

旋翼叶片回波建模与闪烁现象机理分析

陈永彬 李少东 杨军 曹芙蓉

Rotor blades echo modeling and mechanism analysis of flashes phenomena

Chen Yong-Bin Li Shao-Dong Yang Jun Cao Fu-Rong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 138401 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.138401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.138401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低信噪比下的二维联合线性布雷格曼迭代快速超分辨成像算法

A fast two dimensional joint linearized bregman iteration algorithm for super-resolution inverse synthetic aperture radar imaging at low signal-to-noise ratios

物理学报.2016, 65(3): 038401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.038401>

基于扩展信源熵值的穿墙成像雷达墙体强杂波抑制

A method of wall clutter removal for through-wall radar based on entropy of expanded antenna source

物理学报.2015, 64(19): 198402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198402>

基于哈达玛积扩展子空间的到达时间和波达方向联合估计

Joint for time of arrival and direction of arrival estimation algorithm based on the subspace of extended hadamard product

物理学报.2015, 64(7): 078403 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.078403>

基于海面散射模型的全极化合成孔径雷达海洋环境探测关键技术参数设计仿真研究

Simulation study on the design of key technical parameters in marine environment sounding with fully polarimetric synthetic aperture radar based on ocean surface scattering model

物理学报.2014, 63(21): 218401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.218401>

基于子带补偿的弹载聚束 SAR 成像算法

An imaging algorithm for missile-borne spotlight SAR based on subband compensation

物理学报.2014, 63(19): 198404 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.198404>

旋翼叶片回波建模与闪烁现象机理分析

陈永彬 李少东 杨军[†] 曹芙蓉

(空军预警学院三系, 武汉 430019)

(2016年3月11日收到; 2016年4月6日收到修改稿)

对旋翼叶片回波建模与闪烁现象进行了综合研究. 基于散射点散射系数和分布情况, 构建了旋翼叶片回波的散射点模型, 并分析了散射点分布对回波的影响; 在此基础上研究了回波时域闪烁现象的物理散射机理, 并结合时频分析和横向分辨率分析了微多普勒特征及时频域闪烁现象; 对两类不同分布间隔的散射点模型进行了仿真, 并与积分模型进行对比性实验, 结果验证了闪烁现象物理分析的合理性. 该研究成果在旋翼目标的探测识别领域具有一定的理论与应用价值.

关键词: 闪烁, 电磁散射, 微多普勒, 散射点模型

PACS: 84.40.Xb, 84.40.Ua, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.65.138401

1 引言

AH-64阿帕奇武装直升机、MV-22鱼鹰运输机等新型旋翼飞机被广泛应用于对地攻击、武器运送、战略支援等军事活动. 此类新型旋翼飞机的“微多普勒效应”^[1-3]反映了目标独特的微动^[4]特征和结构特征, 基于此可有效实现旋翼飞机的探测、识别^[5,6].

分析研究旋翼飞机等目标微多普勒, 一般分为雷达回波建模、微动特征提取与特征参数估计三个环节^[7], 因此如何构建准确的回波模型是分析微多普勒的关键之处. 目前学者对旋翼叶片的雷达回波建模方法主要有以下三种: 一是将叶片等效为刚性、均匀的线条, 对散射点回波进行积分建模, 如美国海军研究实验室的Chen^[1]构建了叶片回波的积分模型, 但并未对叶片时域回波和微多普勒特征的“闪烁”现象进行解释; 二是利用物理光学法、等效电磁流等方法计算叶片的雷达截面积 (radar cross section, RCS) 进行回波建模, 如文献^[8]采用物理光学法计算叶片RCS, 分析了单旋翼微多普勒特

征, 得出叶片形状并不影响微多普勒特征的结论, 但对于微多普勒特征中多条频率“闪烁”的原因并未提及; 文献^[9]通过时频域变换对旋翼叶片的动态RCS特性进行了理论计算和分析, 并给出了时频谱分析; 文献^[7, 10]应用一种将物理光学、等效电磁流和准静态法相结合的方法分别开展了对目标微动特征和对旋翼叶片外形的雷达特征信号时频域谱特性的研究; 三是将叶片等效为若干强散射点进行回波建模^[11-13], 但叶片的散射中心并不固定, 有时是边缘散射起主要作用, 有时则是镜面反射占主导因素^[14,15], 因此若干强散射点很难完整地表征旋翼叶片的真实回波.

针对目前回波建模方法的不足之处, 本文基于散射点散射系数和分布情况, 构建了旋翼叶片回波的散射点模型, 分析了散射点分布对回波的影响; 在此基础上研究了回波时域闪烁现象的物理散射机理, 并结合时频分析和横向分辨率分析了微多普勒特征和时频域闪烁现象; 最后对两类不同分布间隔的散射点模型进行仿真. 仿真结果验证了闪烁现象机理分析的合理性, 对旋翼飞行器的分类识别等研究具有重要的参考价值.

[†] 通信作者. E-mail: yangjem@126.com

2 旋翼叶片回波的散射点模型

当电磁波照射到旋翼叶片时, 由于入射角及反射机理等原因, 并非叶片上所有点都会产生回波, 而只是一部分具有一定散射系数的散射中心点才能产生回波. 本文基于上述理论对旋翼叶片回波构建一个新的散射点模型, 并且证明了文献[1]所构建的积分模型是散射点模型的极限情况. 下面首先基于散射点散射系数和散射点在叶片上的分布情况, 建立旋翼叶片回波散射点模型, 并分析散射点分布对回波的影响.

2.1 单叶片回波

雷达与旋翼叶片散射点的几何关系如图1所示.

由文献[1]可知, 当雷达发射波长为 λ 的信号时, 散射点 P_i 的基带回波为

$$s_{P_i}(t) = \sigma_{P_i} \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} \times x_i \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right), \quad (1)$$

式中 σ_{P_i} 为后向散射系数; R_0 为雷达与旋翼中心 O' 的距离; β 为俯仰角; f_{rot} 为旋翼旋转频率; x_i ($0 \leq x \leq l$, l 为叶片长度), θ_1 分别为散射点 P_i 与旋翼中心的距离和初始旋转角.

由(1)式可知回波多普勒频率为

$$\begin{aligned} f_{dP_i}(t) &= -\frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Phi_{P_i}(t) \\ &= \frac{4\pi f_{\text{rot}} x_i}{\lambda} \sin(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta. \end{aligned} \quad (2)$$

假设单叶片有 K 个强散射中心, 则单叶片回波为

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{i=1}^K s_{P_i}(t) \\ &= \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \sum_{i=1}^K \sigma_{P_i} \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} \times x_i \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right). \end{aligned} \quad (3)$$

则在 t 时刻叶片散射点的多普勒频率值为

$$f_d(t) = (f_{dP_1}(t), f_{dP_2}(t), \dots, f_{dP_K}(t)). \quad (4)$$

由(3)式可知, 单叶片回波主要取决于散射点散射系数、个数和位置, 而散射点个数和位置可转化散射点在叶片上的分布情况. 考虑所有散射点散射系数和分布情况, 主要分为以下四种: 一是散射系数一致且散射点等间隔分布, 二是散射系数一致、散射点位置随机分布, 三是散射系数随机、散射点等间隔分布, 四是散射系数随机且散射点位置随机分布.

