2013年12月

#### 文章编号: 2095-4980(2013)06-0917-05

# 机场跑道异物监测雷达回波建模

吴 静,汪学刚,王 洪,敖丹丹

(电子科技大学 电子工程学院,四川 成都 611731)

摘 要:跑道异物严重影响飞机的安全,有效检测跑道异物是保障飞机安全急需解决的问题。 根据跑道监测雷达固定工作环境,采用坐标系统变换的方法建立几何模型,为简化运算,对模型 参数做了近似表示。在此基础上,运用统计模型法模拟跑道杂波,并建立目标回波模型。杂波主 要来自草地和跑道,结合几何模型计算该复合场景的后散射系数,对杂波随机序列和回波分别进 行了仿真,给出了仿真结果。

**关键词:**异物检测;毫米波雷达;几何模型;回波模拟 **中图分类号:**TN957.52<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **doi:**10.11805/TKYDA201306.0917

# Radar echo modeling of Foreign Objects Debris detection on airport runways

WU Jing, WANG Xue-gang, WANG Hong, AO Dan-dan

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

**Abstract:** Foreign Objects and Debris(FOD) may cause accidents or disasters, and seriously affect the safety of aircraft. According to the radar working in the fixed environment of the airport runway, the geometric model is established by using the coordinate system transform method. The approximation of model parameters is adopted in order to simplify the calculation. The statistical model is employed to produce clutter, and corresponding target signal model is established. The clutters mainly come from meadow and runways, therefore the backscatter coefficient of the composite scene is calculated with the combination of geometric models. The clutters of random sequences and echoes are simulated and the results are given.

Key words: Foreign Objects and Debris detection; millimeter-wave radar; geometric model; echo signal simulation

机场跑道异物(FOD)指任何不属于机场但是出现在机场运作区域并且可能对机场造成损失或对飞机造成损害的外来物品<sup>[1]</sup>。FOD带来的危害不仅会损坏飞机和夺去宝贵的生命,而且还伴随着巨大的经济损失。据保守估计,每年全球因FOD造成的损失至少30亿~40亿美元,而间接损失至少为直接损失的4倍。目前,大多数机场工作主要采用人工定时巡视的方式。这种方法不仅耗时费力,占用了宝贵的跑道使用时间,而且受天气等因素影响,导致安全隐患,所以对跑道异物有效而可靠的监测是急需解决的问题。自2000年法协和飞机悲剧发生后,各国纷纷开始研发FOD探测系统,从报道的几种FOD监测系统来看,跑道异物监测雷达系统主要采用毫米波线性调频连续波雷达体制。毫米波雷达具有质量轻,体积小,空间分辨率高等优点。

本文中 FOD 雷达是对地扫描的固定雷达,对地杂波是影响其检测性能的主要因素<sup>[2]</sup>。因此,雷达杂波模型 在评估 FOD 雷达工作性能时起着重要作用。杂波是一个复杂的随机过程,一般用幅度概率分布模型和相关模型 来描述<sup>[3]</sup>。本文就跑道 FOD 检测雷达建模进行研究。首先根据雷达工作环境的特定性利用坐标系变换建立几何 模型,并对模型参数进行了近似。随后讨论了回波信号模型,回波包括目标回波、杂波和噪声3部分,其重点在 于杂波建模。针对草地和跑道的复合场景,结合几何模型计算后散射系数。采用统计模型产生杂波,讨论其概率 密度函数和功率谱密度函数。

收稿日期: 2012-11-02; 修回日期: 2013-02-26 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(61139003); 国家自然科学基金面上资助项目(61079006)

## 1 几何模型

本文所研究的 FOD 监测雷达,是工作在特定场景——即 机场跑道场景下的地面搜索雷达,其几何关系见图 1。雷达在 地面上投影 o 为坐标原点,以点 o 所在的平行于跑道中心的 直线为 x 轴,建立图 1 直角坐标系。其中椭圆区域为雷达波 束照射的地面区域, h 为雷达架设高度,θ<sub>B</sub>为雷达波束方位宽 度,α为雷达波束俯仰宽度,ψ为掠射角,θ为天线扫描角度。

