

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-08

海上低空直升机 RCS 与隐身性能分析

梁成良, 费钟阳, 招启军, 陈希
(南京航空航天大学 航空学院, 南京 210016)

摘要: 海上低空直升机的雷达目标特性与隐身性能的研究可以为路径规划提供依据。本文建立随机粗糙海面模型, 基于高频近似方法对海上低空飞行的直升机雷达目标特性进行分析, 研究孤立直升机的雷达散射截面 (RCS) 以及直升机在海面环境背景下的复合电磁散射、海上直升机在不同飞行高度下的雷达隐身性能, 并总结其影响规律。结果表明: 在雷达波直射条件下, 直升机表面的大曲率半径处形成强散射源, 呈现出较高的 RCS; 当直升机在海上飞行时, 随着飞行高度的增加, 直升机与海面间的耦合效应减弱, 复合电磁散射逐渐接近于孤立直升机; 直升机在海上飞行时可以降低高度以缩短暴露距离, 一定程度上能够躲避敌方的雷达追踪, 实现隐身突防。

关键词: 海上直升机; 随机粗糙海面; 雷达散射截面; 隐身性能; 暴露距离

中图分类号: V218

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

RCS and stealth performance analyses of marine low-altitude helicopter

LIANG Chengliang, FEI Zhongyang, ZHAO Qijun, CHEN Xi

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The study of radar target characteristics and stealth performance of low altitude helicopters at sea can provide a basis for path planning. A random rough sea surface model is established in this paper. Based on the high frequency approximation method, the radar target characteristics of helicopters flying at low altitude on the sea are analyzed. The radar cross section (RCS) of isolated helicopters, the composite electromagnetic scattering of helicopters in the background of sea surface environment, the radar stealth performance of offshore helicopters at different flight heights are studied, and the influence rules are summarized. The results show that under direct radar wave conditions, a strong scattering source is formed at the large curvature radius of the helicopter surface, exhibiting a high RCS. When helicopter is flying at sea, as the flying altitude increases, the coupling effect between the helicopter and the sea weakens, their composite electromagnetic scattering gradually approaches that of an isolated helicopter. When helicopter fly at sea, it can lower their altitude to shorten the exposure distance and to some extent avoid enemy radar tracking, achieving stealth penetration.

Key words: marine helicopter; random rough sea surface; radar cross section; stealth performance; exposure distance

收稿日期: 2024-08-26; 修回日期: 2024-10-18

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

通信作者: 招启军(1977-), 男, 博士, 教授。E-mail: zhaoqijun@nuaa.edu.cn

引用格式: 梁成良, 费钟阳, 招启军, 等. 海上低空直升机 RCS 与隐身性能分析[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-8.

LIANG Chengliang, FEI Zhongyang, ZHAO Qijun, et al. RCS and stealth performance analyses of marine low-altitude helicopter [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-8. (in Chinese)

0 引言

直升机具有垂直起降能力和较好的低空突防性能,被广泛应用于海上运输、侦查、救援等任务。随着现代海上信息技术的不断发展,直升机被探测的概率加大,生存环境愈发恶劣,直升机的雷达隐身日渐成为设计及作战规划中的重点考虑因素。直升机在海上进行低空作战时,其电磁散射会受到海面强烈的干扰,雷达接收到的回波信号是由直升机与海面共同产生的复合电磁散射。因此,考虑海面环境的电磁影响,研究海上低空直升机的电磁散射特性,并准确预测直升机海上飞行时的雷达隐身性能,能够为提前规划应对策略提供理论依据。

目前,国外学者 Wang 等^[1]对海面背景下的海浪和海上目标的电磁散射研究分析;Shi 等^[2]对时变复合船海场景下海况对目标的雷达散射截面(Radar Cross Section,简称 RCS)影响进行研究,但是他们的研究对象以海上舰船为主,缺乏对低空领域机动性更好的直升机研究。国内郭立新等^[3]开展了海洋环境下如何提升雷达检测目标能力的研究;桑建华等^[4]对飞行器表面设计低 RCS 载体和实验模型研究;杨继云等^[5]主要研究了直升机的雷达散射截面测量;梁江涛等^[6]对直升机的动态 RCS 仿真;刘丰军等^[7]研究各目标特性的差异对导弹各功能、效能发挥的影响;赖德雄等^[8]在直升机 RCS 数据基础上开展了可探测范围曲线、曝露时间等研究。但鲜有针对直升机融入海上环境的电磁散射特性和海上直升机隐身性能的相关文献公开发表。

