

基于幅度变化点检测的多功能雷达脉冲列解析方法

马 爽, 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: 在电子情报领域, 针对多功能雷达脉冲列解析中的基本波形提取问题, 提出了一种新的基于统计变化点检测的方法. 该方法利用相控阵天线波束离散扫描的特点, 将基本波形提取问题转化成脉冲幅度序列变化点的检测问题. 引入生物染色体分析中的循环二分算法来检测并估计幅度序列的多个变化点, 进而得到基本波形的集合. 该方法不需要任何先验知识, 在较低信噪比的情况下仍然能够得到高精度的提取结果. 仿真实验表明了该方法的有效性.

关键词: 多功能雷达; 统计变化点; 循环二分算法; 电子战

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)07-1436-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.07.030

A Method for Multifunction Radar Pulse Train Analysis Based on Amplitude Change Point Detection

MA Shuang, LIU Zheng, JIANG Wen-li

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

Abstract: To deal with the problem of basic waveforms extraction in multifunction radar pulse train analysis, a new method is proposed based on statistic change point detection. Considering the discrete scan pattern of phased array antenna, the extraction of basic waveforms is converted into the detection of pulse amplitude change points. The circular binary segmentation algorithm which is used for biological chromosome analysis is introduced to split the pulse train into regions of equal amplitude, each of which corresponds to a certain basic waveform. The proposed method needs no prior knowledge, and can give a high performance even when the noise level is comparable with the change level of amplitude. Simulation results show that the method is applicable and effective.

Key words: multifunction radar; statistic change points; circular binary segmentation algorithm; 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^[1,2], 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解析具有重要意义. 基本波形是多功能雷达信号的基本组成单元, 也是雷达控制和调度的最小单位^[3]. 如何从截获的脉冲列中提取基本波形, 是多功能雷达信号解析需要解决的首要问题.

当能够获得基本波形的先验知识时, 主要采用模板匹配的方法来进行波形提取. 文献[4]用隐马尔可夫模型(HMM)来表示基本波形, 通过修正的 Viterbi 算法来判断基本波形之间的边界. 文献[5]提出了一种三级匹配的波形提取算法, 在数据库、脉冲和编码序列三个等级实现噪声环境中的波形匹配. 在实际应用中, 基本波形的先验知识不容易获得, 这促使相关研究转入利用信号本身的特征来提取基本波形. 文献[6]利用脉冲重复

间隔(PRI)信息, 通过动态地特征提取和神经网络分类, 来划分不同基本波形对应的区域. 该方法只能区分重频类型不同的区域, 而且脉冲数较少时效果并不理想.

通过分析多功能雷达的工作原理可知, 基本波形的调度一般与相控阵天线波束的切换同步发生^[7]. 相控阵天线波束扫描具有离散性, 波束切换会引起侦察接收机端脉冲幅度的变化, 因此, 可以利用脉冲幅度变化的特征来提取基本波形. 根据以上概念, 本文引入生物信息学领域的染色体分析技术^[8,9], 提出了一种基本波形提取方法. 该方法不需要任何先验知识, 在较低信噪比的情况下仍然能够得到高精度的提取结果.

2 多功能雷达信号

2.1 多功能雷达信号的结构

多功能雷达采用复杂的信号形式实现多种功能的并行执行, 如图 1 所示.

在程序的控制下, 多功能雷达实时地调度各种任

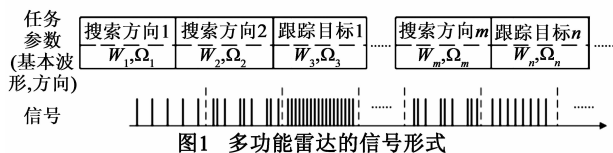


图1 多功能雷达的信号形式

务来并行执行搜索和多目标跟踪等功能。每种任务映射成一种基本波形 W ,并在波束指向 Ω 上发射出去。基本波形是用于提取特定信息的有限个脉冲的优化排列,是构成发射信号的基本模块。所有基本波形组成一个集合,存储在雷达内建的波形库中。波束切换通过相控阵天线来实现。相控阵天线具有离散扫描的特点^[10]。前一个基本波形发射完毕后,波束迅速切换到指定的方向并驻留,直到对应的基本波形发射完毕,再转入下一个指向。

