

## 基于 MDL-ADT 的雷达对抗空域优化搜索方法

李敏乐<sup>1</sup>, 毕大平<sup>1,2</sup>, 杜浩<sup>1</sup>

(1. 电子工程学院, 合肥 230037; 2. 安徽省电子制约技术重点实验室, 合肥 230037)

**摘要:** 针对雷达对抗侦察中传统空域搜索方法效率不高的问题, 提出一种基于最小描述长度准则的调整驻留时间(MDL-ADT)搜索方法。该方法将数字波束形成(DBF)技术引入空域搜索中, 重点分析了截获概率与波束驻留时间的关系, 通过两个步骤对空域完成搜索: 首先进行预搜索, 利用 MDL 准则对各波束内信源数目进行估计; 然后根据信源在空域的分布情况对驻留时间进行分配, 并完成空域搜索。该方法通过合理分配驻留时间, 使侦察系统的时间资源得到了高效利用。仿真实验表明, 该方法可以使空域搜索效率提高约 20%。

**关键词:** 雷达对抗侦察; 空域搜索; 最小描述长度准则; 截获概率; 驻留时间

**中图分类号:** TN971+.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)01-0051-03

## An Optimized Airspace Search Method in Radar EW Reconnaissance Based on MDL-ADT

LI Min-le<sup>1</sup>, BI Da-ping<sup>1,2</sup>, DU Hao<sup>1</sup>

(1. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

2. Key Laboratory of Electronic Restriction of Anhui Province, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that conventional airspace search method has a low effectiveness in radar EW reconnaissance, a dwell time adjusting method based on the minimum description length criterion (MDL-ADT) is proposed. The Digital Beam-Forming (DBF) technology is introduced in airspace search, and the relationship between the intercept probability of radar reconnaissance receiver and the beam dwell time is analyzed. The method has two steps: 1) Pre-searching, using the MDL criterion to estimate the source quantity in each beam; and 2) Allocating the dwell time according to the distribution of signal sources in airspace, and implementing airspace search. The method ensures most efficient utilization of the resources of EW reconnaissance system by reasonable distributing of the dwell time. Finally, a simulation example shows that the proposed method can improve the airspace searching effectiveness by 20%.

**Key words:** radar EW reconnaissance; airspace search; minimum description length criterion; intercept probability; dwell time

### 0 引言

对辐射源进行截获和监视是电子战空域搜索中的一项重要任务。其中, 雷达对抗侦察空域搜索受制于现有技术体制, 效率往往不高, 无法适应日益复杂的雷达技术。文献[1]研究了截获概率和截获时间的测算方法, 并提出了适用于先验信息明确情况下的优化搜索策略, 但是先验信息的获得需要依赖其他传感器; 文

献[2]提出了一种基于遗传算法的优化搜索策略, 虽然能够提高搜索效率, 但该搜索策略运算量大、预备时间长、实时性差; 文献[3]首先根据引导信息对卫星信号进行搜索捕获, 给出搜索过程的波位排列, 根据能量检测理论判断接收信号是否为有效信号, 但引导信息与卫星真实方向之间存在的偏差需要矫正; 文献[4]研究了有指示信息情况下相控阵雷达的最优搜索算法, 在分析搜索策略的基础上, 得到了最优搜索的随机规划模型, 但该模型不适用于无源侦察; 文献[5-6]对相控阵雷达的搜索概率进行了研究, 并提出了自适应优化搜索策略, 但该搜索策略无法适用于雷达对抗侦察系统。

收稿日期: 2015-12-25

修回日期: 2016-09-21

作者简介: 李敏乐(1992—), 男, 河北石家庄人, 硕士生, 研究方向为电子对抗系统。

针对上述问题,本文将数字波束形成(DBF)技术引入到雷达对抗侦察空域搜索中,DBF是一种以数字方法来实现波束形成的技术,以其优越的性能受到了普遍关注<sup>[7]</sup>。本文结合雷达对抗侦察的任务特点,分析了截获概率与波束驻留时间的关系,提出了一种基于最小描述长度准则的调整驻留时间(MDL-ADT)优化搜索方法。该算法利用MDL准则对各个波束内信源数目进行快速估计,根据估计结果对波束驻留时间进行调整,实现了雷达对抗侦察系统的时间资源、能量资源的优化配置,从而提高了搜索效率。