本 文 雷 达 采 用 线 性 调 频 连 续 波 (Linear Frequency Modulation Continuous Wave, LFMCW)体制。该体制雷达作 用距离短,采用沿跑道安装多部雷达监测单元的方式,雷达 安装 位置根据美国联邦航空管理局发布的咨询公告 AC 150/5220-24<sup>[3]</sup>,对于固定雷达,雷达需安装在跑道中心外 50 m

以外。跑道附近的雷达天线架设高度受限,所以掠射角 $\psi$ 非常小,例如雷达安装在跑道中心 50 m 处,架设高度 h=2 m 时, $\psi=2.29^{\circ}$ 。雷达只在水平方位向上转动,而在俯仰方位向上不动,图1中雷达架设高度h,雷达波束方

位宽度  $\theta_B$ ,俯仰宽度  $\alpha$ ,掠射角  $\psi$  不变,只有天线扫描角度  $\theta$  是随时间变 化。故雷达波束照射的地面区域也是固定不变的。图 2 为地面俯视图。雷 达波束照射的地面区域是由 2 个短半轴长度相等,长半轴有差异的半椭圆 组成。在以地面为 *xoy* 面建立的直角坐标系中,雷达在坐标原点 *o* 处,  $L_1$ 和  $L_2$  为跑道边缘,椭圆为波束照射面,  $\theta$  为天线扫描角度。

为简便求得椭圆方程及其参数,可采用坐标系变换。图 2 中,将坐标 系由 xoy 变换到 x'oy',原点不变,以波束中心与原点 o 所连成的直线作为 x 轴,相当于将 xoy 坐标系逆时针旋转 θ 得到 x'oy'坐标系。首先在 x'oy' 中直接求得椭圆的方程,如式(1)。

$$\begin{cases} \frac{(x'-x_0)^2}{a_1^2} + \frac{{y'}^2}{b^2} = 1, \quad x' \le h / \tan \psi \\ \frac{(x'-x_0)^2}{a_2^2} + \frac{{y'}^2}{b^2} = 1, \quad x' > h / \tan \psi \end{cases}$$



Fig.1 Geometrical relationship of FOD detection radar 图 1 FOD 检测雷达几何关系图



式中:  $a_1 = \frac{h}{\tan\psi} - \frac{h}{\tan(\psi + \alpha/2)}$ ,  $a_2 = \frac{h}{\tan(\psi - \alpha/2)} - \frac{h}{\tan\psi}$ ,  $b = \frac{h\tan(\theta_B/2)}{\sin\psi}$ ,  $x_0 = \frac{h}{\tan\psi}$ 可由几何关系得出。

雷达安装高度受限,且离跑道距离近,  $\alpha$  和  $\psi$  很小,上述参数  $a_1,a_2,x_0$  可分别近似为  $a_1 = \frac{h}{\psi} - \frac{h}{\psi + \alpha/2}$ ,

 $a_2 = \frac{h}{\psi - \alpha/2} - \frac{h}{\psi}, x_0 = \frac{h}{\psi}$ ,其中  $\alpha$  和  $\psi$  采用弧度单 位,表 1 给出了在  $\theta_B = 45^\circ$ 时对各参数的误差分析。 从表 1 中结果可知,可用上述表达式近似表示  $a_{1,a_2,x_{0,o}}$ 

然后从坐标系 x'oy'直接变换到坐标系 xoy, 坐标系变换见图 2,变换公式为式(2)。

$$\begin{cases} x' = x\cos\theta + y\sin\theta\\ y' = y\cos\theta - x\sin\theta \end{cases}$$
(2)

表1 参数误差分析 Table1 Parameter error analysis 2.3°/4° 2.6°/4.5° 3°/5°  $\Psi/\alpha$ 2°/3° 24.57 23.20 20.47 17.39  $a_1$ truth-value 171.90 332.17 283 36 191.02  $a_2$ 57.27 49 80 44 04 38.16  $x_0$ 0.07% 0.1% 0.13% 0.17%  $a_1$ relative-error 0.009% 0.015%  $a_2$ 0.01% 0.007%  $x_0$ 0.041% 0.054% 0.069% 0.091%

