

# 低空逃逸小 RCS 目标 PD 雷达探测技术

刘明辉, 刘 昊, 陈浩川  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 雷达面临的挑战之一是来自于对低空逃逸微弱目标的探测。现代军事逐渐向低空领域扩展, 超低空逃逸技术也在日益发展, 促使对低空逃逸微弱目标检测技术研究中的地位日益提升。雷达对低空微弱目标进行下视探测时, 目标的低空和超低空飞行致使雷达接收的回波功率变弱, 被淹没在强烈的背景杂波中。与传统脉冲多普勒 PD (Pulse-Doppler) 雷达不同, 合成宽带脉冲多普勒雷达可以同时实现距离和速度的二维高分辨, 并且具备良好的相参性和抗干扰性能。针对低空飞行目标的特点进行定性定量分析, 对探测所遇到的杂波环境进行仿真验证, 提供了一种基于合成宽带脉冲多普勒雷达低空逃逸小雷达截面积 RCS 目标的探测方法, 并对参数设计进行优化分析, 降低漏探概率。

**关键词:** 低空逃逸; 合成宽带; 相参积累; 相位补偿

中图分类号: TN957.51 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)06-0117-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220509001

引用格式: 刘明辉, 刘昊, 陈浩川. 低空逃逸小 RCS 目标 PD 雷达探测技术[J]. 遥测遥控, 2022, 43(6): 117-123.

## PD radar detection technology of low-altitude escape small RCS targets

LIU Minghui, LIU Hao, CHEN Haochuan

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** One of the major challenges that radar faces comes from the detection of low-altitude escaping weak targets. Modern military is gradually expanding to the low-altitude field, and ultra-low-altitude escape technology is also increasingly developed, resulting in the research on low-altitude escape and weak target detection technology. When the radar performs downward-looking detection on this low-altitude weak target, due to the relatively low flying height of the target, the corresponding scattering coefficient of the target is large, so that the echo of the target is easily submerged in the sidelobe clutter. Different from traditional pulse-Doppler (PD) radar, synthetic broadband pulse-Doppler radar can achieve two-dimensional high resolution of distance and velocity at the same time, and has good coherence and anti-jamming performance. In this paper, a qualitative and quantitative analysis of the characteristics of low-altitude flying targets is carried out, and the clutter environment encountered by the detection is simulated and verified, and a detection method of low-altitude escape small radar cross-section (RCS) targets based on synthetic broadband pulsed Doppler radar is provided, so as to optimize the parameter design to reduce the probability of missed detection.

**Key words:** Low altitude escape; Synthetic broadband; Coherent accumulation; Phase compensation

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20220509001

**Citation:** LIU Minghui, LIU Hao, CHEN Haochuan. PD radar detection technology of low-altitude escape small RCS targets[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(6): 117-123.

## 引 言

由于雷达在低空安防领域表现的高效和先进性, 因此在此领域逐渐占据了核心位置<sup>[1]</sup>。低空逃逸目标以及隐身技术对雷达的挑战巨大<sup>[2]</sup>, 隐身技术的发展使得目标的雷达截面积 RCS 大大降低, 而低空弱小目标更是带来了多径效应, 更容易被强杂波环境所影响。简而言之, 就是此类目标 RCS 小、背景杂波强, 使得其不能很好地被探测出来。针对此类目标, 一方面可以使用现代信号处理的技术解决问题,

比如动目标显示 (Moving Target Indicator) 技术、动目标检测 (Moving Target Detection) 技术、脉冲多普勒技术以及长时间积累等技术。另一方面, 还需要通过在雷达自身设施上采取手段来进行杂波抑制或者改善, 比如采用频率捷变技术、大宽带技术, 或者在硬件上采取超低副瓣技术等<sup>[3,4]</sup>。综上, 由于探测目标飞行高度低、散射面积小, 在复杂环境中容易被噪声和杂波淹没, 雷达需要具备同时实现距离维和速度维的二维高分辨, 才能完成对目标的精确探测任务。