在电子情报领域,多功能雷达信号解析的目的是通过分析截获信号的组成结构和变化规律,为雷达性能的评估、工作状态和威胁程度的判断等提供依据。多功能雷达信号解析的首要问题是要确定基本波形的集合。由多功能雷达的工作原理可知,基本波形的转换与波束切换同步发生,波束切换将引起天线增益的变化,进而导致截获的脉冲幅度的变化。下面首先分析一下多功能雷达脉冲列幅度的变化规律。

2.2 多功能雷达脉冲列的幅度特征

设多功能雷达和侦察接收机的相对位置保持不变,侦察接收机截获的信号功率由式(1)给出

$$S = \frac{PG_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2 L} \quad (1)$$

其中, S 为侦察接收机截获的信号功率, P 为雷达发射功率, G_t 为接收机方向上雷达天线的增益, G_r 为雷达方向上接收机天线的增益, λ 为波长, R 为雷达与接收机间的距离, L 为传输损耗。假定 P 、 G_t 和 R 不变,在较短时间和有限的工作带宽内, L 和 λ 的变化可以忽略不计, S 主要由 G_r 决定。下面对波束驻留和波束切换两种情况下的脉冲幅度特征进行分析。

(1) 波束驻留期间脉冲幅度的分布

在波束驻留期间,天线波束指向不变, G_t 为常数,此时,脉冲幅度主要受噪声影响。根据信号检测理论,在信噪比超过一定门限的情况下,经过中频滤波和包络检波后,输出的包络近似服从正态分布

$$p(r) = \frac{(r/A)^{1/2}}{(2\pi\sigma^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(r-A)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

其中, A 为信号幅度, σ^2 为噪声功率。为了保持一定的检测性能,一般有 $A/\sigma \gg 1$ 。

脉冲幅度是包络的采样值,在波束驻留期间,各脉冲的包络服从同一分布,因此,多个脉冲的幅度也近似服从式(2)的正态分布,且 $A/\sigma \gg 1$ 。由此可知,在波束驻

留期间,不同脉冲的幅度具有相同的均值,且变化很小。

(2) 波束切换对脉冲幅度的影响

相控阵天线波束切换会引起天线增益的变化。由式(1)可知,该变化量正比于接收机端信号功率变化量。图2给出了某 25×25 个阵元的相控阵天线波束指向由 $(0,0)$ 变化到 $(5,5)$ 时,在方位角上天线增益的变化情况^[11]。

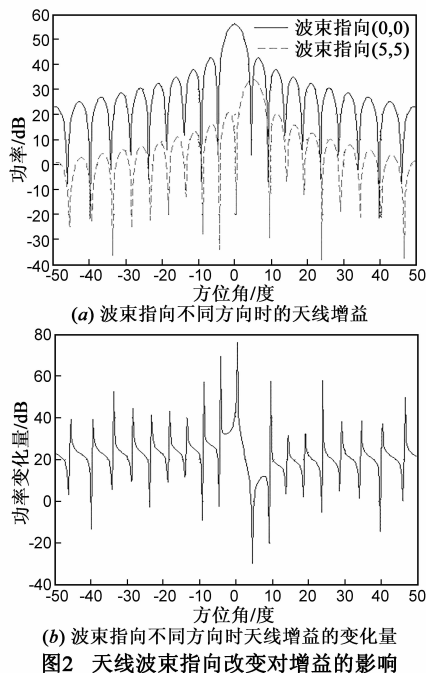


图2 天线波束指向改变对增益的影响

由以上分析可知,接收机截获的多功能雷达信号具有阶梯型的幅度序列,幅度跳变的时刻对应波束切换的时刻,同时也对应基本波形之间的边界。下节将通过建立幅度的统计变化点模型来实现对噪声中幅度变化的检测,并估计变化点。