鉴于此,本文将海上低空直升机为目标,对其复合电磁散射特性和隐身性能进行研究。首先,建立基于几何光学法(GO)和一致性绕射理论(UTD)的 RCS 高频预估方法;然后,分析孤立直升机 RCS 和直升机与海面的复合散射特性,研究海上直升机不同飞行高度下的曝露距离,以期对直升机作战规划提供依据。

1 数值方法

为了兼顾精度和效率,实现快速获取目标 RCS,本节建立几何光学法结合等效电磁流法的

RCS 高频预估方法,此方法适用于超电大尺寸目标和多次散射计算,用于直升机、海面和直升机的电磁耦合计算。

1.1 几何光学法

几何光学法遵循几何光学原理,把几何光学处理方式延伸到电磁波传播上,假设是电磁波能量沿射线管传播。基于射线追踪原理,电磁波在高频率或小波长的情况下,在局部区域视为局部平面波^[6]。

像散射线管示意图如图 1 所示,其中 $F(O_1)$ 和 $F(O_2)$ 表示传播路径上的波阵面, ρ_1 和 ρ_2 为波阵面的两个主曲率半径,两个波阵面相距为 d ^[9]。

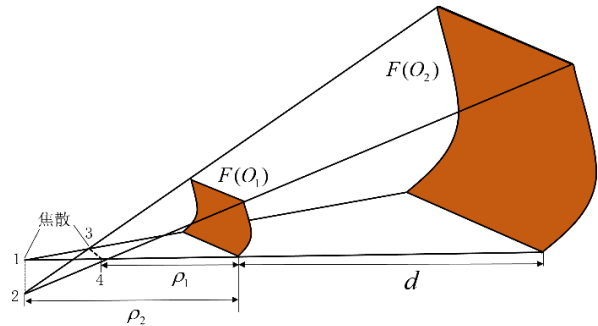


图 1 像散波射线管示意图

Fig. 1 Astigmatic wave ray tube schematic diagram

在电磁场中还要考虑沿射线传播上各处场强的相位关系。以 $F(O_1)$ 为相位参考面, e^{-jkd} 为 $F(O_1)$ 传播到 $F(O_2)$ 的相位因子,在均匀媒质中的传播场关系^[10]表示为

$$E(O_2) = E(O_1) \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + d)(\rho_2 + d)}} e^{-jkd} \quad (1)$$

$E(O_2)$ 和 $E(O_1)$ 为波阵面上的场强,当平面波照射至目标表面上一点时,射线管的反射遵循 Snell 定律,经过反射后其反射场强满足:

$$E_r(\mathbf{r}_{n+1}) = \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + d)(\rho_2 + d)}} \cdot \mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{E}_i(\mathbf{r}_n) e^{-jkr} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r} = |\mathbf{r}_{n+1} - \mathbf{r}_n|$ 为反射射线传播路径, i 为入射射线传播路径; $\mathbf{\Gamma}$ 为目标表面的反射系数,由反射平面两侧介质的本征阻抗和入射、反射及表面法矢方向决定。

1.2 等效电磁流法

基于一致性绕射理论的等效电磁流形式,可以弥补几何光学法的计算精度不足,其尖劈处的等效线电流 I_e 和线磁流 I_m [11] 表达如下:

$$I_e = \frac{-2\sqrt{2\pi k} e^{-i\frac{\pi}{4}}}{kZ_0} \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{t} D_s \quad (3)$$

$$I_m = \frac{-2\sqrt{2\pi k} e^{-i\frac{\pi}{4}}}{k} Z_0 \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{t} D_h \quad (4)$$

式中: \mathbf{E}_i 和 \mathbf{H}_i 为入射电磁场; \mathbf{t} 为劈边缘的切向量; $D_{s,h}$ 为理想导电劈的一致性绕射系数; Z_0 为自由空间的特征波阻抗。

