

风电场对航管二次监视雷达 S 模式的影响分析

吴仁彪* 马晨曦 王晓亮 何炜琨

(中国民航大学 天津 300300)

摘 要: 风电场作为一种运动的大型障碍物可能对航管二次监视雷达的性能产生影响。目前航管二次监视雷达正在经历逐步由 A/C 模式到 S 模式的转变升级, 研究风电场对航管二次监视雷达 S 模式的影响, 对保障民航飞行安全具有重要意义。该文在 S 模式和 A/C 模式信号特征对比分析的基础上, 分析了 S 模式询问信号和应答信号可能受到风电场影响的条件, 并由此给出了 S 模式二次雷达附近可能受风电场影响的飞行范围的计算方法, 同时给出了其与 A/C 模式影响范围的量化比较。该文所提方法及相关结论可以为风电场附近的雷达选址(或新建风电场选址)和飞行程序的设计提供依据。

关键词: 航管二次雷达; S 模式; 空中交通管制; 风电场; 干扰影响评估

中图分类号: TN958.96

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)08-1887-07

DOI: 10.11999/JEIT161033

Analysis of Impact of Wind Farms on the Mode S Secondary Surveillance Radar in Air Traffic Control

WU Renbiao MA Chenxi WANG Xiaoliang HE Weikun

(Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Wind farms, which are motorial large obstacles, may degrade the performance of the Secondary Surveillance Radar (SSR) in Air Traffic Control (ATC). The SSR is undergoing the upgrade from Mode A/C to Mode S. Thus, it is important and meaningful to study the impact of wind farms on SSR for protecting the safety of civil aviation. The conditions of determining the impacted flight region of the interrogation and response signals are analyzed based on the contrastive analysis of signal characteristics of Mode S and A/C. Also, the calculation method of impacted flight region caused by wind farms as well as the quantitative comparison are given. The method and the conclusion can be used to provide a basis for selecting proper location for the radar near the wind farms (or address for new wind farms near the radar), and for designing a flight program.

Key words: Secondary surveillance radar; Mode S; Air traffic control; Wind farms; Evaluation of interference effects

1 引言

为应对全球气候变暖, 世界各国对清洁能源产生了巨大需求, 风力发电作为一种清洁能源在全世界受到高度关注。根据全球风能理事会和中国风能协会的数据统计^[1,2], 近十多年来世界和我国风电累

计装机容量呈指数飞速增长。自 2010 年起, 我国风电累计装机容量稳居世界第一位。此外, 风力发电机的几何尺寸近年来也快速增长。

风电场结构庞大并且成片分布, 对雷达信号造成阻挡; 风电场叶片会随风向、风速改变其旋转面方向和旋转速度, 导致雷达回波信号多普勒频谱复杂, 2000 年英国报道了风电场会对一次雷达造成影响^[3], 此后其他发达国家如美国、德国、西班牙、荷兰等国陆续开展对航管一次监视雷达受风电场的影响研究^[4-8]。目前, 对航管二次监视雷达(以下简称为二次雷达)受风电场影响的研究虽已开展了一些工作^[9-11], 但对于风电场对 S 模式二次雷达的影响, 尚没有系统的研究报道。

二次雷达, 是目前民航使用最广泛的监视手段。新一代 S 模式二次雷达相较于传统 A/C 模式二次雷达, 除了监视飞机位置和速度信息外还具有数据链

收稿日期: 2016-10-08; 改回日期: 2016-12-08; 网络出版: 2017-03-07

*通信作者: 吴仁彪 rbwu@cauc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民航局联合资助项目(U1533110, U1233109), 国家自然科学基金(61571442), 中国民用航空局空中交通管理局科技计划项目, 中央高校基本科研业务费项目(3122015D005)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation Committee and Civil Aviation Administration of China Jointly Funded Program (U1533110, U1233109), The National Natural Science Foundation of China (61571442), The Science and Technology Program of Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation Administration of China, The Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (3122015D005)

传输能力,可以提供更多的诸如航空交通管制指令,气象及环境等信息。在国际民航组织 ICAO 的计划中, S 模式二次雷达将替代 A/C 模式二次雷达^[12]。

S 模式信号相较于 A/C 模式信号具有较为复杂的编码方式,造成风电场对 S 模式造成的影响范围、影响方式有所不同。本文在 S 模式和 A/C 模式信号特征对比分析的基础上,分析了 S 模式询问信号和应答信号可能受到风电场影响的条件,并由此给出了 S 模式二次雷达附近可能受风电场影响的飞行范围的计算方法,同时给出了其与 A/C 模式影响范围的量化比较。本文所提方法及相关结论可以为风电场附近的雷达选址(或新建风电场选址)和飞行程序的设计提供依据。

