

# 基于序列比对的多功能雷达搜索规律识别方法

马 爽,王莹桂,柳 征,姜文利

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘 要:** 对多功能雷达信号规律的识别是电子侦察领域的难点问题之一,本文将多功能雷达搜索方式下的工作规律表示为一个任务序列,提出了一种基于序列比对的识别方法.该方法引入了生物信息学领域的生物序列分析技术,通过将两次不同观测时间段的信号进行比对,提取其中的相似部分来达到识别多功能雷达搜索规律的目的.仿真结果证明了该方法的有效性.

**关键词:** 多功能雷达; 辐射源识别; 序列比对; 电子战

**中图分类号:** TN957.51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 07-1434-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.07.024

## A Method for Search Schema Recognition of Multifunction Radars Based on Sequence Alignment

MA Shuang, WANG Ying-gui, LIU Zheng, JIANG Wen-li

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Signal understanding of multifunction radars is one of the difficult issues in the field of Electronic Intelligence (ELINT). The search schema of multifunction radars is modeled as a task sequence, and a new method is proposed based on sequence alignment which is used extensively for biological sequence analysis in the field of bioinformatics. The recognition is achieved by extracting the similarity between two observed signal intervals. Simulation results show that the method is applicable and effective.

**Key words:** multifunction radars; emitter recognition; sequence alignment; electronic warfare

### 1 引言

多功能雷达是一个具有搜索和跟踪等功能的大规模动态系统,它结合了相控阵天线的波束控制能力和计算机强大的管理和数据处理能力,采用时间分割的方式实现多种功能的并行执行<sup>[1]</sup>.随着多功能雷达越来越广泛的部署和应用,从电子侦察的角度对其信号规律进行识别具有重要意义.多功能雷达多种功能并行执行的特点使得单纯的型号识别无法判断出它的工作状态和威胁程度等十分重要的信息,因此需要采用与传统的雷达识别方法不同的方法来进一步分析多功能雷达信号背后隐藏的规律,其中搜索方式下的工作规律的识别对于深入理解雷达信号具有重要作用,并且在雷达告警、干扰和战术突防等方面具有重要的军事价值.

已有一些文献对多功能雷达信号的建模和处理进行了较为深入的研究.文献[2]采用 HMM(Hidden Markov Model)对多功能雷达的脉冲列信号进行建模,将脉冲列

转化成符号序列作为 HMM 的观测,采用 HMM 的经典算法进行辐射源识别、状态解码、信号预测、模型训练等处理.但是,HMM 的状态并不直接对应多功能雷达的各种功能,而且多功能雷达的信号具有更精细的结构,HMM 不能反映出这种结构关系.文献[3,4]进一步分析了多功能雷达的信号结构,将多功能雷达对一个目标的跟踪过程用马尔可夫调制的随机上下文无关语法来建模,并根据句法理论对模型进行训练、数据处理等操作.该方法需要完全已知多功能雷达的先验信息,并且研究对象是多功能雷达对单一目标的跟踪过程,并没有涉及搜索和多目标同时跟踪的情况.

虽然多功能雷达的信号具有很大的随机性,但是如果其只执行搜索功能,发射信号将具有恒定高度覆盖的周期性光栅扫描的形式<sup>[5]</sup>.搜索功能的这种周期性使得多功能雷达并行执行搜索和跟踪等多种功能时,信号仍然在不同的时间段之间表现出一定的相似性.利用这种相似性,本文引入生物信息学领域的生物序列分析技

术<sup>[6,7]</sup>提出了一种搜索规律识别方法.生物序列分析技术通过计算不同的核苷酸或氨基酸序列间的最优序列比对来确定物种之间的相似性和进化关系,这种方法能够有效地找出两条序列间的相似部分.

## 2 多功能雷达信号模型

### 2.1 多功能雷达信号的层级结构

多功能雷达信号具有“功能/任务/脉冲”的层级结构,本文以典型的搜索和跟踪功能为例来讨论问题.首先定义几个相关概念.