传统脉冲多普勒雷达的处理方式是通过多普勒滤波器组进行速度分辨<sup>[5]</sup>, 从而在强杂波的环境下对其进行抑制, 并从中提取出目标的运动信息。根据雷达系统理论知识, 距离维的高分辨可以通过增大带宽来实现。而雷达想要实现速度的高分辨, 往往需要相参积累技术, 并且积累的时间越长分辨率越高, PD 雷达可以通过采用脉冲串的形式来增加信号处理的时间。但是大宽带和较长的处理时间存在一定的兼容问题。带宽越大, 目标在脉冲串内包络走动的现象越明显, 往往对相参积累造成损失。目前常用的宽带信号体制有线性调频信号、相位编码、瞬时窄脉冲信号以及频率步进信号<sup>[6]</sup>。目前, 频率步进合成宽带与 PD 雷达结合是一种新型体制, 与传统 PD 雷达相比, 它具有能够实现二维距离高分辨、极强的杂波抑制能力、可解速度模糊、抗干扰能力强、子脉冲瞬时窄带等特点。

本文首先对合成宽带 PD 雷达的两种信号形式进行介绍, 阐释其原理, 提出基于合成宽带 PD 雷达的信号处理流程; 然后针对探测过程中可能遭遇的强地、海杂波进行仿真建模分析, 从而分析本系统所适应的雷达擦地角、回波主瓣杂波强度、目标的最小可检测速度进行定量分析, 为工程应用提供理论依据。

## 1 信号模型

### 1.1 合成宽带 PD 信号模型

频率步进信号是一类关于时间频率编码的波形, 其特点是由一组载频线性跳变的窄带脉冲串组成。根据定义, 设频率步进信号中包含的子脉冲数为  $N$ , 起始的载频为  $f_0$ , 载频之间的频率差为  $\Delta f$ , 可知第  $n$  个子脉冲的载频为  $f_n = f_0 + n\Delta f, n = 0, 1, \dots, N-1$ , 其数学模型为:

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} u_1(t - nT_r) e^{j2\pi(f_0 + n\Delta f)t} \quad (1)$$

$u_1(t)$  是子脉冲的调制信号, 本文为线性调频信号,  $T_r$  为脉冲重复频率。

$$s_i(t - \tau) = p(t - \tau) e^{-j\frac{4\pi f_i k}{c} \cdot e^{j\frac{4\pi f_i}{c}}} \quad (2)$$

频率步进信号是典型的瞬时窄带宽合成宽带信号<sup>[7]</sup>, 它是宽带 PD 雷达的基础。宽带 PD 雷达的信号形式主要有两种, 一种是多周期脉冲间频率步进信号, 另一种是多周期脉冲内频率步进信号。

多周期脉冲间频率步进信号的时频形式如图 1 所示。由图可以看出, 其特点是周期内发射单个脉冲, 每个周期内的脉冲载频是步进的。脉冲周期重复发射, 在此周期内信号频率步进。多周期脉冲内频率步进信号的时频图<sup>[8]</sup>如图 2 所示。

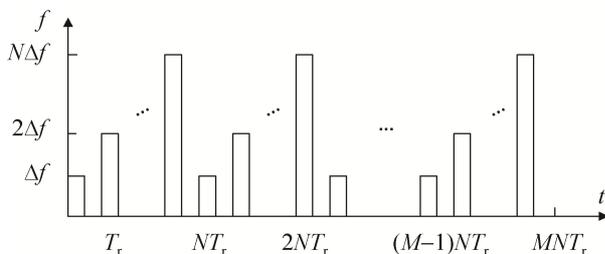


图 1 多周期脉冲间频率步进信号时频图  
Fig. 1 Time-frequency diagram of frequency step signal between multi-cycle pulses

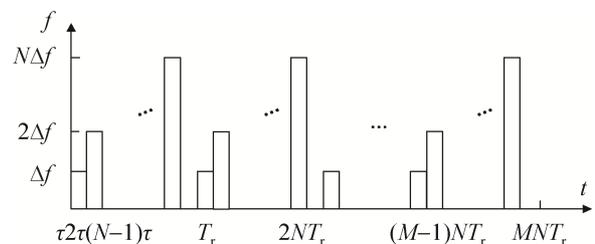


图 2 多周期脉冲内频率步进信号时频图  
Fig. 2 Time-frequency diagram of frequency step signal in multi-cycle pulse

