

风轮机叶片雷达散射特性计算与解析式拟合*

何炜琨, 汲超迪, 王晓亮, 吴仁彪

(中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室 天津 300300)

摘要:风轮机作为高大的运动障碍物,会对气象雷达的工作性能产生较为严重的影响,研究风轮机的电磁散射特性对于识别风电场干扰、评估其对气象雷达的影响具有重大意义。考虑了圆柱叶片介电常数对其雷达散射截面(RCS)的影响,利用数值拟合的方法实现了不同材料圆柱叶片 RCS 仿真和解析式的拟合,并对拟合结果进行了验证;其次,考虑了风轮机叶片翼型对其 RCS 的影响,运用 UG 软件对某型号风轮机叶片进行了三维建模,对其回波信号进行微动特征分析,并与实测结果进行了对比,证明了该建模方法的正确性;最后利用数值拟合的方法给出了真实叶片 RCS 在一定范围内的解析计算公式。

关键词:风轮机;气象雷达;电磁散射特性;解析公式;叶片建模

中图分类号: TN 958.2 TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Radar cross characteristics calculation and analytical formula fitting of wind turbine blade

He Weikun, Ji Chaodi, Wang Xiaoliang, Wu Renbiao

(Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: As a kind of tall moving obstacle, wind turbines have an inevitable impact on weather radar performance. The analysis of electromagnetic scattering characteristics of wind turbine is significant for the identification of wind farm disturbing and the evaluation of influence on weather radar. In this paper, considering the effect of the dielectric constant for cylindrical blade on the radar cross section (RCS), an analytical formula of the RCS calculation for cylindrical blade is proposed based on numerical theory, and the results are validated by simulation. Meanwhile, a real blade is modeled by using software UG in consideration of airfoil section. Therefore, the electromagnetic scattering characteristics including RCS and time-frequency domain analysis are established. Simulation results demonstrate the validity of the modelling method in comparison with the measured data. Finally, an analytical formula of real blade's RCS is adapted with a certain range.

Keywords: wind turbines; weather radar; electromagnetic scattering characteristics; analytical formula; blade modelling

0 引言

鉴于对清洁能源的需求,近年来,风电产业在世界各国得到快速发展。由于雷达系统和风电场建设选址的相似性,持续增长的风轮机数量对气象雷达系统造成了较大的影响^[1-5]。首先,风轮机叶片的转动使轮毂到叶尖产生连续变化的速度,导致雷达回波产生连续的多普勒谱,这与气象目标具有很高的相似度。传统的地杂波抑制方法对此不再适用,从而导致风速估计误差增大,引起湍

流、风切变、龙卷风漩涡等气象目标的误检测和误识别。其次,风轮机尺寸较大且桅杆材料为金属,其过强的反射能量会造成降雨量的过估计以及风暴、雷暴的误识别,同时,过强的反射能量也可能使雷达设备产生阻塞。除此之外,风电场中多台风轮机之间的多径效应会扩大风电场的干扰范围,使气象雷达中产生大量的虚假目标。研究风轮机在气象雷达频段的电磁散射特性,对于评估其对气象雷达的影响乃至气象雷达风电场杂波抑制具有重要意义。

风轮机的电磁散射特性分析广受关注,目前主要的研究方法分为散射点叠加模型、电磁软件仿真、实验室微

缩模型测量以及数学解析式拟合等。Chen V. C.^[6]、冯孝斌等人^[7]和蒋相闻等人^[8]基于散射点叠加理论研究了旋翼螺旋桨飞机的雷达电磁散射特性及其频谱特征; Rashid L. S. 等人^[9]在此基础上,建立了风轮机回波的散射点叠加模型,能简单仿真风轮机雷达回波信号的某些特性,但其不能实现任意观测点处(不同方位角、俯仰角)的风轮机回波仿真,且准确度不高。电磁仿真软件的计算精度相对较高,常用的主要有基于一致性绕射射线追踪技术的电磁仿真软件 XGtd^[10],基于微波光学和几何光学的电磁仿真软件 X-Patch,具有矩量法、有限元法和物理光学等多种求解算法的电磁仿真软件 FEKO。但这些电磁计算工具运算量非常大,且受到频率的限制,在气象雷达波段的运算会耗费极大的计算资源。Zhang Y 等人^[11]、Kong F. X. 等人^[12]和俞一鸣^[13]利用等比例缩小的风轮机模型在微波暗室中测量并分析了风轮机的电磁散射特性,并与仿真软件结果进行了对比。但该方法不方便修改风轮机参数,成本较高且无法得到风轮机的实际反射强度。Angulo I 等人^[14]和 Grande O 等人^[15]基于物理光学法分别推导出金属圆柱及圆台模型的雷达散射截面积(radar cross section, RCS)计算公式,该公式可用于计算桅杆的 RCS 强度,在此基础上,He W. K. 等人^[16]考虑的电磁波绕射对风轮机桅杆 RCS 的影响,对上述桅杆的 RCS 解析模型进行了修正,但其只适用于金属材料的桅杆 RCS 计算。Karabayir O 等人^[17]利用散射点叠加的思想将风轮机分段,通过理论解析公式计算了风轮机的 RCS,同样只适用于金属导体。可以看出,上述计算风轮机 RCS 的计算方法对于具有形状、材料较为复杂的风轮机叶片或者无能为力,或者由于气象雷达频段的限制,计算量巨大。研究实现风轮机叶片 RCS 计算及其相应的解析模型,为评估风轮机对气象雷达的影响程度提供了有力的技术支撑和成本保障。

