

长驻留信号抗 RCS 起伏特性分析

李伟龙, 王明宇, 万鹏飞, 宋宝军

(空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051)

摘要 为了减小运动目标在飞行过程中由于自身雷达截面积(RCS)起伏带来的影响,在分析目标 RCS 起伏特征的基础上,给出了几种常用的目标 RCS 起伏模型,考虑实际中具体目标的运动情况,建立了一种更符合实际目标运动的起伏模型,具体分析了长驻留信号对抗起伏目标的效果。通过分析不同起伏频率时长驻留采样的结果可以知道,与常规雷达信号相比,长驻留信号能够很好地平滑一定起伏频率范围内的快起伏目标 RCS,减小因目标起伏带来的一系列影响。最后从稳跟距离的角度分析得出长驻留信号能够有效实现对快起伏目标的稳定跟踪。仿真证明:长驻留信号具有良好的抗目标起伏特性。

关键词 雷达截面积;起伏目标;长驻留信号;抗起伏

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.05.010

中图分类号 TN953 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)05-0045-05

目标的起伏特性^[1]是雷达系统探测、跟踪、识别目标问题研究中必须考虑的因素,随着航空航天技术的发展对运动目标起伏特性的研究在现代电子战中越发显得重要^[2-4]。

雷达目标回波的起伏总是与目标的雷达散射截面积(RCS)相联系,一般雷达目标由多个散射子组成,由于自身运动,其相对雷达视线的姿态角时刻都在变化,使散射子矢量合成时,各自的相对相位会随机变化,从而导致回波幅度发生起伏。另外,雷达目标是非刚体的,并且常有活动部件(除发动机),因此 RCS 起伏是随机的、不规律的。文献[5]从目标自身 RCS 特征入手介绍了不同的 RCS 统计起伏模型并给出相应的概率密度函数。文献[6]介绍了噪声和杂波干扰的条件下雷达对起伏目标的探测性能。但这些讨论都是基于常规雷达信号的基础上展开的,本文从雷达发射信号的能量角度出发,提出一种长驻留信号,通过增加雷达信号在目标上的驻留时间进行建模和仿真,分析其对运动目标的抗起伏特性。

1 目标 RCS 的起伏特性

目标的雷达散射截面积^[7]是雷达测量中的重要参量之一,隐身目标就是通过控制和降低自身雷达特征,减小雷达散射截面积的方法来降低敌方雷达作用距离,迫使敌方电子探测系统的探测能力和武器平台的作战效能降低,从而达到有效提高己方武器平台突防能力和生存概率的目的。假设一架隐身飞机高低角不变、方位角从 0°到 360°,图 1、图 2 给出了某单站雷达分别工作在 C 波段和 X 波段的 RCS 变化情况^[8]。

从图中可以看出,随着雷达探测视角的变化,目标 RCS 起伏较大,而且在目标正前方(入射角为 0°)和正后方(入射角为 180°)的 ±30°范围内 RCS 数值较小,隐身效果明显,这对雷达探测目标影响很大,极易造成目标丢失。

为了定量准确地描述目标雷达截面积的起伏特性^[9-10],需要知道它的概率密度函数和相关函数,然后建立相应的 RCS 起伏统计模型。W. Weinstock, D. P. Mayer 与 H. A. Mayer 等提出一种 χ^2 统计模型,其概率

收稿日期:2012-06-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60975026)

作者简介:李伟龙(1989-),男,陕西西安人,硕士生,主要从事雷达信号处理研究. E-mail: weilongli2008@126.com

密度函数为^[11]：

$$p(\sigma) = \frac{m}{(m-1)! \bar{\sigma}} \left(\frac{m\sigma}{\bar{\sigma}}\right)^{m-1} \exp\left[-\frac{m\sigma}{\bar{\sigma}}\right], \quad \sigma > 0 \quad (1)$$