本文采用第一种多周期脉冲间频率步进信号, 具体方式为, 雷达发射  $M$  帧的频率步进信号<sup>[4,9]</sup>, 子

脉冲个数为  $N$ ，起始频率为  $f_0$ ，频率的步进量为  $\Delta f$ 。子脉冲的重复周期是  $T$ ，脉宽为  $T_p$ 。对于一个步进频的周期，有  $T_N = NT$ 。假设目标是速度为  $v$  的匀速直线目标，那么对应的回波信号模型为：

$$s_{mn}(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \alpha \text{rect} \left( \frac{t - mT_N - nT_r - \tau(m,n)}{T_p} \right) \times \exp \left[ j2\pi f_n \left( t - \frac{2(R_0 - vt)}{c} \right) \right] \quad (3)$$

式(3)中， $f_n = f_0 + n\Delta f (n=0,1,2,\dots)$ ，即第  $m$  帧第  $n$  个子脉冲的载频， $\alpha$  表示回波的幅度， $\tau(m,n)$  表示点目标对应的时间延迟，当各脉冲回波幅度一致时，可表示为：

$$\tau(m,n) = \frac{2(R_0 - v(mT_N + nT_r))}{c} \quad (4)$$

经过接收机本振混频后，基带信号可以表示为：

$$s_{mn}(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \alpha \text{rect} \left( \frac{t - mT_N - nT_r - \tau(m,n)}{T_p} \right) \times \exp \left( -j2\pi f_n \frac{2(R_0 - vt)}{c} \right) \quad (5)$$

对一共  $M \times N$  个子脉冲进行重排，载频相同的子脉冲为一组，形成  $N$  个脉冲串<sup>[10]</sup>。对  $N$  个脉冲串进行 FFT，即对窄带信号进行脉冲多普勒处理。然后对频率步进的帧内进行 IFFT 处理，得到高分辨结果。此过程可以从频域对不同速度的目标和杂波进行分离，测得所有目标的速度后可以进行补偿，从而削弱运动对一维距离向的影响。每个速度通道进行相参合成脉压处理，进而得到速度维的高分辨结果。对相参积累进行二维恒虚警检测，最后可实现二维的高分辨检测。图 3 所示为合成宽带 PD 雷达实现高分辨处理流程图。



图 3 合成宽带 PD 雷达实现高分辨处理流程图

Fig. 3 Synthetic broadband PD radar to achieve high resolution processing flow chart

## 2 探测环境与性能分析

### 2.1 杂波特性

针对低空逃逸目标的探测任务分析，主要面对的杂波情况是地杂波或海杂波<sup>[11]</sup>。地海杂波的建模方法已有很多学者做出了很多研究，本节选取两个针对性强且常用的建模方法进行分析。

#### 2.1.1 地杂波单位面积散射系数

地杂波是探测常见的杂波环境。目前常用的模型主要是  $\gamma$ - $f$  模型：

$$\sigma_0 = \gamma a f^b \sin(\theta + c) = D \sin(\theta + c) \quad (6)$$

式中， $f$  为雷达频率 (GHz)， $D$  为和地形相关的常数， $a, b, c$  为统计值， $\theta$  为入射余角。

查阅相关文献，各个参数的取值与地形地貌的关系见表 1。

表 1 不同地貌地杂波模型取值

Table 1 Values of different landforms clutter models

地貌	$\gamma$	$a$	$b$	$c / \text{deg}$
沙漠	0.1	0.08	0.75	0.5
农田	0.0316	0.18	0.60	0.55
丘陵	0.1	0.25	0.20	1.20
城市	0.316	0.35	0.18	0.70

#### 2.1.2 海杂波单位面积散射系数

采用 Morchin 模型进行分析。Morchin 海杂波模型是一种典型的海杂波后向散射参数简化模型<sup>[12]</sup>。根据资料，海杂波主要受载频、海情和擦地角影响，假设载频范围可以任意，擦海角考虑范围为  $0.1^\circ \sim 90^\circ$ ，

则可得具体模型如下:

$$\sigma_0 = \frac{4 \times 10^{-7} \times 10^{0.6(s+1)} \sigma_c^0 \sin \phi}{\lambda} + \text{ctg}^2 \beta \cdot \exp \left[ -\frac{\text{tg}^2 (\pi / 2 - \phi)}{\text{tg}^2 \beta} \right] \quad (7)$$