3 多功能雷达脉冲幅度序列的统计变化点模型

3.1 单统计变化点问题

单统计变化点^[12]问题定义为:给定 N 个独立的随机变量 x_1, x_2, \dots, x_N 的一个观测,判断这 N 个随机变量是具有相同的均值,还是来自两个不同的模型

$$\begin{aligned} x_i &= \mu + \varepsilon_i, & 1 \leq i \leq r \\ x_i &= \mu^* + \varepsilon_i, & r+1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\mu \neq \mu^*$, ε_i 是独立的误差项, r 是需要确定的未知项,称为变化点。单统计变化点问题在数学上可以抽象为一个二元假设检验问题。设 $x_i \sim N(\mu_i, \sigma^2)$, 原假设和备择假设分别为

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_N = \mu$$

$$H_1: \mu = \mu_1 = \dots = \mu_r \neq \mu_{r+1} = \dots = \mu_N \quad (4)$$

其中 r 和 μ 未知,不失一般性地, σ 归一化为 1. Sen 和 Srivastava 在文献[13]中给出了该问题的最大似然比检验统计量

$$Z_B = \max_{1 \leq r \leq N} \left[[1/r + 1/(n-r)]^{-1/2} \cdot [S_r/r - (S_n - S_r)/(n-r)] \right] \quad (5)$$

其中, $S_r = x_1 + \dots + x_r, 1 \leq r \leq N$. 如果 Z_B 大于一个确定的门限 γ , 就接受 H_1 , 认为存在变化点, 且变化点的估计值就是对应 Z_B 的 r 值; 否则接受 H_0 , 认为不存在变化点.

3.2 脉冲列幅度的多统计变化点模型

设侦察接收机截获的多功能雷达的脉冲幅度序列为 x_1, x_2, \dots, x_N , 该序列存在多个变化点, 且变化点的数量、位置未知, 这可以描述为一个多统计变化点问题. 原假设和备择假设分别为

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_N = \mu \\ H_1: \mu_1 = \dots = \mu_{k_1} \neq \mu_{k_1+1} = \dots = \mu_{k_2} \neq \dots \neq \mu_{k_q-1} \\ = \dots = \mu_{k_q} \neq \mu_{k_q+1} = \dots = \mu_N \end{aligned} \quad (6)$$

其中, μ_1, \dots, μ_N 分别代表 N 个脉冲幅度的均值, k_1, \dots, k_q 表示 q 个变化点.

针对多功能雷达脉冲幅度序列的特点, 本文采用循环二分算法来处理该问题. 循环二分算法由 Olshen 和 Venkatraman 提出^[8,9], 用于检测生物染色体中的异常基因片段. 该算法能够精确地对变化点进行检测和估计. 当变化点之间的序列长度较短时, 仍然具有良好的检测性能, 适合于对多功能雷达脉冲幅度序列进行处理.

4 循环二分算法

循环二分算法递归地处理对多个变化点, 每次递归中, 检测出序列中均值变化最大的一段, 直到检测出所有变化点为止.

4.1 检验统计量

在一次递归中, 循环二分算法从序列 x_1, x_2, \dots, x_N 中找出从 $i+1$ 到 j 的一段, 使得该段序列与序列中的其他部分具有最显著的均值差异, 对应的原假设与备择假设分别为

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_N = \mu \quad (7)$$

$$H_1: \mu_1 = \dots = \mu_i \neq \mu_{i+1} = \dots = \mu_j \neq \mu_{j+1} = \dots = \mu_N$$

对式(5)的检验统计量进行改进, 得到如下统计量

$$Z_C = \max_{1 \leq i < j \leq N} |Z_{ij}| \quad (8)$$

其中

$$Z_{ij} = [1/(j-i) + 1/(N-j+i)]^{-1/2} [(S_j - S_i)/(j-i) - (S_N - S_j + S_i)/(N-j+i)] \quad (9)$$

如果 Z_C 大于某个确定的门限值 γ , 那么就接受 H_1 , 此时, 对应 Z_C 的 i 和 j 就是两个变化点的估计值; 否则, 就接受 H_0 , 认为该段序列中不存在变化点. 需要说明的是, Z_C 也能适应只有一个变化点的情况, 只要注意到此时 $j = N$ 即可.