式中： m 为其自由度，通常为整数； $\bar{\sigma}$ 为雷达平均截面积。

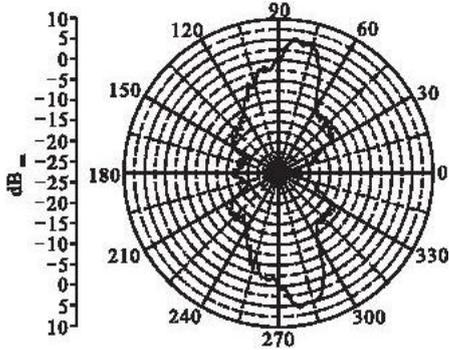


图1 C波段雷达实时 RCS

Fig. 1 Real-time RCS of C wave band

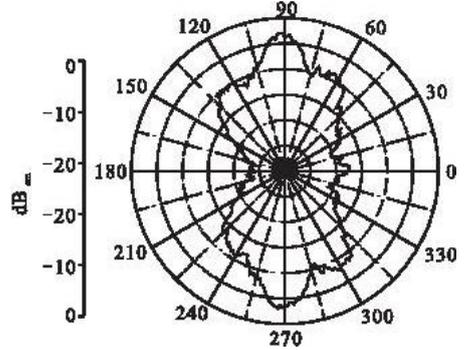


图2 X波段雷达实时 RCS

Fig. 2 Real-time RCS of X wave band

施威林目标起伏模型是 χ^2 分布统计模型的特例，当 $m=1$ 时，相当于施威林 I、II 类目标分布（I 类为快起伏，II 类为慢起伏），其概率密度函数为：

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}}, \quad \sigma > 0 \quad (2)$$

它适用于复杂目标是由大量近似相等单元散射体组成的情况。

当 $m=2$ 时，相当于施威林 III、IV 类目标分布（III 类为快起伏，IV 类为慢起伏）。其概率密度函数为：

$$p(\sigma) = \frac{4\sigma}{\bar{\sigma}} e^{-\frac{2\sigma}{\bar{\sigma}}}, \quad \sigma > 0 \quad (3)$$

它适用于目标具有一个较大反射体和许多小反射体合成，或者一个大的反射体在方位上有小变化的情况。

当 m 趋于无穷大时，相当于不起起伏目标。

2 长驻留信号目标起伏模型

为了提高雷达的抗干扰和反隐身等能力，最基本的方法就是采用高能量发射信号。而提高雷达发射信号能量的直接方法是提高发射功率，这与雷达方程的要求相一致，但雷达发射功率的提高面临设备体积、重量、成本和技术复杂度的限制，同时也不利于信号的隐蔽。因此，在峰值功率受限的条件下，考虑增大发射信号时间宽度提高信号能量，长驻留信号就是在这样的背景下提出的。所谓长驻留信号就是通过增加信号在目标上的驻留时间，提高发射信号的总能量，从而使接收信号的能量增大，获得更大信噪比，提升雷达对目标的探测能力。长驻留信号可以有效地增加目标的单值测量距离，从回波信号中能够提取更多关于目标的信息，使雷达整体性能得到了提升。

分析长驻留信号抗目标起伏特性首先要建立目标 RCS 起伏模型。研究表明，大多数运动目标的 RCS 起伏统计特性都近似满足式(2)表示的概率密度函数，例如飞机等目标；还有的目标比较接近于对数正态分布，例如船舶等。本文考虑的运动目标主要指空中的飞机，在不考虑天线调制作用的情况下，它们的 RCS 起伏统计特性一般服从指数分布。更为实际的情况，在一段时间内，运动目标 RCS 的起伏通常并不是单一服从某个指数分布，而是多个服从相同分布 RCS 的叠加，因此，用多个相互独立同分布叠加后的概率密度函数更能真实表现运动目标 RCS 的起伏状况。

设随机变量 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ 相互独立，且都服从式(2)对应的指数分布，令 $\varepsilon = \sum_{i=1}^n \sigma_i$ ，通过计算推导得到 ε 概率密度函数为：

$$p(\varepsilon) = \frac{\varepsilon^{n-1}}{\bar{\sigma}^n (n-1)!} e^{-\frac{\varepsilon}{\bar{\sigma}}}, \quad \varepsilon > 0 \quad (4)$$

式(4)即为多个服从同分布 RCS 叠加后的概率密度函数,利用它能更好地表示实际情况中 RCS 起伏特性。

3 长驻留信号抗目标起伏特性仿真分析

仿真中设目标起伏全过程 RCS 平均值为 2.0 m^2 ,利用式(4)产生 RCS 随机数,通过设置不同的起伏频率来控制目标雷达截面积的起伏快慢,假定起伏频率 100 Hz ,分别用 4 ms 和 40 ms 驻留信号进行采样,然后取均值,得到的目标 RCS 结果见图 3-4。