其中:  $\beta = [2.44(s+1)^{1.08}] / 57.29(\text{rad})$ ;  $\phi_c = \arcsin(\lambda / 4\pi h_e)$ ;  $h_e = 0.025 + 0.046s^{1.72}$ ;  $\sigma_c^0 = \begin{cases} (\phi / \phi_c)^{1.9}, & \phi < \phi_c \\ 1, & \text{else} \end{cases}$ 。

$s$  为海情, 用以模拟海面粗糙度。

### 2.1.3 杂波 RCS

为了简化分析, 只考虑强的主瓣杂波, 忽略副瓣杂波。强的高度杂波处于 0 多普勒位置, 很容易滤除, 也先也不考虑。设雷达波束可能照射到地面反射面积为  $A_s$ , 则地杂波 RCS 为:

$$RCS = \sigma^0 A_s \quad (8)$$

$$A_s = \frac{1}{2} c \tau R \theta_\beta \sec \theta \quad (9)$$

公式中  $\theta_\beta$  为天线水平波束宽度,  $\tau$  为发射脉宽,  $R$  为探测距离。在合成宽带脉冲多普勒雷达下, 由于距离分辨率的提高,  $A_s$  应修正为:

$$A_s = \frac{c}{2B} R \theta_\beta \sec \theta \quad (10)$$

其中,  $B$  为合成带宽。

## 2.2 信杂比改善因子需求

假设雷达采用步进频方式合成宽带, 任意时刻是窄带系统, 甚至是单频系统, 则在处理过程当中可以把滤波器设计得很窄, 可以对热噪声进行良好滤除, 因此暂不考虑热噪声。

雷达所接收到的目标回波功率为:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_t \quad (11)$$

雷达所接收到的杂波功率为:

$$P_c = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_c \quad (12)$$

则信杂比为:

$$\frac{P_r}{P_c} = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \quad (13)$$

为了实现可靠探测, 信杂比改善因子需求为:

$$I_{\text{exp}} \geq \frac{\sigma_t}{\sigma_c} + K \quad (14)$$

$K$  为满足一定发现概率和虚警概率下的最终信杂比。

## 3 仿真实验与分析

### 3.1 杂波仿真

根据上述海杂波模型描述, 可以建立以下海杂波  $\sigma_0$  与擦地角之间的关系, 如图 4 所示。从图中可以看出, 在不同海情下擦地角和海杂波  $\sigma_0$  关系走向大致一样, 在某一个特定角度后向散射会急速上升。这是由于杂波逐渐由低擦地角的漫反射杂波逐渐向高擦地角的相干反射杂波转变, 漫反射的成分逐渐减少。

假设雷达高度在 6 km 开始探测, 取合成信号带宽 100 MHz, 可进行海杂波 RCS 的仿真, 如图 5 所示。根据雷达海杂波瑞利准则知识, 大于  $60^\circ$  可以认为是高擦地角区, 即可认为是表面粗糙的。从图中可以看出, 到了高擦地角范围海杂波的 RCS 普遍激增。

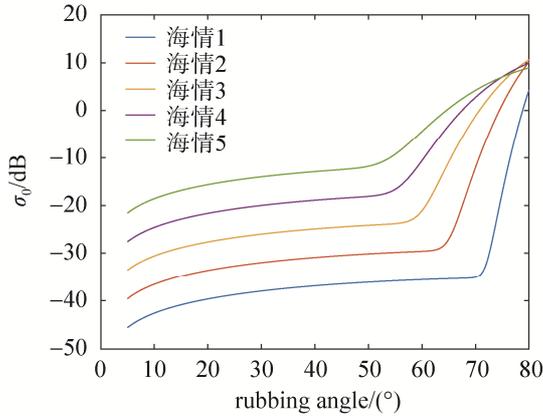


图 4 海杂波后向散射与擦地角之间的关系  
Fig. 4 The relationship between sea clutter backscattering and rubbing angle