本文利用电磁仿真软件 FEKO,完成了气象雷达频率下风轮机叶片简化模型和真实模型的 RCS 计算。并考虑叶片介电常数对其 RCS 影响,利用数值拟合的方法,结合电磁软件仿真得到了不同介电常数下圆柱叶片的 RCS 解析计算公式。考虑到叶片翼型对其 RCS 的影响,运用 UG 软件对真实风轮机叶片进行了三维建模,对其回波进行了微动特征分析,并与实测结果进行对比,证明了该建模方法的有效性。最后,利用真实叶片的仿真数据,拟合出了在一定方位角范围内适用的真实叶片 RCS 计算的解析模型。

1 圆柱叶片 RCS 计算与解析式拟合

1.1 圆柱叶片模型

由于叶片形状较为复杂,首先采用简化的圆柱模型

仿真叶片的 RCS,风轮机与雷达视线(line of sight, LOS)的几何位置关系如图 1 所示。由于叶片材料为玻璃纤维增强复合材料,现有的圆柱模型 RCS 计算的解析公式只适用于理想导体,因此首先利用 FEKO 软件计算不同介电常数圆柱叶片的 RCS,并利用数值拟合的方法,得到不同介电常数圆柱模型的 RCS 解析公式。

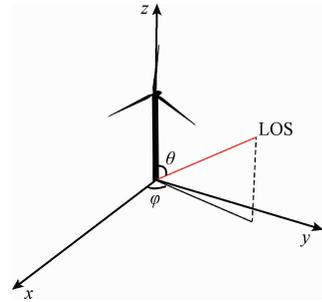


图 1 风轮机 RCS 计算所用球坐标系

Fig. 1 Spherical coordinate used in RCS calculation

风轮机叶片模型如图 2 所示,圆柱叶片长度为 24 m、叶片半径 1 m。通过设置介电常数来考虑叶片材料对其 RCS 的影响,叶片相对介电常数可以写为:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (1)$$

式中: ε' 为相对介电常数的实部, σ 表示电导率, ω 表示角频率,对于玻璃纤维复合材料,相对介电常数实部为 2~6,电导率约为 10^{-13} S/m,气象雷达角频率约为 10^{10} ,因此可以忽略介电常数虚部对其 RCS 的影响。

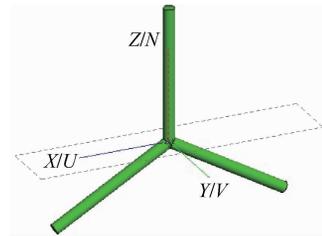


图 2 圆柱叶片模型

Fig. 2 Cylinder blade model

1.2 圆柱叶片 RCS 峰值拟合

鉴于风轮机叶片 RCS 的计算主要是为后续风电场对气象雷达的影响评估提供理论依据,因此本节考虑雷达波束垂直照射风轮机叶片的一个边缘,即风轮机叶片的 RCS 值最大的情况。此时不存在电磁波在叶片边缘的绕射,矩量法与物理光学法精度相当,但物理光学法需的计算资源要少得多,因此利用物理光学法计算介电常数为 2~6 的电介质叶片 RCS 峰值,介电常数变化步长为 0.1。利用多项式对 RCS 峰值进行了数值拟合,拟合结果如图 3 所示。