把目标边缘分成多个微元,利用辐射积分公式对微元积分,可获得目标边缘部位的绕射场,再结合几何光学法的反射场,对其进行矢量叠加得到目标整体的总散射场。

此方法结合几何光学法,可以更高效、准确的计算直升机、直升机和海平面耦合的电磁散射。

1.3 隐身性能计算方法

使用散射截面互等法 [12-13] 计算得到飞行器与方位角的散射截面曲线 $\sigma = f(\varphi)$, 根据雷达性能得到临界散射截面随目标距离的曲线 $\sigma_{cr} = h(R)$, 目标在某方位角 φ 上提供散射截面 σ 与雷达某一距离 R 上检测目标所需的临界散射截面 σ_{cr} 相等, 即可得到飞行器的暴露距离 R_{ex} 。

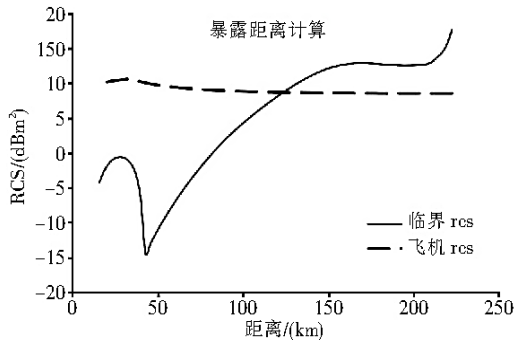


图2 计算暴露距离的散射截面—距离曲线法

Fig. 2 RCS-exposure distance curve

1.4 数值方法验证算例

为验证本文的计算方法能有效的应用在多次散射的计算中,选用二面角反射器的 RCS 试验值作为验证算例 [14]。角反射器外形及数据对比如图

3, 两平板夹角为 90° , 边长 $a = b = l = 5.6088\lambda$, 计算角度为 $0^\circ \sim 53^\circ$, 雷达波频率为 9.4 GHz, 水平极化。几何光学法的计算值与测试值基本吻合, 此方法有良好的计算精度, 可用于多次散射电磁场。

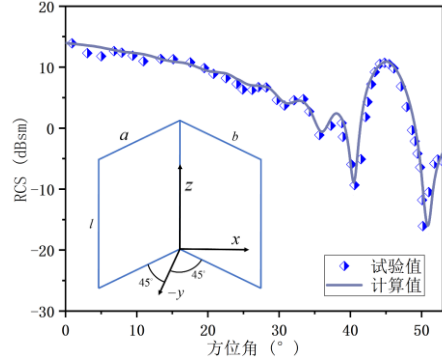


图3 角反射器外形及数据对比

Fig. 3 Corner reflector shape and result comparison

为了验证本章几何光学法能应用于多个目标下的散射场计算, 选用有 RCS 测试值的平板和圆柱体作验证算例 [15]。雷达频率为 10 GHz, 水平极化, 计算角度为 $-180^\circ \sim 180^\circ$, 圆柱体和平板尺寸如图 4 所示。几何光学法在多目标下的计算值与测试值基本吻合, 可用于多目标的散射电磁场。

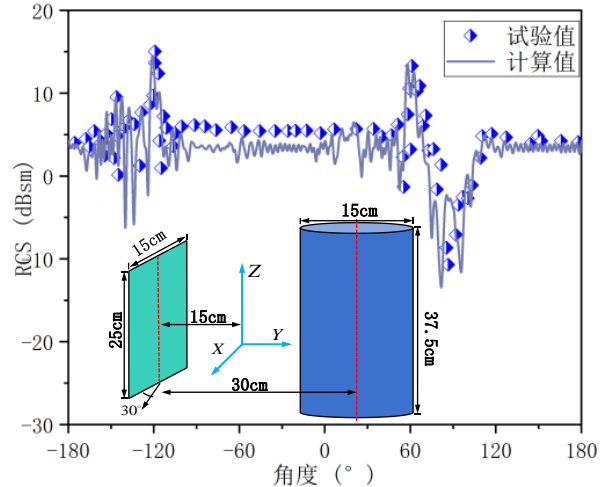


图4 复杂目标参数及数据对比

Fig. 4 Complex target parameters and result comparison

2 模型与雷达参数

为了研究直升机在海上飞行时的电磁散射特性的影响, 建立海面模型和直升机模型, 作为本文的研究对象。直升机模型主要参数 [16] 如表 1 所示。

表1 直升机模型的主要参数
Table 1 Main parameters of helicopter model

参数	数值	参数	数值
长度/m	19.76	高度/m	4.05
旋翼半径/m	8.18	旋翼转速/(r·min ⁻¹)	257.8

利用高斯分布的二维随机粗糙面并代入PM海谱函数^[17],生成高斯谱分布的粗糙海平面。设置本文的海情为三级,海上风向为45°,海浪拍打方向与风向保持一致。其该粗糙海平面的轮廓如图5所示。其中海平面尺寸大小为 $800\lambda \times 800\lambda$ (λ 为波长)。

