第 2 期
2014 年 4 月

雷达科学与技术
Radar Science and Technology

Vol. 12 No. 2
April 2014

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2014.02.002

机场场面监视雷达反杂波性能分析

沈 杰[1],晏 勇[2]
(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所,安徽合肥 230088;
2. 民航西南空管局,四川成都 610202)

摘 要:机场场面监视雷达主要监视目标为机场场面上的飞机、汽车及跑道异物等。作为一次雷达,其波束照射范围内除有用目标外同时还存在其他无关物体回波,如机场场面上的跑道、滑行道、停机坪、草地、环场路等的表面反射和传输路径上的雨、雾霾的反射回波等。如何在这些无用回波的背景下,可靠地检测并跟踪有用目标是机场场面监视雷达需要解决的重要问题。针对该问题,通过对机场场面监视雷达基本功能的分析,论述了机场场面监视雷达主要杂波的评估方法及相应的反杂波措施。

关键词:机场场面监视雷达;地杂波;雨杂波;反杂波技术

中图分类号:TN957;TN959　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-2337(2014)02-0123-04

Analysis of Clutter Suppression Capability in Surface Movement Radar

SHENG Jie[1], YAN Yong[2]
(1. *No.38 Research Institute of CETC*, *Hefei* 230088, *China*; 2. *Southwest Air Traffic Control Bureau of Civil Aviation*, *Chengdu* 610202, *China*)

Abstract: Surface movement radar(SMR) is used to monitor aircraft and vehicles on the airport surface and other objects on runway. As primary radar, SMR can receive the echoes from other unrelated objects, such as the surface reflection of runways, taxiways, aprons, meadows and the echoes of rain, fog and haze on transmission path. How to detect and track useful target within these useless background echoes is an important issue for SMR. In this paper, based on the basic function of SMR, the major clutter and assessment methods for SMR has been discussed and the methods of clutter suppression has been presented correspondingly.

Key words: surface movement radar(SMR); ground clutter; rain clutter; clutter suppression

0 引 言

机场场面监视雷达对目标的监视不需要被监视目标的合作,具备全天时全天候监视的能力,是提升机场运行效率,保证交通引导安全的重要设备。然而作为一次雷达与其他机场场面监视技术(二次雷达、ADS-B、多点定位等)相比其缺点也是显而易见的:雷达波束照射范围内的无用回波影响目标的检测,因此机场场面监视雷达必须进行反杂波设计[1-2]。

1 主要功能

根据国际民航组织规定,机场场面监视雷达应具有检测机场活动区域(跑道和滑行道)运动、静止目标的能力,还需具有一定的非活动区域(如停机坪、维修区等)目标监视能力,具有一定的目标识别能力,能够提供超过 1 Hz 的数据率,能够快速、可靠、精确地探测到机场场面上飞机和机动车辆的运动状况。具体功能包括:

(1) 帮助管制员及时清晰地了解场面上静止和运动的飞行器及车辆的位置、动态;

(2) 雷达信息可用于对交叉口的飞行器/车辆发布指令避免交通冲突和拥堵,并为飞行器选择合理路线,并可用于判断跑道是否被占用;

(3) 必要时为飞行器、救援车辆等提供紧急状况下的导航信息[3]。

2 主要杂波

从机场场面监视雷达功能看,其监视区域为

收稿日期:2013-08-26;修回日期:2013-12-19
基金项目:国家科技支撑计划(No.2011BAH24B05)

整个机场场面区域，该区域内除飞机、汽车等我们关心的目标还存在来自机场场面区域内跑道、滑行道、停机坪、草地、环场路等的反射回波和气象回波[4]。

下面以一种 Ku 波段机场场面监视雷达为例对机场场面监视雷达的主要杂波加以分析，该雷达主要指标如表1所示。

表1 一种机场场面监视雷达的主要指标

参 数	指 标
频率	Ku 波段
方位	360°
距离 R	150～3 000 m
高度	0～60 m
方位分辨率	0.25°
距离分辨率	3 m
RCS	2 m^2
检测概率	优于 90%
虚警概率	10^{-6}
气象条件	0～16 mm/h 降雨
架设高度 h_a	25～90 m

（1）地杂波强度分析

机场区域内跑道、滑行道、停机坪、草地、环场路等的后向反射回波统称为地杂波，可用雷达照射面积内所有离散目标的总散射截面积 σ_c 表示：

$$\sigma_c = \sigma^0 \times S = \gamma \times \sin\theta \times S \tag{1}$$

式中，σ^0 和 γ 都是表面散射率，是与雷达无关的参数，两者主要区别在于采用的雷达照射面积 S 不同，前一个 S 为雷达波束（照射立体角 Ω）在 R 处的截面积，后一个 S 为雷达波束在 R 处的截面积在地面的投影面积，故 $\sigma^0 = \gamma \times \sin\theta$。从雷达手册查得混凝土路面 γ 最大值为 -30 dB，草地最大值为 -15 dB[5]，而有资料认为机场活动区域跑道、滑行道、停机坪表面比普通混凝土路面更光滑，其 γ 值在 -55 dB 左右[6]。