本文主要分析散射系数一致且散射点等间隔分布的情况, 即 $\sigma_{P_1} = \dots = \sigma_{P_K} = \sigma$, 相邻散射点间隔 $d = l/(K-1)$, 则散射点 P_i 与旋翼中心距离 $x_i = (i-1)d$, (3)式变为

$$\begin{aligned} s(t) &= \sigma \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \sum_{i=1}^K \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} (i-1)d \times \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right] \\ &= \sigma \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \\ &\quad \times \exp\left(-j\frac{2\pi l}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right) \\ &\quad \times \frac{\sin[2\pi K d \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta / \lambda]}{\sin[2\pi d \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta / \lambda]}. \end{aligned} \quad (5)$$

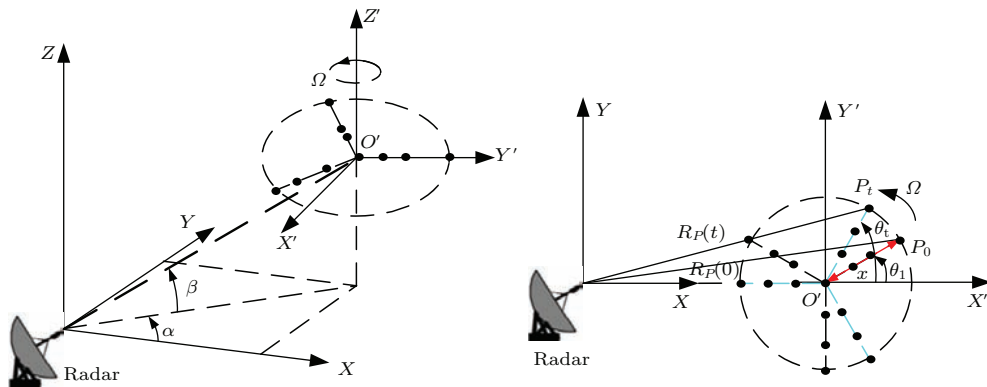


图1 (网刊彩色) 雷达与旋翼散射点的几何关系

Fig. 1. (color online) Geometry of the radar and the scattering points on the rotor blades.

当散射点间隔 d 趋于 0 时, (5) 式变为

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \sigma \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \exp\left(-j\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \\
 &\quad \times \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta \\
 &\quad \times K \operatorname{sinc}\left(\frac{2Kd}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right) \\
 &\approx \sigma \cdot K \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \\
 &\quad \times \exp\left(-j\frac{2\pi l}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right) \\
 &\quad \times \operatorname{sinc}\left(\frac{2l}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right). \quad (6)
 \end{aligned}$$

在积分模型^[1]下, 回波表达式为

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \sigma \cdot l \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \\
 &\quad \times \exp\left(-j\frac{2\pi l}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right) \\
 &\quad \times \operatorname{sinc}\left(\frac{2l}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right). \quad (7)
 \end{aligned}$$

对比 (7) 式和 (6) 式, 除了回波幅度有所差异以外, 表达式基本是一致的. 幅度差异的来源在于文献 [1] 求积分时忽略了散射点间隔 d 的因素: 由定积分定义可知, 当函数 $f(y)$ 在 $[a', b']$ 上有界, 令 $a' = y_1 < y_2 < \dots < y_M = b'$, 取 $\varepsilon_i \in [y_{i-1}, y_i]$, 记 $\Delta y = \max\{\Delta y_i | \Delta y_i = y_i - y_{i-1}\}$, 若极限 $\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \sum_{i=1}^M f(\varepsilon_i) \Delta y_i$ 存在, 则有

$$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \sum_{i=1}^M f(\varepsilon_i) \Delta y_i = \int_{a'}^{b'} f(y) dy. \quad (8)$$

而文献 [1] 在对 (3) 式做积分时, 人为地添加了间隔因子 Δy_i (即本文 d), 最终得到 (7) 式. 因此需将 (7) 式除以 d (假设 d 可除) 才能准确的表示回波. 此时 (7) 式变为

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \frac{\sigma \cdot l}{d} \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \\
 &\quad \times \exp\left(-j\frac{2\pi l}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right) \\
 &\quad \times \operatorname{sinc}\left(\frac{2l}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right) \\
 &= \sigma \cdot (K - 1) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \\
 &\quad \times \exp\left(-j\frac{2\pi l}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right) \\
 &\quad \times \operatorname{sinc}\left(\frac{2l}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta\right), \quad (9)
 \end{aligned}$$

在 $d \rightarrow 0$ 时往往有 $K - 1 \rightarrow \infty$, 此时 (9) 式的回波幅度将趋于无穷. 对比 (9) 式和 (7) 式, 两者除了幅度差异以外是一致的, 且两者幅度比值是固定的, 而回波幅度并不影响对回波特性的分析, 因此本文忽略回波幅度的影响 (用归一化幅度表达), 采用 (7) 式作为积分模型的表达式.

对比 (9) 式和 (6) 式, 两式是近似相等的, 这可从当散射点间隔趋于 0 时, 离散求和与连续积分等效的角度加以证明, 因此在散射系数一致、散射点等间隔分布且间隔趋于 0 的情况下, 积分模型和散射点模型是一致的. 这一结论表明, 积分模型本质上是散射点模型的极限形式 (即散射点间隔趋于 0 的情况).

实际上 (5) 式更加接近旋翼叶片的真实回波模型, 且该回波模型与散射点间隔有关. 下面本文从定量的角度分析散射点间隔变化时对回波产生的影响. 首先给出结论, 其次给出相应的分析.

结论 1 当散射点间隔 $d < \lambda/2$ 时, 回波将出现“sinc 峰值”, 随着 d 减少至某一个间隔 a (a 需具体求解) 时, (5) 式与 (6) 式近似等效, 回波只出现“sinc 峰值”; 当散射点间隔 $d \in (a, \lambda/2)$ 时, 回波幅度除 sinc 峰值外还将出现“次峰值”.

证明 图 1 中的俯仰角在某一时间内是不变的, 即 $\cos \beta$ 为常数. 由于旋翼旋转的周期性, 取旋翼叶片一个旋转周期 $t \in [0, T]$ ($T = 1/f_{\text{rot}}$ 为旋转周期) 的回波作为分析对象. 首先分析 (6) 式, 在 $t \in [0, T]$ 时有 $\cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \in [-1, 1]$, 且存在 $t_1 = [0.25 - \theta_1/(2\pi)]T$, $t_2 = [0.75 - \theta_1/(2\pi)]T$ 使得 $\cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) = 0$, 由 $\operatorname{sinc}(x)$ 在 $x = 0$ 时取到峰值的性质, 此时 (6) 式的回波幅度 $|s(t)|$ 将取到峰值.

再分析 (5) 式, 令

$$c(t, d) = \frac{\sin[2\pi K d \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta / \lambda]}{\sin[2\pi d \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta / \lambda]},$$

固定 d , 由 $c(t)$ 的性质有当 $\sin[2\pi d \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta / \lambda] = 0$ 时 $c(t)$ 可取到峰值, 即 (5) 式的回波幅度 $|s(t)|$ 将取峰值. 若 (5) 式与 (6) 式近似等效, 需保证在一个旋转周期 $t \in [0, T]$ 内仅有 $t_1 = [0.25 - \theta_1/(2\pi)]T$, $t_2 = [0.75 - \theta_1/(2\pi)]T$ 使 $\sin[2\pi d \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta / \lambda] = 0$ 成立. 由 $t \in [0, T]$ 有 $2\pi d \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta / \lambda \in [-2\pi d / \lambda, 2\pi d / \lambda]$, 故为使当且仅当 $t = t_1, t_2$ 有 $2\pi d \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta / \lambda = 0 \in [-2\pi d / \lambda, 2\pi d / \lambda]$ 成立, 即

$[-2\pi d/\lambda, 2\pi d/\lambda] \subset (-\pi, \pi)$, 解得 $d < \lambda/2$, 此时回波出现“峰值”现象.