本文计算条件为雷达频率3 GHz,雷达最大作用距离为300 km(对 5m^2 目标,发现概率 $P_d=80\%$),水平极化,雷达与直升机在同一高度下,采用单站式照射方式,入射俯仰角度 $\theta=0^\circ$,方位角 $\varphi=0^\circ \sim 360^\circ$,本文雷达探测目标的曝露距离在雷达切地线以外条件下。海上温度 T 为 20°C ,根据Debye公式^[18]计算此条件下海水的相对介电常数为 $\epsilon=(77.89, 41.45j)$,并把该值赋给粗糙海平面属性。

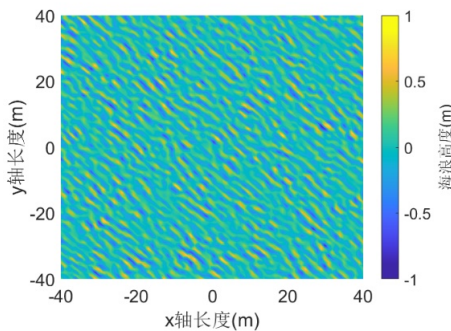


图5 三级海情海平面示意图
Fig. 5 Level 3 sea conditions

3 结果与分析

3.1 直升机 RCS

直升机飞行过程中,易受各方位的雷达探测,需提前计算直升机各个方位角的雷达散射截面(RCS),从而预判飞行路径,降低被探测概率。

直升机各方位角 RCS 如图6所示,在各方位角下,直升机的头部区域(航向角 $\pm 45^\circ$),峰值为 17.80 dBsm ,均值为 11.00 dBsm ,主要是桨叶前缘、桨尖端面、发动机进气口、驾驶舱等区域强散

射造成的;直升机左侧(航向角 $60^\circ \sim 120^\circ$),其峰值为 30.02 dBsm ,均值为 16.62 dBsm ;直升机右侧(航向角 $240^\circ \sim 300^\circ$),峰值为 31.94 dBsm ,均值为 16.34 dBsm ,左右两侧受垂尾和大曲率的机舱等强散射区域影响具有较大的 RCS;直升机尾部(航向角 $150^\circ \sim 210^\circ$),峰值为 20.09 dBsm ,均值为 10.80 dBsm 。

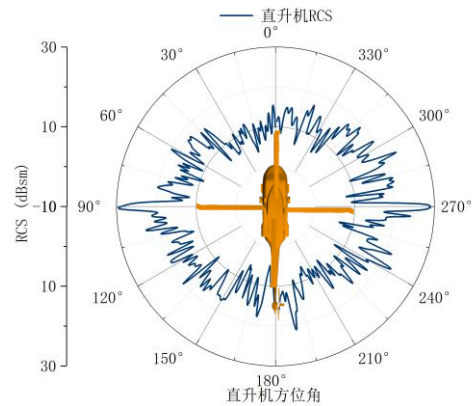


图6 直升机各方位角 RCS
Fig. 6 Helicopter RCS at different azimuth

3.2 海上直升机电磁散射特性

直升机在海上执行低空任务时,其雷达对直升机的探测会受海平面的影响,下面研究海上低空飞行的直升机的雷达目标特性影响。

本文以直升机飞行高度 H 为 $20, 50, 100\text{ m}$ 为变量(如图7所示),直升机位于海平面模型中心的上方,海情选用常见的三级海情,基于上述的高频近似法对海面和目标电磁散射计算,研究直升机高度对复合电磁散射特性的影响。