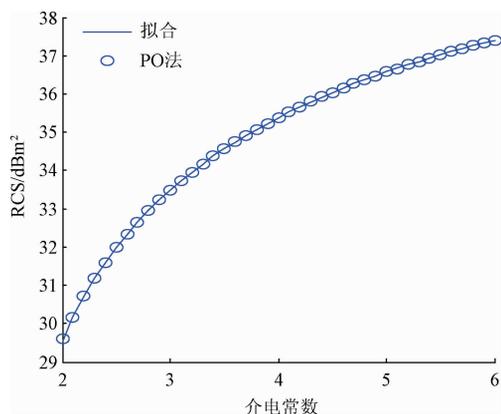


图3 圆柱叶片 RCS 峰值随介电常数变化曲线
Fig. 3 Maximum RCS of cylinder blade corresponding to relative permittivity

以上拟合只考虑了单参数(介电常数)的变化,为进一步考虑雷达发射频率和叶片尺寸等参数对风轮机叶片 RCS 的影响,本文在理想圆柱导体 RCS 峰值计算公式(见式(2))^[14]的基础上,利用数值拟合的方法得到风轮机叶片 RCS 的峰值与雷达波长、尺寸以及介电常数的关系如式(3)所示,式中, λ 表示波长, r 表示叶片半径, H 表示叶片长度, ε_r 表示材料的相对介电常数。

$$\sigma_{\max} = \frac{2\pi r H^2}{\lambda} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{2\pi r H^2}{\lambda} (-5.315 \times 10^{-5} \cdot \varepsilon_r^3 - 0.001296 \cdot \varepsilon_r^2 + 0.04841 \cdot \varepsilon_r - 0.06355) \quad (3)$$

为了验证式(3)的准确性,利用物理光学法分别计算不同频率和叶片尺寸下的 RCS 峰值,并与式(3)的结果进行了对比。叶片模型参数如表1所示,验证结果如表2、3所示。

表1 圆柱叶片模型参数

Table 1 Parameters of cylinder blade

介电常数为3和4	叶片长度/m	叶片截面半径/m
模型1	20	0.8
模型2	24	1
模型3	32	1

表2 圆柱叶片拟合结果(介电常数为3)

Table 2 Results of simulation and analytical formula of blade (relative permittivity is 3)

频率/GHz	模型1		模型2		模型3	
	PO法	拟合	PO法	拟合	PO法	拟合
2.7	31.00	30.94	33.49	33.49	36.01	35.99
4.0	32.67	32.64	35.21	35.20	37.74	37.70

表3 圆柱叶片拟合结果(介电常数为4)

Table 3 Results of simulation and analytical formula of blade (relative permittivity is 4)

频率/GHz	模型1		模型2		模型3	
	PO法	拟合	PO法	拟合	PO法	拟合
2.7	32.88	32.83	35.39	35.38	37.93	37.88
4.0	34.56	34.53	37.11	37.09	39.62	39.59

由表2、3可以看出,拟合结果与物理光学计算结果的误差均控制在3%以内,但解析模型的计算效率要明显高于传统的物理光学(physical optics, PO)法。对于CPU频率2.60 GHz,内存32 GB的计算机,所使用的仿真软件为MATLAB R2010a和FEKO 7.0,雷达工作频率为2.7 GHz时,介电常数为3的模型1给出的圆柱叶片,物理光学法的计算时间为21.4 min,对于模型3给出的圆柱叶片来说,物理光学法的计算时间将增加到1 h 4 min左右;当雷达工作频率增加到4 GHz时,物理光学法计算模型1给出的圆柱叶片所需的时间为27.2 min,且物理光学法的计算时间会随着工作频率及叶片长度的增加而加长,而解析模型的计算时间仅需数秒内即可完成。

2 真实叶片的建模与电磁散射特性分析

2.1 真实叶片建模

建模对象为国内某品牌的750 kW叶片,长度约为23.5 m,叶片截面采用NACA4412翼型,归一化(弦长为1)标准翼型数据可由Profili软件导出,图4所示为NACA4412翼型的标准截面。叶片弦长、扭转角等参数如表4所示,实体建模采用Siemens PLM Software开发的UNIGRAPHICS NX9.0(UG)完成。

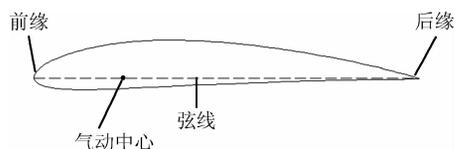


图4 NACA4412翼型

Fig. 4 NACA4412 airfoil

叶素建模法的主要思路是建立不同位置的叶片截面模型,即叶素模型。将标准翼型截面二维坐标(x_0, y_0)转换为翼型以气动中心为原点的二维坐标(x_1, y_1),进而得到叶素各离散点空间坐标(x, y, z),具体过程如下所述。

