

# 基于外辐射源特征信息的 Logistic 多星累积算法

彭章友 陈文涛 李林霄

(上海大学 特种光纤与光接入网省部共建教育部重点实验室 上海 200072)

**摘要:** 本文主要研究卫星信号作为外辐射源的多星被动雷达检测系统,文章首先分析了多星场景下的被动雷达系统的信号模型和检测的预处理过程,然后就经典二进制累积无法充分利用各辐射源特征信息的问题提出改进方法,使得第一阶段判决同时输出该次判决的可信度,然后将各通道的输出集中处理得到检测结果,并分析了检测中不同卫星的选取对反射信号强度的影响以及多普勒变化速率对相干时间增益的影响。结论表明在相同虚警概率和检测概率的情况需要的信噪比更低。

**关键词:** 被动雷达;辐射源特征信息;多星累积

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Logistics multi-satellite integration algorithm base on external illuminators' features

Peng Zhangyou Chen Wentao Li Linxiao

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** In this paper the problem of binary detection in passive radar system which exploits satellite signal as the illuminator is addressed. We first analyze the signal model in the background of multi-satellite illuminator and pre-detection process. Then propose the logistics multi-satellite integration algorithm in order to sufficiently utilize the scattering signal with a output of reliability, and the appropriate choice of parameters. Experimental result in false alarm rate and detection rate achieves better performance.

**Keywords:** passive radar; illuminators' features; multi-satellite integration

## 1 引言

无源雷达作为雷达的重要分类,有着普通雷达<sup>[1-2]</sup>所没有的优点,有着很好的“四抗”能力,基于外辐射源信号的无源雷达(passive radar),利用多通道在不同区域进行空间分集接收处理隐身目标的非后向散射能量,实现抗隐身;使用外辐射源信号作为发射信号,反辐射导弹无可寻,天然具有抗反辐射导弹的功能;采用 MIMO 体制,增加双基角,可有效改善低空探测性能,实现抗低空突防。常用的外辐射源<sup>[3]</sup>有 GSM 信号<sup>[4]</sup>、FM 信号<sup>[5-6]</sup>和卫星信号<sup>[7]</sup>等。卫星作为外辐射源有着覆盖范围广、照射角度全面的优点成为被动雷达比较好的选择。

然而无论哪种外辐射源,外辐射源雷达都有着天生的不足,就是反射信号较弱,因为如何有效利用反射信号成为外辐射源雷达中的重要研究领域<sup>[8-12]</sup>。二进制累积以其需要较少先验知识和实现简单,在高分辨雷达中被使用较多,研究重点<sup>[13-14]</sup>中在检测参数的选择、使用分组检测等方面。

但这些研究在对二进制检测设置的门限都有一定程度的不足,使得来自各辐射源目标回波的特征信息没有得到充分运用,影响了雷达系统的检测性能。

考虑到目标的反射信号反映了距离、速度和角度等信息,卫星的选取决定了外辐射源的入射角度和强度;目标的多普勒变化速率受限于目标的运动状况和姿态。进行以上两部分的分析后可以获得反射信号,基于反射信号的特征信息对传统二进制累积的判决输出进行特征信息的映射,得到外辐射源的可信度分析,使得多通道的判决输出会权衡各辐射源的贡献情况,从而提高检测性能,降低信噪比通道的误差影响。

## 2 外辐射源特征信息

### 2.1 信号模型

本文研究的多星被动雷达系统主要系统结构如下图所示:

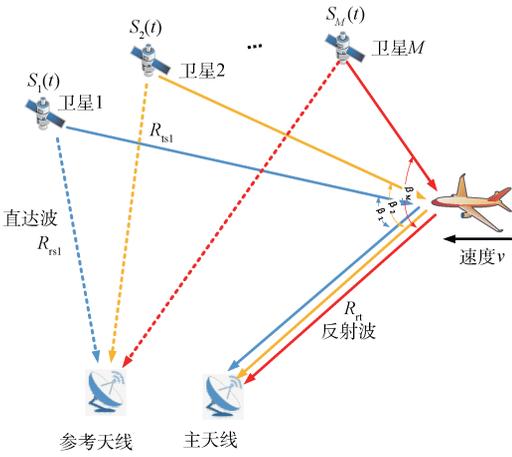


图 1 多星被动雷达系统结构

该系统信号接收部分主要由接收直达波的参考天线部分和接收反射信号的主天线部分构成。参考天线接收卫星的直达波,经过解码、重构处理后得到用于消除主天线通道接收的直达波和后期互模糊的参考信号;主天线接收目标的反射信号,经过直达波消除,互模糊后进行数据分析和处理,从而判断目标的存在与否。

以卫星 1 为例,具体来说,根据雷达方程反射信号功率:

$$P_{r1}^r = \frac{P_{t1} G_{r1}}{4\pi R_{rs1}^2} \cdot \sigma_1 \frac{1}{4\pi R_{r1}^2} \cdot \frac{G_{r1} \cdot \lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{L_1} \quad (1)$$

式中: $P_{t1}$ 是卫星 1 的信号发射功率, $G_{r1}$ 、 $G_{r1}$ 分别为卫星发射天线和主天线的天线增益, $R_{rs1}$ 、 $R_{r1}$ 分别为卫星和目标到主天线的距离, $\sigma_1$ 为从卫星 1 方向入射目标到主天线接收的雷达截面积(RCS), $L_1$ 为路径损耗。

直射信号功率:

$$P_{r1}^d = \frac{P_{t1} G_{r1}}{4\pi R_{rs1}^2} \cdot \frac{G_{r1} \lambda_1^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{L_1} \quad (2)$$

热噪声功率:

$$P_{n1} = kTB_1 \quad (3)$$

信号相对时延:

$$t_1 = \frac{R_{rs1} + R_{r1} - R_{rs1}}{c} \quad (4)$$

信号相对频偏:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} (\cos(\beta_1) + \cos(\gamma_1)) \quad (5)$$

系统的接收信号主要分为两部分:参考天线的接收信号和主天线的接收信号,参考天线接收的直达波信号为:

$$y_d(t) = \sqrt{P^d} S(t - \tau_d) \exp(j\phi^d) + n_d(t) \quad (6)$$

式中: $\sqrt{P^d}$ 为直达波的功率系数, $\phi^d$ 表示直达波信号的随机相移, $\tau_d$ 为直达波信号到雷达处时延, $S(t)$ 为卫星发射的信号;

以卫星 1 的反射信号为例,主天线接收的反射信号为:

$$y_{r1}(t) = \sqrt{P_r^r} \cdot S_1(t - t_1) \times$$

$$\exp[j(2\pi f_1(t - t_1) + \phi_1^r)] + \sqrt{P_r^d} S_1(t) \exp(j\phi_1^d) + \sqrt{P_n} N(t) \quad (7)$$

式中第一部分为目标的反射信号、第二部分为主天线接收到的直达波信号、第三部分为噪声。其中 $\sqrt{P_r^r}$ 、 $\sqrt{P_r^d}$ 、 $\sqrt{P_n}$ 分别表示反射信号、直达波信号和噪声的功率系数, $t_1$ 和 $f_1$ 分别表示反射信号相对于直达波信号的时延和频偏, $\phi_1^r$ 和 $\phi_1^d$ 分别表示反射信号和直达波信号的随机相移。

## 2.2 特征信息

互模糊函数<sup>[15]</sup>计算时使用直达波信号与主天线接收信号做互模糊函数计算得到的多普勒时延函数,主要有四部分构成,期望信号的互相关、残留直达波的互相关、其他卫星反射信号的干扰和热噪声与原信号的干扰。其中期望信号的互相关输出为本文使用的外辐射源特征信息。

参考信号和反射信号的互模糊函数输出,即特征信息定义为:

$$|\tau(\tau, f)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} y_d(t) y_{r1}^*(t + \tau) e^{j2\pi f t} dt \right|^2 \quad (8)$$