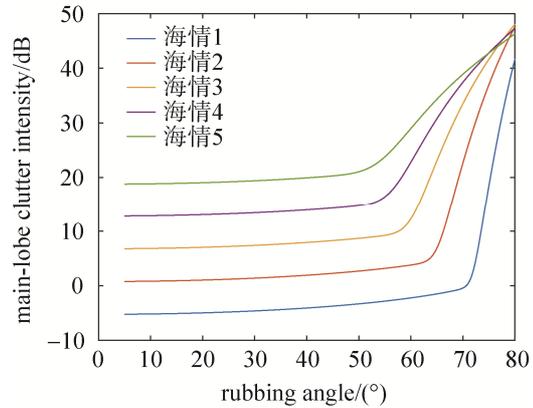


图 5 海杂波 RCS 图  
Fig. 5 Sea clutter RCS diagram

3.2 最小可检测速度仿真

主瓣杂波的多普勒带宽为：

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \left[ \cos \alpha \cos \left( \theta - \frac{\theta_{0.5}}{2} \right) - \cos \alpha \cos \left( \theta + \frac{\theta_{0.5}}{2} \right) \right] = \frac{2V}{\lambda} \theta_{0.5} \cos \alpha \sin \theta \quad (15)$$

上式中， $\theta_{0.5}$  为俯仰向波束宽度。对目标的速度进行补偿，将主瓣杂波搬移到 0 频附近，则可认为杂波的多普勒频率最大值为：

$$f_{dmax} = \frac{2V}{\lambda} \theta_{0.5} \cos \alpha \sin \theta \quad (16)$$

当目标飞行与雷达没有夹角时，杂波的多普勒频率最大值为：

$$f_{dmax} = \frac{2V}{\lambda} \theta_{0.5} \sin \theta \quad (17)$$

此时飞机速度对目标多普勒频率的影响也消除了，假设目标沿着径向飞行，此时目标的多普勒频率为：

$$f_{dT} = \frac{2V_T}{\lambda} \quad (18)$$

当  $f_{dT} \geq f_{dmax}$  时，目标的多普勒和杂波的多普勒在频域上是分离的，这决定了系统的最小可检测速度。由此，可计算出最小可检测速度。

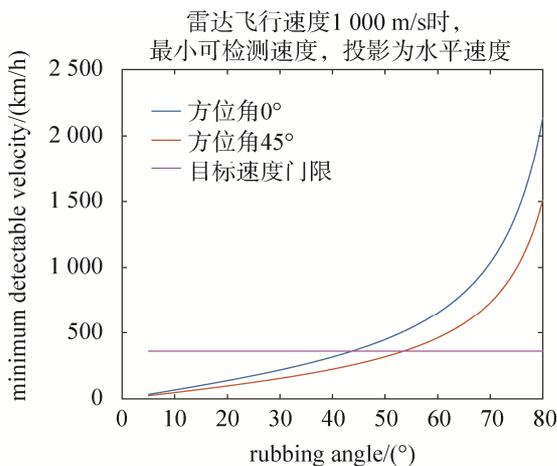


图 6 15 GHz 频段最小可检测速度示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of the minimum detectable speed in the 15 GHz frequency band

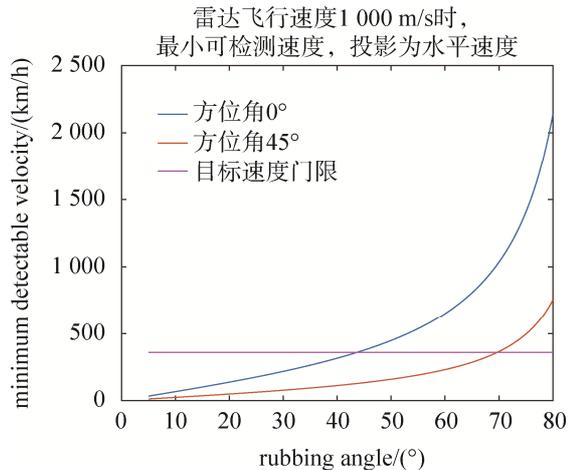


图 7 30 GHz 频段最小可检测速度示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of the minimum detectable speed in the 30 GHz frequency band

从图 6 和图 7 可知, 随着擦地角的增大, 目标的最小可检测速度也随之增大<sup>[13]</sup>。将两个不同频率的曲线相比较可以看出, 当方位角为 0 时, 频率对最小可检测速度没有影响。但是当大方位角时, 高频段可以适应的擦地角度显然更大<sup>[14,15]</sup>。根据定量计算, 15 GHz 可以适应的最大擦地角为 53.5°, 30 GHz 频段最大能适应的擦地角为 69.7°。需要注意的是, 虽然高频段能适应的擦地角更大, 但是由于频率的提高, 处理时间也相应变长, 需要根据工程实际进行调整。