4.2 判决方法

要对式(7)进行判决, 需要确定门限值 γ . 根据检测理论, γ 由显著性水平 α 决定, 满足下式的关系

$$\int_{Z_C > \gamma} p(Z_C; H_0) dx = \alpha \quad (10)$$

其中, $p(Z_C; H_0)$ 为原假设对应的概率分布.

当 $x_i, i = 1, 2, \dots, N$ 满足正态分布时, 可以利用 Monte Carlo 方法直接计算 γ 的值, 或者采用文献[14]中给出的“尾分布”的方法来快速地估计 γ 的值.

循环二分算法采用“随机排列”的方法来对式(7)进行判决, 对非正态分布的数据同样适用. 令 $x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*$ 是 x_1, x_2, \dots, x_N 的一个随机排列, 按照式(8), 计算该排列对应的统计量 $Z_C^* = \max_{1 \leq i < j \leq N} |Z_{ij}^*|$. 对 P 个随机排列分别计算 Z_C^* , 得到 Z_C^* 的 P 个采样值. 在原假设 H_0 下, Z_C^* 与 Z_C 服从相同的分布, 当 P 很大 (> 10000) 时, 就可以用这些采样值来模拟 $p(Z_C; H_0)$ 的分布.

通过比较 P 个采样值中 $Z_C^* > Z_C$ 的数量与 αP 的大小关系, 就可以对式(7)进行判决, 而不用求解具体的 γ 值. 事实上, 式(10)表明, 在 P 个采样值中, 有且只有 $P\alpha$ 个采样值大于 γ . 那么, 如果 P 个采样值中 $Z_C^* > Z_C$ 的数量大于 $P\alpha$, 就说明 $Z_C < \gamma$, 即接受 H_0 ; 反之, 则接受 H_1 , 此时, 变化点的估计值由满足式(8)的 i 和 j 给出.

在实际计算过程中, 每得到 Z_C^* 的一个采样值, 就将其与 Z_C 做比较, 并记录当前 $Z_C^* > Z_C$ 的数量 k , 如果已经有 $k > P\alpha$, 那么就可以直接接受 H_0 , 没有必要继续计算下去. 在多次循环中使用这一方法, 可以大大减小计算量.

4.3 循环检测

根据上述方法, 假设找到的两个变化点分别为 i 和 j , 那么, 将 x_1, x_2, \dots, x_N 分成三个部分: x_1, x_2, \dots, x_i 、 x_{i+1}, x_2, \dots, x_j 和 x_{j+1}, x_2, \dots, x_N , 对每个部分继续采用上述方法进行变化点检测, 直到每一段中都不存在变化点为止. 这样通过循环处理, 就得到了序列 x_1, x_2, \dots, x_N 的所有变化点.

5 仿真

实验 1 考察了各种因素对算法性能的影响; 实验 2 检验了算法对典型的多功能雷达脉冲幅度序列的处理性能.

实验 1

变化点的可检测性主要与三个方面的因素有关:

(1)变化点前后均值的差 $\Delta\mu$ 与噪声标准差 σ 的比值 $\Delta\mu/\sigma$; (2)两变化点之间序列的长度 L ; (3)变化点所处的位置 Loc . 设置仿真条件如下:序列长度 $N = 40$, 添加方差为 σ^2 的零均值高斯白噪声. $\Delta\mu/\sigma$ 取值 $\{1, 2, 3, 4,$

$5\}$, L 取值 $\{3, 4, 5, 6, 10, 15\}$, Loc 取值 $\{F, M, E\}$, 其中 F 代表两个变化点分别为 0 和 L , E 代表两个变化点分别为 $N - L$ 和 N , 这两种情况实际上只有一个变化点; M 代表两变化点的中心位置在 $N/2$ 处. 对每种情况进行 1500 次 Monte Carlo 仿真, 正确结果所占的比例如表 1 所示.