2 影响分析

S 模式和 A/C 模式二次雷达受风电场影响分别从定性和定量两个方面分析。

2.1 航管二次监视雷达 S 模式风电场影响区域定性分析

S 模式二次雷达是 A/C 模式二次雷达基础上继承并发展得到的产物。为了与现行二次雷达兼容, S 模式二次雷达继承了 A/C 模式询问频率(1030 MHz)和应答频率(1090 MHz),并且全呼叫信号能够兼容现行 A/C 模式应答机。S 模式二次雷达选择性询问,并且地面站之间互相配合,减少因为其他雷达旁瓣询问造成的应答机抑制而降低检测概率^[13]。根据国际民航组织 ICAO 所颁布的《国际民用航空公约》附件 10^[12]以及我国民用航空行业标准《空中交通管制二次雷达设备技术规范》^[14]对 S 模式和 A/C 模式信号进行比较,结果列于表 1。

S 模式与 A/C 模式相比具有较低的询问频次,并且询问具有目的性和预定性并且具有自我校正能力,源头上减少发生异步和同步干扰概率^[15]。发生多径干扰时, S 模式信号编码方式会导致障碍物(如风电场)对其的影响范围与 A/C 模式不同。

风电场对 S 模式二次雷达信号可能产生的影响

包括:询问信号错误抑制,询问和应答信号错误解码,产生虚假目标,询问和应答信号遮挡。

询问信号发生错误的询问旁瓣抑制会造成应答机不予应答,与 A/C 模式类似 S 模式询问信号也有旁瓣抑制的功能,但是其工作方式与 A/C 模式有所不同。图 1^[12]是 S 模式询问信号信号格式。在 S 模式中,旁瓣抑制脉冲 P5 由全向天线发射,在时间上与 P6 脉冲中的同步相位反转脉冲重叠。当应答机接收到询问机旁瓣方向的信号时 P5 脉冲强于 P6 脉冲,此时应答机无法检测到 P6 脉冲中的同步相位反转,终止对后续内容解码;相反,如果在询问信号主瓣方向接收信号, P6 信号会强于 P5 信号,此时应答机可以检测到同步相位反转,会继续对后续内容解码^[15]。风电场可能会反射询问信号,造成反射信号与 P6 脉冲段中的同步相位在时间上叠加,可能造成应答机无法识别同步相位反转而不予应答,询问机在询问周期内未接收到应答信号,会重新安排询问。

询问信号错误解码是 S 模式所特有的, A/C 模式无此问题。当飞机和风轮机在二次雷达主瓣方向上时可能会发生信号反射,反射信号与直达信号中承载信息的部分叠加造成应答机解码过程中出现错误。

应答信号错误解码错误与 A/C 模式类似,飞机收到询问后会进行应答,应答信号经过风电场反射与直达应答信号叠加造成解码过程中出现错误。

虚假目标是由于询问信号经风电场反射后被飞机应答机接收,该飞机应答此次询问后可能会导致该错误发生。

规模庞大的风电场会对信号造成的阻挡,可能造成应答机无法接收到询问信号,或衰减的信号低于询问或应答接收机灵敏度(询问和应答分别为 -85 dBm , -74 dBm)。

表 1 S 模式和 A/C 模式信号特征比较

模式	A/C模式	S模式
询问方式	广播式询问	“点名”式询问
飞机代码数	4,096	16,777,216
编码方式	脉冲编码	2DPSK(询问信号)/PPM(应答信号)
传递信息内容	简单的信息,如高度	蕴含大量信息的数据链
自我校正能力	无	有
应答频次	$>1000\text{ Hz}$	飞机处于4500 m高度以下,空速不超过324 km/h: 每分钟1000次应答; 飞机处于4500 m高度以上,空速324 km/h以上: 每分钟1200次应答
询问频次	500 Hz	每分钟不超过1800次

2.2 航管二次监视雷达 S 模式风电场影响区域定量分析

2.2.1 询问信号 S 模式询问信号格式如图 1 所示, P6 脉冲分为 56 bit 短格式和 112 bit 长格式, 宽度分别为 $16.25 \mu\text{s}$ 和 $30.25 \mu\text{s}$, 脉宽误差为 $\pm 0.25 \mu\text{s}$ (只出现于脉冲后沿), P1, P2 脉冲宽度为 $0.80 \pm 0.10 \mu\text{s}$ 。P6 的前沿应在同步相位反转前 $1.25 \pm 0.05 \mu\text{s}$, P2 的前沿与 P6 的同步相位反转之间间隔为 $2.75 \pm 0.05 \mu\text{s}$, P1 和 P2 之间间隔为 $2.00 \pm 0.05 \mu\text{s}$, 因此 P1 前沿与同步相位反转之间间隔为 $4.75 \pm 0.10 \mu\text{s}$ 。