擦地角 θ 为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{h_a}{R} - \frac{R}{2R_e}\right) \tag{2}$$

式中，R_e 表示地球等效半径，取 8 493 km；h_a 和 R 分别为雷达架设高度和目标的距离，取值范围见表1。

S 是雷达波束（照射立体角 Ω）在地面的投影面积，在擦地角 θ 较小的条件下，$S = \Delta R \times \sec\theta \times \Delta\varphi \times R$，具体几何关系如图1所示。$\Delta R$ 和 $\Delta\varphi$ 表示距离和方位分辨单元，取值见表1。

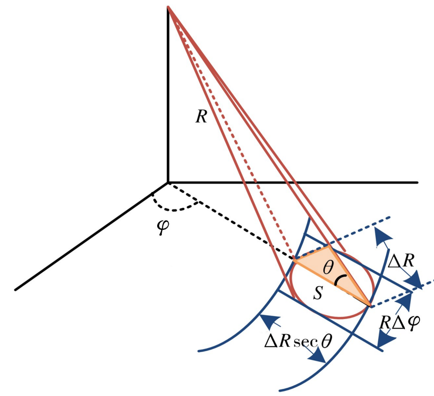

图1 雷达照射面积示意图

对 $\sigma_s = 2m^2$ 的目标，按混凝土路面 γ 最大值为 -30 dB，草地最大值为 -15 dB 计算杂信比 σ_c/σ_s，结果如图2所示。

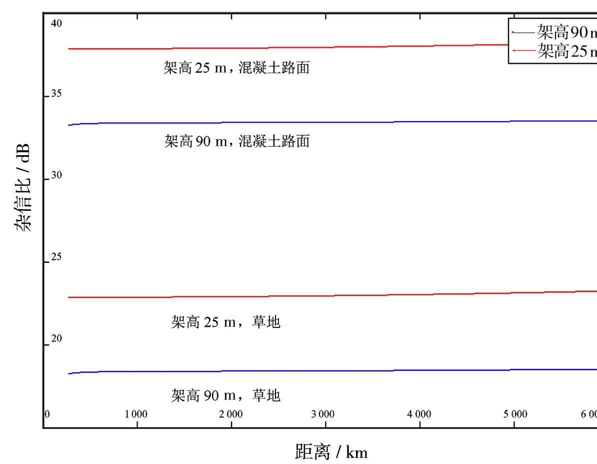

图2 地杂波强度曲线

不考虑建筑物，机场区域内草地反射强度最大，$\sigma_c/\sigma_{s\max} = -18.5$ dB。

（2）雨杂波的强度分析

气象对雷达的影响主要表现在两个方面，一是电磁波穿过气象区域产生的衰减，二是气象颗粒对电磁波散射产生的气象杂波。由于雾颗粒尺寸远小于雨滴尺寸，其散射面积远小于雨的散射面积，故存在于机场场面监视雷达监视区域的气象杂波主要来自雨，下面重点分析雨杂波。

雨杂波为体杂波，在雷达的分辨单元中，有许多雨滴，设第 i 个雨滴的雷达散射面积为 σ_i。那么，雷达分辨单元内的雨的雷达散射面积等于所有雨滴的散射面积之和，可表示为

$$\sigma_c = \sum_i \sigma_i = V_c \eta \tag{3}$$

式中，V_c 为雷达同时照射的体积，且

$$V_c = \Delta R \times R^2 \times \Omega = \Delta R \times R^2 \times \frac{1}{2\ln 2} \times \frac{\pi}{4}\Delta\varphi_H \Delta\varphi_V \qquad (4)$$

式中,Ω表示雷达波束立体角,可用$\frac{1}{2\ln 2}\times\frac{\pi}{4}\cdot\Delta\varphi_H\Delta\varphi_V$近似,$\Delta\varphi_H$表示方位波束宽度,取$0.25°$,转化为弧度是0.00436,$\Delta\varphi_V$表示俯仰波束宽度,取3°,转化为弧度是0.0523;当$R=3000$ m时,$V_{C\max}=35.43$ dB;η为单位体积内雷达散射面积。由雨的直径统计分布和雨的介电系数确定:

$$\eta = Tf^4 r^{1.6} \times 10^{-12}\ \mathrm{m^2/m^3} \qquad (5)$$

式中,T为环境温度,取290°;f是以GHz为单位的雷达频率,f取16 GHz;r是以mm/h为单位的降雨率,r取最大值16 mm/h。计算得$\eta_{\max}=-27.95$ dB(有资料$\eta=-43$ dB[4])。

