

网络协同雷达对 Swerling 型目标的检测研究^{*}

杨瀚涛

(西安邮电大学教务处 西安 710121)

摘要:在介绍 Swerling 目标模型的基础上,研究了网络协同雷达对 Swerling 起伏目标的检测性能。分析了单站雷达对 Swerling 起伏目标的检测性能,进而推广到网络协同雷达对 Swerling 起伏目标的检测,并给出了网络协同雷达对单个多起伏特性目标的检测性能的仿真结果,为研究目标起伏与网络协同雷达系统设计提供了理论依据。

关键词:Swerling 目标模型;检测概率;雷达散射截面积

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Research of Swerling target detection based on network cooperative radar

Yang Hantao

(Educational Administration Office, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Based on the introduction of the Swerling target model, this paper studies the detection performance of the network cooperative radar for Swerling fluctuating targets. The detection performance of a single station radar for the Swerling fluctuation target is analyzed, and then it is extended to the detection of the Swerling fluctuation target by the network cooperative radar. The simulation results of the performance of the network cooperative radar for a single fluctuating target are given, which provides a theoretical basis for the research of the target fluctuation and the design of the network cooperative radar system.

Keywords: Swerling target model; detection probability; radar cross section area

1 引言

雷达散射截面积(radar cross section, RCS)是表征雷达散射雷达信号强弱的物理量,随着雷达入射角的变化而起伏变化,起伏的 RCS 导致雷达检测概率、链路损耗均发生改变,为了准确地表述 RCS 的起伏特性,人们建立了 RCS 分布的统计模型,最为典型的是非起伏模型和 Swerling 起伏模型^[1]。非起伏模型认为 RCS 为一常数,是最简单的模型,Swierling 模型由 Swerling 提出,分为 Swerling I、Swerling II、Swerling III 和 Swerling IV,是两种概率密度函数与两种去相关时间的组合。文献[2]推导了一种高精度的雷达目标检测模型,并对多站联合雷达的检测性能进行了分析,文献[3]给出了分布式检测体制的雷达网性能计算方法。但是,这些模型和方法均是针对非起伏目标提出,并没有涉及实际中更为常见的起伏目标的情形。另外,多基地雷达协同探测近年来越来越受到重视,根据不

同的融合算法,其组网后的性能远优于单部雷达的联合^[4-5]。为了更好地发挥协同组网后整个雷达系统的功效,学者从多个方面对影响组网雷达协同探测的因素进行了研究。本文针对起伏目标,利用组网雷达协同探测方法进行了目标检测概率的分析仿真,研究了协同探测雷达的优越性,对网络协同雷达的系统设计提供了支撑。

2 单站雷达目标起伏特性

雷达目标的分布模型包括非起伏模型和起伏模型,其中运用最为广泛的为 Swerling I-IV 模型,而非起伏模型又被称为 Swerling V 模型^[6]。Swerling I-IV 4 类模型特点如下^[7]:

1) Swerling I:起伏特性为慢起伏,一般认为在一次探测中的多个脉冲是互相相关的,其分布特性为均匀独立散射体组合,概率密度函数为:

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \quad (1)$$

收稿日期:2017-03

^{*} 基金项目:工业和信息化部通信软科学研究项目(2015-R-24)资助

2) Swerling II:起伏特性为快起伏,即认为再一次扫描或探测过程中多个脉冲之间是不相关的,其分布特性也为均匀独立散射体组合,概率密度函数为:

$$p(\sigma) = \frac{N}{(N-1)! \sigma} \left(\frac{N\sigma}{\sigma} \right) \exp\left(-\frac{N\sigma}{\sigma}\right) \quad (2)$$

其中 N 为一次扫描中的脉冲累积数目。典型的目标如喷气飞机、大型民用客机等。

3) Swerling III: 为一个占支配地位的大随机散射体与多个小均匀独立散射体的组合,起伏特性为慢起伏,一次扫描间脉冲相关,典型目标如螺旋桨推进飞机、直升机、带有机扫雷达的大型舰船等,其概率密度函数为:

$$p(\sigma) = \frac{4\sigma}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{2\sigma}{\sigma}\right) \quad (3)$$

4) Swerling IV: 为一个占支配地位的大随机散射体与多个小均匀独立散射体组合,起伏特性为快起伏,一次扫描中脉冲不相关,典型目标如卫星、导弹与高速飞行体等。其概率密度函数为:

$$p(\sigma) = \frac{2N}{(2N-1)! \sigma} \left(\frac{2N\sigma}{\sigma} \right)^{2N-1} \exp\left(-\frac{2N\sigma}{\sigma}\right) \quad (4)$$