表 1 循环二分算法在不同条件下的性能

$\frac{\Delta\mu}{\sigma}$	Loc	$L = 3$		$L = 4$		$L = 5$		$L = 6$		$L = 10$		$L = 15$	
		$m = 0$	$m \leq 1$	$m = 0$	$m \leq 1$	$m = 0$	$m \leq 1$	$m = 0$	$m \leq 1$	$m = 0$	$m \leq 1$	$m = 0$	$m \leq 1$
1	F	0.009	0.016	0.012	0.023	0.019	0.037	0.026	0.050	0.033	0.047	0.038	0.055
	M	0.004	0.015	0.008	0.019	0.022	0.041	0.019	0.043	0.028	0.055	0.041	0.062
	E	0.003	0.019	0.012	0.020	0.024	0.038	0.023	0.044	0.029	0.051	0.041	0.068
2	F	0.062	0.073	0.147	0.266	0.211	0.324	0.276	0.455	0.401	0.688	0.462	0.742
	M	0.066	0.069	0.156	0.245	0.200	0.331	0.276	0.398	0.389	0.694	0.454	0.737
	E	0.057	0.068	0.166	0.245	0.198	0.375	0.285	0.412	0.386	0.713	0.466	0.747
3	F	0.345	0.407	0.583	0.682	0.676	0.821	0.762	0.860	0.782	0.899	0.812	0.941
	M	0.366	0.421	0.610	0.718	0.689	0.841	0.764	0.881	0.777	0.920	0.810	0.934
	E	0.378	0.410	0.593	0.714	0.693	0.838	0.747	0.874	0.786	0.917	0.798	0.946
4	F	0.747	0.762	0.883	0.967	0.923	0.981	0.922	0.947	0.951	0.987	0.966	0.993
	M	0.738	0.778	0.879	0.976	0.923	0.987	0.943	0.965	0.938	0.991	0.954	0.989
	E	0.743	0.767	0.901	0.977	0.918	0.978	0.932	0.956	0.943	0.983	0.955	0.985
5	F	0.926	0.945	0.946	0.973	0.962	1.000	0.979	1.000	0.993	1.000	0.995	1.000
	M	0.917	0.961	0.937	0.988	0.967	0.994	0.976	0.997	0.987	0.997	0.993	1.000
	E	0.931	0.960	0.939	0.995	0.958	0.980	0.973	1.000	0.988	1.000	0.991	0.998

为了定量地描述估计结果, 定义估计的变化点 $\{i_1, i_2, \dots, i_k\}$ 与真实的变化点 $\{j_1, j_2, \dots, j_k\}$ 之间的距离 $m = \max\{|i_1 - j_1|, \dots, |i_k - j_k|\}$. 在表 1 中, $m = 0$ 表示估计的变化点与真实的变化点完全一致, $m \leq 1$ 表示允许有距离为 1 的容差.

从表 1 中可以得出如下结论:

(1)从表格中数据的纵向变化可知, $\Delta\mu/\sigma$ 是影响检测正确率的决定因素. 当 $\Delta\mu/\sigma$ 很小时, 难以可靠地检测到变化点; 随着 $\Delta\mu/\sigma$ 的增大, 检测正确率迅速提高. 只要 $\Delta\mu/\sigma \geq 5$, 即使两变化点间的序列长度很短, 仍然可以得到可靠的 ($>90\%$) 的检测结果.

(2)从表格中数据的横向变化可知, 当 L 较小时 (<6), 对检测正确率有一定的影响. L 越小, 越难以检测, 需要更大的 $\Delta\mu/\sigma$ 才能得到可靠的检测结果. 随着 L 的增大, 这种影响可以忽略.

(3)改变点的位置对检测正确率几乎没有影响. 不论改变点位于序列的前端、中间或后端, 都得到几乎相

同的检测正确率.