当 $\hat{t} = [0.5 - \theta_1/(2\pi)]T, [1 - \theta_1/(2\pi)]T$ 时, $\cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}}\hat{t}) = \pm 1$, 此时固定 t , 有 $c(d) = \frac{\sin(2\pi K d \cos \beta/\lambda)}{\sin(2\pi d \cos \beta/\lambda)}$, 则 $d = h\lambda/(2 \cos \beta)$, $h = 1, 2, \dots$ 时 $|c(d)|$ 将取峰值 K , 且在峰值附近的 $|c(d)|$ 也将取到较大的值. 而在 (6) 式中由于 sinc 函数调制, $\hat{t} = [0.5 - \theta_1/(2\pi)]T, [1 - \theta_1/(2\pi)]T$ 时, 回波归一化幅度为 0, 为使该时刻 (5) 式与 (6) 式近似等效, 需找到一个临界散射点间隔 a , 使 $d \leq a < \lambda/2$ 且 $|c(d)/K| \leq 0.025$ (人为设置) 甚至取更小的值, 可结合 $|c(d)/K|$ 的图像进行求解 a . 如当 $\lambda = 0.3$ m, 通过图像, 可取 $a = 0.098$ m, 即 $d \leq 0.098 < \lambda/2$ 时 (5) 式与 (6) 式近似等效, $0.098 < d < \lambda/2$ 时 (5) 式除了出现 (6) 式的峰值以外, 在 $\hat{t}$ 时刻回波幅度还将出现较小峰值, 定义为“次峰值”. 结论得证.

结论 2 当散射点间隔 $d \geq \lambda/2$ 时, 回波出现“多峰值”现象, 散射点模型回波只能用 (5) 式表示, 且当 d 取在半波长整数倍附近时将产生“次峰值”现象.

证明 当 $d \geq \lambda/2$ 时, 在一个旋转周期 $t \in [0, T]$ 内有 $[-2\pi d/\lambda, 2\pi d/\lambda] \supseteq [-\pi, \pi]$. 令 $\sin[2\pi d \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}}t')/\lambda] = 0$, 有当 $\cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}}t') = \frac{m\lambda}{2d} \subseteq [-1, 1]$, $m = 0, \pm 1, \dots$ 时 (5) 式的回波幅度 $|s(t)|$ 将取峰值, 定义为“多峰值”现象, 且峰值个数与 d 密切相关. 如取 $d = 3\lambda/2$, 则 (5) 式的回波幅度 $|s(t)|$ 取峰值时 $\cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}}t') = m/3 \subseteq [-1, 1]$, 显然有 $m = 0$ 对应 2 个 t' , $m = \pm 1$ 对应 4 个 t' , $m = \pm 2$ 对应 4 个 t' , $m = \pm 3$ 对应 3 个 t' , 故一个旋转周期内将有 13 个峰值, 此时回波将不再与 (6) 式等效. 当叶片长度固定时, 叶片散射点间隔越大, 所取的散射点个数越少, 导致回波幅度峰值越小, 从能量的角度来看, “多峰值”相当于把原先集中的能量分散化, 故幅度峰值降低. 同理, 结论 1 证明, 当 d 取值在 $h\lambda/(2 \cos \beta)$, $h = 1, 2, \dots$ 附近时, 在 $\hat{t}$ 时刻回波幅度将出现“次峰值”. 结论得证.

由结论 1 和结论 2 可知, 旋翼叶片回波模型受限于散射点间隔, 当 $d \leq a < \lambda/2$ 时, 散射点模型与积分模型近似等效, 当 $d > a$ 时, 二者不再等效, 需结合散射点间隔具体分析回波出现的峰值个数和次峰值幅度. 这一结论表明本文所构建的散射点模型更加符合旋翼叶片回波的实际情况, 有比积分模

型更广的适用范围.

2.2 N 个叶片回波

这里以 $d \leq a$ 为例构建多叶片回波模型, $d > a$ 时可类似得到结论. 对于具有 N 个叶片的旋翼, 叶片之间的差异在于 N 个叶片有 N 个不同的初始旋转角, 即

$$\theta_n = \theta_1 + 2\pi(n-1)/N. \quad (10)$$

令散射点等间隔分布且叶片之间的散射系数一致, 则总的接收回波为

$$\begin{aligned} s_{\Sigma}(t) &= \sum_{n=1}^N s_n(t) \\ &= \sigma \exp\left(-j \frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \right. \\ &\quad \times (i-1)d \\ &\quad \times \cos\left(\theta_1 + \frac{2\pi(n-1)}{N} + 2\pi f_{\text{rot}}t\right) \\ &\quad \times \cos \beta \Big). \end{aligned} \quad (11)$$

由 2.1 节可知当 $d \leq a$ 时, (11) 式可近似表示为

$$\begin{aligned} s_{\Sigma}(t) &\approx \sigma K \exp\left(-j \frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \sum_{n=1}^N \text{sinc}\left(\frac{2l}{\lambda}\right) \\ &\quad \times \cos\left(\theta_1 + \frac{2\pi(n-1)}{N} + 2\pi f_{\text{rot}}t\right) \cos \beta \\ &\quad \times \exp\left(-j \frac{2\pi l}{\lambda}\right) \\ &\quad \times \cos\left(\theta_1 + \frac{2\pi(n-1)}{N} + 2\pi f_{\text{rot}}t\right) \\ &\quad \times \cos \beta \Big). \end{aligned} \quad (12)$$

由 (12) 式可知, 旋翼叶片回波与叶片数、散射点个数、初始旋转角、旋翼旋转频率、雷达与旋转平面的俯仰角有关. 下面本文结合散射点模型进行闪烁的物理机理分析.

3 旋翼叶片回波闪烁现象机理分析

由文献 [1] 可知, 当旋翼叶片旋转至与雷达视线垂直时 (如图 2(a) 所示), 回波将出现短暂的“闪烁”, 此时时域回波幅度出现尖峰值, 即时域存在“闪烁”, 如图 2(b) 所示; 微多普勒特征在时域“闪烁”对应时刻出现频率带, 即时频域存在“闪烁”, 如图 2(c) 所示. 图 2(b) 和图 2(c) 为波长 0.3 m、散射

点间隔 0.05 m, 取 121 个散射点使叶片长度 6.0 m, 旋转频率 5 Hz、初始旋转角 0° 、俯仰角 0° 的单叶片散射点模型在一个旋转周期内的“闪烁”现象。