期望信号为:

$$r_i(t', f') = \int \sqrt{P_r^r} \cdot S_i(t - t_i) \times \exp(j(2\pi f_i(t - t_i) + \phi_i^r)) \times S_i^*(t - t') \times \exp(-j(2\pi f'(t - t'))) dt \quad (9)$$

为检测目标关键的信号部分。

残留直达波的互相关 $r_{1d}(t', f')$ 为:

$$r_{1d}(t', f') = \sum_{j=1}^M \int \alpha_j \sqrt{P_r^d} \times S_j(t) \cdot \exp(j(\phi_j^d)) \times S_i^*(t - t') \times \exp(-j(2\pi f'(t - t'))) dt \quad (10)$$

此部分为残余直达波信号,幅度较热噪声较小,且峰值出现在 $f'=0$ 处,当 $f' \neq 0$ 时,可视其为高斯白噪声,相对可忽略。

热噪声的干扰 $r_m(t', f')$ 为:

$$r_m(t', f') = \int \sqrt{P_m} \times N_i S_i^*(t - t') \times \exp(-j(2\pi f'(t - t'))) dt \quad (11)$$

此部分为热噪声与原信号的相关结果,幅度较大,在空间内趋于平坦,是主要的影响因素。

其他卫星的干扰为:

$$r_{ij}(t', f') = \sum_{j=1}^M \int \sqrt{P_r^r} \times S_j(t - t_j) \times \exp(j(2\pi f_j(t - t_j) + \phi_j^r)) \times S_i^*(t - t') \times \exp(-j(2\pi f'(t - t'))) dt \quad (12)$$

此部分为其他反射信号(GPS)的干扰,本身幅度就很小,且 $S(t)$ 之间相互近似正交,可以忽略。

## 3 Logistics 多星累积算法

### 3.1 二进制检测

该问题的二元假设检验问题可以表示为:

$$\begin{cases} H_1: x_i = s_i + n_i \\ H_0: x_i = n_i \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

式中:  $H_1$ 、 $H_0$  表示目标存在和不存在的两类假设,  $x_i$ 、 $s_i$ 、 $n_i$  分别为第  $i$  个通道的观测数据、目标信号和噪声。

相同虚警概率  $P_f$  下, 各辐射源的检测概率为:

$$P_{di} = \exp\left(\frac{\ln P_f}{1 + \text{SNR}_i}\right) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

第一阶段的检测统计量为:

$$\mu(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \geq T_1 \\ 0, & x_i < T_1 \end{cases} \quad (15)$$

二进制检测的概率模型由  $N$  个通道中, 至少有  $M$  个通道高于第一门限, 单个通道的检测概率为  $p$ , 总的检测概率为:

$$P_{MN} = \sum_{k=M}^N \frac{N!}{k!(N-k)!} p^k (1-p)^{N-k} \quad (16)$$

$N$  为场景中的总可用反射信号个数,  $M$  为高于第一门限的反射信号个数。

### 3.2 多星场景下的检测参数确定

#### 3.2.1 多卫星辐射源下的卫星选取

对于同一目标的检测, 不同角度入射的辐射源和不同种类的辐射源差异较大, 普通二进制检测对于各辐射源一视同仁的做法会造成检测性能的损失, 为避免这种情况, 需要对辐射源进行适当分类, 而不同辐射源的性能差异主要取决于不同入射角度的 RCS 分布的区别, 因而需要对各种情况下的 RCS 分布情况下进行分析。