对$\sigma_s=2\ \mathrm{m^2}$的目标,杂信比$\sigma_c/\sigma_{s\max}$计算结果为4.48 dB。

3 反杂波措施

雷达威力一般以自由空间探测距离衡量,是在接收机热噪声和外界自然现象产生的噪声背景下处理目标,不考虑来自外部的干扰和杂波。

在杂波背景下,探测距离较自由空间的下降,可按下式计算:

$$R_{杂} = R_{自}(1 + c_0/n_0)^{-1/4}$$

当输出杂噪比为0 dB时,威力下降到自由空间的84%,当输出杂噪比为−6 dB时,威力下降到自由空间的94%。一般而言在工程上,以杂噪比低于−6 dB作为可以基本忽略该杂波对探测威力影响的上限。

即雷达回波的信号杂波比满足:

$$\frac{c_0}{n_0} = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} + \left(\frac{s}{n}\right)_{\min} \leqslant -6\ \mathrm{dB} \qquad (6)$$

对本雷达当$P_{fa}=10^{-6}$,$P_d=0.9$,采用频率分集后,目标类型为Swerling Ⅱ型起伏目标,$n=5$时,$S/N=9.36$ dB[7]。

即$\frac{\sigma_c}{\sigma_s}\leqslant -15.36$ dB时,可以基本忽略杂波对探测威力的影响。

雷达反杂波设计就是通过对雷达信号形式、天线、接收机和信号处理的设计降低杂噪比,主要有两个途径:一是减小σ_c本身;二是根据有用目标和杂波的不同特性通过处理滤除杂波。

(1) 地杂波

机场场面监视雷达作用距离远小于地球等效半径,对擦地角有$\sin\theta\approx h_a/R$,则$\sigma_c=\gamma\times\sin\theta\times \boldsymbol{S}\approx\gamma\times h_a\times\Delta R\times\Delta\varphi\times\sec\theta$。

可见,γ越大杂波散射面积越大,架设越高杂波散射面积越大,雷达分辨面积越大杂波散射面积越大,另外当θ较小时,地杂波散射面积与距离无显性关系,随距离的变化不明显。

γ由雷达照射面积内不规则表面的散射决定的,国外实验数据表明,雷达工作频率越低,同一表面的视在不平度越低,后向散射分量越少,即雷达工作频率越低γ越小。

架设越高地杂波越强。因此,在满足无遮挡的条件下,应尽量降低机场场面监视雷达架设高度。

另外,选择高分辨率的设计也可以减小地杂波强度。

本雷达地杂波$\sigma_c/\sigma_{s\max}=-18.5\ \mathrm{dB}\leqslant -15.36$ dB,即地物杂波(滑行道、草地等)对雷达检测的影响可以忽略。

(2) 雨杂波

根据公式

$$\sigma_c = \eta V_c \cong \eta \times \frac{\pi}{8\ln 2} \times R^2 \times R\Delta\varphi_H\Delta\varphi_V \qquad (7)$$

可见,η越大杂波散射面积越大,距离越大杂波散射面积越大,雷达分辨面积和垂直波束的乘积越大杂波散射面积越大。

η为单位体积内雷达散射面积。由雨的直径统计分布和雨的介电系数确定。显然η与雷达工作频率的四次方成正比,随着雷达工作频率升高,在雨衰和雨杂波的共同作用下,雷达作用距离急剧下降。

由于雨杂波散射面积和距离的平方成正比,随距离增大杂噪比对雷达威力限制越来越大。

本雷达对雨杂波所需的改善因子:

$$I = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} + \left(\frac{s}{n}\right)_0 + 6 = 19.84\ \mathrm{dB} \qquad (8)$$

即对雨杂波的对消比大于19.84 dB时,目标检测时才能不考虑雨杂波的影响。

普通雷达关心的目标是高速运动目标,可采用MTI、MTD滤波器将静止的和低速的杂波滤除,由于机场场面监视雷达典型目标速度在0～125 m/s之间,而杂波f_d值也在这个范围内,滤波器使用受限。

由电磁波传播理论,入射到圆形散射物上的圆极化入射波将以相反旋向的圆极化波的形式被反射,从而被原来辐射它的天线抑制。另一方面,当圆极化波入射到一个不对称目标,如在飞机上

