于无穷大（大气波导），信号可以传得非常远。不同通信距离下弱、中、强波导附加损耗取值如表 3 所示。

表 3.不同等级大气波导附加损耗

通信距离（km）	弱波导损耗（dB）	中波导损耗（dB）	强波导损耗（dB）
50	10.0	7.5	4.0
80	13.0	9.6	5.2
100	15.0	11.0	6.0
120	17.0	12.4	6.8
150	20.0	14.5	8.0
备注：弱波导 L=0.10d+5；中波导 L=0.07d+4；强波导 L=0.04d+2；d 为通信距离，L 为损耗。			

4.2.1.3 大气不稳定引发负折射条件下的通信距离修订

大气层结处于不稳定状态时，温度、湿度垂直分布异常，大气折射率随高度不降反升，折射率垂直梯度 $\frac{dn}{dh}$>0，形成负折射效应。电波传播轨迹向上弯折溢出有效覆盖层，造成几何视距收缩，同时引入额外传播损耗，压缩可靠通信距离。

修订后的视距如式（10）所示，负折射条件下，k<1。不同等级负折射附加损耗如表 4 所示。

表 4.不同等级负折射附加损耗

通信距离（km）	弱负折射损耗（dB）	强负折射损耗（dB）
50	3.5	7.0
80	4.4	8.8
100	5.0	10.0
120	5.6	11.2
150	6.5	13.0
备注：弱负折射 L=0.03d+2；强负折射 L=0.06d+4；d 为通信距离，L 为损耗。		

4.2.2 天气影响下的通信距离修订

在超短波频段，降雨是影响通信距离的主要气象要素。按 ITU-R P.838 标准，400MHz 的雨衰系数如表 5 所示。

表 5.400MHz 雨衰系数

降雨等级	雨强参考	400MHz 雨衰系数（dB/km）
小雨	轻微细雨	0.005
中雨	普通下雨	0.01
大雨	明显大雨	0.03
暴雨	强暴雨	0.05
特大暴雨	极端暴雨	0.10

超短波电磁波波长远大于雨滴几何尺寸，固有降雨衰减远低于微波频段，但在远距离传输、暴雨及特大暴雨天气下，衰减量累积效应明显。短距离通信时，雨衰影响可以忽略，但长距离通信时，应根据雨衰 A 大小进行修订，式（2）可表示为：

$$P_r = P_t + G_t + G_r - (L_p + L_t + L_r) - A \quad (11)$$

例如，大雨条件下，100km 通信距离的雨衰为 3dB（0.03×100）。

4.3 针对外界干扰与平台干扰影响的通信距离修订方法

干扰分为两类：

a）外界电磁干扰：同频/邻频民用电台、工矿电磁辐射、地面战术干扰、空间杂散电磁信号；

b）机载平台自干扰：机载雷达、航电设备、电源谐波、旋翼辐射、机上线缆耦合干扰。

干扰本质是抬高接收底噪、恶化通干比，影响接收灵敏度；当通干比低于电台解调最低门限（抗干扰容限）时，链路可靠通信失效，同等条件下通信距离被迫缩短。接收灵敏度 P_r（dBm）的计算公式为：

$$P_r = 10log_{10}（kTB）+N_F+SNR \quad (12)$$

式中：

k 为波尔兹曼常数，单位 J/K；

T 为噪声温度，单位 K（开尔文）；

B 为信号带宽，单位 Hz；

N_F 为接收机级联噪声系数，单位（dB）；

SNR 为信噪比，单位（dB）。

在理想无干扰情况下，接收机灵敏度公式中波尔兹曼常数 k 取 1.38×10^{-23}J/K，常数 T 取 293K，则接收灵敏度 P_r 公式（12）改写为：

$$P_r=-174+N_F+10log_{10}（B）+SNR(10) \quad (13)$$

电台装机后，电台的噪声主要包括热噪声和系统噪声两种。热噪声是设备内部电子由于随机波动的影响导致的，是指接收机内部电阻、有源器件等产生的噪声[2]，是设备固有噪声；噪声系数 N_F 是衡量接收机自身在放大信号时，叠加了内部噪声，致使信噪比（SNR）变差的程度；系统噪声抬升了接收机的噪声基底，为了从噪声中解调出信号，所需的最小信号功率需相应提高。噪声线性叠加公式为：

$$P_n=P_{n1}+P_{n2} \quad (14)$$

等效噪声对数叠加公式为：

$$N_{\text{total}} = 10log_{10}\left(10^{\frac{N1}{10}} + 10^{\frac{N2}{10}}\right) \quad (15)$$

式中，N_{total}为叠加后功率谱密度（单位dBm/Hz）；$N1$为系统噪声功率谱密度（单位dBm/Hz）；$N2$为热噪声（单位dB）。装机接收灵敏度$P_r^{'}$按叠加后功率谱密度进行修订。

式（2）则修订为：

$$P_r^{'} = P_t + G_t + G_r - （L_p + L_t + L_r）（16）$$

4.4 多因素耦合的综合修订方法

在复杂的地空或空空通信环境中，通信距离的估算应综合多种因素的影响，具体流程如下：

a）读取传播路径地形高程，判别是否存在遮挡，采用刃形等模型计算地形绕射损耗；

b）依据气象条件判别标准大气、波导、负折射工况，确定修正因子 k，计算大气修正视距[10]；

c）实测或仿真获取外界干扰与平台自干扰功率，核算噪底的恶化量；

d）叠加自由空间损耗、雨衰、大气附加损耗、地形绕射损耗、干扰恶化量，得到总链路损耗；

f）以收端接收机灵敏度、线损、天线增益，发端发射功率、线损、天线增益为约束，迭代求解复杂工况下最大可靠通信距离。

5.应用实例

下面以地面站点与飞机FM调制方式下的超短波地空通信为例，介绍上述修订方法的应用。超短波地空通信是指在给定地面天线高度和飞机飞行高度条件下地空通信距离[11]。假设地面地形为缓丘浅山，大气环境为标准大气环境，天气为小雨，飞机飞行高度为8000m，机载系统噪声为-161dBm/Hz，机载电台噪声系数为6dB，超短波地空通信距离要求为300km。