**雷达任务:**在一次波束驻留时间内或对目标的一次连续照射时间内雷达所执行的活动,是调度的最小单位<sup>[8]</sup>.

**任务类型:**当两个雷达任务具有相同的发射波形时,称它们具有相同的任务类型.按照所属的功能可分为搜索任务类型和跟踪任务类型.

**波形库:**多功能雷达内置的发射波形的集合,每种波形或波形的组合对应某一类型的雷达任务.

多功能雷达将各种功能分解成一系列雷达任务,采用时间分割的方式轮流执行各种雷达任务来实现多种功能的并行执行.每个雷达任务通过波形库映射成脉冲级的信号.

电子侦察对多功能雷达信号的处理可以看成是信号形成过程的逆过程,即对信号进行解析,发现信号背后隐藏的任务级和功能级的规律.以往的研究<sup>[9]</sup>能够将脉冲信号解析成任务序列的形式,本文的方法应用于任务级的处理,这就需要对多功能雷达各种任务的生成机制进行深入的理解.

### 2.2 多功能雷达任务序列的生成机制

多功能雷达按照不同的规律来安排用于实现搜索功能的搜索任务序列和用于实现跟踪功能的跟踪任务序列,并生成最终的执行任务序列.这种机制通过搜索任务管理、跟踪任务管理和雷达任务调度三个模块来实现<sup>[1,8]</sup>,如图 1 所示.

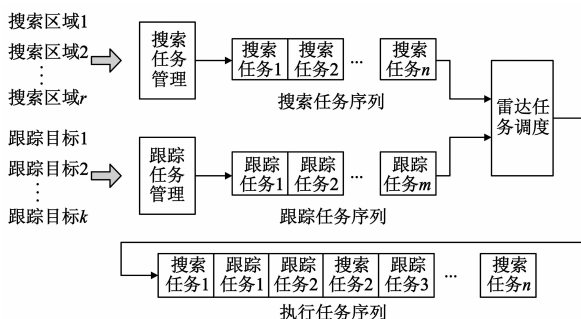


图1 多功能雷达任务序列的产生机制

搜索任务管理负责搜索任务序列的产生.由于待搜索空域是确定的,所以搜索策略<sup>[10]</sup>一般在设计多功

能雷达时完成.首先用固定数目的波位填满整个搜索空域,然后为每个波位指定一个合适类型的搜索任务,以便以最优的性能实现该方向上的搜索,最后按照搜索更新率等要求将所有搜索任务组织成一个搜索任务序列,序列参数被安排在一个控制表中.执行搜索功能时,按照控制表循环地依次执行各个搜索任务.由此可见,搜索任务序列中任务的类型、数量和执行顺序是固定的,并且具有周期性,这种周期执行的固定的搜索任务序列的所表现出来的规律就称为多功能雷达的搜索规律,搜索规律的识别就是要从各种任务交织执行的任务序列中识别出搜索任务序列.

跟踪任务管理负责跟踪任务序列的产生.跟踪单一目标时,多功能雷达动态地执行目标确认,距离、角度测量和失跟处理等跟踪任务,这些任务是否执行、执行时间和执行顺序等需要根据目标状态和雷达与目标之间的相互作用而定;同时跟踪多个目标时,对每个目标都可以采用不同的数据率、不同的精度.跟踪任务管理根据目标状态、时间紧迫性等信息实时地产生跟踪任务序列.由此可见,多功能雷达执行跟踪功能时,跟踪任务的数量、执行时间和执行顺序等是不能事先确定的,具有动态性和随机性的特点.

雷达任务调度<sup>[1,11]</sup>协调搜索任务序列和跟踪任务序列,形成最终的执行任务序列,本质上属于单处理器多任务的实时调度问题.它以一定的优先级交替地安排各种任务的执行,可以看成是在搜索任务的间隙随机插入跟踪任务的过程.