### 3.3 作用距离仿真

通过多普勒域滤波获得信杂比改善之后, 作用距离的计算忽略杂波影响, 计算中考虑热噪声<sup>[16]</sup>。

$$P_N = kTBF_N \tag{19}$$

$$\text{SNR} = \frac{P_r}{P_N} = 16 \text{ dB} \tag{20}$$

在工程实际中, 考虑降雨、天线罩以及馈线等多种因素造成的系统衰减<sup>[17]</sup>, 则取  $\text{SNR}_{\text{衰}} = 8 \text{ dB}$ , 取后端多普勒滤波器组中单个滤波器带宽为 1 000 Hz, 并考虑多脉冲积累, 则作用距离如图 8 所示。

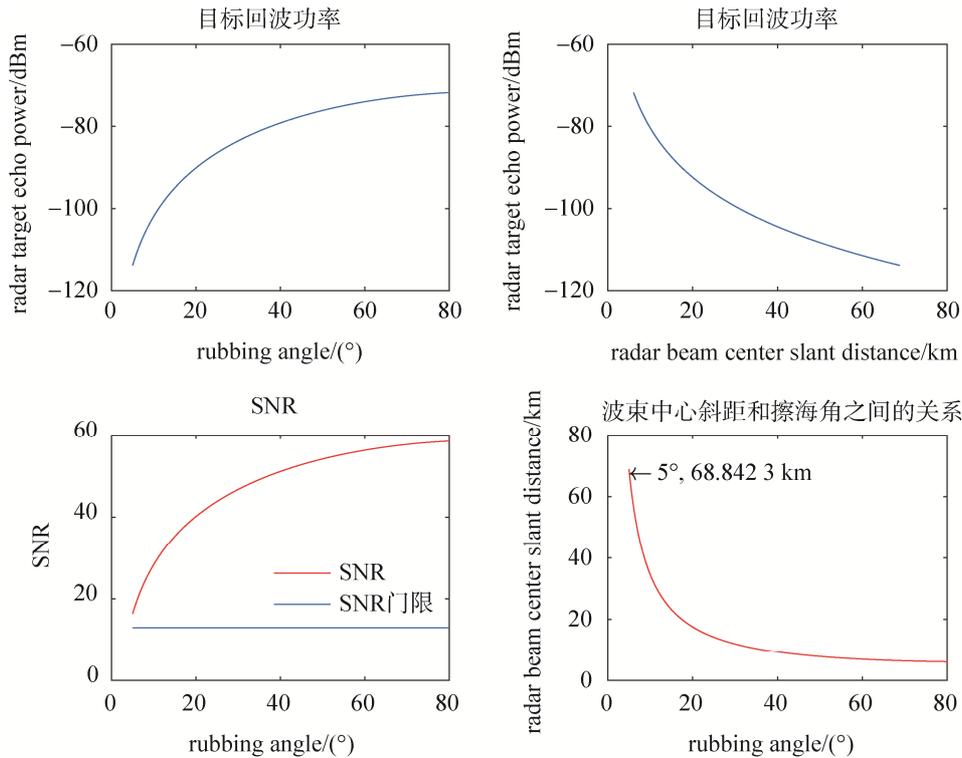


图 8 作用距离示意图

Fig. 8 Action distance diagram

## 4 结束语

对低空逃逸小 RCS 目标的探测是雷达领域的一大挑战<sup>[2,19]</sup>, 利用合成宽带 PD 雷达新体制的距离速度二维高分辨的优势<sup>[17]</sup>, 可以获得较强的探测性能, 从而实现对该类目标的探测任务。本文从探测中可能遇到的强杂波环境做了针对性的建模仿真, 设定了探测所需的参数, 探究了杂波 RCS、擦地角、最小可检测速度之间的关系, 并且对目标作用距离进行了详细计算, 得出了不同参数之间的准确关系, 提出雷达频率、积累时间等参数需要综合考虑, 为后续的工程化应用提供了有效的参考。

### 参考文献

[1] TIAN J, CUI W, WU S. A novel method for parameter estimation of space moving targets[J]. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 2014, 11(2): 389–393.