在系统设计中,对于目标起伏特性的判定,可利用目标模型剖分后的统计特性与 Swerling 起伏的统计特性对比来进行判决^[8]。例如,对某舰船目标模型剖分统计特性结果如图 1 所示,对比 4 种 Swerling 起伏的概率密度函数图,其与 Swerling III 较为符合,此时目标检测概率模型可利用 Swerling III 的概率密度函数推导较为合理。

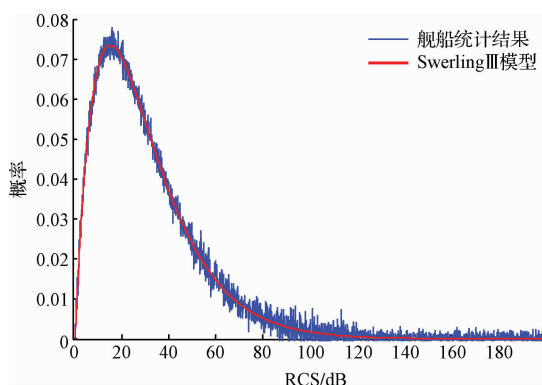


图 1 舰船统计模型与 Swerling III 对比结果

在单站雷达条件下, Swerling I 型目标的检测概率为^[9]:

$$P_d = \exp\left(\frac{-V}{1+SNR}\right), n=1$$

$$P_d = 1 - \Gamma_1(V, n-1) + \left(1 + \frac{1}{n \cdot SNR}\right)^{n-1}$$

$$\Gamma_1\left(\frac{V}{1 + \frac{1}{n \cdot SNR}}, n-1\right) \cdot \exp\left(\frac{-V}{1 + \frac{1}{n \cdot SNR}}\right), n > 1 \quad (5)$$

Swerling II 型目标的检测概率为^[10]:

$$P_d = 1 - \Gamma_1\left(\frac{V}{1+SNR}, n\right), n < 50 \quad (6)$$

Swerling III 型目标的检测概率为:

$$P_d = \exp\left(\frac{-V}{1+n \cdot SNR/2}\right) \left(1 + \frac{2}{n \cdot SNR}\right)^{n-2} \cdot \left(1 + \frac{V}{1+n \cdot SNR/2} - \frac{2}{n \cdot SNR}(n-2)\right), n=1,2$$

$$P_d = \frac{V^{n-1} \exp(-V)}{(1+n \cdot SNR/2)(n-2)!} + 1 - \Gamma_1(V, n-1) + \left(1 + \frac{V}{1+n \cdot SNR/2} - \frac{2}{n \cdot SNR}(n-2)\right) \cdot \Gamma_1\left(\frac{V}{1+2 \cdot SNR/N}, n-1\right), n > 2 \quad (7)$$

Swerling IV 型目标的检测概率为:

$$P_d = 1 - \left[\gamma_0 + \left(\frac{SNR}{2}\right) n \gamma_1 + \left(\frac{SNR}{2}\right)^2 \frac{n(n-1)}{2!} \gamma_2 + \dots + \left(\frac{SNR}{2}\right)^n \gamma_n \right] \left(1 + \frac{SNR}{2}\right)^{-n}, n < 50 \quad (8)$$