实验 2

仿真条件设置如下: 脉冲幅度序列长度为 715, 其中有 14 个变化点, 每段序列的起止位置和均值如表 2 所示. 添加方差为 σ^2 零均值高斯白噪声. 记所有变化点的幅度变化量的均值为 $\overline{\Delta\mu}$, 对 $\overline{\Delta\mu}/\sigma$ 不同取值情况, 分别进行 1500 次 Monte Carlo 仿真. 仿真结果用平均正确率 P_{tave} 和平均错误率 P_{fave} 来表示. 记真实的变化点的数量为 N_r , 检测到的变化点的数量为 N_d , 其中与真实变化点的距离 m (定义与实验 1 相同) 满足一定容差的点的数量为 N_c , 定义

$$P_{tave} = N_c / N_r \times 100\% \quad (11)$$

$$P_{fave} = (N_d - N_c) / N_r \times 100\% \quad (12)$$

在容差为 $\{0, 1, 2, 3\}$ 的情况下得到的 P_{tave} 和 P_{fave} 分别如图 3(a) 和 (b) 所示. 图 4(a) ~ (d) 分别给出了 $\overline{\Delta\mu}/\sigma$ 不同取值下, 一次仿真中的处理结果.

表 2 脉冲幅度序列每段的起止位置和均值

起止位置	1	33	49	113	155	261	325	389	444	460	524	588	604	620	652
位置	~ 32	~ 48	~ 112	~ 154	~ 260	~ 324	~ 388	~ 443	~ 459	~ 523	~ 587	~ 603	~ 619	~ 651	~ 715
均值	4.50	5.10	3.40	2.60	4.00	2.70	3.20	3.80	5.80	2.50	5.00	4.00	3.50	3.00	4.00

从图 3 和图 4 中可以看出, 循环二分算法在能够以较高的性能实现对多个变化点的检测和估计. 该算法能够适应不同幅度变化量和不同长度的脉冲序列, 当

幅度的变化量与噪声水平相比较小时, 能够可靠地检测出多个不同均值的序列片段, 并准确地估计出对应的变化点. 随着噪声方差的增大, 检测性能有所下降.

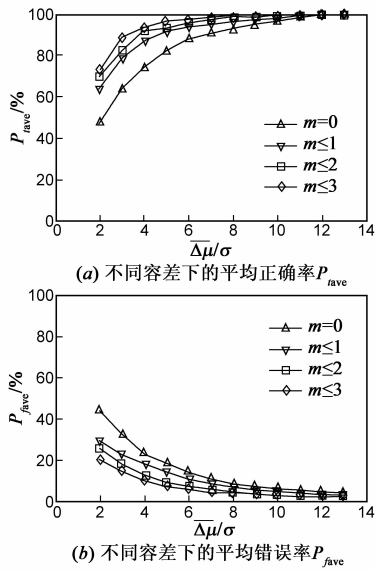
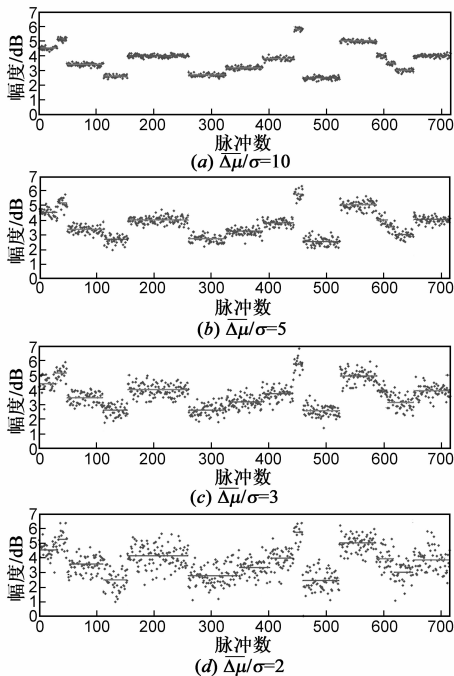
图3 算法性能随 $\Delta\mu/\sigma$ 的变化曲线

图4 不同平均信噪比条件下脉冲幅度序列变化点的检测结果

一方面,较大的噪声方差使得均值之间的差异变得不再明显,特别是序列很短时,容易造成变化点的漏检测;另一方面,噪声的增大导致对变化点的估计不准确,不同均值的序列片段之间的边界在噪声的影响下变得模糊不清,此时,循环二分算法能够在统计的意义下检测出均值差异,但是难以准确地判断出边界周围的脉冲的归属。事实上,当噪声较强时,人眼在直观上也无法确定这些脉冲的归属,因此,有理由认为循环二分算法得到了令人满意的结果。