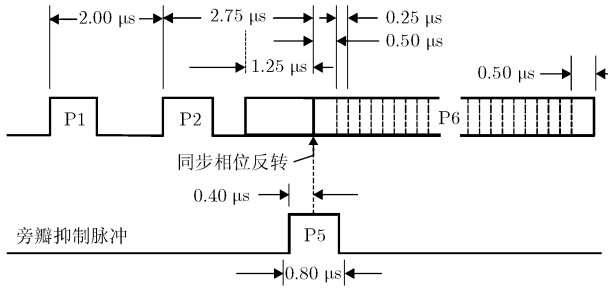


图 1 询问信号格式

由此, 当反射信号相对直达信号的时延分别为: (1) 反射信号延时从 0 时刻起到 P6 上升沿: $(0, 1.25) \mu\text{s}$ 。若考虑误差为 $(0, 1.25+0.05)$, 即 $(0, 1.30) \mu\text{s}$; (2) 反射信号延时为 P2 脉冲宽度: $(2.75-0.80, 2.75)$ 即 $(1.95, 2.75) \mu\text{s}$ 。若考虑误差为 $[(2.75-0.05)-(0.80+0.10), 2.75+0.05]$, 即 $(1.80, 2.80) \mu\text{s}$; (3) 反射信号延时为 P3 脉冲宽度: $(4.75-0.80, 4.75)$ 即 $(3.95, 4.75) \mu\text{s}$ 。若考虑误差为 $[(4.75-0.10)-(0.80+0.10), 4.75+0.10]$, 即 $(3.75, 4.85) \mu\text{s}$ 这 3 种情况时, 反射信号将可能对同步相位反转的识别造成干扰, 导致应答机不对后续数据进行解码。3 段时延区间端点为: $0, T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}, T_{i4}, T_{i5}$ 如图 2(a) 所示, 3 段区间分别为对应图 2(b) 的 3 块阴影区。

另一种是被反射的询问信号与直达信号中承载信息的部分叠加, 112 bit 询问信号长度为 $(4.75+0.10)+(30.25+0.25)-(1.25-0.05)$ (P1 前沿与 P6 同步相位反转之间间距和 P6 脉冲之和), 即 $34.15 \mu\text{s}$ 。

发生该影响的反射信号与直达信号的时延差为询问信号时间长度与上述影响区间的补集: $(1.30, 1.80) \mu\text{s}, (2.90, 3.75) \mu\text{s}, (4.95, 34.15) \mu\text{s}$, 记 $T_I = 34.15 \mu\text{s}$ 。

当飞机和风电场某台风轮机在雷达主瓣方向上, 如果被该风轮机反射的询问信号相对直达信号的时延小于询问信号的长度 T_I , 则询问信号可能受到影响。定义由时延得到的影响条件为路程差条件, 则根据上述两种不同影响类型路程差条件分为两部分。

设飞机相对二次雷达的高度为 h 水平距离为 r , 雷达与风轮机的水平距离为 d 。该风轮机相对雷达的高度与 h 相比一般较小, 因此忽略风轮机相对雷达的高度差, 则:

$$\text{发生错误的询问信号旁瓣抑制的路程差条件为} \\ 0 < d + \sqrt{(r-d)^2 + h^2} - \sqrt{r^2 + h^2} < cT_{i1} \quad (1)$$