接收站、目标和卫星的相对位置示意图如图 2 所示。

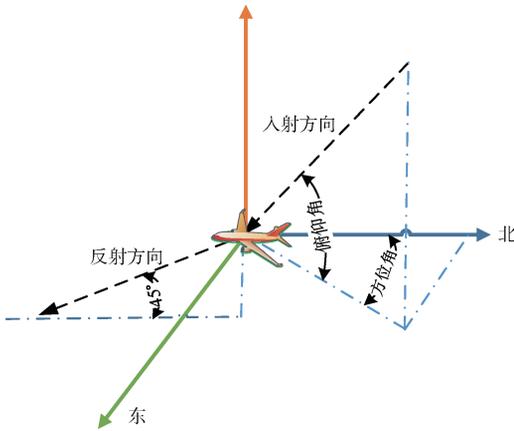


图 2 目标观测视角示意

使用 CST 软件对 F35 型飞机 RCS 的模型仿真可以得到飞机各方向的 RCS 分布情况如图 3 所示。

以巡航平飞状态下, 观测点  $45^\circ$  仰角接收为例, 卫星以  $0 \sim 180^\circ$  俯仰角、 $0 \sim 360^\circ$  方位角入射的飞机 RCS 分布情况从图中可以看出, 在卫星以俯仰角  $127^\circ \sim 153^\circ$ 、方位角  $155^\circ \sim 205^\circ$  或者俯仰角  $23^\circ \sim 67^\circ$ 、方位角  $135^\circ \sim 255^\circ$  方位内入射时, 目标有较大的 RCS, 远高于方位角  $30^\circ \sim 120^\circ$ 、 $240^\circ \sim 330^\circ$  的情况。这种辐射源反射信号的起伏直接反映在检测概率的差异上, 单星情况下的检测概率为:

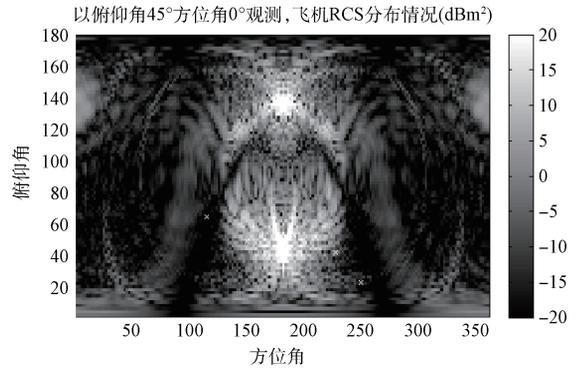


图 3 观测点以  $45^\circ$  仰角观测时飞机 RCS

$$P_d = \exp\left(\frac{\ln P_f}{1 + \text{SNR}}\right) \quad (17)$$

#### 3.2.2 相干时间的选取

相干累积时间的选择取决于信号相干特征、观测点与目标的相对位置和检测目标的运动情况, 以目标多普勒频偏变化速率在  $200 \sim 400$  Hz/s 为例, 相干时间的选取对性能损失的影响如表 1 和图 4 所示。

表 1 相干时间与多普勒变化速率的关系

Doppler 频偏变化速率 / (Hz · s <sup>-1</sup> )	12 ms	22 ms	100 ms
400	<0.1 dB	<1 dB	<16.8 dB
200	<0.1 dB	<1 dB	<11.8 dB
100	<0.1 dB	<1 dB	<8.9 dB