将式(2)和参数代入式(1)中得 xoy 坐标系中的椭圆方程,如式(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{(x\cos\theta + y\sin\theta - h/\psi)^2}{\left[h/\psi - h/(\psi + \alpha/2)\right]^2} + \frac{(y\cos\theta - x\sin\theta)^2}{\left[h\tan\left(\theta_B/2\right)/\psi\right]^2} = 1, \ x\cos\theta + y\sin\theta \le h/\psi \\ \frac{(x\cos\theta + y\sin\theta - h/\psi)^2}{\left[h/(\psi - \alpha/2) - h/\psi\right]^2} + \frac{(y\cos\theta - x\sin\theta)^2}{\left[h\tan\left(\theta_B/2\right)/\psi\right]^2} = 1, \ x\cos\theta + y\sin\theta > h/\psi \end{cases}$$
(3)

(1)

至此,几何模型建立完成,该模型将应用在 2.2 节杂波模型的建立中。

#### 2 回波信号模型

雷达接收到的回波信号包括:目标回波信号、杂波回波信号和噪声回波信号。假设目标为点目标,噪声看作加性高斯白噪声,则重点在于地杂波回波信号。设 $S_R(t)$ 为回波信号,则 $S_R(t) = S_{RV}(t) + S_{RC}(t) + n(t)$ ,其中 $S_{RV}(t)$ 为目标回波, $S_{RC}(t)$ 为杂波,n(t)为噪声。

#### 2.1 目标回波模型

本文所讨论的 FOD 监测雷达采用 LFMCW 体制。设 LFMCW 雷达在第 n 个周期内的发射信号  $S_{T}(t)$  为:

$$S_{\rm T}(t) = A\cos\left[2\pi(f_0 t + \mu t^2/2) + \Phi_0\right], \quad 0 < t < T$$
(4)

式中: A 和  $\phi_0$  分别为发射信号的振幅和随机相位;  $f_0$  为载波频率;  $\mu = B/T$  为调频斜率, B 为信号带宽, T 为扫 描周期。在对 FOD 的检测中,跑道异物主要是静止物体,在此假定目标为点目标,则距离雷达 R 处的目标的接 收信号  $S_{RV}(t)$  为:

$$S_{\rm RV}(t) = KA\cos\left[2\pi(f_0(t-\tau) + \frac{\mu(t-\tau)^2}{2}) + \Phi_0 + \theta_0\right], \quad 0 < t < T$$
(5)

式中: *K*为目标反射系数;  $\tau = 2R/c$ 为目标回波时延,  $c = 3 \times 10^8$  m/s 为光速;  $\theta_0$ 为目标反射引起的附加相移。将 发射信号与接收信号进行混频,经低通滤波后得到的差拍信号  $S_{\rm F}(t)$ 为:

$$S_{\rm IF}(t) = \frac{1}{2} K A^2 \cos\left[2\pi (f_0 \tau + t\mu \tau - \mu \tau^2 / 2) + \theta_0\right]$$
(6)

差拍信号频率为  $f_{IF} = B\tau/T = 2BR/Tc$ ,即  $R = f_{IF}Tc/2B$ ,从而可知对差拍信号进行 FFT 变换,测得差拍信号频 率  $f_{IF}$ ,即可计算出距离  $R_{\circ}$ 

#### 2.2 地面杂波

地面杂波是影响 FOD 检测的主要因素。雷达作用距离近,接收到的杂波信号和能量较大。

统计模型的杂波建模等价于产生具有特定概率密度函数和功率谱密度函数的随机序列。FOD 监测雷达工作 在相对均匀的杂波环境中,跑道发射的杂波信号可以看作是 FOD 雷达某时刻照射在地面有效区域内的大量小散 射体的回波信号的相互叠加。

根据雷达的工作环境可知,雷达波束照射区域内,只有草地和跑道2种地形,为了更近似地模拟杂波,杂波的后散射系数需要综合考虑草地和跑道的影响。复合场景的后散射系数 $\sigma^0$ 可表示为<sup>[4]</sup>:

$$\sigma^{0} = \frac{A_{\text{grass}}\sigma^{0}_{\text{grass}} + A_{\text{way}}\sigma^{0}_{\text{way}}}{A}$$
(7)