$$cT_{i2} < d + \sqrt{(r-d)^2 + h^2} - \sqrt{r^2 + h^2} < cT_{i3} \quad (2)$$

$$cT_{i4} < d + \sqrt{(r-d)^2 + h^2} - \sqrt{r^2 + h^2} < cT_{i5} \quad (3)$$

发生询问信号错误解码的路程差条件为

$$cT_{i1} < d + \sqrt{(r-d)^2 + h^2} - \sqrt{r^2 + h^2} < cT_{i2} \quad (4)$$

$$cT_{i3} < d + \sqrt{(r-d)^2 + h^2} - \sqrt{r^2 + h^2} < cT_{i4} \quad (5)$$

$$cT_{i5} < d + \sqrt{(r-d)^2 + h^2} - \sqrt{r^2 + h^2} < cT_I \quad (6)$$

其中, c 为光速, 式(1)~式(6)可以通过求解数值解得到路程差条件下的风电场影响区域距雷达的最近和最远距离。

2.2.2 应答信号 图 3^[12] 为应答信号格式, 对于数据位为 112 bit 的应答信号, 发生脉冲叠加的时延范围为整个应答脉冲长度。前导脉冲组宽度为 $8 \mu\text{s}$, 数据段宽度为 $112 \mu\text{s}$, 考虑脉冲误差 $\pm 0.05 \mu\text{s}$, 则应答信号发生脉冲叠加的时延范围为: $[0, (8+0.05)+(112+0.05)] \mu\text{s}$, 即 $(0, 120.10) \mu\text{s}$ 。记 $T_R = 120.10 \mu\text{s}$ 。

当飞机和风电场某台风轮机在雷达主瓣方向上, 如果被该风轮机反射的应答信号相对直达信号

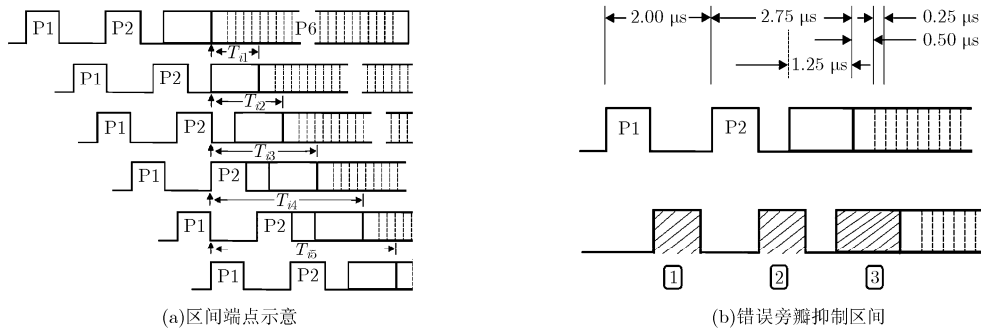


图 2 询问信号发生旁瓣抑制条件

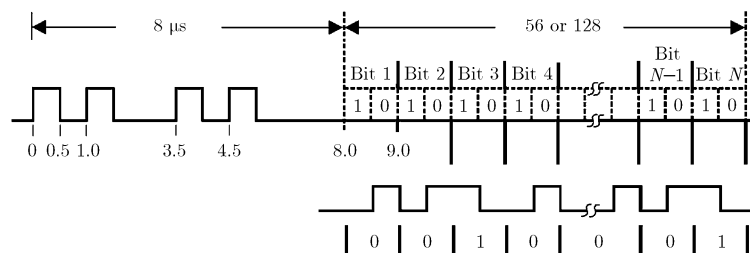


图 3 应答信号格式

的时延小于应答信号的长度 T_r ，则反射信号与直达信号发生重叠；如果直达信号与反射信号的信干比小于一定阈值，则应答信号可能错误解码。前者对应路程差条件，后者对应信干比条件^[16]：

$$0 < d + \sqrt{(r-d)^2 + h^2} - \sqrt{r^2 + h^2} < L_{th} \quad (7)$$

$$\frac{S}{I} = \frac{d^2 [(r-d)^2 + h^2]}{(r^2 + h^2)} \frac{4\pi}{\sigma} < R_{th} \quad (8)$$

其中， $L_{th} = cT_R$ ， R_{th} 为信干比阈值， σ 为风轮机的雷达散射截面积(RCS)，由于风轮机的 RCS 随观测方向变化，可以取不同方向 RCS 的最大值，其它符号的含义与前述相同。

式(7)可以通过求解数值解得到路程差条件下的风电场影响区域距雷达的最近和最远距离。式(8)中，令 $k = R_{th}\sigma/4\pi$ ，可以计算信干比条件下的风电场影响区域距雷达的最近和最远距离，应答信号受风电场影响的飞行区域为上述两者的交集。结果列于表 2^[16]。

应答信号采用脉冲位置调制(PPM)，相当于先用双相码进行码型变化再进行振幅键控(ASK)调制。二进制数 0 用“01”两位码表示，二进制数 1 用“10”两位码表示。接收端解码中判断 0 和 1 的一种方法是判断前后两位码电平大小。假设在加性高斯白噪声信道下信号经过接收端带通滤波器无失真通过。设发送高电平(即“01”或“10”中的“1”)时接收端的采样值为随机变量 A ，发送低电平时接收端的采样值为随机变量 B ，则 $A \sim N(a, \sigma_n^2)$ ， $B \sim$