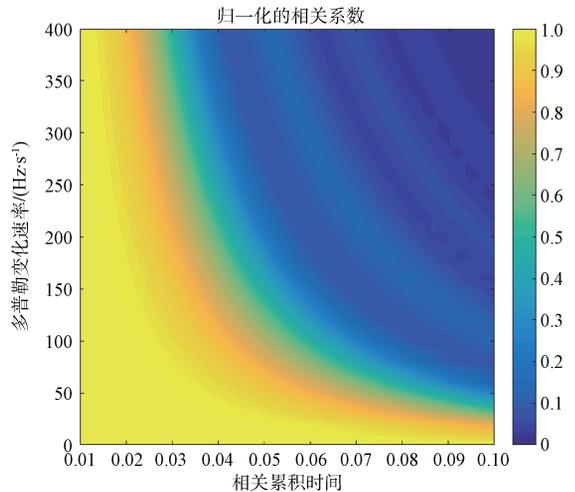


图 4 相干时间与多普勒变化速率的关系

### 3.3 Logistics 多星累积算法

#### 3.3.1 虚警概率与检测概率

鉴于多星条件下各辐射源反射信号差距略大, 为提高检测性能, 将第一阶段检测的门限即第一门限设置较低, 也就是高虚警概率。

而反射信号的信噪比对检测概率有重要影响, 针对多

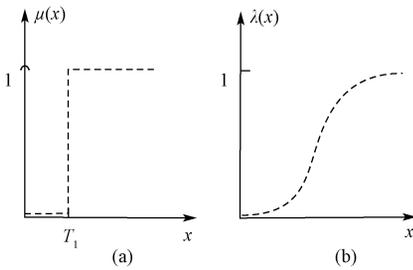


图 5 普通判决(a)、可信度判决(b)

星条件下的各辐射源的差异情况将对第二次判决的方式进行优化,将原来第一阶段判决输出 0 和 1 转化为 0~1 之间的连续输出,尽量避免反射信号在判决中的信息损失。

这样判决输出的映射代表了每一次判决的可信度,而可信度的大小与反射信号的观测值和噪声的功率有关系,在反射信号信噪比较好的时候接近 1,在信噪比很差的时候接近 0,而且可信度必须是随着反射信号信噪比的增加而单调递增的。实际上做出判决类似做出分类,为了达到多级甚至平滑的分类,这里选用神经网络中常用的阈值函数 Logistic 函数作为映射准则:

$$\lambda(x) = \frac{L}{1 + e^{-k(x-x_0)}} \quad (18)$$

在 Logistic 函数中  $L$  代表曲线的最大值,这里选  $L=1$ ;代表曲线的中心位置横坐标,横坐标代表观测值的幅度而输出代表判决的可信程度,所以选择噪声的平均幅度作为曲线的中心,即  $x_0 = \chi_n$ ;  $k$  代表曲线的陡峭程度,作为映射准则的关键因素, $k$  的选择与实际情况有密切关系,根据奈曼-皮尔逊准则,信噪比固定时,虚警概率越高检测概率也越高,因此  $k$  的确定准则是在给定信噪比和虚警概率的情况下使检测概率最大,本文最后通过蒙特卡洛仿真的方法确定  $k$  值。

从而第二阶段检测的检验统计量为:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda(x_i) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} T_2 \quad (19)$$

$T_2$  为第二阶段检测的判决门限,可以是 0~ $N$  之间的任意实数,雷达问题通常采用虚警概率<sup>[12]</sup>作为约束准则,下面推导可信度判决的虚警概率:

$$P_{fa} = P\left(\sum_{i=1}^N \lambda(x_i) \geq T_2 \mid x_i \sim N(0, \sigma_n^2)\right) \quad (20)$$

考虑到每个通道的判决输出都是相互独立的,因为第一阶段检验统计量和的输出为  $N$  个通道分布的卷积,从而得到虚警下的累积分布函数:

$$F(x) = \sum_{i=0}^x (-1)^i \binom{N}{i} \frac{(x-i)^N}{N} \quad (21)$$

因为虚警概率就是第二阶段检测判决门限的函数:

$$P_{fa} = 1 - F(T_2) \quad (22)$$

可信度判决的检测概率为:

$$P_d = P\left(\sum_{i=1}^N \lambda(x_i) \geq T_2 \mid H_1\right) \quad (23)$$

考虑到每个通道输出的  $\lambda(x_i)$  不同,最终超过第二门限  $T_2$  可能会有很多种并且通道个数也有可能不同,所以检测概率是每种满足和为  $T_2$  的所有通道的组合,也就是各种组合下相应通道的概率乘积的总和。

### 4 仿真分析

结合实际情况下的卫星分布和目标情况,进行仿真验证上述算法。在给定虚警概率  $10^{-6}$  的情况下,以 10 个外辐射源为例,

由图 6 可知,随着反射信号信噪比 SNR 的增加,检测概率也得到提升,同时比较相同输入信噪比时,本文提出的算法比经典算法的检测概率更高,这种提升在输入信噪比越高的情况下越明显。在达到相同检测概率的要求下,可以看到改进的方法可以使输入的信噪比最小降低 1 dB,最高可达 4 dB。在实际应用中,输入信噪比的降低可以使更多的外辐射反射信号被使用,也会使雷达的探测距离和精度得到进一步提升。