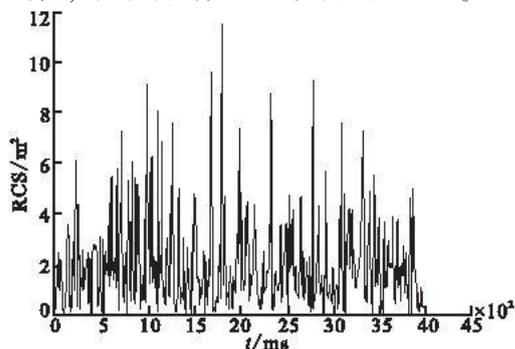


图3 4 ms 驻留 RCS 结果

Fig.3 RCS of 4 ms dwelling

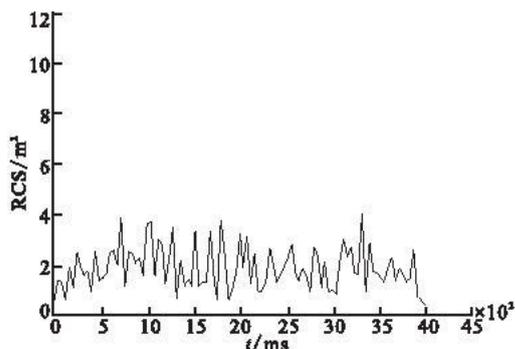
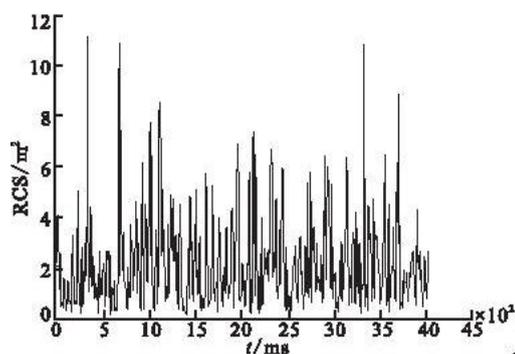


图4 40 ms 驻留 RCS 结果

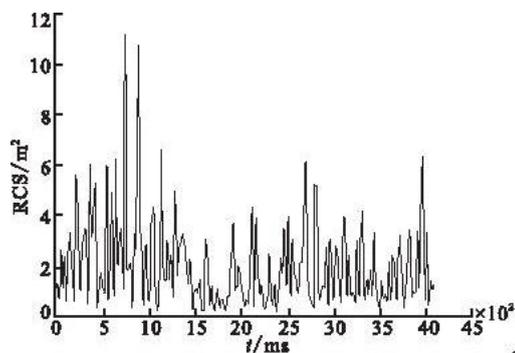
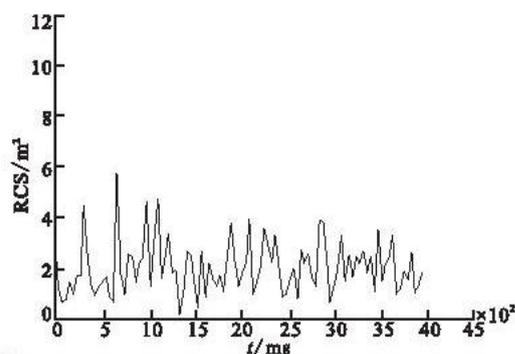
Fig.4 RCS of 40 ms dwelling

从图中可以看出,40 ms 驻留得到的目标 RCS 起伏结果明显比 4 ms 驻留要低很多,也就是说,当目标 RCS 的起伏频率为 100 Hz 时,长驻留信号比常规雷达信号具有更好的抗目标起伏特性。下面通过设置不同的起伏频率,分析长驻留信号的抗起伏特性,图 5 给出了起伏频率分别为 100 Hz , 50 Hz , 25 Hz , 10 Hz 时长驻留信号抗起伏特性(左图为处理前信号,右图为处理后信号)。在产生随机 RCS 过程中,采用插值的方法保证不同起伏频率下产生的 RCS 点数一致。