表 4 某真实叶片叶素参数

Table 4 Blade element parameters of a real wind turbine blade

截面序号	弦长 C/m	扭转角 $\theta/(^\circ)$
1	2.250	18.797
2	2.198	15.807
3	2.143	13.614
4	2.061	11.779
5	1.971	11.11
6	1.912	9.301
7	1.838	7.663
8	1.754	6.317
9	1.651	5.427
10	1.552	5.432
11	1.453	4.653
12	1.342	4.287
13	1.220	3.837
14	1.103	3.165
15	0.982	2.937
16	0.978	2.789
17	0.860	2.131
18	0.761	2.134

1) 求解翼型气动中心坐标 (X, Y) , 对于 NACA4412 翼型, 其气动中心位于 $1/4$ 弦长处, 则翼型以气动中心为原点的二维坐标 $(x_1, y_1) = (x_0, y_0) - (X, Y)$;

2) 以叶素平面的气动中心为坐标原点建立三维坐标系, 设叶片根部处的叶素平面为 XOY 平面, 叶片翼展方向为 Z 轴正向;

3) 求解叶素空间坐标, 由于叶素坐标随弦长发生变化, 因此对于不同翼展处的叶素, 根据表 4 中的弦长数据 C , 其坐标为 $(x_2, y_2) = (x_1, y_1) \times C$;

4) 以翼型前后缘连线为 OX 轴, 求解考虑扭转角之后的叶素坐标: 对于叶素中的任意一点 (x_2, y_2) , 其与 OX 轴所成夹角为 $\arctan(y_1/x_1)$, 加入扭转角之后, 其与 OX 轴夹角变为 $\arctan(y_1/x_1) + \theta$, 因此可以得到各叶素离散空间点的坐标, 如式 (4) ~ (6) 所示。

$$x = C \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cos\left(\arctan \frac{y_1}{x_1} + \theta\right) \quad (4)$$

$$y = C \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sin\left(\arctan \frac{y_1}{x_1} + \theta\right) \quad (5)$$

$$z = L \quad (6)$$

得到各叶素的离散空间坐标后, 可将数据导入 UG 软件进行 3D 实体建模。叶片模型如图 5 所示。

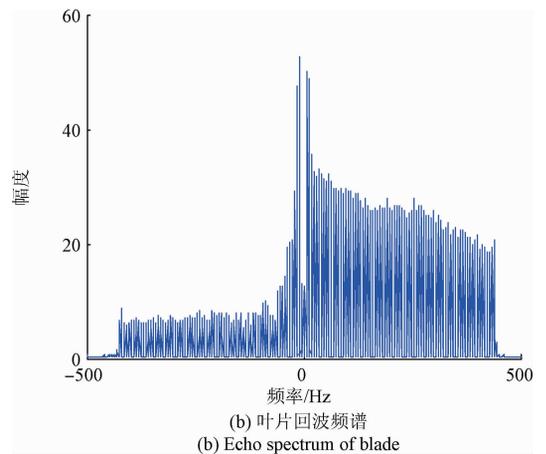
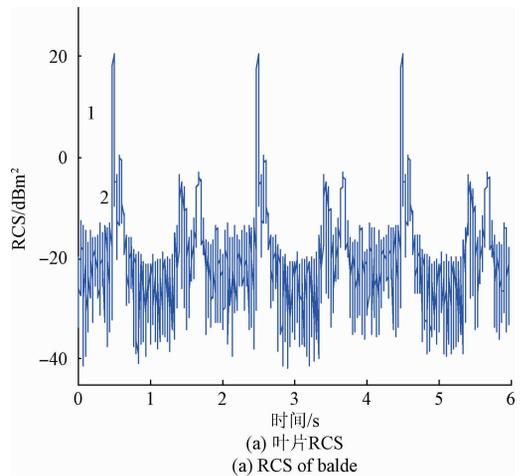


图 5 真实叶片 3D 模型

Fig. 5 3D model of real blade

2.2 真实叶片电磁散射特性分析

真实叶片的电磁散射特性计算采用 2.1 节中的真实叶片模型, 在 2.7 GHz 和 4.0 GHz 下采用仿真软件 FEKO 计算完成, 材料采用介电常数为 4 的玻璃纤维复合材料。为模拟叶片的动态转动特性, 仿真时通过不断变化雷达观测点的位置达到相对运动的效果。仿真步长为 0.06° , 在雷达脉冲重复频率 (pulse recurrence frequency, PRF) 为 1 000 Hz 的情况下, 对应转速为 10 r/min, S 波段仿真结果如图 6 所示。