时，发射的能量基本是在两个极化旋转方向上平均分配的。采用圆极化，由于非对称目标反射的一半能量与发射的圆极化旋向相同，球形雨滴的圆极化回波是相反的极化方向，从而抑制雨杂波对目标的干扰，提高系统的信杂比，圆极化对雨杂波的抑制在17 dB左右[8]。

另外，对气象杂波这类慢起伏杂波，由于其时间和空间上的相关性较强，采用频率分集可以对气象杂波去相关，降低杂波起伏，使其分布更接近瑞利分布，这对场面监视雷达这种要求高发现概率的雷达尤为有利，本方案采用双频率分集方案，理论上可以得到和目标一样4 dB的得益，且该得益与目标去相关得益是独立起作用的。

采用了圆极化、频率分集后对雨杂波的对消比为21.0dB，超过要求的改善因子19.84 dB，理论上可以消除雨杂波对雷达检测的影响，但实际杂波环境是极其复杂的，如在下雨条件下地面积水使地面反射率增大、反射回波的多路径导致回波旋向多次改变而使极化得益失效等，可能造成杂波剩余，设计AMTI滤波器在强杂波条件下选用，该滤波器可以自动估计杂波的 f_d 值，并且自适应的移动滤波器的凹口对准该 f_d 值，从而滤除杂波，显著降低虚警，改善画面质量，但AMTI模式只适用于全相参体制的雷达，且会抑制与杂波相同 f_d 的目标。

4 结束语

由于机场场面区域内跑道、滑行道、停机坪、环场路等都属于比较光滑的区域，后向散射率较低，且机场场面监视雷达分辨率要求较高，分辨单元面积一般较小，只要设计得当，地杂波对目标检测的影响可以忽略。

虽然与光学和红外传感器相比雷达受到气象的影响较小，但为了利用较小的天线获得高的方位分辨率，机场场面监视雷达一般工作于很高的微波频率，此时气象也会大大降低雷达性能，这也是早期工作于毫米波的机场场面监视雷达没有得到广泛应用的主要原因。随着大尺寸高速天线设计等技术相继成熟，真正得到广泛应用的是Ku、X波段机场场面监视雷达。其中X波段机场场面监视雷达以价格便宜、反杂波性能好成为国内机场场面监视雷达主流。随着固态发射技术、计算机技术和组网技术的发展，为获得高的方位分辨率、低的生命周期成本和更好更方便的机场区域覆盖，机场场面监视雷达开始朝更高工作频率、固态、小型化、组网的方向发展。

从国外典型的机场场面监视雷达来看，圆极化、频率分集(或频率捷变)是对付气象杂波的主要手段，考虑到现阶段机场场面监视雷达已经不是独立起作用，而是作为A-AMGCS的主要组成部分，能够整合各类传感器数据互为补充，部分相参体制的机场场面监视雷达采用信号处理技术(AMTI等)降低虚警率[9]。

参考文献：

[1] 杨琳. 美国FAA对机场安全的监管措施[J]. 中国民用航空，2012(10):26-30.

[2] 危力青. 空管监视系统展望[J]. 科学之友，2013(3):144-145.

[3] GALATI G, NALDI M, FERRI M. Airport Surface Surveillance with a Network of Miniradars[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 1999, 35(1):331-338.

[4] 沈慧芳，赖宏慧. 雷达相关杂波的建模与仿真研究[J]. 雷达科学与技术，2009, 7(6):447-451.
SHEN Hui-fang, LAI Hong-hui. Research on Modeling and Simulation of Radar Coherent Clutter[J]. Radar Science and Technology, 2009, 7(6):447-451.(in Chinese)

[5] SKONIK M I. 雷达手册[M]. 谢卓，译. 北京：国防工业出版社，1978:2-57.

[6] PERL E. Review of Airport Surface Movement Radar Technology[C]// 2006 IEEE Conference on Radar, [s.l.]:[s.n.], 2006:692-695.

[7] BARTON D K. 雷达系统分析与建模[M]. 南京电子技术研究所，译. 北京：电子工业出版社，2007:47-79.

[8] BROWN A K. A Review of Radar as a Sensor for Advanced Surface Movement Guidance and Control System(A-SMGCS)[C]// IEE Aviation Surveillance Systems, London, UK:[s.n.], 2002.

[9] 金文. 场面监视雷达的应用和发展[J]. 中国民用航空，2011(9):48-50.

作者简介：

沈　杰　男，1970年生，安徽淮北人，高级工程师，主要研究方向为雷达系统总体设计。
E-mail:shenjie@cetc38.com.cn

晏　勇　男，1977年生，四川宜宾人，工程师，主要研究方向为民用航管雷达系统、机场场面监视雷达。