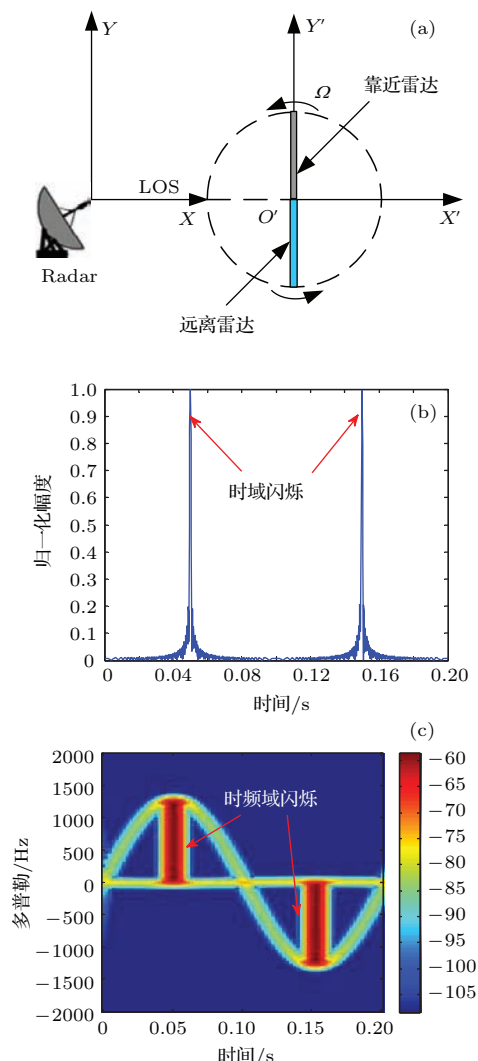


图 2 (网刊彩色) 单叶片散射点模型“闪烁”现象示意图 (a) 叶片与雷达视线垂直的位置; (b) 时域闪烁; (c) 时频域闪烁

Fig. 2. (color online) Sketch of “flashes” phenomena under the scattering point model of the single blade: (a) The vertical position between the blade and the radar LOS; (b) flashes in time-domain; (c) flashes in time-frequency-domain.

图 2(b) 中单叶片在一个旋转周期内出现两次时域“闪烁”现象, 这是由于叶片在一个旋转周期内会有两次与雷达视线垂直的时刻, 分别发生在叶片旋转至靠近雷达和远离雷达的过程中 (见图 2(a) 标注), 且“闪烁”时刻为 $t' = 0.05$ s, $t' = 0.15$ s, 分别对应靠近雷达和远离雷达时刻. 由微多普勒效应可知, 叶片在靠近雷达和远离雷达过程中, 分别产生正多普勒和负多普勒频率, 因此叶片在 $t' = 0.05$ s

靠近雷达且与雷达视线垂直时出现正频率带, 而在 $t' = 0.15$ s 远离雷达且与雷达视线垂直时出现负频率带, 如图 2(b) 所示. 同时由于散射点间隔 $d = 0.05$ m 较小, 因此时域回波在 $t = 0.1$ s 时幅度很小, 即不会有次峰值现象, 对应时刻的微多普勒频率值的幅度也将较小.

由文献 [1, 8] 和 2.2 节可知, 旋翼回波是由所有叶片回波叠加而成的, 叶片之间的差异为不同的初始旋转角, 即不同的相位函数; 由 (2) 式可知, 每个叶片产生的微多普勒曲线除了初相不同以外是一致的, 即在微多普勒特征中可通过不同的微多普勒曲线区分出每个叶片. 因此本文结合图 2, 分别从时域和时频域两个角度分析单叶片“闪烁”现象的物理机理.

3.1 时域回波闪烁现象及物理解释

由 2.1 节的结论 1, 2 可知散射点间隔对回波将产生不同的影响, 下面针对 $d \leq a$ 和 $d > a$ 两种情况分别进行分析.

首先分析 $d \leq a$ 的情况, 此时旋翼单叶片的时域特性可由 (6) 式幅度决定, 即

$$\begin{aligned}
 |s_{\Sigma}(t)| &= \left| \sigma K \exp \left(-j \frac{4\pi R_0}{\lambda} \right) \right. \\
 &\quad \times \text{sinc} \left(\frac{2l}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta \right) \\
 &\quad \left. \times \exp \left(-j \frac{2\pi l}{\lambda} \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta \right) \right|.
 \end{aligned} \quad (13)$$

由 (13) 式可知, 时域回波受 sinc 函数调制, 当 $2l \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t') \cos \beta / \lambda = 0$ 时回波幅度最强, 出现峰值; 一旦 $t = t' + \delta(t)$ ($\delta(t)$ 为很小的数值) 时, 即叶片发生小角度转动, 此时 $2l \cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t) \cos \beta / \lambda \neq 0$, 回波幅度受 sinc 函数调制由峰值快速下降, 即时域回波产生“闪烁”现象, 如图 2(a) 所示. 下面结合电磁散射对时域“闪烁”现象进行解释.

由电磁场理论可知, 复杂目标的电磁散射来自局部效应的散射中心, 而散射中心相当于斯特拉顿-丘 (Stratton-Chu) 积分中的一个数学不连续处, 从几何观点来看即为一些曲率不连续处与表面不连续处. 因此, 对于旋翼叶片而言, 散射中心类型主要包括镜面散射中心、边缘散射中心、尖顶散射中心 [15].

基于电磁散射可知, 叶片回波出现短暂的时域“闪烁”正是由于当叶片旋转至与雷达视线垂直的位置时, 叶片表面完全被电磁波照射, 叶片发生镜面反射使散射强度最大, 此时出现回波峰值, 为所有散射点回波叠加的结果. 由于发生镜面反射的方位角范围很小, 导致闪烁持续时间很短. 在叶片发生镜面反射时, 对回波起作用的所有散射点间隔满足 $d \leq a$, 由 2.1 的结论 1 可知回波模型与积分模型等效, 该时刻将出现 sinc 峰值.

在非闪烁时刻, 叶片发生一般散射, 入射波并非直射叶片, 此时叶尖、叶榫的散射点分别对应于尖顶和边缘散射中心点, 它们的散射强度占优, 为回波的主要来源, 这也正是回波为何急剧下降的原因所在, 且尖顶和边缘散射中心在大部分方位角范围均能起作用, 因此非闪烁持续时间将比闪烁时间长得多. 此时叶尖与叶榫的散射点间隔一般有 $d \gg \lambda/2$, 满足 $d \geq \lambda/2$, 由 2.1 的结论 2 可知此时将出现多个峰值, 峰值之间间隔很小, 该情况与本文所定义的时域“闪烁”有所不同, 为“多峰值”现象, 此时不能形成 sinc 峰值, 即不会发生“闪烁”现象.

对于 $d > a$ 的情况, 该时刻回波由 (5) 式表示. 当 $d \in (a, \lambda/2)$ 时, 由 2.1 的结论 1 可知此时回波除了发生“闪烁”现象以外还将出现“次峰值”现象. 当 $d \geq \lambda/2$ 时, 由 2.1 的结论 2 可知时域回波在一个旋转周期将出现“多峰值”现象, 这是由于散射点间隔增大, 散射点之间的影响较小, 导致在旋转过程中多个时刻叶片所有散射点均能对回波起作用, 同时由于叶片上所取的散射点个数的减少, 使得能量分散, 即峰值幅度也相应地降低. 当散射点间隔越大, 峰值个数越多, 如当叶片仅等间隔取某几个点时, 在一个旋转周期内的峰值个数将非常多, 此时在旋转的每个时刻所有散射点均对回波产生影响, 此时“闪烁”现象消失.

由上述分析可知, 当 $d \leq a$ 时旋翼叶片在一个旋转周期仅发生两次“闪烁”, 为本文定义的时域“闪烁”现象; 当 $d \in (a, \lambda/2)$ 时, 旋翼在两次“闪烁”基础上还会出现“次峰值”现象; 随着 d 的增大, 时域回波将出现与本文“闪烁”现象定义不一样的“多峰值”情形, 当 d 增大至一定程度(叶片仅等效为几个散射点)时, 时域“闪烁”现象消失.