### 2.3 多功能雷达任务序列模型

根据上文的描述,可以用符号序列对多功能雷达的任务进行建模,搜索任务类型和跟踪任务类型用集合分别表示为

$$W_S = \{W_{S1}, W_{S2}, \dots, W_{Sn}\}$$

$$W_T = \{W_{T1}, W_{T2}, \dots, W_{Tm}\}$$

其中,  $W_{Si}$  表示第  $i$  种搜索任务类型;  $W_{Tj}$  表示第  $j$  种跟踪任务类型.令

$$W = W_S \cup W_T \quad (1)$$

且记  $W$  中元素的数目为  $r$ .为了表示搜索任务序列、跟踪任务序列和执行任务序列,做如下定义.

设  $\Sigma$  为一个元素为符号的有限集,  $\Sigma^*$  表示  $\Sigma$  的 Kleene 闭包,即由  $\Sigma$  中的元素组成的所有有限长度的字符串的集合.

$$\forall A \in \Sigma, x, y \in \Sigma^*, \text{定义插入算子 } IN(\cdot)$$

$$IN(x, A) = \{y \mid y \in \Sigma^*, y \text{ 为在 } x \text{ 中任意}$$

位置插入符号  $A$  得到的序列}

推广到两个字符串的情况

$$IN(x, y) = \{z \mid z \in \Sigma^*, z \text{ 为对 } y \text{ 中每个符号 } A, \text{ 都}$$

使用一次  $IN(x, A)$  算子后得到的序列} 易知,  $IN(x, A) \subset \Sigma^*$ ,  $IN(x, y) \subset \Sigma^*$ .

根据以上定义, 在一个搜索帧周期<sup>[1]</sup>内雷达执行的搜索任务序列  $s \in W_s^*$ , 表示为

$$s = S_1 S_2 \cdots S_i \cdots S_j \quad (2)$$

跟踪任务序列  $t \in W_T^*$ , 表示为

$$t = T_1 T_2 \cdots T_j \cdots T_j \quad (3)$$

$t$  是一个随机序列, 在跟踪任务的执行概率未知的情况下, 假定以等概率取到各个符号, 即

$$p(T_j = W_T) = 1/m, i = 1, 2, \cdots, m \quad (4)$$

其中  $p(\cdot)$  表示概率密度函数.

利用插入算子, 执行任务序列  $e = E_1 E_2 \cdots E_k \cdots E_k$  表示为

$$e \in IN(s, t)$$

可见,  $e$  是一个包含一个固定的子序列  $s$  的随机序列. 由于搜索任务序列具有周期性, 因此可以得到两个不同时间段的执行任务序列  $e_1$  和  $e_2$ , 它们包含相似搜索任务序列  $s_1$  和  $s_2$ , 即

$$e_1 \in IN(s_1, t_1) \quad (5)$$

$$e_2 \in IN(s_2, t_2) \quad (6)$$

$$s_1 \sim s_2 \sim s \quad (7)$$

其中, “ $\sim$ ”代表两个序列相似, 即一个序列可以通过循环移位变成另一个序列. 我们希望能够从  $e_1$  和  $e_2$  中恢复出  $s$ , 即从观测到的序列中识别出多功能雷达的搜索规律, 第3节将详细描述这种识别方法.

### 3 多功能雷达搜索规律识别方法

假设我们已经得到了  $e_1$  和  $e_2$ , 它们包含相似的搜索任务序列, 搜索规律识别方法包括三个部分. 首先调整  $e_1$  和  $e_2$  得到  $e'_1$  和  $e'_2$ , 使其中包含的搜索任务序列具有相同的起始点; 其次采用最优序列比对算法找出  $e'_1$  和  $e'_2$  中最可能的任务配对关系; 最后将匹配的任务提取出来组成搜索任务序列.