$N(0, \sigma_n^2)$ 。记 $z = A - B$ ，由高斯分布特性可知 $z \sim N(a, 2\sigma_n^2)$ 。发送一个码元，如果该码元为二进制数 1，则解码无错误发生条件为前一个码位比后一个码位电平高，否则为误码。记 $P(e) = \{z \leq 0\}$ 为码元错判的概率，则应答信号数据段误码率可表示为

$$P_e = P(A)P(e) + P(B)P(e) \quad (9)$$

若发送“0”和“1”的概率相等，那么 $P_e = P(e)$ ，则应答信号数据段误接收的概率为

$$\begin{aligned} P_e = \{z \leq 0\} &= \int_{-\infty}^0 \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-\frac{(x-a)^2}{4\sigma_n^2}} dx \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\gamma/2}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中，信噪比 $\gamma = a^2/(2\sigma_n^2)$ 。

A/C 模式应答信号采用脉冲编码，其相干解调误码率为

$$P_{e1} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\gamma/4}\right) \quad (11)$$

由上述分析可知，当 S 模式和 A/C 模式误码率相同时，所要求的信噪比 S 模式为 A/C 模式的 1/2。

2.2.3 虚假目标 虚假目标是应答机接收到风电场反射的询问信号后而错误应答所形成的，其发生的条件为：(1)反射信号相对于直达信号时延在 $25 \mu\text{s}$ 以上(应答机发生旁瓣抑制的时间为 $35 \pm 10 \mu\text{s}$ ，当相对时延小于旁瓣抑制时间时，应答机不再应答)；(2)反射信号功率大于最小触发电平^[14]。

影响范围由路程差条件(时延条件)和询问信号

表 2 应答信号受风电场影响区域距雷达的最近和最远距离

d 的取值范围	最小影响范围	最大影响范围
$\sqrt{k/(1-\sqrt{k}/h)} > d > \sqrt{k}$	$\frac{d - \sqrt{k - (1-k/d^2)^2 h^2}}{1 - k/d^2}$	$\frac{d + \sqrt{k - (1-k/d^2)^2 h^2}}{1 - k/d^2}$
$\sqrt{k/(1+\sqrt{k}/h)} < d \leq \sqrt{k}$	$\frac{d - \sqrt{k - (1-k/d^2)^2 h^2}}{1 - k/d^2}$	无穷远
$d \leq \sqrt{k/(1+\sqrt{k}/h)}$	0	无穷远
$d > \sqrt{k/(1-\sqrt{k}/h)}$	0	0

功率条件共同决定, 分别为^[17]

$$d + \sqrt{(r-d)^2 + h^2} - \sqrt{r^2 + h^2} \geq L'_{th} \quad (12)$$

$$P_{ref} = \frac{\sigma G_{rw} P_t G_{wa} \lambda^2}{(4\pi)^3 d^2 (r^2 + h^2)} > P_{th} \quad (13)$$

式中, L'_{th} 为询问旁瓣抑制技术抑制应答的时间 25 μs 对应的路程差 7.5 km。式(13)中, P_t 为雷达发射功率, G_{rw} , G_{wa} 分别为雷达发射天线和机载接收天线在风电场方向上的增益, λ 为询问信号波长, P_{ref} 为风电场散射的询问信号强度, P_{th} 为接收机灵敏度取 -77 dBm, 其它符号的含义与前述相同。

令式(12)不等号相等, 即

$$d + \sqrt{(r-d)^2 + h^2} - \sqrt{r^2 + h^2} = L'_{th} \quad (14)$$

式(14)左侧是关于 r 的增函数, 因此可以计算求得雷达和风轮机距离 d 已知飞机处于某一高度 h 时, 影响区域距离雷达距离的最小值 r_{min} 。

同样令式(13)不等号相等, 即

$$\frac{\sigma G_{rw} P_t G_{wa} \lambda^2}{(4\pi)^3 d^2 (r^2 + h^2)} = P_{th} \quad (15)$$