图7 直升机海上飞行示意图
Fig. 7 Helicopter flight over the sea

直升机飞行高度 20m 时复合电磁散射如图8所示,海面的电磁散射特性相对直升机较小,但由

于海面的风向为 45° , 导致海平面在 45° 和 225° 有较大散射。在直升机飞行高度为 20 m 时, 直升机与海面的耦合效应较强, 其复合散射特征更加显著, 使得直升机的 RCS 被复合电磁散射信号淹没。复合散射峰值为 32.54 dBsm, 在直升机方位角 270° (直升机峰值角度) 下, 受海面的影响, 复合电磁散射特性为 21.36 dBsm, 其复合散射截面 (单位为 m^2) 相对直升机降低了 76.99%。

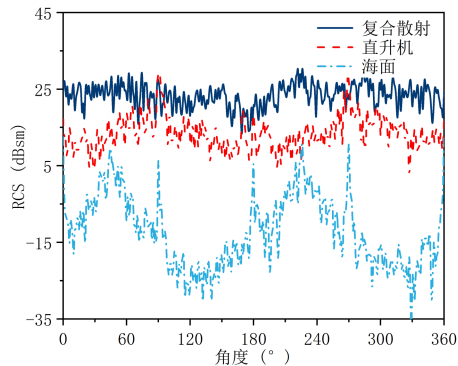


图8 直升机飞行高度 20 m 时复合电磁散射
Fig. 8 Composite electromagnetic scattering at a helicopter flight altitude of 20 m

直升机飞行高度 50m 时复合电磁散射如图 9 所示, 直升机飞行高度为 50 m 时, 相比于飞行高度 20 m 的复合电磁散射有所降低, 但大部分散射大于直升机 RCS。直升机与海平面的耦合效应有减弱趋势。复合散射峰值为 29.77 dBsm, 照射直升机的雷达波在海浪中发生多次反射, 雷达波信号受一定干扰, 在直升机尾部区域的复合电磁散射出现小于直升机自身散射。

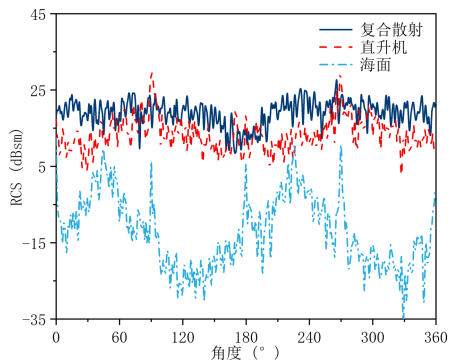


图9 直升机飞行高度 50 m 时复合电磁散射
Fig. 9 Composite electromagnetic scattering at a helicopter flight altitude of 50 m

如图 10 所示, 直升机飞行高度为 100 m 时, 直升机与海面的复合电磁散射再次降低, 复合散射

峰值为 25.84 dBsm, 直升机与海平面的耦合效应不再明显。在某些角度下复合散射接近直升机散射, 在直升机尾部区域的复合电磁散射呈现明显的降低效果, 在风向角度下 (45° 和 225°), 受海浪电磁散射影响, 复合散射没有明显的降低效果。

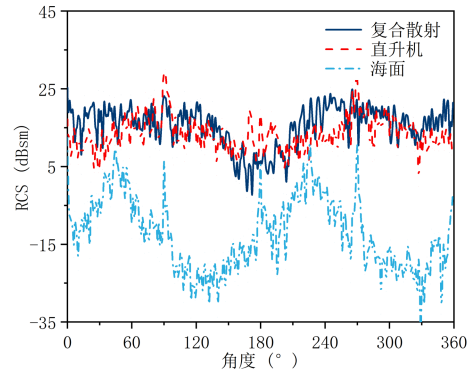


图10 直升机飞行高度 100 m 时复合电磁散射
Fig. 10 Composite electromagnetic scattering at a helicopter flight altitude of 100 m

海上直升机飞行过程中, 随着直升机飞行高度的增加, 直升机与海面的电磁散射耦合效应逐渐减弱, 导致复合电磁散射信号减小, 并逐步接近孤立直升机散射信号, 雷达接收的回波信号以直升机为主。直升机飞行高度增加, 电磁耦合效应减小, 但其隐身性能需结合该雷达下曝露距离综合分析。