3.2 微多普勒特征及时频域闪烁机理分析

由图 2(b) 可知, 表征旋翼叶片精细的频率调制的微多普勒特征将出现时频域“闪烁”现象, 而微

多普勒特征是通过时频分析获得的, 同时散射点的分布往往涉及横向分辨率问题, 因此本文结合时频分析和横向分辨率对微多普勒特征及时频域闪烁现象的机理进行分析.

同 3.1 节一致, 首先分析 $d \leq a$ 的情况: 先从时频分析的角度来看, 由 (2) 式可知, 散射点多普勒频率是时变的, 故可采用短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT) 的时频分析方法分析其时频分布. STFT 的定义为

$$\text{STFT}(t, f) = \int s(\tau) w(\tau - t) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau. \quad (14)$$

由 (14) 式可知, STFT 与傅里叶变换的惟一区别是 STFT 多了窗函数 $w(t)$, 因此 STFT 可显示回波在每一细小时间段内频谱的变化, 如图 3 所示.

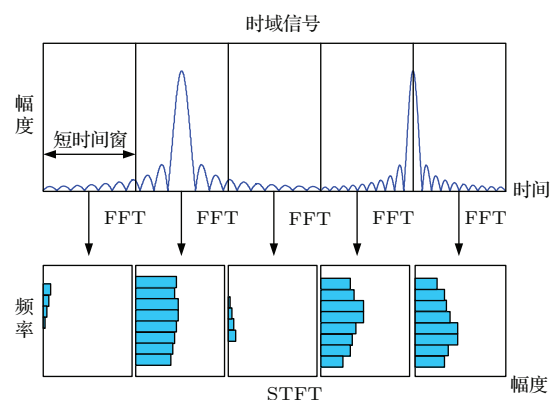


图 3 STFT 图示

Fig. 3. Sketch of STFT.

由傅里叶变换可知 $\text{sinc}(t)$ 和 $\text{rect}(f)$ 是 Fourier 变换对, 即

$$\text{sinc}(t) \xleftrightarrow{\text{FFT}} \text{rect}(f). \quad (15)$$

分析 (6) 式和图 2 可知, 在以时域闪烁时刻为中心的短暂时间段内, 回波呈现 sinc 峰值包络形式, 因此其频域为 $\text{rect}(f)$ 的矩形包络形式, 从时频分布来看即为一条有一定宽度的频率带, 即时频域“闪烁”现象, 如图 2(b) 所示, 此时回波由所有散射点发生镜面反射叠加而成, 故当叶片与雷达视线垂直且靠近雷达时, 频率带范围为 $(0, 4\pi f_{\text{rot}} l \cos \beta / \lambda)$, 而当叶片与雷达视线垂直且远离雷达时, 频率带范围为 $(0, -4\pi f_{\text{rot}} l \cos \beta / \lambda)$. 在非闪烁时刻, 回波主要由叶尖、叶榫的散射中心点引起的强电磁散射回波组成, 因此在微多普勒特征中这些时刻也只呈现由叶尖和叶榫散射点引起的多普勒频率, 分别表现为正弦曲线包络形式和零频带.

其次从横向分辨率角度分析时频域“闪烁”现象. 根据瑞利分辨准则, 若两个相邻散射点的相位差大于或等于 360° 时, 在多普勒频域即可将两者分辨开来. 令叶片在 Δt 内旋转的角度为 $\Delta\theta = 2\pi f_{\text{rot}}\Delta t$, 则由 (1) 式可知, 相邻两个散射点在旋转 $\Delta\theta$ 角后引起的相位差分别为

$$\Delta\Phi_{P_1}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} |\cos(\Delta\theta) \cos \beta| \cdot x_1, \quad (16)$$

$$\Delta\Phi_{P_2}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} |\cos(\Delta\theta) \cos \beta| \cdot x_2. \quad (17)$$

由此可得该相邻两个散射点的相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\Phi(t) &= |\Phi_{P_1}(t) - \Phi_{P_2}(t)| \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} |\cos(\Delta\theta) \cos \beta| \cdot |x_1 - x_2|. \end{aligned} \quad (18)$$

由瑞利分辨准则有

$$\begin{aligned} \Delta\Phi(t) &= \frac{4\pi}{\lambda} |\cos(\Delta\theta) \cos \beta| \cdot |x_1 - x_2| \\ &\geq 2\pi. \end{aligned} \quad (19)$$

因此, 当旋翼叶片旋转角度很小时, $\cos(\Delta\theta) \approx 1$, 故横向分辨率为

$$\Delta x = |x_1 - x_2| \geq \frac{\lambda}{2|\cos(\Delta\theta) \cos \beta|} \geq \frac{\lambda}{2}. \quad (20)$$

因此横向分辨率与波长、旋转角度、俯仰角等有关, 相邻散射点间隔至少大于或等于波长的一半时才有可能将两者分辨开来, 否则将产生模糊. 故在时域闪烁时刻, 所有相邻散射点间隔满足 $d \leq a < \lambda/2$ 时, 相邻散射点产生的微多普勒频率受横向分辨率约束无法分辨, 最终形成一条频率带; 而在非闪烁时刻, 叶尖和叶榫的散射点间隔一般有 $d \gg \lambda/2$, 满足 $d \geq \lambda/2$, 故可分辨, 不会有“闪烁”现象的发生.

接着分析 $d > a$ 的情况: 由 2.1 节可知, 当 $d \in (a, \lambda/2)$ 时, 时域回波除了发生“闪烁”现象以外, 还将出现“次峰值”现象, 当 $d \geq \lambda/2$ 时, 时域回波将出现“多峰值”现象, 结合本节的时频分析可知, 在时域回波出现“多峰值”和“次峰值”的时刻, 时频域均将出现同本文定义的时频域“闪烁”现象类同的频率带, 且由 (2) 式有频率带范围为 $(0, 4\pi f_{\text{rot}} l \cdot \sin(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t') \cos \beta / \lambda)$. 当散射点之间的间隔较大(叶片仅等效为某几个散射点)导致时域“闪烁”消失时, 时频域“闪烁”现象也将消失, 此时由 (4) 式可知散射点产生的微多普勒频率之间差异将较大, 在微多普勒特征上将表现出多条微多普勒曲线.

综合上述分析可知, 当散射点等间隔分布时, 若散射系数一致且 $d \leq a$, 微多普勒特征由叶尖强散射点引起的正弦曲线包络、叶榫散射点引起的零频带等组成, 且在时域闪烁对应的时刻受横向分辨率的限制会出现 $(0, \pm 4\pi f_{\text{rot}} l \cos \beta / \lambda)$ 的频率带, 即时频域“闪烁”现象. 随着 d 的增大, 微多普勒特征会出现多条与 $d \leq a$ 时的时频域“闪烁”类同的频率带; 当 d 增大至一定程度(叶尖仅等效为几个散射点)时, 时频域“闪烁”现象消失, 微多普勒特征表现为多条微多普勒曲线.

4 仿真与分析

基于理论分析, 下面以旋翼叶片为对象, 采用等间隔分布的散射点模型进行仿真实验, 仿真中基本参数均一致, 如表 1 所列. 在仿真中采用窗函数为高斯窗的 STFT 对回波进行时频分析.

表 1 仿真参数

Table 1. Simulation parameters.