6 结论

本文提出了利用脉冲幅度信息提取多功能雷达基本波形的的方法,建立了幅度序列的统计变化点模型,引入生物染色体分析中的循环二分算法来检测并估计幅度变化点.该方法能够很好地适应多功能雷达信号的特点,在幅度变化量与噪声水平可比拟的情况下,仍然能够得到高精度的提取结果。

在实际应用中,复杂信号环境会对本文方法的应用产生一定的影响.当脉冲密度很高时,脉冲相互叠加会造成幅度测量的不准确;不适当的信号分选可能引入其他辐射源的脉冲,造成幅度序列出现“毛刺”现象.此时,可以通过滤波来消除或减小这些影响.当接收机的动态范围不足时,容易造成饱和失真,此时,可以采用对数接收机来扩展动态范围,由于本文的方法只需要相对幅度,因此能够直接对对数接收机的输出进行处理。

参考文献

- [1] 卢建斌,胡卫东,郁文贤.基于协方差控制的相控阵雷达资源管理方法[J].电子学报,2007,35(3):402-408.
LU Jian-bin, HU Wei-dong, YU Wen-xian. Resource management algorithms based on covariance control for phased array radars[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 402-408. (in Chinese)
- [2] Sergio S, Tarantino M. Multifunction Array Radar: System Design and Analysis[M]. Norwood, MA: Artech House, 1994. 213-254.
- [3] 马爽,王莹桂,柳征,等.基于序列比对的多功能雷达搜索规律识别方法[J].电子学报,2012,40(7):1434-1439.
MA Shuang, WANG Ying-gui, LIU Zheng, et al. A method for search schema recognition of multifunction radars based on sequence alignment[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(7): 1434-1439. (in Chinese)
- [4] Snevski N. Syntactic Modeling of Multi-function Radars[D]. Hamilton: McMaster University, 2005.
- [5] 刘海军,樊响,李悦,等.多功能雷达建模中的雷达字提取技术研究[J].国防科技大学学报,2010,32(2):91-96.
LIU Hai-jun, FAN Yun, LI Yue, et al. Research on extracting of radar words in modeling of multi-function radar[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(2): 91-96. (in Chinese)
- [6] Kauppi J, Martikainen K, Ruotsalainen U. Hierarchical classification of dynamically varying radar pulse repetition interval modulation patterns[J]. Neural Networks, 2010, 23(10): 1226-1237.
- [7] 卢建斌,胡卫东,郁文贤.多功能相控阵雷达实时任务调度研究[J].电子学报,2006,34(4):732-736.

- LU Jian-bin, HU Wei-dong, YU Wen-xian. Study on real-time task scheduling of multifunction phased array radars[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(4): 732 - 736. (in Chinese)
- [8] Olshen A, Venkatraman E. Circular binary segmentation for the analysis of array-based DNA copy number data[J]. Biostatistics, 2004, 5(4): 557 - 572.
- [9] Venkatraman E, Olshen A. A faster circular binary segmentation algorithm for the analysis of array CGH data[J]. Bioinformatics, 2007, 23(6): 657 - 663.
- [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. (in Chinese)
- [11] 何学辉, 吴兆平, 吴顺君. 一种任意阵的方向图模值综合方法[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2292 - 2296.
HE Xue-hui, WU Zhao-ping, WU Shun-jun. Pattern synthesis with desired magnitude resource for arbitrary arrays[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2292 - 2296. (in Chinese)
- [12] Page S. A test for a change in a parameter occurring at an unknown point[J]. Biometrika, 1955, 42(3): 248 - 252.

- [13] Sen A, Srivastava M. On test for detecting change in mean [J]. Annals of Statistics, 1975, 3(1): 98 - 108.
- [14] Siegmund D. Boundary crossing probabilities and statistical applications[J]. Annals of Statistics, 1986, 14(2): 361 - 404.

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



柳 征 男, 1978 年生于江西瑞昌. 现为国防科技大学电子科学与工程学院副研究员, 博士. 主要研究方向为综合电子战系统与技术.

E-mail: nudtlz@163.com