#### 3.1 调整执行任务序列

点阵图<sup>[7]</sup>可以直观地比较两序列的相似区域, 构建方法如下: 将  $e_1$  排列在点阵空间的横轴,  $e_2$  排列在纵轴,  $e_1$  和  $e_2$  中两个符号相同时, 在对应的点做上标记, 这样, 两条序列中连续相同的区域会形成下斜线, 根据下斜线的位置和形状就可以对  $e_1$  和  $e_2$  进行调整.

执行任务序列长度较长并且任务类型不多时, 点阵图会显得非常复杂和拥挤, 采用滑动窗的方法来对其进行滤波, 可以明显降低点阵图的噪声, 直观地显示出两条序列间具有显著相似性的区域.

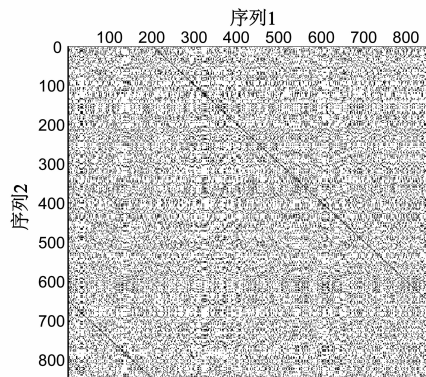
文献[12]分析了窗口大小  $w$  和窗口内两序列匹配符号总数  $k$  的下限  $Tr$  的设置依据. 设两序列中符号匹

配的平均概率为  $p_M$ , 根据贝努利实验,  $k > Tr$  的概率  $p_{Tr}$  为

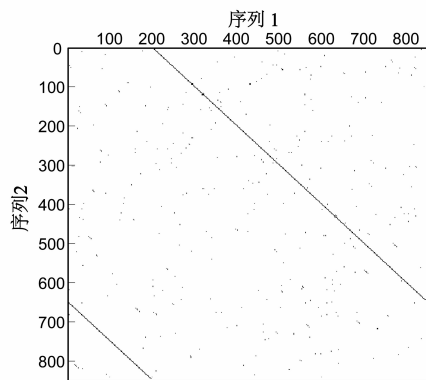
$$p_{Tr} = 1 - \sum_{k=1}^{Tr} C_w^k p_M^k (1 - p_M)^{w-k} \quad (8)$$

选取适当的  $w$  和  $Tr$ , 使得  $p_{Tr}$  小于某一比例, 就可以滤除大部分噪声.

图2显示了在设置  $w = 10$ ,  $Tr = 7$  的情况下, 长度为 850, 任务类型数为 10 的两个执行任务序列滤波前后的点阵图. 可以看出, 将序列 2 循环右移 200 位, 就可以与序列 1 保持较好的一致性.



(a) 滤波前的点阵图



(b) 滤波后的点阵图

图2 点阵图滤波前后对比图

#### 3.2 构建两执行任务序列的最优比对

序列比对定义为给两序列指定一个相对位置, 从而构成两序列中符号的一一配对关系. 如果允许在符号间的任意位置插入空位, 那么候选的比对数量将大大增加, 这时希望得到  $e'_1$  和  $e'_2$  总体上的一个最优比对, 使  $e'_1$  和  $e'_2$  中包含的搜索任务序列具有高度的匹配关系. 序列最优比对可以采用经典的 Needleman-Wunsch 算法<sup>[7]</sup>来实现, 该算法是一种动态规划方法, 它使用一个表格来存储部分序列比对的得分, 大大减少了计算量, 能够满足工程应用的要求. 采用该算法获得  $e'_1$  和  $e'_2$  的最优比分为以下三个步骤:

步骤 1: 建立打分规则

打分规则用于定量对符号间的配对情况进行奖励

或惩罚,可以用打分矩阵来表示,令

$$W^+ = WU \cup \{-\}$$

其中,“-”代表空位,那么打分矩阵  $P_{(r+1) \times (r+1)}$  是一个  $(r+1)$  阶对称矩阵

$$P_{(r+1) \times (r+1)} = (p_{ij}) \quad (9)$$

其中,  $p_{ij}$  表示  $W^+$  中第  $i$  个元素与第  $j$  个元素的配对得分. 记符号  $A$  是  $W^+$  中第  $i$  个元素,符号  $B$  是  $W^+$  中第  $j$  个元素,那么配对  $(A, B)$  的得分

$$p(A, B) = p_{ij} \quad (10)$$

序列比对的得分  $sc$  定义为比对中所有位置上的配对得分之和. 最优比对就是使得分  $sc$  最大的比对,可以通过计算部分得分矩阵得到.

步骤 2: 计算部分得分矩阵

部分得分矩阵  $M$  用来记录  $e'_1$  和  $e'_2$  所有可能的最优比对方式.  $M$  的行和列分别对应序列  $e'_1$  和  $e'_2$ . 记  $e'_1$  和  $e'_2$  的长度分别为  $n_1$  和  $n_2$ , 则  $M$  是一个  $(n_1 + 1) \times (n_2 + 1)$  矩阵, 表示为

$$M_{(n_1+1) \times (n_2+1)} = (m_{ij}) \quad (11)$$

$m_{ij}$  用于存储由序列  $e'_1$  的前  $i-1$  个符号组成的部分序列与由序列  $e'_2$  的前  $j-1$  个符号组成的部分序列的最优比对得分.

已知待比对的两序列和打分矩阵后,  $M$  可以通过标准的过程来构建. 首先按照空位得分规则初始化  $M$  的第 1 行和第 1 列, 然后, 从  $m_{22}$  开始, 按式 (12) 计算  $m_{ij}$

$$m_{ij} = \max \{ m_{(i-1)j} + p(E'_{1i}, -), m_{i(j-1)} + p(E'_{2j}, -), m_{(i-1)(j-1)} + p(E'_{1i}, E'_{2j}) \} \quad (12)$$

其中,  $E'_{1i}$  代表  $e'_1$  的第  $i$  个符号,  $E'_{2j}$  代表  $e'_2$  的第  $j$  个符号. 填满  $M$  以后, 右下角的值  $m_{(n_1+1)(n_2+1)}$  就是两序列间最优比对的得分.

步骤 3: 重建最优序列比对

最优比对是通过对  $M$  进行路径回溯得到的, 它对应一条从  $m_{(n_1+1)(n_2+1)}$  沿向左、向上或向左上三个方向移动到  $m_{11}$  的路径. 从  $m_{(n_1+1)(n_2+1)}$  开始, 路径回溯到达  $m_{ij}$  后, 从  $m_{(i-1)j}$ 、 $m_{i(j-1)}$  和  $m_{(i-1)(j-1)}$  三个选项中选择满足式 (12) 的位置继续前进, 直到回溯到  $m_{11}$ .

重建路径后, 需要把路径转化成最优序列比对, 方法是: 在  $m_{ij}$  处, 向左移动表示在  $E'_{2j}$  前加入一个空位; 向上移动表示在  $E'_{1i}$  前加入一个空位; 向左上移动表示将  $E'_{1(i-1)}$  与  $E'_{2(j-1)}$  进行配对. 将路径从右下角至左上角排列起来, 就得到了两序列从右至左排列的最优比对.

需要指出的是, 按上述方法得到的路径可能不止一个, 这时可以将所有这些路径对应的比对都作为最优比对的结果, 也可以在回溯过程中有多种选择时, 人为地指定一条更加合适的方向.