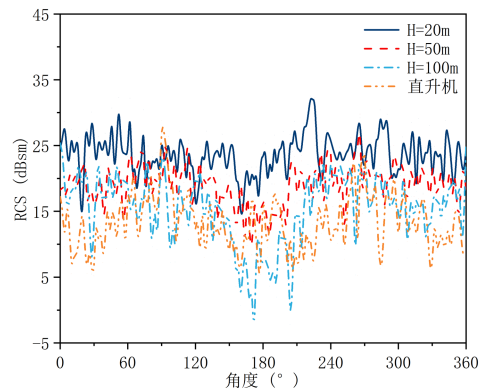


图11 不同高度下复合电磁散射
Fig. 11 Composite electromagnetic scattering at different altitude

3.3 直升机各方位隐身性能

结合上述结果, 海平面为三级海情条件时, 对直升机在海上飞行时雷达探测的距离研究分析。利用散射截面互等法, 直升机 RCS 与雷达临界散

射截面的目标距离曲线^[13]拟合,得到海上直升机低空飞行时的曝露距离。由前文中直升机 RCS 数据为依据,得到该直升机在海上低空飞行的曝露距离。

在雷达探测下,该直升机的峰值信号出现在右侧,此时雷达曝露距离的最大值角度恰好对应于直升机的峰值角度。直升机飞行高度在 20 m 时,直升机的最大曝露距离达到了 54.82 km。相较于 20 m 高度最大曝露距离,当直升机飞行至 50 m 高度时,曝露距离增加了 16.10%;而在 100 m 高度时,曝露距离的增长更为显著,达到了 35.37%。

由此可知,直升机在不同飞行高度下对雷达的隐身性能不同。直升机飞行高度较低时,雷达探测受地球曲率半径影响,探测性能减弱,隐身性能提高,随直升机飞行高度增加,地球曲率半径影响减小,雷达探测范围增大,对曝露距离的影响加大。

直升机飞行高度为 20 m 时最大曝露距离为 55.44 km,雷达无法检测到直升机的信号;直升机飞行高度为 50 m 时,左侧最大曝露距离为 63.70 km,右侧最大曝露距离为 63.80 km;飞行高度为 100 m 时,左侧最大曝露距离为 73.18 km,右侧最大曝露距离为 75.52 km。受海情和地球曲率半径影响,在雷达平视作用下的曝露距离相差较大。

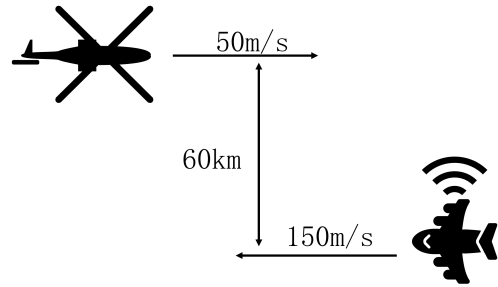


图 13 直升机与侦察机飞行示意图
Fig. 13 Helicopter and reconnaissance aircraft flight diagram

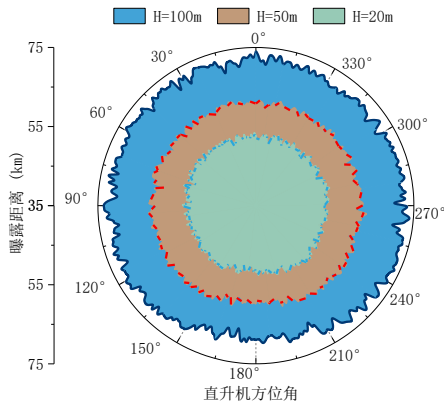


图 12 直升机在 20 m~100 m 曝露距离
Fig. 12 Exposure distance of helicopter flying at the altitudes from 20 m to 100 m

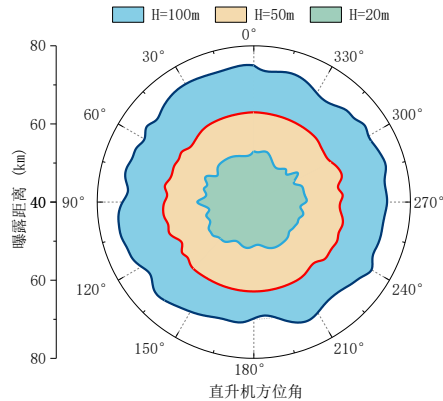


图 14 直升机飞行过程中的曝露距离
Fig. 14 Exposure distance during helicopter flight

3.4 直升机海上飞行隐身性能

为更好的研究直升机实际飞行过程中在该雷达下曝露距离,设置直升机前飞速度为 50 m/s,侦察无人机飞行速度为 150 m/s,直升机与侦察机之间的间距为 60 km,且飞行高度保持一致。直升机与侦察机飞行示意图如图 13 所示