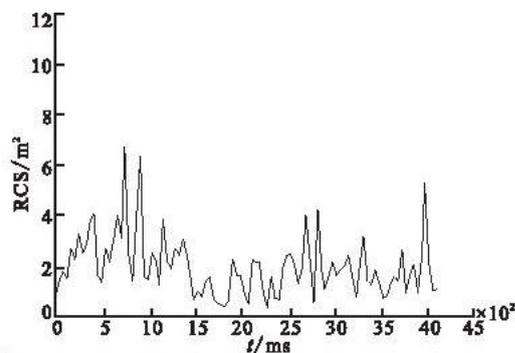
从图 5 可以看出,随着目标 RCS 起伏频率的降低,长驻留信号抗起伏性能减弱,当起伏频率较高时,长驻留采样平滑效果明显,能够有效对抗目标起伏。通过多次设置不同的起伏频率仿真长驻留信号对起伏特性的平滑效果得到,当起伏频率降到 14 Hz 以下时,长驻留采样结果不再有明显变化,抗目标起伏特性降低。



(a) $f=100 \text{ Hz}$



(b) $f=50 \text{ Hz}$



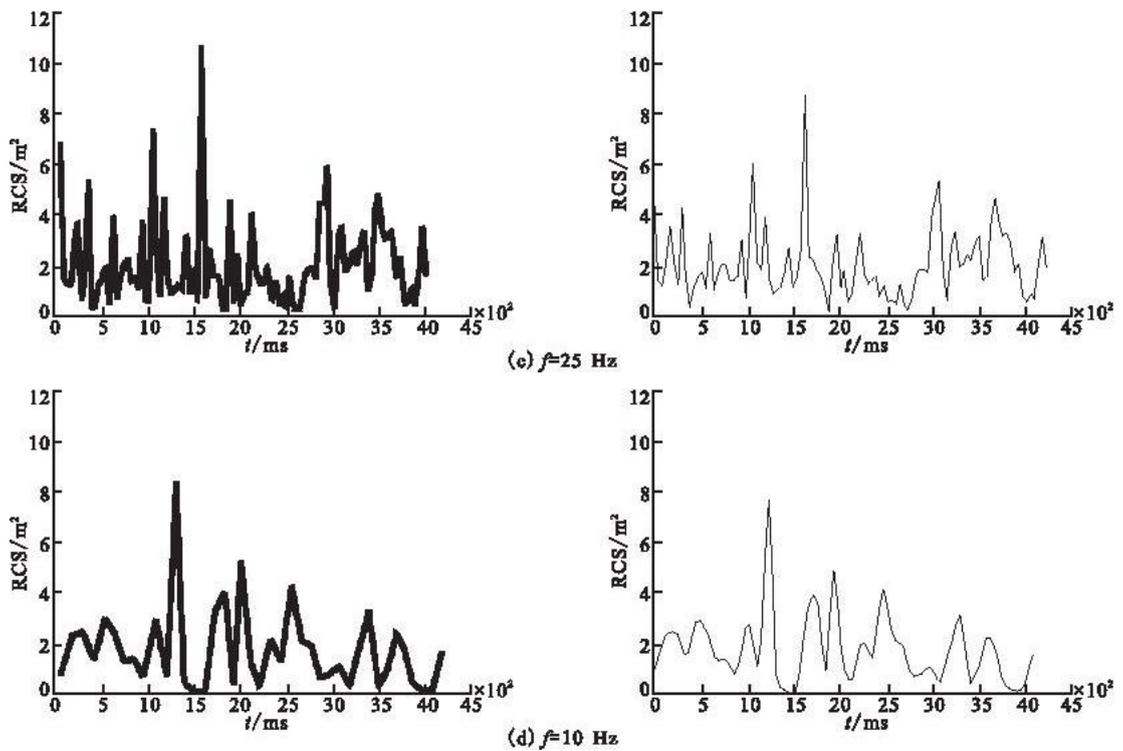


图5 不同起伏频率时长驻留信号抗起伏特性

Fig. 5 The anti-fluctuant properties of long dwell signal under different fluctuant frequency

雷达信号对目标的抗起伏性能还体现在对目标的稳定跟踪距离上。为了实现雷达对起伏目标的稳定跟踪,要求雷达能够持续检测到目标,连续两次未检测到目标认为丢失一次,因此,对相同起伏频率下,长驻留信号抗目标起伏特性进行蒙特卡洛仿真,保证丢失率小于1%,此时认为能够实现稳定跟踪。表1为仿真次数100次的条件下雷达对不同起伏频率目标的稳定跟踪距离。从表中可知,随着目标RCS起伏频率的降低,雷达的稳定跟踪距离也在不断减小,并且对于快起伏目标,长驻留信号具有较大的稳跟距离。

表1 稳定跟踪距离比较

Tab. 1 The comparison of stabilized tracking distance

起伏频率/Hz	100	50	40	25	10	5
仿真次数/次	100	100	100	100	100	100
稳跟距离/km	115.37	103.31	100.31	82.15	64.88	56.41