## 1 DBF波束的扫描原理

雷达对抗侦察系统采用的天线阵是由 $M$ 个相同阵元组成的均匀直线阵。通过信号处理手段对阵元信号进行加权处理,就可以增大期望方向的天线增益,实现空域滤波<sup>[8]</sup>。其中,DBF波束方向性函数为

$$f(\theta, \varphi) = \mathbf{w}^T \mathbf{a} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{a} = [e^{jkr_1 \cdot \mathbf{a}}, e^{jkr_2 \cdot \mathbf{a}}, \dots, e^{jkr_N \cdot \mathbf{a}}]^T$ ,与天线阵排列方式和辐射方向有关,其中, $\mathbf{r}_i$ 为第 $i$ 个阵元的位置矢量, $\mathbf{a}$ 为指向辐射方向 $(\theta, \varphi)$ 的单位矢量; $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ ,与天线阵列的馈电方式有关,称为天线阵列的权矢量。当阵元辐射特性是无方向性时,天线阵的方向性函数由权矢量和天线阵列的排列方式决定。通常情况下,天线阵列位置是固定的,因此,波束方向图主要由阵元权矢量决定,通过改变权矢量就可以控制波束在空域进行扫描。

## 2 波束驻留时间与截获概率的关系

雷达对抗侦察系统的截获概率与具有两个或多个参数的“窗口函数”的时间重叠概率有关<sup>[9]</sup>。不考虑系统过载造成的脉冲丢失,则接收机对雷达辐射源的截获可以看作是重合概率与检测概率的联合概率<sup>[10]</sup>。其数学模型为

$$P_{di}(t) = P(t) \cdot P_d \quad (2)$$

式中: $P_{di}(t)$ 为信号截获概率; $P(t)$ 为雷达发射机和侦察接收机的重合概率,由于侦察系统大多采用频率宽开的信道化接收机,因此这里只考虑方向对准和时间重合; $P_d$ 为侦察接收机前端对辐射源信号的检测概率,与其信噪比和虚警概率有关<sup>[11]</sup>,一般可设为0.9。

现假设雷达辐射源位于第 $i$ 个波位( $i \in [1, N]$ )。图1中:a序列表示雷达天线在空间的扫描过程,其中, $T_r$ 为扫描周期, $\tau_0$ 为其天线主瓣对准侦察接收系统的时间; $b$ 序列表示侦察接收波束在该波位的驻留时间 $T_i$ ;c序列表示雷达脉冲信号的时序图,信号脉冲重复间隔为 $\tau_1$ ;d序列表示重合时间。

根据侦察接收机截获信号的实际需要,必须连续截获 $k$ 个脉冲才能完成一次有效探测(一般情况下可设 $k=4$ ),因此,最小重合时间应满足 $(\tau_0 \cap T_i) \geq 4\tau_1$ ,则接收机在驻留时间 $T_i$ 内对辐射源的截获概率为

$$P_{di} = P(t) \cdot P_d = \frac{2(T_i - k\tau_1) + \tau_0}{T_r} \cdot P_d \quad (3)$$

由此可以看出,接收机在检测概率确定的情况下,其截获概率与波束的驻留时间 $T_i$ 密切相关,驻留时间越长,截获概率越大。

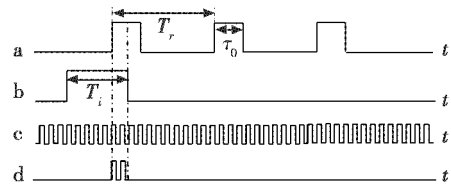


图1 雷达发射机和侦察接收机的时序重合图  
Fig.1 Reclosing sequence of radar transmitter and reconnaissance receiver

## 3 基于MDL-ADT的雷达对抗空域优化搜索方法

### 3.1 MDL准则

信源数目估计是阵列信号处理中的一个关键问题,直接影响到信号DOA估计精度、波束形成等一系列问题。利用MDL准则对空域辐射源数目进行估计,并据此完成波束驻留时间的分配。

信息论方法的统一表达式为<sup>[8]</sup>

$$J(k) = L(k) + P(k) \quad (4)$$

式中: $L(k)$ 为对数似然函数; $P(k)$ 为罚函数。通过对 $L(k)$ 和 $P(k)$ 的不同选择可以得到不同的准则。MDL准则表达式为

$$L_{MDL}(k) = L(M-k) \ln \Lambda(k) + \frac{1}{2}k(2M-k) \ln L \quad (5)$$

式中: $k$ 为待估计的信号源数(自由度); $L$ 为采样数;

$$\Lambda(k) \text{ 为似然函数,且 } \Lambda(k) = \frac{1}{M-k} \sum_{i=k+1}^M \lambda_i \cdot \frac{1}{\left( \prod_{i=k+1}^M \lambda_i \right)^{\frac{1}{M-k}}}$$