式(15)左侧是关于 r 的减函数, 因此可以计算求得雷达和风轮机距离 d 已知飞机处于某一高度 h 时, 影响区域距离雷达距离的最大值 r_{max} 。

虚假目标影响区域俯视图如图 4^[17]所示, 阴影部分右侧曲线是式(14)中双曲线的一部分, 阴影部分左侧曲线是对应式(15)圆的一段弧。

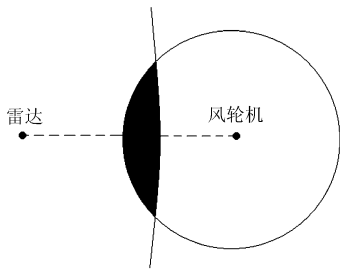


图4 虚假目标影响区域

2.2.4 阴影区分析 风轮机对电磁波信号的遮挡将在其背后形成雷达阴影区, 飞机在阴影区中飞行时信号传输质量将受显著影响。阴影区是一个立体空间。阴影区长度为二次雷达最大工作距离。阴影区高度计算须考虑风力发电机和雷达的高度、地球曲率、电磁波的非直线传播等因素。阴影区宽度计算利用反射信号和直达信号叠加后的功率特征和多径几何关系。风电场的阴影区影响对于S模式和A/C模式是相同的, 具体计算方法可参考文献[10]。

3 分析结果

为了分析风电场对S模式和A/C模式二次雷达

信号的影响差别, 利用上述分析结果, 计算在相同条件下, 飞机在某一高度下风电场与雷达处于不同水平距离时风电场对二次雷达信号产生的影响范围。

3.1 询问信号影响范围计算

图5和图6分别是飞机相对雷达高度为1000 m和7000 m时询问信号可能发生错误旁瓣抑制的区域, A/C模式发生错误旁瓣抑制的区域计算与S模式类似, 其发生错误旁瓣抑制的多径时延区间为(0.95, 3.05) μs ^[17], 色块区为询问信号受风电场影响区域, 区域下边沿代表影响区域距离雷达最近距离, 区域上边沿代表影响区域距离雷达最远距离。可以看到S模式询问信号可能受错误旁瓣抑制影响的范围更大, 并且随高度降低其受到风电场的影响范围增大。

图7(a)和图7(b)是飞机处于1000 m和7000 m时, S模式和A/C模式询问信号可能受风电场影响区域计算结果, 实线之间的区域表示A/C模式信号可能受风电场影响的区域, 虚线上方的区域表示S模式信号可能受风电场影响的区域。该结果A/C模式与图5和图6结果相同, 但S模式与图5和图6结果不同, 是询问信号可能受到影响的区域。两条实线之间区域表示A/C模式风电场对询问信号影响的范围, 虚线上方区域表示风电场对S模式询问信号的影响范围。从图中可以看出, 无论在起飞或进近阶段的1000 m高度, 还是在巡航阶段的7000 m高度, 风电场对询问信号的影响范围S模式均大于A/C模式。

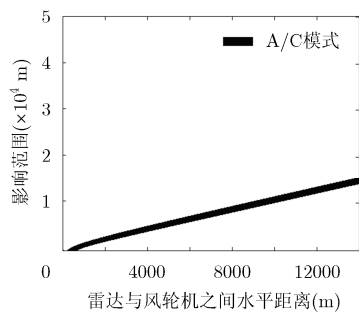
3.2 应答信号影响范围计算

假设S模式和A/C模式误码率相同, 参考欧洲航空安全组织关于风电场影响评估的指南将风轮机RCS设定为35 dB, A/C模式信干比阈值设为50 dB^[11], 由2.2.2节分析可得S模式信干比阈值为47 dB。

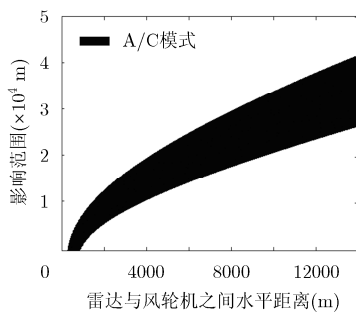
图8(a)和图8(b)是飞机处于1000 m和7000 m时, S模式和A/C模式应答信号可能受风电场影响区域距雷达的最近距离和最远距离计算结果。两条实线之间区域表示A/C模式应答信号影响范围区域, 两条虚线之间区域表示S模式应答信号影响范围区域。图8(a)中飞机处于进近或起飞阶段高度, S模式和A/C模式分别在雷达与风电场之间距离大约为4000 m和6000 m时影响区域距雷达的最远距离迅速下降, 并且在之后一定范围内较为稳定。图8(b)中飞机处于巡航高度, S模式雷达与风电场之间距离大于约5000 m时应答信号将不再受风电场影响, 对于A/C模式雷达, 该值约为9300 m。随着

飞机高度升高,这两个值会进一步减小。从计算结果来看,无论在起飞或进近阶段的1000 m高度,还是在巡航阶段的7000 m高度,风电场对S模式应答信号的影响范围均小于A/C模式。