- [2] 王健, 王宝, 万华. 低空目标长时间积累检测技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2014, 37(3): 48–51.  
WANG Jian, WANG Bao, WAN Hua. Research into detection technology of long-time accumulation for low-altitude target [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2014, 37(3): 48–51.
- [3] 毛二可, 范花玉. 合成宽带脉冲多普勒雷达[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(12): 2717–2724.  
MAO Erke, FAN Huayu. Synthetic wideband pulse Doppler radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(12): 2717–2724.
- [4] 柴振岭. 步进频率雷达高分辨距离像宽带合成技术的研究[D]. 北京: 航天科工集团第二研究院, 2019.
- [5] 刘海波, 卢俊道. 基于 Keystone 变换的宽带脉冲多普勒雷达目标运动补偿算法[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(6): 625–630.  
LIU Haibo, LU Jundao. Target motion compensation algorithm based on Keystone transform for wideband pulse Doppler radar[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(6): 625–630.
- [6] 牛丽方. 线性调频宽带脉冲多普勒制导雷达信号处理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [7] 刘峥, 张守宏. 跳频脉冲雷达目标的运动参数估计[J]. 电子科学学刊, 2000(4): 591–596.  
LIU Zheng, ZHANG Shouhong. Estimation of target slant velocity parameter for a hopped-frequency pulses radar[J]. Signal Processing, 2000(4): 591–596.
- [8] 陈超, 郑远, 胡仕友, 等. 频率捷变反舰导弹导引头相参积累技术研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(8): 1819–1825.  
CHEN Chao, ZHENG Yuan, HU Shiyu, et al. A study of coherent technique of frequency-agile radar for antiship missile[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(8): 1819–1825.
- [9] 刘雷松, 张永泉, 蔡晨曦, 等. 一种改进的脉间频率捷变与 MTD 兼容算法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(2): 5–8, 61.  
LIU Leisong, ZHANG Yongquan, CAI Chenxi, et al. An improved algorithm for compatibility of pulse-to-pulse frequency agility and MTD [J]. Computer Simulation, 2011, 28(2): 5–8, 61.
- [10] 苏军海. 捷变频信号相参积累方法[J]. 现代工业经济和信息化, 2017, 7(13): 66–69.  
SU Junhai. A coherent accumulation method for frequency-agile signal[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2017, 7(13): 66–69.
- [11] 王姣. 雷达信号长时间相参积累若干问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [12] 中国人民解放军国防科学技术大学. 脉冲压缩捷变频雷达的动目标检测方法: CN201710152372.X[P]. (2017-05-10)
- [13] 骆成, 李军, 刘红明, 等. 基于发射信号预处理的包络移动补偿方法[J]. 电波科学学报, 2013, 28(2): 226–230.  
LUO Cheng, LI Jun, LIU Hongming, et al. Compensation method for envelop migration based on transmit signal pre-process [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(2): 226–230.
- [14] 原浩娟, 高梅国, 牟建超. 基于多普勒通道对齐的多帧步进频率信号速度补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(7): 1659–1663.  
YUAN Haojuan, GAO Meiguo, MU Jianchao. Multi-frame stepped-frequency signal processing based on Doppler bin alignment [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(7): 1659–1663.
- [15] 北京电子工程总体研究所. 一种基于雷达信号相位补偿的多帧相参积累方法: CN201910783733.X[P]. 2019-11-26.
- [16] 张顺生, 曾涛. 基于 Keystone 变换的微弱目标检测[J]. 电子学报, 2005(9): 1675–1678.  
ZHANG Shunsheng, ZENG Tao. Weak target detection based on Keystone transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2005(9): 1675–1678.
- [17] 户盼鹤, 林财永, 鲍庆龙, 等. 基于非合作捷变频雷达的微弱目标检测算法[J]. 雷达科学与技术, 2015(5): 473–478.  
HU Panhe, LIN Caiyong, BAO Qinglong, et al. A novel weak target detection method based on non-cooperative frequency agile radar [J]. Radar Science and Technology, 2015(5): 473–478.
- [18] DAVID K BARTON. 雷达系统分析与建模[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007
- [19] 商哲然, 谭贤四, 曲智国, 等. 一种改进的快速 RFT 实现方法[J]. 现代防御技术, 2017, 45(1): 140–146.  
SHANG Zheran, TAN Xiansi, QU Zhiguo, et al. A novel improved fast RFT algorithm[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(1): 140–146.

#### [作者简介]

刘明辉 1996年生, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理。

刘昊 1976年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为相控阵天线与微波技术。

陈浩川 1979年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为雷达总体设计。