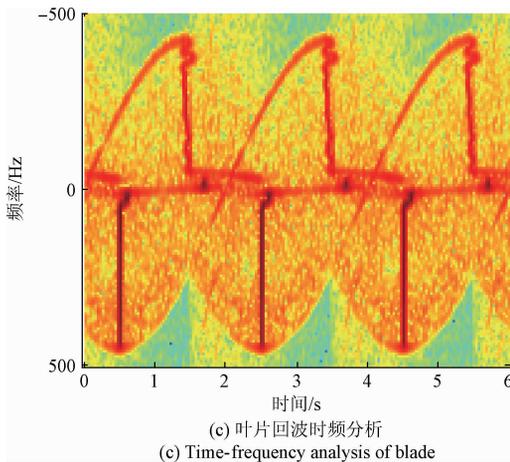


图6 2.7 GHz下叶片电磁散射特性分析
Fig.6 Electromagnetic scattering characteristics of blade in 2.7 GHz

由于仿真时长为6 s,因此图6(a)中RCS出现6个峰值(6 s时间内,叶片恰好转动一圈,每个叶片两次经过与雷达波束垂直的位置(上下各一次)),但6组峰值并不完全一致,由于如图4所示的叶片前缘后缘厚度不同,造成每个叶片正面和反面的反射能量强度不同;另外,6组峰值中,每组峰值均包含两个峰值。以图6(a)中0~1 s内的峰值为例,该峰值是第1个叶片经过与雷达波束垂直的位置时产生的峰值。将每组峰值中的左侧的峰标记为“1”,右侧峰值标记为“2”,产生两个峰值是由于圆柱叶片的叶根连接处造成的,其中1号峰由叶片引起,2号峰则由叶根部位的圆柱体支撑结构引起,叶片与叶根部分扭转角不同,因此RCS最大值出现的时间不同。通过与其他5组峰值比较可发现,由于圆柱体正反两侧形状一致,所以每组峰值中的2号峰大小相同,而1号峰值则分为大小不同的两种。

图6(b)所示为叶片回波的频谱,零频附近的能量较高是由于叶根部位的圆柱部分造成的,该部分线速度较低造成多普勒频率接近于0。频谱能量不对称则是由于叶片前后缘厚度不同造成,叶片的前缘厚度较大,反射的能量相对后缘也要高一些,因此造成正频率部分能量比负频率部分高。另外,虽然图6(a)中前缘的RCS峰值大于圆柱产生的RCS峰值(即1号峰大于2号峰),但对于2号峰来说,它的能量集中在低频部分,而对于1号峰,由于叶片长度较长,虽然RCS最大值较高,但分布在不同的频率,因此造成图6(b)中高频部分的能量低于零频附近。另外,由于从叶片的叶根到叶尖,叶片逐渐变薄,造成叶片的前缘厚度逐渐降低,因此正频率部分能量逐渐降低;而叶片后缘厚度基本保持不变,其回波能量也基本保持稳定。

风轮机叶片回波时频分析图如图6(c)所示,时频分

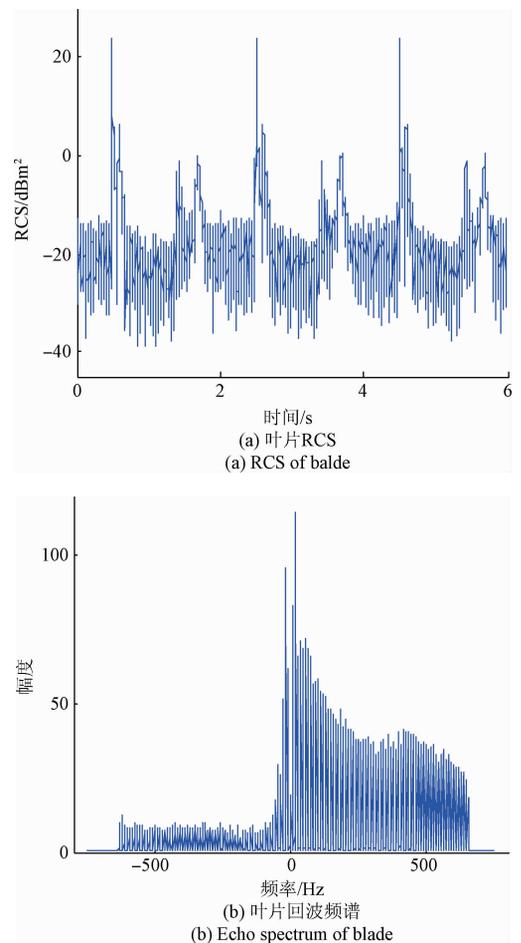
析后出现多普勒频率闪烁现象,最大多普勒频率约为440 Hz,风轮机叶片多普勒频率理论值可由式(7)计算。

$$f_{d\max} = \frac{2v_{\max}f_0}{c} \quad (7)$$

式中: v_{\max} 表示叶尖最大线速度, f_0 表示发射频率, c 表示光速。利用式(7)计算可得理论最大多普勒频率为442.9 Hz,与仿真结果基本一致。在叶片转动一周的时间内共出现6次频闪,且每次频闪在零频附近发生弯曲,说明最大能量出现时间不一致,是由于叶根部位扭转角不同造成的,这与图6(a)中每组RCS峰值均包含两个峰值相吻合。3组正弦形状的包络线则是由于叶尖部分散射造成。