本小节的最后, 用一个例子来说明构建序列最优比对的方法. 设  $W^+ = \{A, B, C, D, -\}$ ,  $e'_1 = \text{ABDBC}$  和  $e'_2 = \text{ABACDAC}$ , 配对的两符号相同时得分为 1, 不相同或与空位配对时得分为 -1, 得到的打分矩阵  $P$ 、部分得分矩阵  $M$  和最优比对对应的路径如图 3(a) 和 (b) 所示, 图 3(c) 给出了根据路径得到的两序列最优比对结果.

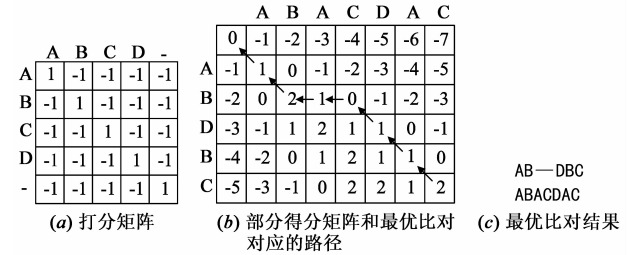


图3 序列ABDBC和ABACDAC的最优比对

### 3.3 搜索任务序列的提取和评价准则

$e'_1$  和  $e'_2$  中包含的搜索任务由于具有相同的执行顺序, 因此会有较高的几率实现正确的配对. 得到的最优比对后, 只要从比对结果中将完全匹配的任务分离出来, 就可以得到搜索任务序列, 也就达到了对多功能雷达的搜索规律进行识别的目的.

由于跟踪任务的随机性等原因, 采用本文的方法得到的搜索任务序列可能与实际执行的搜索任务序列不完全相同, 为了定量地评价算法的性能, 定义了两个指标, 分别为相似度  $P_i$  和虚符号率  $P_f$

$$P_i = N/I \quad (13)$$

$$P_f = (M - N)/M \quad (14)$$

其中,  $I$  表示原搜索序列的长度,  $M$  表示采用搜索规律识别方法提取出的搜索序列的长度,  $N$  表示提取出的序列与原搜索序列在名称和顺序上都一致的符号的数目. 相似度  $P_i$  反映的是提取出的序列与真实搜索序列的相似程度, 虚符号率  $P_f$  反映的是将跟踪任务误判为搜索任务的数量在提取出的序列中所占的比例.

### 4 仿真结果

为了验证搜索规律识别方法的效果, 设置了两个仿真实验. 实验一用文献[13]中的典型多功能雷达来检验该方法对搜索任务序列的提取效果; 实验二考察了该方法对不同类型多功能雷达的适应能力.

实验 1 文献[13]中的典型多功能雷达与本文方法有关的参数描述如下.

搜索空域划分: 8 个仰角方向, 每个仰角上 81 个波束位置, 共 648 个搜索波束位置覆盖搜索空域;

搜索波形: 110 $\mu\text{s}$ 、55 $\mu\text{s}$ 、27.5 $\mu\text{s}$  脉冲压缩波形; 5 个 55 $\mu\text{s}$  脉冲组成的 MTI 波形; 5 个 27.5 $\mu\text{s}$  脉冲组成的 MTI



明,搜索任务类型数的变化对该方法的性能几乎没有影响;而图 5(b)和(d)表明,跟踪任务类型数越多,该方法的性能越好.产生这种结果的原因在于,任务类型数的变化并不影响固定的搜索任务序列之间的相似性,而对于跟踪任务序列,随着符号数的增加,相近位置的同类型跟踪任务数必然减少,从而有利于获得正确的序列比对结果.图 5(e)表明该方法能够准确地从两执行任务序列中找出相似的搜索任务序列,但会将序列中位置相近的同类型跟踪任务(用虚线框标记)误判为搜索任务,造成虚符号率的提高.

## 5 结论

多功能雷达一般采用周期的确定性的搜索任务序列来实现搜索功能,采用随机性的跟踪任务序列来执行跟踪功能.对于具有这种特点的多功能雷达,当执行的跟踪任务数少于搜索任务数或与之相当时,搜索规律识别方法能够有效地从两执行任务序列中提取出搜索任务序列,达到对多功能雷达的搜索规律进行识别的目的,适合于工程应用.