参数	σ	f_{rot}/Hz	$\theta_1/(^\circ)$	雷达坐标	λ/m	PRF/Hz	观测 T/s	雷达与旋翼位置关系		
								R/m	$\beta/(^\circ)$	$\alpha/(^\circ)$
数值	1	4	0	(0, 0, 0)	0.3	4000	1	50000	0	0

4.1 $d \leq a$ 时散射点模型仿真与分析

由 2.1 节结论 1 可知, 当散射点间隔 $d \leq a$ 时, 散射点模型与积分模型等效. 设叶片数为 2, 散射点间隔 $d = 0.075 \text{ m} < a$, 取 81 个散射点, 则叶片长度 $l = 6 \text{ m}$, 时域闪烁回波和微多普勒特征仿真结果如图 4 所示.

由 2.1 节可知, 时域回波取峰值时有 $\cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t') = 0$, 代入参数得 $t' = (0.0625 + 0.125k) \text{ s}$, $k = 0, 1, \dots$, 而图 4(a) 在这些时刻均有很高的幅度峰值, 发生时域“闪烁”现象. 由图 4(b) 可知, 微多普勒特征呈现对称形式, 这是由于两个叶片完全对称, 在时域上无法区分, 可通过微多普勒特征加以区分; 同时微多普勒特征由正弦曲线包络、零频

带及时频域“闪烁”组成, 由3.2节时频分布的理论分析可知正弦曲线包络是由叶尖散射点强散射引起的, 零频带则是由叶毂散射点引起的, 时频域闪烁出现在时域闪烁时刻, 为叶片上所有散射点发生镜面反射造成的. 在 $t' = 0.05$ s时, 旋翼叶片靠近

雷达且与雷达视线垂直, 理论时频域“闪烁”频率带范围为 $(0, 4\pi f_{\text{rot}} l \cos \beta / \lambda) = (0, 1005.3)$ Hz, 而图4(b)中该时刻的频率带范围为 $(0, 1050)$ Hz, 这是受STFT分辨率的制约, 微多普勒曲线有展宽效应.

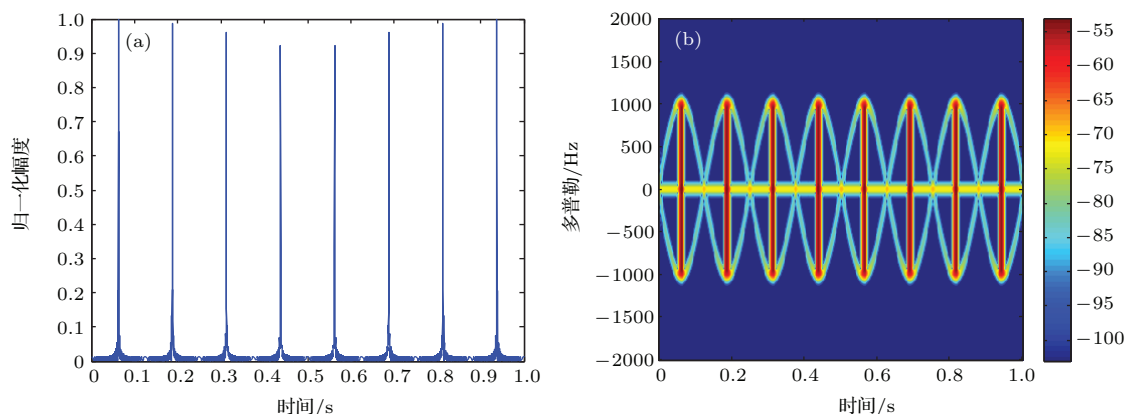


图4 (网刊彩色) 散射点模型两叶片旋翼仿真结果 ($d = 0.075$ m) (a) 时域特征; (b) 微多普勒特征

Fig. 4. (color online) The simulation results of the two-blade rotor with the scattering point model ($d = 0.075$ m): (a) Time-domain signature; (b) the micro-Doppler signature.

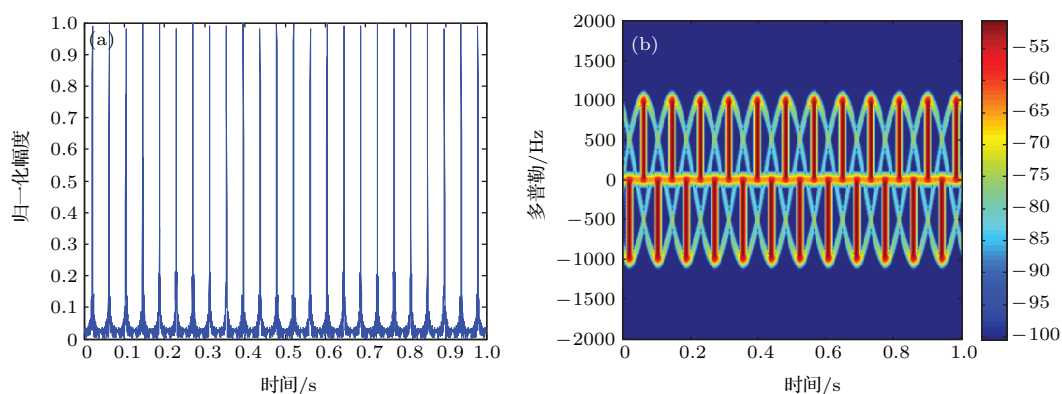


图5 (网刊彩色) 散射点模型三叶片旋翼仿真结果 ($d = 0.05$ m) (a) 时域特征; (b) 微多普勒特征

Fig. 5. (color online) The simulation results of the three-blade rotor with the scattering point model ($d = 0.05$ m): (a) Time-domain signature; (b) the micro-Doppler signature.

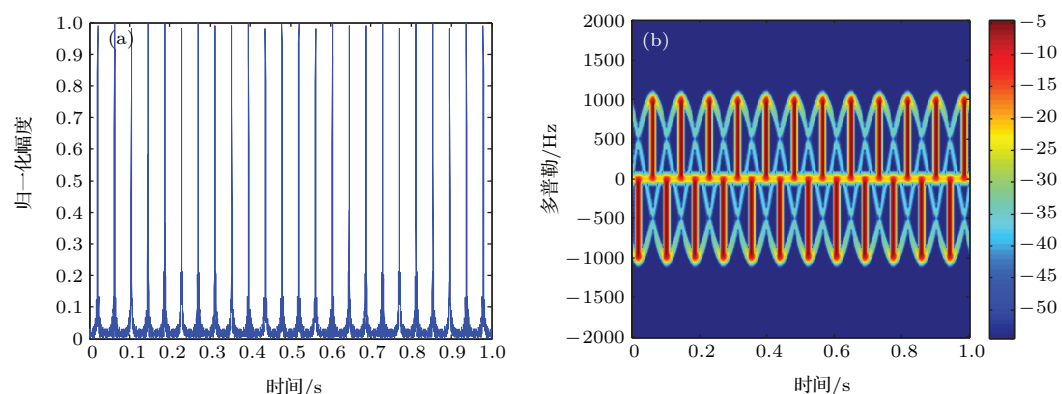


图6 (网刊彩色) 积分模型三叶片旋翼仿真结果 (a) 时域特征; (b) 微多普勒特征

Fig. 6. (color online) The simulation results of the three-blade rotor with the integral model: (a) Time-domain signature; (b) the micro-Doppler signature.