式中: $\gamma_m = \Gamma_1\left(\frac{V}{1+SNR/2}, n+m\right)$

利用上述公式,可以计算出 4 种起伏目标在一定虚警概率条件下,不同信噪比对应的目标的检测概率,分别如图 2~5 所示。

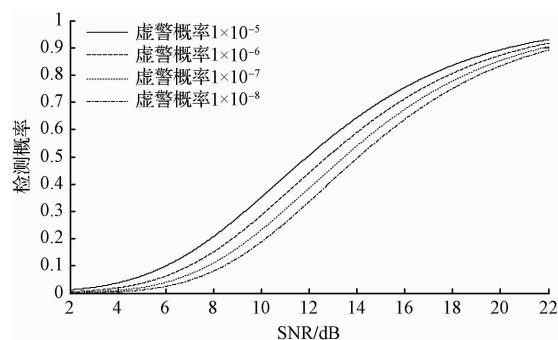


图 2 Swerling I 检测概率与 SNR 之间的关系

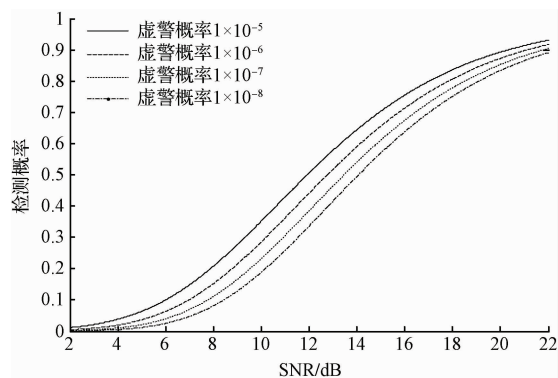


图 3 Swerling II 检测概率与 SNR 之间的关系

3 网络协同雷达 swerling 起伏目标检测概率

当有 N 部雷达协同探测时,可对 N 部雷达的检测信息进行融合处理,在较小的信噪比条件下得到较高的检测概率,一般采用检测级的协同处理^[11],即将多部雷达的检

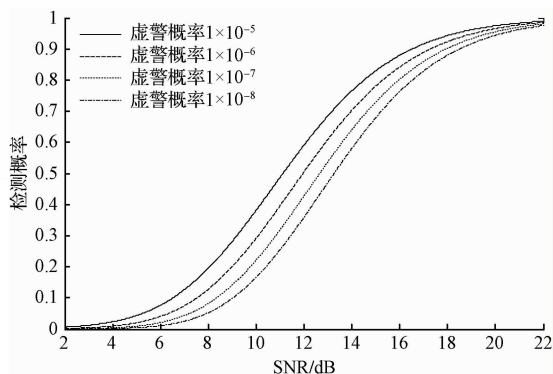


图4 Swerling III 检测概率与 SNR 之间的关系

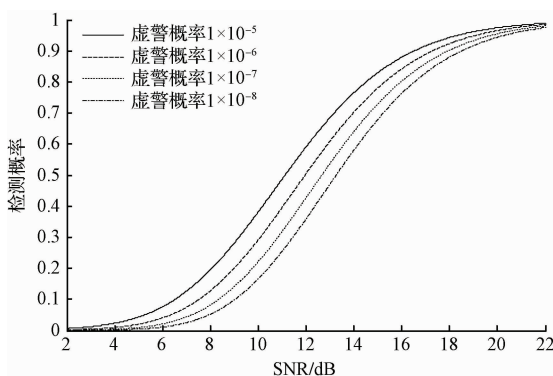


图5 Swerling IV 检测概率与 SNR 之间的关系

测结果进行融合处理,得到一个系统级的检测概率。所以,此协同网络系统不要求准确的信号处理级的同步,从而降低了算法的难度,判决准则如下^[12]:

$$\text{Rule}(D) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^N d_i \geq K \\ 0, & \sum_{i=1}^N d_i < K \end{cases} \quad (9)$$

式中:Rule 为检测准则, D 为检测空间,表示如果有 K 部雷达判决目标在,则系统判决目标存在,如果不是,则判决目标不存在。这里存在两个极限,当 $K=1$ 时,称为“或”准则,即任意一部雷达判决有目标即认为目标存在,而对应的 $K=N$ 时称为“与”准则,即需要全部的雷达判决存在目标,目标才存在^[13]。

以这样的检测准则可以推导出,系统总的发现概率为:

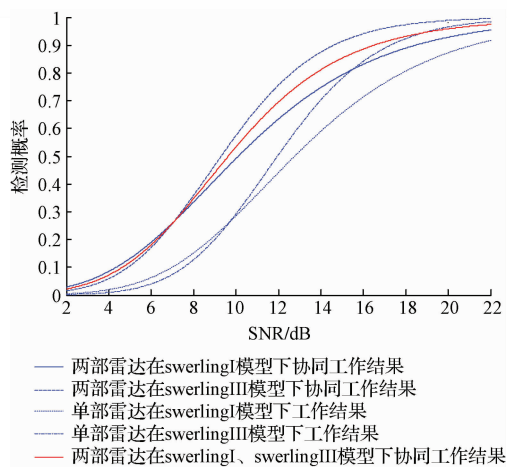
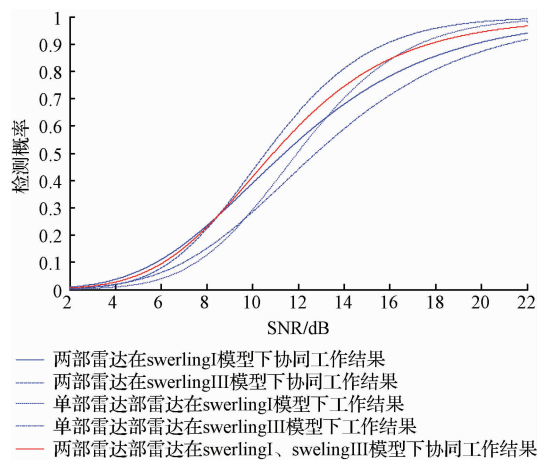
$$P_d = \sum_D [R(D) \prod_{S_1} (1 - P_{d_i}) \prod_{S_0} P_{d_i}] \quad (10)$$