### 3.2 雷达对抗空域优化搜索方法

搜索空域宽度为 $\Omega \approx \varphi_c \cdot \theta_c$ ,其中, $\varphi_c, \theta_c$ 分别为俯仰宽度和方位宽度。接收波束俯仰和方位宽度分别为 $\Delta\varphi, \Delta\theta$ ,且满足俯仰覆盖要求,即 $\Delta\varphi \approx \varphi_c$ ;方位上将警戒空域划分为 $N$ 个紧密排列的波位,即 $\theta_c = N \cdot \Delta\theta$ 。设波束主瓣指向第 $i$ 个波位时对应的阵列天线的权矢量为 $\mathbf{w}_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 。阵列天线对警戒空域中的 $N$ 个波束完成一次搜索的时间(即搜索帧时间)为 $T_{sum}$ ,且 $T_{sum} =$

$\sum_{i=1}^N T_i$ , 其中,  $T_i$  表示波束在第  $i$  个波位的驻留时间。

空域优化搜索的基本思路是:第  $p$  ( $p = 1, 2, 3, 4, \dots$ ) 帧搜索分两步进行,首先利用 MDL 准则对各个波位的辐射源数目进行估计,然后根据估计结果,对各个波位的驻留时间进行分配,并进行空域搜索。

**步骤 1** 在波束形成器中依次加载阵列天线的权向量  $w_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ),使波束在空域进行扫描,并利用 MDL 准则对每个波位中的辐射源数目进行估计。设  $i$  波位的辐射源数目估计值为  $\hat{k}_{i,p}$ ,为了防止漏警,对于信源数目为 0 的波束,可将其设置为  $k_0$ ,通常令  $0 < k_0 < 1$ 。

**步骤 2** 根据步骤 1 中的估计结果,得到  $i$  波位的辐射源数目在总辐射源数目估计值中所占比例为

$$\mu_{i,p} = \frac{\hat{k}_{i,p}}{\sum_{i=1}^N \hat{k}_{i,p}} \quad (6)$$

根据式(6)对总搜索帧时  $T_{\text{sum}}$  进行分配,可以得到各波位的最优驻留时间  $T_{i,p,\text{opt}}$  为

$$T_{i,p,\text{opt}} = \mu_{i,p} \cdot T_{\text{sum}} = \frac{\hat{k}_{i,p}}{\sum_{i=1}^N \hat{k}_{i,p}} \cdot T_{\text{sum}} \quad (7)$$

由于在每帧搜索过程都会首先对空域辐射源数目进行估计,因此,该方法不仅适用于固定的辐射源,也适用于处于慢速运动状态的辐射源。

#### 4 仿真实验

地面 8 部 S 频段固定站雷达的分布情况如表 1 所示,信号样式为常规或特殊体制脉冲信号,且假设均符合接收的距离要求。

表 1 信号源空域分布情况

Table 1 The airspace distribution of signal sources

波束序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
信源数目	0	3	0	0	2	2	0	0	0	1

雷达对抗侦察空域范围的方位宽度为  $120^\circ$ ,其 DBF 波束宽度为  $12^\circ$ ,采用频率覆盖范围为  $2 \sim 4$  GHz 的信道化接收机。仿真实验中,分别采用了 MDL-ADT 搜索方法和文献[11]中提供的传统搜索方法,图 2 表示利用 MDL 方法估计信源数目的准确率与所需快拍数之间的关系。图 3 所示为两种搜索方法的截获概率随时间的变化,为了方便对比,将传统搜索方法中天线转过  $12^\circ$  所消耗的时间设为单位时间  $T_s$ ,则图中横坐标表示搜索时间与  $T_s$  的比值,虚线代表最大截获概率的 0.8 倍。

1) 由图 2 可知,在本文提出的 MDL-ADT 方法中,预搜索采用 MDL 准则完成信源数目估计仅需 100 次快

拍,该时间远小于波束驻留时间,因此,MDL-ADT 方法所消耗的时间主要考虑波束在各波位的驻留时间即可。

2) 图 3 中,  $T_s$  分别取 7.0 s 和 8.4 s。传统搜索方法需要 30 倍单位时间才能对空域完成一次搜索,随着单位时间的增大,其截获概率也相应提高,因此,想要达到 100% 的截获概率,还需进一步增大单位时间,从而降低了搜索效率。

3) 图 3 中,当单位时间取不同值时,MDL-ADT 空域优化搜索方法所能达到的最大截获概率均比传统搜索方法提高约 20%,并且当单位时间为 8.4 s 时,MDL-ADT 空域优化搜索方法即可达到 100% 的截获概率。试验结果表明,该方法通过驻留时间的调整提升了整体的截获概率。

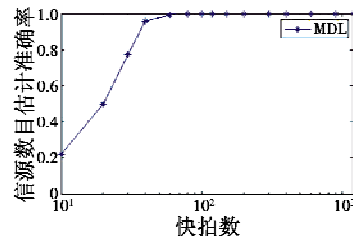


图 2 MDL 准则信源估计准确率与快拍数的关系

Fig. 2 The estimation accuracy rate of signal source with MDL criterion vs number of snapshots