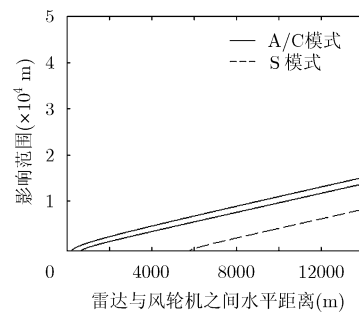
图9是二次雷达信号可能受风电场影响区域,是询问信号和应答信号受风电场影响范围取并集得到的计算结果。实线之间的区域表示A/C模式信号可能受风电场影响的区域,虚线上方的区域表示S



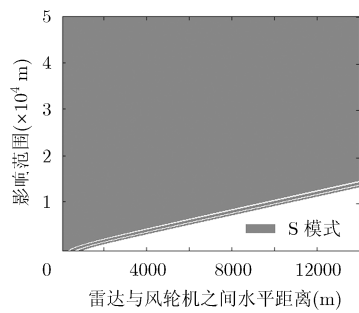
(a) A/C模式



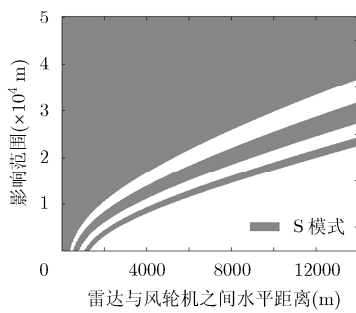
(a) A/C模式



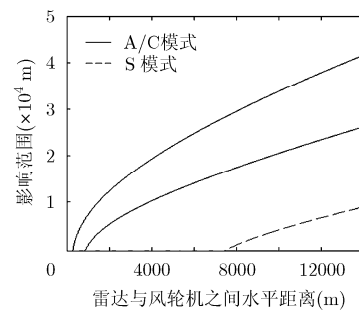
(a) $h=1000$ m



(b) S模式



(b) S模式

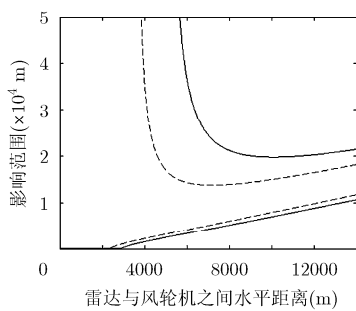


(b) $h=7000$ m

图5 $h=1000$ m时询问信号可能发生错误旁瓣抑制的影响区域

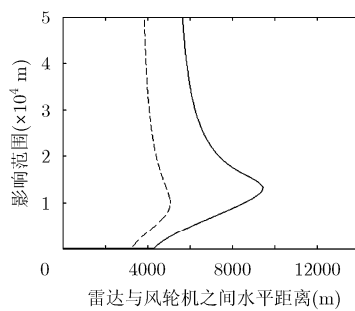
图6 $h=7000$ m时询问信号可能发生错误旁瓣抑制的区域

图7 询问信号受风电场影响区域



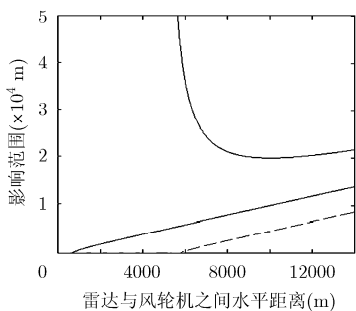
(a) $h=1000$ m

— A/C模式
--- S模式



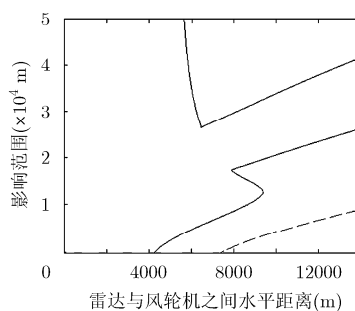
(b) $h=7000$ m

图8 应答信号受风电场影响区域



(a) $h=1000$ m

— A/C模式
--- S模式



(b) $h=7000$ m

图9 二次雷达信号受风电场影响区域

模式信号可能受风电场影响的区域,从计算结果来看,无论在起飞或进近阶段的1000 m高度,还是在巡航阶段的7000 m高度,S模式二次雷达信号受风电场影响区域均大于A/C模式。