为进一步验证2.1节结论1和闪烁现象机理分析的合理性, 设叶片数为3, 散射点间隔 $d = 0.05 \text{ m} < \lambda/2$, 令叶片长度 $l = 6.0 \text{ m}$, 则需取121个散射点, 时域闪烁回波和微多普勒特征仿真结果如图5所示. 同时积分模型采用(7)式进行实现, 仿真结果如图6所示.

对比图5和图4可以发现, 叶片的奇偶性也将对回波结果产生影响^[1]. 在图4(a)中由于叶片的对称性, 时域闪烁无法区分, 闪烁次数为8次; 而在图5(a)中叶片数为3, 并无严格的对称性, 因此在时域上即可区分出每个叶片, 且每个叶片有8次闪烁, 总的闪烁次数为24. 在微多普勒特征中, 无论叶片个数是奇数, 还是偶数, 均能显示每个叶片的特征, 并在时域闪烁对应的时刻均有时频域闪烁现象.

积分模型的仿真结果中的闪烁现象基本上与 $d = 0.05 \text{ m}$ 时散射点模型的结果是一致的, 即散射点间隔越小, 散射点模型的时域闪烁及微多普勒特征时频域闪烁越接近于积分模型, 验证了2.1节结论1的合理性.

4.2 $d > a$ 时散射点模型仿真与分析

由3.2节理论分析可知, 当 $d > \lambda/2$ 时理论上是有可能通过微多普勒频率分辨散射点. 为了便于观察分析, 取单叶片作为仿真对象, 设散射点之间的间隔 $d = 0.3 \text{ m} = \lambda > a$, 令叶片长度 $l = 6.0 \text{ m}$, 则需取21个散射点, 时域闪烁回波和微多普勒特征仿真结果如图7所示, 结果取仿真结果的一段数据.

当 $d = \lambda$ 时, 由2.1节结论2分析可知, 在一个旋转周期内 $\cos(\theta_1 + 2\pi f_{\text{rot}} t'') = m/2 \in [-1, 1]$, 显然有 $m = 0$ 对应2个 t'' 、 $m = \pm 1$ 对应4个 t'' 、 $m = \pm 2$ 对应3个 t'' , 故此时一个旋转周期内将有9个幅度峰值. 由图7(a)可知, 在一个旋转周期0—0.25 s内共有9次峰值, 发生“多峰值”现象, 与 $d \leq a$ 出现的时域闪烁不一样, 验证了结论2与3.2节分析的正确性. 同时 $t' = (0.125k) \text{ s}$, $k = 0, 1, 2, \dots$ 对应于结论1分析中的“次峰值”时刻, 而图中这些时刻均有峰值, 且持续的时间比其余“闪烁”时刻要长; 由理论分析可知这些时刻的峰值与 d 的具体取值相关.

由微多普勒特征及时频域闪烁分析可知时域闪烁将导致时频域出现频率闪烁带, 从图7(b)中不难发现时域闪烁对应的时刻均有出现频率带, 且频率带的频率范围在零频曲线和叶尖散

射点引起的微多普勒曲线之间, 同时图7(a)中 $t' = (0.125k) \text{ s}$, $k = 0, 1, 2, \dots$ 时峰值持续的时间较长, 导致时频分布中该部分的闪烁频率带持续的时间较其他时刻要长.

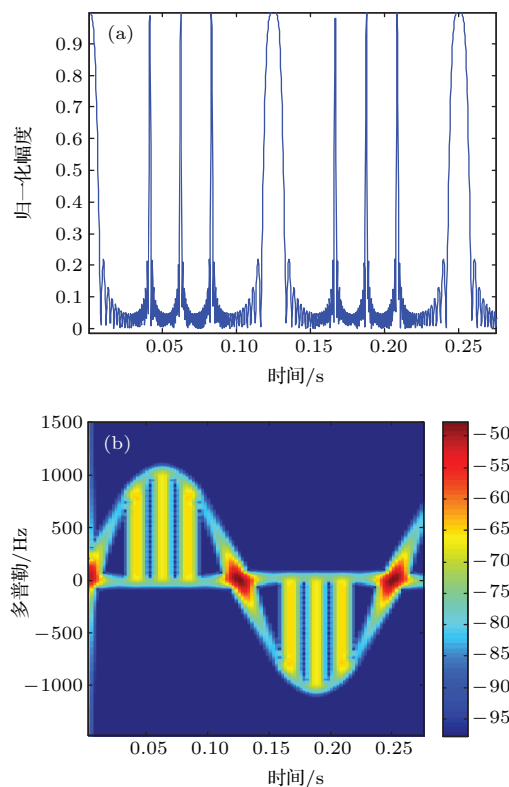


图7 (网刊彩色) 散射点模型单叶片旋翼仿真结果 ($d = 0.3 \text{ m}$) (a) 时域特征; (b) 微多普勒特征

Fig. 7. (color online) The simulation results of the single-blade rotor with the scattering point model ($d = 0.3 \text{ m}$): (a) Time-domain signature; (b) the micro-Doppler signature.

由3.2节的横向分辨率分析可知, 两个散射点间隔越远就越能被分辨开来, 设散射点间隔 $d = 1.0 \text{ m}$, 则长度 $l = 6.0 \text{ m}$ 的叶片需取7个散射点, 仿真结果如图8所示.

当散射点间隔 $d = 1.0 \text{ m}$ 时, 时域回波将呈现更多峰值的形式, 即时域“闪烁”现象消失; 在微多普勒特征中由于散射点之间的微多普勒频率差异为 $40\pi |\cos(2\pi f_{\text{rot}} t)|/3$, 差异较大, 在当前的时频分辨率下能很好地分辨, 因此在微多普勒特征中能将7个散射点对应的7条微多普勒曲线显示出来, 验证了3.2节中 $d > a$ 情况的分析.

由上述两个仿真可知, 在相同分辨率的时频分布和散射点间隔 $d > \lambda/2$ 中, 散射点间隔越大, 微多普勒特征便越能更好地分散射点的频率特性, 通过不同的微多普勒频率曲线可估算叶片的旋转频率、散射点位置等信息.

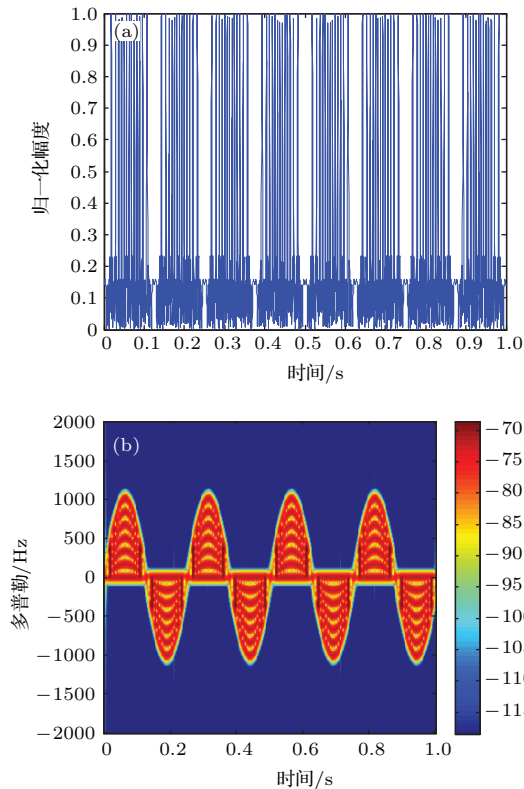


图8 (网刊彩色) 散射点模型单叶片旋翼仿真结果 ($d = 1.0$ m) (a) 时域特征; (b) 微多普勒特征

Fig. 8. (color online) The simulation results of the single-blade rotor with the scattering point model ($d = 1.0$ m): (a) Time-domain signature; (b) the micro-Doppler signature.