C波段采用4.0 GHz频率仿真,由于频率过高容易导致最大多普勒频率超过PRF/2,产生多普勒模糊现象。因此,在C波段仿真过程中将PRF提高为1 500 Hz。仿真结果如图7所示。

C波段下叶片RCS特征与S波段保持一致,同样分为6组峰值,每组包含两个。回波频谱特征也与S波段一致,由于发射频率发生变化,因此最大多普勒频率相较于S波段有所增大,约为655 Hz,与利用式(7)计算的理论最大多普勒频率656.2 Hz基本保持一致。图8所示



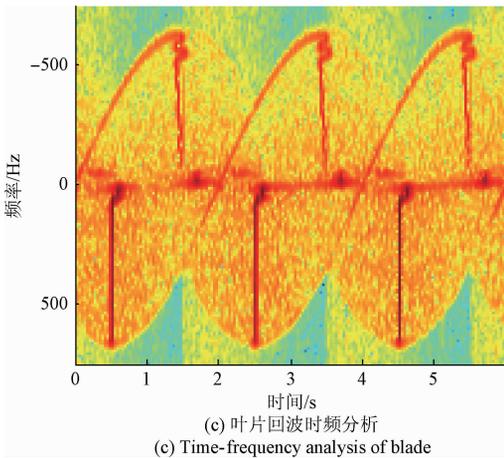


图 7 4.0 GHz 下叶片电磁散射特性分析
Fig. 7 Electromagnetic scattering characteristics of blade in 4.0 GHz

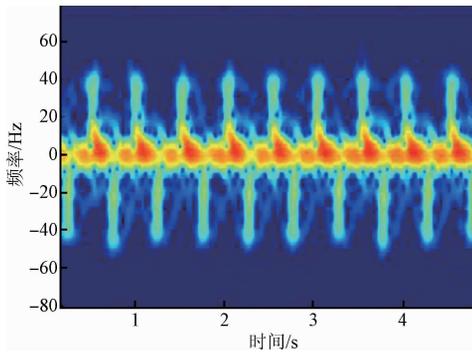


图 8 1:160 微缩模型实测数据时频分析
Fig. 8 Time-frequency analysis of turbine measurement data with 1:160 scaled model

为在微波暗室内利用 1:160 的微缩模型得到的实测结果^[13],工作频率为 14 GHz,雷达视线平行于叶片旋转平面,由于模型大小与发射频率存在差异,导致结果在数值上有所差距,但回波信号特征较为接近:多普勒频闪在接近零频处有所弯曲(由于叶根连接引起),叶尖对应的多普勒频闪在时域有所展宽(叶尖部分叶片弦长急剧下降,叶片与雷达视线之间的角度变化更快)。

2.3 真实叶片 RCS 拟合

真实叶片形状不规则,无法利用解析公式计算其 RCS。通过图 6、7 中叶片 RCS 随时间的变化曲线可知,叶片 RCS 依赖于叶片的转动位置;同时,由于叶片形状的复杂性,其 RCS 随方位角也会发生很大变化。但由于叶片 RCS 明显低于桅杆,且对于影响评估来说只需考虑其“最坏”影响,因此可以通过计算叶片 RCS 最大值来分析其影响,简化模型的复杂度。图 9 所示为 2.7 GHz

频率下叶片最大 RCS(某一叶片与雷达视线垂直时)随方位角变化曲线,从图 9 中可以看出,真实叶片的 RCS 在雷达视线垂直叶片旋转平面时最大(由于叶片存在扭转角,因此两侧 RCS 值不同),其中左侧峰值对应图 10(a)中的 LOS1,右侧峰值对应图 10(a)中的 LOS2;其次是当雷达视线照射叶片前缘时,即图 9 中方位角处于 200° 附近的部分,对应图 10(b)中的 LOS。由于雷达视线垂直于叶片旋转平面时不会产生多普勒频移现象,而照射前缘是产生较大的多普勒频移,且由于前缘形状近似于圆柱,其 RCS 随方位角变化较小,因此首先拟合雷达视线照射叶片前缘(即方位角位于 150° ~ 240°)时的 RCS。