式中:  $A_{A_{grass}}$ 和  $A_{way}$ 表示雷达波束面积、波束内草地和跑道的 面积;  $\sigma_{grass}^{0}$ 和  $\sigma_{way}^{0}$ 表示草地和跑道杂波的后散射系数。

在仿真中为减小计算量,后散射系数  $\sigma_{grass}^0$  和  $\sigma_{way}^0$  采用经验 模型。本文采用文献[5]中 Kulemin 等人提出的模型,如式(8):

$$\sigma^{0} = A_{1} + A_{2} \log \psi / 20 + A_{3} \log f / 10$$
(8)

式中: f 为频率,单位为 GHz; ψ 为掠射角,以 "o" 为单位;系数 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>和 A<sub>3</sub>随地形不同而不同,草地和跑道的系数见表 2。

而波束内草地和跑道的面积 Agrass 和 Away则利用椭圆方程式(3) 来计算。图 3 中椭圆区域为波束照射区域, L<sub>1</sub>和 L<sub>2</sub>为跑道边缘。为 便于计算,采用间接计算面积而非直接利用几何模型计算的方法。 因建立杂波模型时,要根据雷达的距离分辨率 ΔR 和方位角分辨率 Δθ 在雷达波束照射的有效区域内划分网格单元。任一网格单元 A 坐标为 A(x<sub>m</sub>,y<sub>n</sub>),对应的网格单元面积为:

$$A_{mn} = \Delta R \Delta \theta \sqrt{x_{mn}^2 + y_{mn}^2} \tag{9}$$

Table2 Coefficients of different surfaces					
$A_1$		$A_2$		$A_3$	
runway	grass	runway	grass	runway	grass
-49	-25-(-30)	32	10	20	6

表 7 不同表面的系数



结合椭圆方程式(3)判断该网格单元是否在雷达波束照射区域内,根据每个网格单元的坐标判断其是位于跑道上还是草地上,然后将位于跑道上和位于草地上的网格单元面积分别求和即可得到波束内草地和跑道的面积。

当满足恒定多普勒理论时,单个网格单元上产生的杂波信号 S<sub>RC</sub>(t;m,n)为<sup>[6]</sup>:

$$S_{\rm RC}(t;m,n) = S_{\rm T}(t-\tau_{mn}) e^{j2\pi f_{\rm d}(t-\tau_{mn})} \left[ \frac{\lambda^2 G(t)^2}{(4\pi)^3 R_{mn}^4} \right]^{1/2} \sqrt{\sigma_{mn}}$$
(10)

式中:  $m \approx n$  表示杂波单元的地理位置;  $\tau_{mn}$  为杂波单元的双程延迟时间;  $f_d$  为杂波单元的中心多普勒频率;  $\lambda$  为 雷达工作波长; G(t) 为单程天线功率增益; R 为杂波单元到雷达的距离;  $\sigma_{mn}$  为地面杂波在网格单元内的散射面积, 可表示为:

$$\sigma_{mn} = \sigma_{mn}^0 A_{mn} \tag{11}$$

式中: $\sigma_{mn}^{0}$ 为后向散射系数; $A_{mn}$ 为对应的地面网格单元面积。

本文采用高斯分布来描述  $\sigma_{mn}^{0}$  的幅度概率分布模型。高斯分布的均值为  $\mu$ , 方差为  $\sigma^{2}$ , 一般认为杂波的均值为零, 即  $\mu=0$ ; 方差  $\sigma$  由杂波的后散射系数  $\sigma^{0}$  确定。因 FOD 雷达是一个固定的地面雷达,则地面各区域反射的杂波功率谱一般可用高斯函数来描述<sup>[7]</sup>, 如式(12)所示。其中  $\delta_{c}$ 为杂波功率谱展宽, 受雷达发射信号和天线扫描的影响。

$$S(f) = \exp(-\frac{f^2}{2\delta_c^2})$$
(12)