4 结束语

针对常规雷达信号抗目标起伏性能较弱的问题,本文从能量角度出发,提出一种长驻留信号,通过仿真实验证明,它对某一RCS起伏频率范围内的目标具有良好的跟踪效果,能够有效克服目标的起伏特性,并且相对短驻留信号有着更大的稳定跟踪距离。长驻留信号在雷达信号处理过程中可能会带来失配损失等问题,但同时带来的优势十分明显,如何对失配进行补偿将是下一步研究工作的重点。

参考文献(References):

- [1] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
HUANG Peikang, YIN Hongcheng, XU Xiaojian. Radar target characteristics[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry,2006. (in Chinese)
- [2] 沈齐,李涛. 两种飞机目标雷达截面积的起伏特性[C]//第七届全国雷达学术年会. 南京:中国电子学会,1991:484-487.
SHEN Qi, LI Tao. RCS fluctuant properties of two kinds of airplane targets [C]//The seventh national radar annual conference. Nanjing: Electronics of Chinese institute,1991:484-487. (in Chinese)
- [3] 李红兵. 小型战斗机目标起伏特性分析[J]. 现代雷达,2004,26(12):17-19.

- LI Hongbin. Fluctuant characteristics analysis of light fighter target[J]. Modern radar, 2004,26(12):17-19. (in Chinese)
- [4] Riazi Vahid, Haghjoo Fariba, Sheikhi Abbas. Detection of fluctuating targets in the presence of clutter in HRR (high range resolution) radars using the Hough transform [C]//IEEE transactions on microwaves radar and remote sensing symposium (MRRS). National aviation university kiev ukraine:IEEE press, 2011:327-331.
- [5] Dowdy P C. RCS probability distribution function modeling of a fluctuating target[C]//Proceedings of the 1991 IEEE national radar conference. Los Angeles:IEEE press,1991:164-168.
- [6] Fante R L. Probability of detecting a fluctuating target immersed in both noise and clutter[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems,1977,13(6):711-716.
- [7] 韦笑,殷红成,黄培康,等. F117A 隐身飞机的电磁散射特性研究[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(4):492-494.
WEI Xiao, YIN Hongcheng, HUANG Peikang, et al. Study on the EM scattering characteristics of F117A stealth fighter[J]. Systems engineering and electronic, 2006,28(4):492-494. (in Chinese)
- [8] 张小宽,张晨新,姜军,等. 单基地雷达对隐身目标探测范围的研究[J]. 现代雷达,2008,30(5):21-23.
ZHANG Xiaokuan,ZHANG Chenxin,JIANG Jun,et al. A study on the detection coverage of monostatic radar for stealth target [J]. Modern radar, 2008,30(5):21-23. (in Chinese)
- [9] Blanding W R,Willett P K. Multisensor track management for targets with fluctuating SNR[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems,2009,45(4):1275-1289.
- [10] Derakhian M, Tadaion A A, Gazor S C, et al. Rapid-fluctuating radar signal detection with unknown arrival time[C]//IEEE international conference on signal processing and communications (ICSPC). United Arab Emirates:IEEE press,2007:213-216.
- [11] 丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
DING Lufei, GENG Fulu, CHEN Jianchun. Radar principles [M]. Beijing: publishing house of electronics industry,2009. (in Chinese)

(编辑:田新华)

Study of Long Dwell Signal on Anti-RCS Fluctuant Properties

LI Wei-long, WANG Ming-yu, WAN Peng-fei, SONG Bao-jun

(School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to decrease the influence resulted from the fluctuation of moving targets RCS in the flight process, this paper gives several common target RCS fluctuation models based on the analysis of RCS characteristics, then builds a proper model considering the concrete circumstances of virtual targets, and makes a detailed analysis of the effect that the long dwell signal combats fluctuating targets. Compared with the conventional radar signal, the long dwell signal could smooth the RCS of fast fluctuating targets under certain fluctuant frequency range and decrease a series of influence resulted from fluctuating targets through analyzing the results of long dwell signal sampling. Finally, the long dwell signal could implement stable tracking effectively in the perspective of analyzing stable tracking range. The simulation results also show that the long dwell signal has a good property in anti-target fluctuation.

Key words: RCS; fluctuating targets; long dwell signal; anti-fluctuation