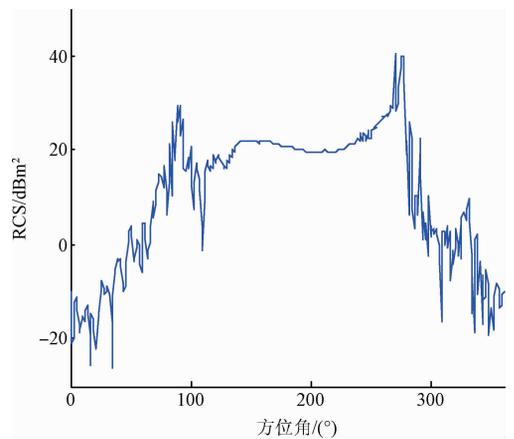


图 9 真实叶片最大 RCS 随方位角变化
Fig. 9 Maximum RCS of real blade corresponding to azimuth

不同型号的叶片相关参数相差较大,本文以 750 kW 叶片为例,并认为当叶片长度发生变化时,其弦长等参数等比例变化。拟合的思路是建立不同长度的叶片模型,仿真雷达视线照射前缘时的 RCS,以叶片长度为自变量,拟合叶片 RCS 随叶片长度的变化。同时对于相同长度的叶片模型,计算其 RCS 随频率的变化,用以拟和 RCS 与频率的关系。当雷达视线平行于叶片旋转平面垂直照射叶片前缘时(见图 10(b)),拟合结果如式(8)所示。

$$\sigma = 10 \log_{10} \left(\frac{2\pi}{\sqrt{\lambda}} (-4.085 \times 10^{-4} H^3 + 4.718 \times 10^{-2} H^2 - 0.8335 H + 5.225) \right) \quad (8)$$

式中: H 为叶片长度,为验证式(8)的适用性,利用 FEKO 计算了长度为 12、16 和 20 m 的叶片在 3.0、4.0 GHz 频率下的最大 RCS,计算结果如表 5 所示,误差小于 0.4 dB。由于图 9 中雷达视线照射叶片前缘时对应的方位角在 150° ~ 240° 之间变化,其 RCS 变化范围不会超过 2 dB,因此可利用该公式估计 150° ~ 240° 范围内的 RCS。

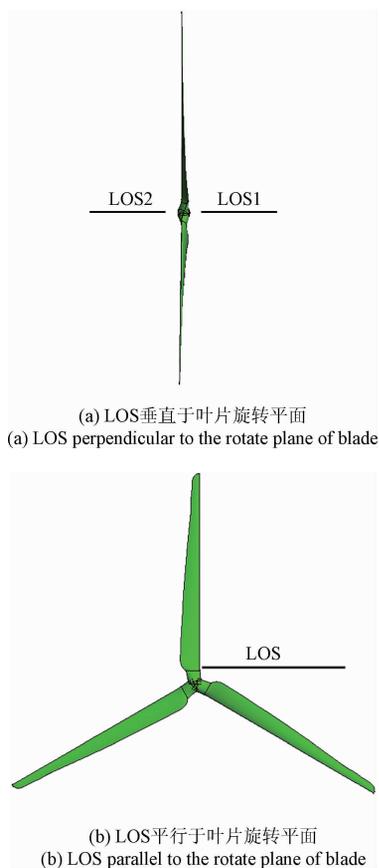


图10 LOS与叶片相对位置示意图

Fig. 10 Relative position between LOS and blade

表5 真实叶片 RCS 峰值拟合结果

Table 5 Peak RCS results of real blade

(dB)

频率/GHz	12 m		16 m		20 m	
	PO 法	拟合	PO 法	拟合	PO 法	拟合
3.0	14.35	14.16	16.49	16.58	19.26	19.17
4.0	14.52	14.78	17.50	17.21	19.71	19.80

3 结 论

为了定量评估风电场杂波对气象雷达的影响,首要问题是研究风轮机的电磁散射特性。本文基于数值拟合的方法提出了玻璃纤维等复合材料的圆柱叶片 RCS 解析模型,在保证一定计算精度的前提下,提高了风轮机 RCS 的计算效率;其次,考虑到叶片翼型对 RCS 的影响,建立了真实的叶片模型,分析了其 S 波段和 C 波段的回波特性,并与实测结果进行了对比,验证所建叶片模型的可靠性;最后,利用真实叶片的仿真结果,提出了适用于一定方位角范围的 RCS 解析计算公式,从而可以实现风