4 结论

S模式相较于A/C模式具有很多优点,询问频次较低并且询问具有目的性和预定性,从源头上降低发生异步和同步干扰概率。S模式与A/C模式不同的信号形式造成二者受风电场影响的影响范围不同。综合风电场对询问信号和应答信号的影响范围计算结果,结果显示无论在起飞或进近阶段的1000m高度,还是在巡航阶段的7000 m高度,S模式二次雷达信号可能受风电场影响的区域范围均大于A/C模式。本文定量分析风电场对S模式和A/C二次雷达信号影响范围,可以为风电场附近的雷达选址(或新建风电场选址)和飞行程序的设计提供依据。

参 考 文 献

- [1] Global wind energy council. Global statistics[OL]. <http://www.gwec.net>, 2016.9.
- [2] 中国风能协会(CWEA). 2015 年中国风电装机容量统计[OL]. <http://www.cwea.org.cn>, 2016.9.
CWEA. China's wind power installed capacity statistics in 2015[OL]. <http://www.cwea.org.cn>, 2016.9.
- [3] SUMMERS E. Operational effects of windfarm developments on air traffic control (ATC) radar procedures for Glasgow Prestwick International Airport[J]. *Wind Engineering*, 2000, 24(6): 431-435. doi: 10.1260/030952400320769811.
- [4] THEIL A, SCHOUTEN M W, and DE JONG A. Radar and wind turbines: A guide to acceptance criteria[C]. 2010 IEEE Radar Conference, Washington DC, USA, 2010: 1355-1361.
- [5] Civil aviation authority. CAP 764: Civil aviation authority policy and guidelines on wind turbines[OL]. <https://publicapps.caa.co.uk/docs/33/CAP764%20Issue6%20FINAL%20Feb.pdf>, 2016.9.
- [6] LEMMON J, CARROLL J, SANDERS F, *et al.* Assessment of effects of wind turbines on ATC radars[R]. NTIA Technical Report TR-08-454.2008.
- [7] POUPART G J. Wind farms impact on aviation radar interests[R]. DTI PUB URN:03/1294, 2003.
- [8] LUTE C and WIESERMAN W. ASR-11 radar performance assessment over a wind turbine farm[C]. Radar Conference, Kansas, USA, 2011: 226-230.
- [9] TOGNOLATTI P and ORLANDI A. Analysis of the EMI impact of an array of wind generators on the performances of secondary surveillance radar system[C]. International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC Europe, Rome, Italy, 2008: 1-4.
- [10] Eurocontrol. Guidelines on how to assess the potential impact of wind turbines on surveillance sensors[S]. EU, BORELY M, 2010.
- [11] 吴仁彪, 付恒智, 王晓亮. 利用信号特征的风电场对二次雷达影响评估[J]. 中国民航大学学报, 2013, 31(6): 1-4. doi: 10.3969/j.issn.1674-5590.2013.06.001.
WU Renbiao, FU Hengzhi, and WANG Xiaoliang. Impact assessment of wind farms on secondary surveillance radar utilizing signal characteristics[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2013, 31(6): 1-4. doi: 10.3969/j.issn.1674-5590.2013.06.001.
- [12] ICAO, Annex 10 to the convention on international civil aviation aeronautical telecommunications volume IV[S]. 2012.
- [13] TRIM R M. Mode S: An introduction and overview (secondary surveillance radar)[J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1990, 2(2): 53-59. doi: 10.1049/eej:19900017.
- [14] 中国民用航空总局. MH4010-2006, 空中交通管制二次监视雷达设备技术规范[S]. 中国, 2012.
CAAC. MH4010-2006, ATC secondary surveillance radar equipment specification[S]. China, 2012.
- [15] 张尉. 二次雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 144-146.
ZHANG Wei. Principle of Secondary Surveillance Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 144-146.
- [16] 王晓亮, 马晨曦, 何炜琨, 等. 风电场附近航路二次雷达选址方法[P]. 中国, 2015107055993, 2016-03-02.
WANG Xiaoliang, MA Chenxi, HE Weikun, *et al.* Method of site selection of airway near wind farms[P]. China, 2015107055993, 2016-03-02.
- [17] WANG X, MA Y, HE W, *et al.* Analysis on the range of wind farm's impact area for secondary surveillance radar[C]. IET International Radar Conference 2015, Hangzhou, China, 2015: 1-4.

吴仁彪: 男, 1966年生, 教授, 博士, 主要研究方向为自适应信号处理、阵列信号处理和现代谱分析在雷达、通信、导航中的应用。

马晨曦: 男, 1991年生, 硕士生, 研究方向为航管雷达信号处理。

王晓亮: 男, 1982年生, 讲师, 博士, 主要研究方向为雷达信号处理、图像处理与识别。

何炜琨: 女, 1977年生, 副教授, 博士, 主要研究方向为雷达信号处理、风电场杂波抑制。