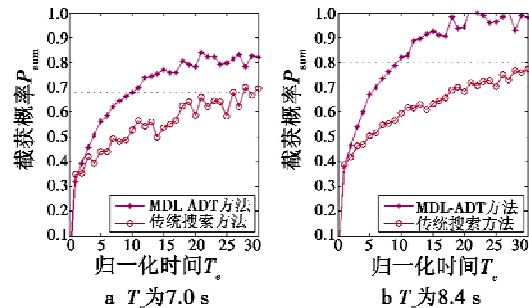


图 3 两种方法的截获概率对比图

Fig. 3 The intercept probability of two methods

#### 5 结束语

针对雷达对抗侦察中传统的空域搜索方法效率不高等问题,本文创新性地引入了 DBF 技术,通过分析侦察系统的截获概率与 DBF 波束驻留时间的关系,提出了一种 MDL-ADT 的优化搜索方法,并分两步对警戒空域完成搜索。仿真表明,该方法能够根据辐射源的战场分布情况对时间资源进行优化配置,提高搜索效率。同时,该方法不仅适用于固定目标的搜索,还可以推广到辐射源处于慢速运动的情况。

#### 参考文献

[1] CLARKSON I V L. Optimisation of periodic search strate-

- [7] REN W. Collective motion from consensus with cartesian coordinate coupling[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(6):1330-1336.
- [8] SEPULCHRE R, PALEY D A, LEONARD N E. Stabilization of planar collective motion with limited communication[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(3):706-719.
- [9] DIMAROGONAS D V, KYRIAKOPOULOS K J. Inverse agreement protocols with application to distributed multi-agent dispersion[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(3):657-663.
- [10] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Flocking in fixed and switching networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(5):863-868.
- [11] CUCKER F, DONG J G. A general collision-avoiding flocking framework[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(5):1124-1129.
- [12] CAO Y, REN W, LI Y. Distributed discrete-time coordinated tracking with a time-varying reference state and limited communication [J]. Automatica, 2009, 45(5):1299-1305.
- [13] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Consensus-based cooperative formation control with collision avoidance for a multi-UAV system[C]//American Control Conference, 2014;2077-2082.
- [14] XIANG J, WEI W, LI Y. Synchronized output regulation of linear networked systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(6):1336-1341.
- [15] YU W, CHEN G, CAO M. Distributed leader-follower flocking control for multi-agent dynamical systems with time-varying velocities[J]. Systems & Control Letters, 2010, 59(9):543-552.
- [16] CAO Y, REN W. Distributed coordinated tracking with reduced interaction via a variable structure approach [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(1):33-48.
- [17] KHOO S, XIE L, ZHAO S, et al. Multi-surface sliding control for fast finite-time leader-follower consensus with high order SISO uncertain nonlinear agents[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2014, 24(16):2388-2404.
- [18] HU J, FENG G. Distributed tracking control of leader-follower multi-agent systems under noisy measurement [J]. Automatica, 2010, 46(8):1382-1387.
- [19] REN W. Distributed cooperative attitude synchronization and tracking for multiple rigid bodies[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(2):383-392.

(上接第53页)

- gies for electronic support[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2011, 47(3):1770-1784.
- [2] WINSOR C, HUGHES E J. Optimisation and evaluation of receiver search [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2012, 6(4):233-240.
- [3] 向晓萍,李朝海,黄宇声,等. 相控阵卫星跟踪系统搜索/捕获仿真研究[J]. 雷达科学与技术,2015,13(5):535-542.
- [4] 周颖,王雪松,王国玉,等. 相控阵雷达最优搜索随机规划研究[J]. 现代雷达,2005,27(4):60-63.
- [5] 徐斌,杨晨阳,李少洪,等. 相控阵雷达的最优分区搜索算法[J]. 电子学报,2000,28(12):69-73.
- [6] 徐斌,杨晨阳,李少洪,等. 相控阵雷达中的自适应搜索研究[J]. 电子学报,2001,29(12):1719-1722.
- [7] 刁晓静. 电子侦察中的宽带 DBF 技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [8] 王红霞,潘成胜,宋建辉. 星载智能天线波束形成技术[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [9] WILEY R G. Electronic intelligence: the interception and analysis of radar signals[M]. Norwood: Artech House Publishers, 2006.
- [10] 邵涛,胡以华,石亮. 机载相控阵火控雷达信号的截获概率分析[J]. 雷达科学与技术,2009,7(3):184-188.
- [11] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 2版. 西安:西安电子科技大学出版社,2012.

欢迎订阅期刊 欢迎刊登广告