5.1 地形影响的通信距离修订

缓丘浅山对地空通信的影响，与天线安装位置、飞机飞行高度紧密相关。为减少缓丘浅山等地形环境对视距通信的影响，地面站点一般建设在平坦开阔的地方。若周围有缓丘浅山，则通常将天线架设在山丘高处，并将天线加高10～15m，因此，地形影响一般在1dB以内；若地形复杂，缓丘浅山对地空通信有轻微遮挡，则附加绕射损耗一般按3dB核算。本次通信距离测算，按3dB核算。

5.2 大气影响的通信距离修订

标准大气环境下，视距按式（8）进行计算。地面天线架高10m（h_1），飞机飞行高度为8000m（h_2），不难算出视距r为381.5km。

5.3 天气影响的通信距离修订

小雨条件下，400MHz雨衰系数为0.005dB/km。飞机飞行高度为8000m时，300km地空超短波通信距离下，雨衰约为1.5dB。

5.4 干扰影响的通信距离修订

机载系统噪声为-161dBm/Hz，机载电台噪声系数为6dB时，由式（15）不难得出机载电台噪声叠加后的功率谱密度N_{total}为-160dBm/Hz。信号带宽约为70kHz，解调门限为10dB，由此可计算得出装机接收灵敏度为-101.55dBm。

5.5 计算约束条件

根据工程应用经验，地面站点/某型飞机超短波电台、天线及线缆的接收灵敏度、发射功率、天线增益及线缆损耗一般为：

a) 机载天线增益：108MHz～173.975MHz频段约为-7dBi；225MHz～399.975MHz频段约为-4dBi；

b) 地面天线增益：0dBi；

c) 机载电台发射功率约为：15W；

d) 地面电台发射功率约为：40W；

e) 机载电台装机接收机灵敏度：-101.55dBm；

f) 地面电台接收机灵敏度：-113dBm；

g) 飞机平台馈线损耗约为：1dB；

h) 地面平台馈线损耗约为：3dB；

i) 受地形和天气影响增加的自由空间传播损耗约为：4.5dB。

5.6 通信距离预算结果

根据约束条件、计算公式，结合视距，不难算出超短波电台地空通信距离，具体预算结果见表6。

表6.超短波电台地空通信距离预算结果

通信距离要求			通视距离（km）	通信距离理论计算结果（km）	
类型	工作频率（MHz）	要求（km）		理论值	结合视距
地↓空	108	300	381.5	886	381.5
	174	300	381.5	550	381.5
	225	300	381.5	601	381.5
	400	300	381.5	338	338
空↓地	108	300	381.5	2028	381.5
	174	300	381.5	1259	381.5
	225	300	381.5	1375	381.5
	400	300	381.5	774	381.5

由以上分析可以看出，超短波电台地空通

信距离最低可达 338km 及以上。该型飞机超短波 FM 通信距离实际试飞结果在 323km 及以上。由此可见，本预估方法的评估结果与实际试飞数据比较一致，误差较小。

6.结束语

在超短波通信工程应用过程中，传统距离估算手段主要依托设备固有参数开展测算，未充分考量外部环境变量，普遍存在测算精度不足、适配性差等问题。为解决该工程痛点，本文跳出设备参数、天线馈线等常规研究范畴，重点探究地形遮挡结构、大气分层特性、气象环境变化、外部电磁干扰等外部条件对超短波通信传输距离的制约机制。基于各环境要素的影响机理，针对性制定差异化的通信距离修正方案，通过工程应用案例开展实测验证与距离评估工作。相关研究成果有效解决了传统估算方式的短板问题，能够为复杂场景下超短波通信传输距离的精准判定、通信方案优化调整提供切实可行的技术参考，在各类超短波通信保障场景中具备良好的落地应用价值与推广前景。

参考文献

[1] 郭星灿，石磊，张宏志.某型飞机甚高频电台地面通信距离分析[J].信息通信，2015（1）：159-161

[2] 蒋国峰，樊养余，周刚.电磁干扰环境下的航空通信距离[J].计算测控技术，2020（39）：57-62

[3] 姜建华.根据输入噪声估算通信距离[J].装甲兵工程学院学报，2000，6（14）：49-53

[4] 盛楠.大气波导对舰载通信距离的影响[J].舰船电子对抗，2020，8（43）：55-59；

[5] 王芳，扈胜超.超短波通信距离浅析[J].动力与电气工程，2013（18）：102、104

[6] 赖剑强.无人机超短波通信系统设计与实现 [J].通信技术，2019，53(06):1198-1204；

[7] 张一.基于二次调制的超短波航空数据通信系统设计与实现研究[D].电子科技大学硕士论文，2011；

[8] 李国军，郝书吉，王琨等.VHF 超视距多模耦合传播机理研究[J].电波科学学报，2025，40（3）：521-528

[9] 张毅，李鹏.复杂山地环境超短波通信链路损耗工程计算方法[J].电讯技术，2021，61（06）：697-703

[10] 康士峰，张玉生，王红光等.对流层大气波段超视距传播技术研究与展望[J].电波科学学报，2023，38（4）：610-624

[11] 丁永强，李铁生.机载超短波电台通信距离近原因分析与外场测试[J].航空维修与工程，2022（4）：88-91.