以直升机的方位角为角坐标,5°一算,结合直升机飞行速度和旋翼的转速推算出旋翼与机身位置关系,再计算该位置关系下的直升机 RCS,最后拟合出直升机在此飞行状态的曝露距离。

直升机飞行过程中的曝露距离如图 14 所示,

雷达的扫描范围设定为 90°的区域,直升机总飞行里程为 120 km,耗时 10 min 完成。当直升机飞行高度仅为 20 m 时,其对于无人机雷达的曝露距离变得狭小,无人机几乎无法探测到直升机的存在。

当直升机的高度提升至 50 m 时,无人机的雷达上开始显示出一定的曝露区域。当无人机位于直升机的左侧时,直升机在雷达上的曝露时间达到了 2.84 min,相对曝露区域占比为 35.19%。而当无人机位于直升机的右侧时,曝露时间和相对曝露区域同样有所体现,分别为 3.32 min 和 46.3%;

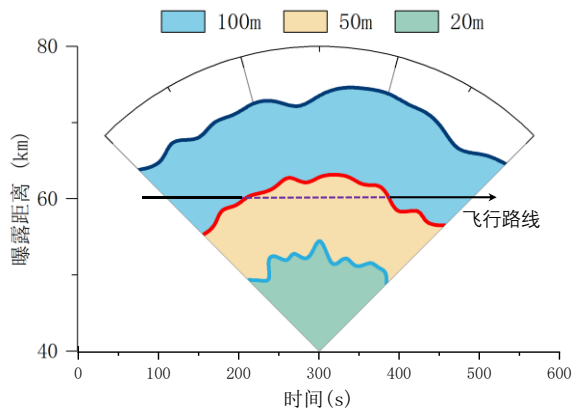


图 15 直升机左侧探测图

Fig. 15 The exposure distance of helicopter left side

随着飞行高度的进一步增加,当直升机攀升至 100 m 时,无论无人机位于直升机的左侧还是右侧,直升机的曝露时间都达到了整个飞行时长的最大值,即 10 min,相对曝露区域达到了 100%,意味着无人机能够全程且全方位地监测到直升机的动态。

综上所述,雷达探测到直升机的曝露距离在雷达切地线以外时,直升机的飞行高度对其在无人机雷达上的曝露情况具有显著影响。随着飞行高度的增加,直升机的曝露时间和相对曝露区域均呈现增加趋势,这意味着无人机在较高空域对直升机的探测能力更强。

4 结 论

1) 为满足直升机气动性能,直升机表面有较多大曲率半径区域,雷达从不同方位角照射下,这些区域呈现出较大的雷达回波信号,是强散射源,导致此区域出现较大的 RCS,不利于直升机的隐身突防作战任务。

2) 直升机飞行高度较低时,海面与直升机的电磁耦合效应较强,其复合散射特征显著。随着直升机飞行高度的增加,复合电磁散射特性逐渐降低,直升机的散射信号受海浪的电磁散射干扰减小,复合电磁散射的耦合效应逐渐减弱,复合电磁散射逐渐接近孤立直升机。

3) 雷达探测到直升机的曝露距离在雷达切地线以外条件下,直升机的 RCS 一定时,海上直升机在不同高度飞行时对其隐身性能有一定影响。直

升机飞行高度较低时,雷达探测受地球曲率半径和海面的电磁影响,直升机的曝露距离增大,隐身性能较好。随海上直升机飞行高度增加,地球曲率半径和海浪对散射信号的影响减小,曝露距离增大,隐身性能降低。

4) 直升机在海上飞行过程中,当直升机飞行高度增加时,雷达探测范围增大,使其探测能力增强,复合电磁散射减小,会降低雷达探测能力,但降低幅度有限。综合来看,直升机的曝露距离随飞行高度的增加而增大。