对比4.1节和4.2节的仿真结果可知, 散射点间隔 $d > a$ 时的结果呈现与 $d \leq a$ 时结果不同的形式, 验证了散射点间隔对回波的影响分析的正确性.

5 结 论

本文针对旋翼叶片回波建模和闪烁现象进行系统研究, 基于散射点散射系数和散射点在叶片上的分布情况, 构建了旋翼叶片回波的散射点模型, 在此基础上分析了散射点间隔对回波的影响, 并对回波时域闪烁现象的散射原因进行解释, 结合时频分布和横向分辨率研究了微多普勒特征及时频域闪烁; 对两类不同分布间隔的散射点模型进行仿真, 并与积分模型进行对比. 仿真结果表明:

1) 旋翼叶片回波模型受限于散射点间隔, 不同的散射点间隔对回波产生不同的影响;

2) 散射点间隔 $d \leq a$ 时, 散射点模型可等效为积分模型; 此时闪烁现象的物理原因在于叶片的电磁散射, 即叶片垂直雷达视线发生镜面反射导致时

域回波峰值闪烁, 同时使得微多普勒特征出现频率带的闪烁现象; 叶尖和靠近叶榫的散射点产生强散射回波, 使得微多普勒特征表现为正弦曲线包络以及零频条带;

3) 随着散射点间隔在 $d > a$ 的前提下增大, 闪烁现象会消失, 同时散射点之间的微多普勒频率差异变大, 微多普勒特征表现为多条正弦曲线形式.

本文是针对散射点散射系数一致且等间隔分布情况下展开研究的, 下一步研究中将重点分析散射系数随机或非等间隔分布时对回波特性产生的影响.

参考文献

- [1] Chen V C 2011 *The Micro-Doppler Effect in Radar* (Boston: Artech House) pp105–127
- [2] Chen V C, Tahmoush D, Miceli W J 2014 *Radar Micro-Doppler Signature Processing and Applications* (London: The Institution of Engineering and Technology) pp187–227
- [3] Gao H W, Xie L G, Wen S L, Kuang Y 2010 *IEEE Trans. Aero. Elec. Sys.* **46** 1969
- [4] Lei P, Sun J P, Wang J, Hong W 2012 *IEEE Trans. Geos. Remo. Sens.* **50** 3776
- [5] Chen V C, Li F Y, Ho S S, Wechsler H 2006 *IEEE Trans. Aero. Elec. Sys.* **42** 2
- [6] Chen V C 2008 *IET Sig. Proc.* **2** 291
- [7] Wang T, Tong C M, Li X M, Li C Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 210301 (in Chinese) [王童, 童创明, 李西敏, 李昌泽 2015 物理学报 **64** 210301]
- [8] Chen P, Hao S Q, Zhao N X, Zhou J G 2013 *Infrared and Laser Engineering* **42** 3259 (in Chinese) [陈鹏, 郝士琦, 赵楠翔, 周建国 2013 红外与激光工程 **42** 3259]
- [9] Ye S B, Xiong J J 2006 *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* **27** 816 (in Chinese) [叶少波, 熊峻江 2006 航空学报 **27** 816]
- [10] Jiang X W, Zhao Q J, Meng C 2014 *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* **35** 3123 (in Chinese) [蒋相闻, 招启军, 孟晨 2014 航空学报 **35** 3123]
- [11] Huo K, Liu Y X, Hu J M, Jiang W D, Li X 2011 *IEEE Trans. Geos. Remo. Sens.* **49** 1464
- [12] Li J, Pi Y M, Yang X B 2010 *J. Infra. Milli. Terahz. Waves* **31** 319
- [13] Li P, Wang D C, Chen J L 2013 *Sig. Image Video Proc.* **7** 1239
- [14] Ji W J, Tong C M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 160301 (in Chinese) [姬伟杰, 童创明 2012 物理学报 **61** 160301]
- [15] Zhang L X, Li N J, Hu C F, Li P 2009 *Radar Target Scattering Characteristic Test and Diagnostic Imaging* (Beijing: China Aviation Press) pp2–4 (in Chinese) [张麟兮, 李南京, 胡楚锋, 李萍 2009 雷达目标散射特性测试与成像诊断 (北京: 中国航空出版社) 第2–4页]

Rotor blades echo modeling and mechanism analysis of flashes phenomena

Chen Yong-Bin Li Shao-Dong Yang Jun[†] Cao Fu-Rong

(No. Three Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

(Received 11 March 2016; revised manuscript received 6 April 2016)

Abstract

Since the rotorcraft can easily be recognized by using the micro-Doppler (m-D) signature of rotor blades, the m-D effect induced by micro-motion dynamics plays an important role in target recognition and classification. However, the existing researches on the rotor blades pay little attention to the mechanism of the time-domain and time-frequency-domain flash phenomena. To comprehensively explain the flash phenomena from physics, the modeling of the rotor blades and the mechanism of the flash phenomena are studied in this paper. Firstly, for the rotor blades, the target cannot be represented as a rigid, homogeneous line nor several points. Taking the scattering coefficients and the interval of adjacent scattering points (the scattering point distribution on the blade) into consideration, the scattering point model of the rotor blade echo is established, and the influence of the scattering point distribution on the radar echo is analyzed as well. The detailed mathematic analysis and comparison results show that the conventional integral model of the rotor blade is only a special case of the scattering point model. Furthermore, in the case where the scattering point model is approximately equivalent to the conventional integral model, the critical interval of adjacent scattering points is deduced by mathematic analysis. Secondly, on the basis of the proposed model above, the physical mechanism of the time-domain and time-frequency-domain flash phenomena is studied from the viewpoint of the electromagnetic (EM) scattering. On the one hand, considering the EM scattering and scattering point distribution, the mechanism of the time-domain flashes is analyzed. Ideally, when the rotor blade is at the vertical position relative to the radar line of sight, i.e., at the flash time, the blade has the strongest echo. At this moment, the radar echo consists of echoes of all scattering points, thus inducing the time-domain flashes. At the non-flash time, the scattering points at the tip of blade and hub of rotor have stronger scattering intensities, so the echo is much weaker than that at the flash time. On the other hand, the time-frequency analysis and the cross range resolution are simultaneously used to analyze the mechanism of the time-frequency-domain flashes in the m-D signature. The m-D signature of the rotor blades consists of three parts: the time-frequency-domain flashes, the sinusoidal Doppler curves, and the zero-frequency band. At the flashes time, the Doppler frequency of adjacent scattering points cannot be distinguished, thus the m-D signature has the frequency band caused by all scattering points, i.e., the time-frequency-domain flashes appear. At the non-flash time, the sinusoidal Doppler curves and the zero-frequency band are caused by the scattering points at the tip of blade induced by the scattering points at the hub of rotor respectively. Finally, the simulation results about the scattering point model with the different intervals of adjacent scattering points show that the effectiveness of the proposed model and the correctness of theoretical analysis.

Keywords: flashes, electromagnetic scattering, micro-Doppler, scattering points model

PACS: 84.40.Xb, 84.40.Ua, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.65.138401

[†] Corresponding author. E-mail: yangjem@126.com