式中: S_0 为判决为 0 的雷达集合,而 S_1 为判决为 1 的雷达集合,所以协同雷达网的虚警概率为^[14-15]:

$$P_{fa} = \sum_D [R(D) \prod_{S_1} P_{fa_i} \prod_{S_0} (1 - P_{fa_i})] \quad (11)$$

由前文分析可知,目标一般服从某种分布,但有时,同一目标从正面观察与从侧面观察,其分布特性也有很大不同。针对两部雷达,仅考虑目标特性条件下的仿真结果,

分别采用协同检测同一分布特性目标、不同分布特性目标以及常规检测方法,在虚警概率为 10×10^{-6} 以及 10×10^{-8} 时系统检测概率随信噪比变化的曲线分别如图 6、7 所示。

图6 虚警概率为 $10e-6$ 时的检测结果图7 虚警概率为 $10e-8$ 时的检测结果

由图 7 可以看出,多部雷达的检测概率在 swerling I、swerling III 模型以及多种虚警概率条件下均有所提升,这也说明在多部雷达检测对信测概率的提升有一定好处。另外,可以看到,在一部雷达的目标特性为 swerling I,另一部雷达的目标特性为 swerling III 时,其检测概率曲线介于两部雷达同是 swerling I 或 swerling III 之间。所以,在两部雷达协同工作的系统设计中,如果两部雷达的位置距离很近,对目标视角差别不大,可以采用单种目标起伏模型设计;如果两部雷达的位置距离很远,对目标视角差别很大,则需要考虑目标的类型(探测船、飞机或是导弹),目标起伏特性在不同视角下是否差别很大,检测曲线是否需要多种起伏模型等联合处理。

4 结 论

分析了 Swerling 目标模型以及如何判断目标起伏特

性,研究了单站雷达对 Swerling 起伏目标的检测性能,进而推广到网络协同雷达对 Swerling 起伏目标的检测,并给出了网络协同雷达对多种起伏特性目标的仿真结果,为研究目标起伏与网络协同雷达系统的设计提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] 梁达川,魏明贵,谷建强,等. 缩比模型的宽频域太赫兹雷达散射截面(RCS)研究[J]. 物理学报, 2014, 63(21):85-94.
- [2] 郑全普,张凤伟,霍烁烁. 雷达目标检测概率简化算法及应用分析[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(3): 39-42.
- [3] 熊年生. 基于分布式检测的雷达组网探测技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(4):363-366.
- [4] 闵涛. 双/多基地雷达密集多目标探测技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.
- [5] 李兆铭,杨文革,丁丹,等. 多雷达实时定轨的一致性分布式容积信息滤波算法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8):1833-1842.
- [6] 胡小全,刘钦,孙建军. 雷达组网协同探测范围研究[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(3):223-227.
- [7] 游俊,强勇,董国,等. MIMO 雷达目标检测问题研究[J]. 火控雷达技术, 2012, 41(1):20-23.
- [8] 吴赞. 雷达目标航迹模拟器设计与实现[D]. 南京:南京理工大学, 2015.
- [9] 徐振海,黄坦,熊子源,等. 雷达目标二元积累检测非线性效率研究[J]. 电气电子教学学报, 2015, 37(1): 1-2.
- [10] 刘月平,姜秋喜,孙志勇. 网络雷达对 Swerling II 目标检测性能分析[J]. 电路与系统学报, 2013, 18(1): 255-262.
- [11] 王颖,雷斌. 基于雷达信噪比模型的目标跟踪算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(1):28-31.
- [12] 卢铮,李超,方广有. 调频连续波太赫兹雷达方案研究及系统验证[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 58-63.
- [13] 魏萌,徐科军,刘铮. 基于特征参数识别的导波雷达物位计信号处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4):542-549.
- [14] 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):5-7+13.
- [15] 房明星,王杰贵,杨永晶. 分布式多假目标干扰下组网雷达检测性能分析[J]. 现代防御技术, 2014, 42(3): 135-141.

作 者 简 介

杨瀚涛,工学硕士,工程师,主要研究方向为通信工程。
E-mail:37110016@qq.com