参 考 文 献

- [1] WANG X B, GAO W, LIANG Z C, et al. Dynamic composite scattering from low altitude target over sea surface [C] // 2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies. Shanghai: IEEE, 2015: 1-7.
- [2] SHI F Y, LI J X, JIANG W Q, et al. Research on scattering characteristics of ship targets on two-dimensional dynamic sea surface [C] // 2021 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC). Shenzhen, IEEE, 2021: 180-182.
- [3] 郭立新, 魏仪文. 复杂动态海面与目标电磁散射及回波仿真研究现状与展望[J]. 雷达学报, 2023, 12(1): 76-109.
GUO Lixin, WEI Yiwen. Status and prospects of electromagnetic scattering echoes simulation from complex dynamic sea surfaces and targets [J]. Journal of Radars, 2023, 12(1): 76-109. (in Chinese)
- [4] 桑建华, 张宗斌, 王烁. 低 RCS 飞行器表面弱散射源研究[J]. 航空工程进展, 2012, 3(3): 257-262.
SANG Jianhua, ZHANG Zongbin, WANG Shuo. Research on the radar cross section of weak scatterers on stealth vehicle [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(3): 257-262. (in Chinese)
- [5] 杨继云. 某型直升机 RCS 的仿真计算与分析[J]. 空天防御, 2018, 1(3): 44-47.
YANG Jiyun. Simulation-calculation and analysis for the RCS of helicopter [J]. Air & Space Defense, 2018, 1(3): 44-47. (in Chinese)
- [6] 梁江涛, 曾勇虎, 汪连栋, 等. 某型直升机动态 RCS 测量数据分析[J]. 航天电子对抗, 2006, 22(6): 58-61.
LIANG Jiangtao, ZENG Yonghu, WANG Liandong, et al. Analysis of the dynamic measuring data of a helicopter RCS [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2006, 22(6): 58-61. (in Chinese)
- [7] 刘丰军, 赵阳, 张丽. 隐身靶机外形尺寸对导弹作战效能评估的影响[J]. 航空工程进展, 2023, 14(4): 76-84, 115.

- LIU Fengjun, ZHAO Yang, ZHANG Li. The impact of stealth target drone dimensions on missiles operational effectiveness evaluation [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2023, 14(4): 76-84, 115. (in Chinese)
- [8] 赖德雄, 张云飞, 包晓翔. 军用直升机雷达隐身性能仿真与评估[J]. *直升机技术*, 2014(1): 29-34.
- LAI Dexiong, ZHANG Yunfei, BAO Xiaoxiang. Radar stealth performance simulation and assessment of military helicopter [J]. *Helicopter Technique*, 2014(1): 29-34. (in Chinese)
- [9] RUSCH W V T. A comparison of geometrical and integral fields from high-frequency reflectors[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(11): 1603-1604.
- [10] 韦小杰. 典型背景目标 SAR 图像仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- WEI Xiaojie. SAR image simulation of typical background targets[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [11] KELLER J B. Geometrical theory of diffraction[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, 52(2): 116.
- [12] BARTON D K. Radar equations for modern radar[J]. *The Aeronautical Journal*, 2014, 12(2): 454.
- [13] 张考. 飞行器对雷达隐身性能计算与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- ZHAGN Kao. Calculation and analysis of radar hidden performance of aircraft[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [14] 田军, 阮颖铮. 角形结构的电磁散射和雷达截面分析[J]. *宇航学报*, 1991, 12(4): 89-94.
- TIAN Jun, RUAN Yingzheng. Em scattering and rcs analysis of corner structures [J]. *Journal of Astronautics*, 1991, 12(4): 89-94. (in Chinese)
- [15] 赵维江. 复杂目标雷达截面计算方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 1999.
- ZHAO Weijiang. Research on calculation method of radar cross section of complex target[D]. Xi'an: Xidian University, 1999. (in Chinese)
- [16] HILBERT K. A mathematical model of the UH-60 helicopter: NASA-TM-85890[R]. US: NASA, 1984
- [17] 郭立新, 王蕊, 吴振森. 随机粗糙面散射的基本理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- GUO Lixin, WANG Rui, WU Zhensen. Basic Theory and method of random rough surface scattering [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [18] LEONARD T P, ANTIPOV I, WARD K D. A comparison of radar sea clutter models[C]// 2002 RADAR Conference. Edinburgh, UK: IET, 2002: 429-433.

(编辑: 丛艳娟)