搜索规律识别方法是建立在搜索序列固定这一假设的基础上的,因此如果多功能雷达的搜索策略随功能、环境因素变化,会在一定程度上限制该方法的应用.该方法在适应变化的搜索策略和提高识别准确度方面仍有改进的空间,可以从复杂搜索策略建模,用于比对的两序列的选取方法、打分矩阵的设计、三个或更多序列的利用几方面做进一步研究.

## 参考文献

- [1] 胡卫东,郁文贤,等.相控阵雷达资源管理的理论和方法[M].北京:国防工业出版社,2010.29-38.  
Hu Weidong, Yu Wenxian, et al. The Theory and Method of Phased Array Radar Resource Management [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 29-38. (in Chinese)
- [2] Lavoit P. Hidden Markov modeling for radar electronic warfare [P]. US Patent:6788243, 2004-09-07.
- [3] Visnevski N, Haykin S, et al. Syntactic modeling and signal processing of multifunction radars: A stochastic context-free grammar approach[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(5): 1000 - 1025.
- [4] Visnevski N. Syntactic modeling of multi-function radars[D]. McMaster University, 2005.
- [5] Wiley R G. ELINT The Interception and Analysis of Radar Signals[M]. Norwood, MA: Artech House, 2006. 251 - 252.
- [6] 孙啸,陆祖宏,谢建明.生物信息学概论[M].北京:清华大学出版社,2004.29 - 38.  
Sun Xiao, Lu Zuhong, Xie Jianming. Fundamental Concepts of Bioinformatics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

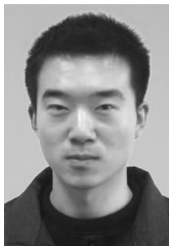
29 - 38. (in Chinese)

- [7] S B Needleman, C D Wunsch. A general method applicable to search for similarities in the amino acid sequences of two proteins[J]. Journal of Molecular Biology, 1970, 48: 443 - 453.
- [8] Sergio S, Tarantino M. Multifunction Array Radar: System Design and Analysis[M]. Norwood, MA: Artech House, 1994. 213 - 254.
- [9] Visnevski N, Haykin S, Krishnamurthy V, et al. Hidden Markov models for radar pulse train analysis in electronic warfare[A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing[C]. IEEE, 2005. 597 - 600.
- [10] 周颖,王雪松,王国玉,等.相控阵雷达最优波位编排的边界约束算法研究[J].电子学报,2004,32(6):997-1000.  
Zhou Ying, Wang Xue-song, Wang Guo-yu, et al. Study on boundary-confined algorithm of optimal beam position arrangement for phased array radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 997 - 1000.
- [11] Jimenez M I, Izquierdo A, Villacorta J J, et al. Analysis and design of multifunction radar task schedulers based on queue [A]. Digital Avionics Systems Conference 2009. IEEE/AIAA 28th[C]. IEEE, 2009. 1 - 9.
- [12] Akito Taneda. Adplot: Detection and visualization of repetitive patterns in complete genomes [J]. Bioinformatics, 2004, 20 (5): 701 - 708.
- [13] 卡里拉斯 P J. 电扫描雷达系统设计手册[M].北京:国防工业出版社,1979.239 - 272.  
Kahrilas P J. Electronic Scanning Radar Systems (ESRS) Design Handbook[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979. 239 - 272. (in Chinese)

## 作者简介



马 爽 男,1981 年生于辽宁锦州.现为国防科学技术大学博士研究生.主要研究方向为综合电子战、航天信息处理.  
E-mail: mashuang@nudt.edu.cn



王莹桂 男,1985 年生于河南南阳.现为国防科学技术大学博士研究生.主要研究方向为综合电子战、数据压缩与随机采样.  
E-mail: wyinggui@126.com