#### 2.3 噪声

在毫米波波段, 雷达系统的噪声主要来源是系统内部噪声。通常可认为雷达系统的内部噪声是均值为 0 的高斯白噪声, 方差  $\delta_n^2$  的大小由杂波功率  $P_c$  和杂噪比(Clutter Noise Ratio, CNR)决定, 如下式所示:

$$\delta_{\rm n}^2 = P_{\rm c} \,/ \,10^{CNR/10} \tag{13}$$

#### 3 仿真分析

#### 仿真1:杂波建模

FOD 监测雷达工作在相对均匀的杂波环境中,杂波包含许多小的散射体回波,可假定杂波服从瑞利分布,因此可用 MATLAB 软件仿真得到幅度服从瑞利分布,功率谱为高斯谱的瑞利杂波。图 4(a)和图 4(b)分别给出了杂波的幅度概率密度函数和功率谱,通过与理论值作比较知仿真结果基本正确;并结合跑道的实际环境,图 4(c)给出在方位单元、距离单元分别为 30 个和 500 个,杂波功率为 10 dB 时的杂波时域波形。



#### 仿真 2: 目标回波建模

设定参数:信号带宽 B=100 MHz,采样频率  $F_s=4$  MHz,目标距离 R=250 m,调频周期 T=5 ms,采样点数  $N=T\cdot F_s=2000$ ,载频  $F_0=10$  GHz,距离分辨力为 c/2B=1.5 m。图 5 给出了目标回波的时域波形、混频滤波后得到 差频信号时域波形以及差频信号的 FFT 值,由图 5(c)中频谱峰值即可计算出目标位置。



# 4 结论

FOD 监测雷达回波的建模对整个雷达系统的性能、检测精确度以及杂波干扰等方面的研究都具有重要意义。 本文根据跑道异物监测雷达的特定工作环境建立几何模型,近似计算了模型参数,采用统计建模方法模拟均匀杂 波,并结合 LFMCW 的特性仿真了目标回波信号。仿真结果与理论值吻合较好。

### 参考文献:

- [1] 国家民航总局机场司民航安全技术中心. FOD 防范手册[Z]. 2009:1-5. (Security & technology center of department of airport CAAC. FOD precaution manual[Z]. 2009:1-5.)
- [2] 贾可,李世丹,郭燕,等. 基于 GPU 的软件化雷达恒虚警概率算法实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(5):525-527. (JIA Ke,LI Shidan,GUO Yan,et al. Software radar Constant False-Alarm Rate algorithm implementation based on GPU[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(5):525-527.)
- [3] 吴永超,马秀荣,张媛. 一种改进的小波系数相关滤波算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(5):604-607. (WU Yongchao, MA Xiurong, ZHANG Yuan. An improved denoising algorithm using correlation of wavelet coefficients[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(5):604-607.)
- [4] Zeitler Annin, Lanteri J, Migliaccio C, et al. Folded Reflect Arrays with Shaped Beam Pattern for Foreign Object Debris Detection on Runways[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010,58(9):3065-3068.
- [5] Kulemin G P,Tarnavsky E V,Goroshko E A. Land backscattering for millimeter wave radar[C]// Proceedings of International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Lviv-Slavsko, Ukraine: [s.n.], 2004:138-141.
- [6] Yonemoto N,Kohmura A,Futatsumori S,et a1. Broad Band RF Module of Millimeter Wave Radar Network for Airport FOD Detection System[C]// Proceedings of International Conference on Radar. Bordeaux,France:[s.n.], 2009:1-4.
- [7] MW 朗. 陆地和海面的雷达波散射特性[M]. 北京:科学出版社, 1981. (MW Lang. Scattering characteristics of radar echo of Land and Sea[M]. Beijing:Science Press, 1981.)

#### 作者简介:



**吴** 静(1988-), 女, 安徽省安庆市人, 在 读硕士研究生, 主要从事 FOD 监测雷达信号处 理方面研究.email:wujing1821@126.com.

**王** 洪(1974-),男,四川省仁寿县人,博士,副教授, 主要研究方向为FOD监测雷达、MIMO雷达、多点定位、数 字接收机和高速实时信号处理. **汪学刚**(1962-),男,湖南省常德市人,教授,博士生导师,长期从事雷达信号处理、毫米波雷达系统等领域的研究工作.

**敖丹丹**(1988-), 女,江西省上饶市人,在读硕士研究生,主要从事 FOD 监测雷达信号处理方面研究.