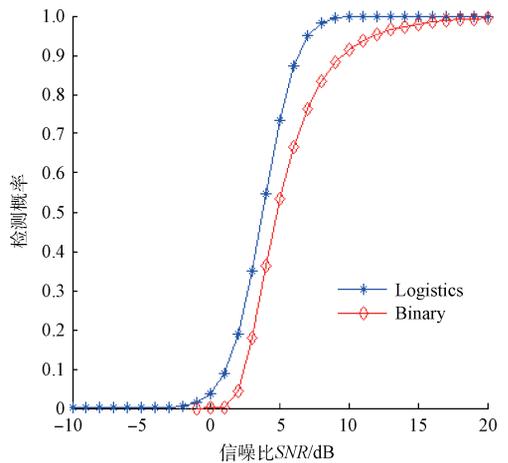


图 6 检测性能比较

### 5 结 论

本文首先分析了多星被动雷达系统的系统组成和信号模型,并分析了外辐射源的特征信息的提取,并对检测过程中的卫星选取和相干时间选取等问题进行分析,针对二进制累积中外辐射源信息没有充分利用的缺点,提出了基于外辐射源特征信息的多星累积算法,进行理论分析后进行实验仿真,取得较好的检测效果。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 何艳丽, 吕雪芹, 敖振浪. 海况环境对高频地波雷达信噪比的影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2014, 2.

- [3] 钟利冬, 卢琨, 陈绪元. 基于外辐射源的高频天波雷达信号分析与选择[J]. 电子测量技术, 2015 (1): 126-134.
- [4] KRYSIK P, WIELGO M, MISIUREWICZ J, et al. Doppler-only tracking in GSM-based passive radar[C]. 2014 17th International Conference on Information Fusion (FUSION), IEEE, 2014: 1-7.
- [5] COLONE F, DE LEO G, PAGLIONE P, et al. Direction of arrival estimation for multi-frequency FM-based passive bistatic radar [C]. 2011 IEEE Radar Conference (RADAR), IEEE, 2011: 441-446.
- [6] EDRICH M, SCHROEDER A, MEYER F. Design and performance evaluation of a mature FM/DAB/DVB-T multi-illuminator passive radar system [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2014, 8 (2): 114-122.
- [7] SUBERVIOLA I, MAYORDOMO I, MENDIZABAL J. Experimental results of air target detection with a GPS forward-scattering radar [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2012, 9(1): 47-51.
- [8] 吴兆平, 吴惠阳, 苏涛. 距离-多普勒-时间三维雷达数据中的目标能量积累[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 68-72.
- [9] HACK D E, PATTON L K, HIMED B, et al. Centralized passive MIMO radar detection without direct-path reference signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(11): 3013-3023.
- [10] MENG X W. Performance analysis of OS-CFAR with binary integration for Weibull background [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2): 1357-1366.
- [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 (1): 28-31.
- [12] MÜLLER A, ELMIRGHANI J M H. Novel approaches to signal transmission based on chaotic signals and artificial neural networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50 (3): 384-390.
- [13] 夏宇垠, 冯大政, 李涛. 宽带雷达目标的稳健二进制检测算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7): 1399-1402.
- [14] 陈远征, 周剑雄, 付强. 扩展目标的最优二进制检测[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 26-29.
- [15] KHAN W, QURESHI I M, SULTAN K. Ambiguity function of phased - MIMO radar with colocated antennas and its properties [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2014, 11 (7): 1220-1224.

## 作者简介

彭章友, 教授, 主要研究方向为无线通信等。

陈文涛, 硕士研究生, 主要研究方向为多星累积算法和信号对消算法。

E-mail: wtwtchen@163.com

李林霄, 硕士研究生, 主要研究方向为被动雷达系统。