轮机 RCS 的快速计算。为后续评估风电场对气象雷达的影响提供了基础。在现有的工作基础上,扩大真实叶片 RCS 解析公式的适用范围是后续工作的一个方向。

参考文献

- [1] SEO B, KRAJEWSKI W and MISHRA K. Using the new dual-polarimetric capability of WSR-88D to eliminate anomalous propagation and wind turbine effects in radar-rainfall [J]. Atmospheric Research, 2015, 153 (2): 296-309.
- [2] NORIN L. A quantitative analysis of the impact of wind turbines on operational Doppler weather radar data [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8 (2): 593-609.
- [3] 何炜琨, 郭双双, 王晓亮, 等. 基于奇异值分解的风电场杂波波动特征提取 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31 (4): 588-595.
HE W K, GUO SH SH, WANG X L, et al. Micro-motion features extraction of wind farm echoes based on singular value decomposition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31 (4): 588-595.
- [4] 李喆, 邵楠, 高玉春, 等. 中美天气雷达回波强度标定性能分析 [J]. 电子测量技术, 2016, 39 (6): 35-38.
LI ZH, SHAO N, GAO Y CH, et al. Calibration performance analysis on weather radar echo intensity between China and USA [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39 (6): 35-38.
- [5] 金晓航, 孙毅, 单继宏, 等. 风力发电机组故障诊断与预测技术研究综述 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (5): 1041-1053.
JIN X H, SUN Y, SHAN J H, et al. Fault diagnosis and prognosis for wind turbines: An overview [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (5): 1041-1053.
- [6] CHEN V C. Radar signatures of rotor blades [J]. Proceedings of the International Society for Optical Engineering, 2001, 4391: 63-70.
- [7] 冯孝斌, 黄培康. 飞机旋转叶片回波频谱特征分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27 (3): 385-387.
FENG X B, HUANG P K. Analysis of the spectrum signature of the radar return signal from aircraft rotating blade [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27 (3): 385-387.
- [8] 蒋相闻, 招启军, 孟晨. 直升机旋翼桨叶外形对雷达特征信号的影响 [J]. 航空学报, 2014, 35 (11): 3123-3136.
JIANG X W, ZHAO Q J, MENG CH. Effect of helicopter rotor blade shape on its radar signal characteristics [J].

- Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 35 (11): 3123-3136.
- [9] RASHID L S, BROWN A K. Impact modelling of wind farms on marine navigational radar [C]. IET International Conference on Radar Systems, 2007: 1-5.
- [10] SUNDARESAN S, SHANMUGHA S G A. Simulation study on modeling the effects of wind turbine on communication signals (C and X bands) using XGtd [C]. International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP), 2015: 195-199.
- [11] ZHANG Y, HUSTON A, PALMER R D, et al. Using scaled models for wind turbine EM scattering characterization: techniques and experiments [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(4): 1298-1306.
- [12] KONG F X, ZHANG Y, PALMER R, et al. Wind turbine radar signature characterization by laboratory measurements [C]. IEEE Radar Conference, 2011: 162-166.
- [13] 俞一鸣. 时频分析简介及应用 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6): 12-15.
YU Y M. Introduction and application of time-frequency analysis [J]. Foreign Measurement Technology, 2015, 34(6): 12-15.
- [14] ANGULO I, GRANDE O, JENN D, et al. Analysis of wind turbines radar cross section for analyzing the potential impact on weather radars [C]. 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2015: 1-5.
- [15] GRANDE O, ANGULO I, JENN D, et al. Estimating reflectivity values from wind turbines for analyzing the potential impact on weather radar services [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8 (5): 2183-2193.
- [16] HE W K, JI CH D, WANG X D, et al. RCS Calculation of wind turbine mast for weather radar [C]. CIE International Conference on Radar, 2016: 1249-1252.
- [17] KARABAYIR O, YUCEDAG S M, COSKUN A F, et al. Wind turbine signal modelling approach for pulse Doppler radars and applications [J]. Radar, Sonar & Navigation IET , 2015, 9(3): 276-284.

作者简介



何炜琨(通讯作者), 2000 年于中央民族大学获得学士学位, 2003 年于中国民航大学获得硕士学位, 2012 年于天津大学获得博士学位, 现为中国民航大学副教授, 主要研究方向为雷达信号处理、风电场杂波抑制。
E-mail: hwkcauc@126.com

He Weikun (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Minzu University of China in 2000, received her M. Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2003, and received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2012. Now she is an associate professor in Civil Aviation University of China. Her main research interests include radar signal processing and wind farm clutter suppression.