

引用格式:薛磊,黄中瑞,刘照龙.基于周期样本图重构的雷达PRI调制类型识别算法研究[J].信息对抗技术,2023,2(2):75-89. [XUE Lei, HUANG Zhongrui, LIU Zhaolong. Research on radar PRI modulation type recognition algorithm based on periodic sequence pattern reconstruction[J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(2):75-89. (in Chinese)]

# 基于周期样本图重构的雷达PRI调制类型识别算法研究

薛磊\*,黄中瑞,刘照龙

(国防科技大学电子对抗学院,安徽合肥 230037)

**摘要** 为提升对雷达脉冲重复间隔(pulse repetition interval, PRI)的分析性能,提出了一种基于周期样本图重构的雷达PRI调制类型识别算法。首先,建立了雷达PRI调制模型,分析了不同调制类型的信号特点;其次,利用到达时间(time of arrival, TOA)多阶差分序列估计了雷达PRI调制周期,并基于直方图算法重构了PRI周期样本图;然后,以PRI周期样本图为基础,提出了5个PRI调制特征实现PRI调制类型识别;该方法不仅能够提升PRI调制类型的识别准确率,而且对于干扰脉冲特别是脉冲丢失具有很强的稳健性;最后,仿真实验表明了所提方法的有效性。

**关键词** 脉冲丢失;脉冲重复间隔调制周期;PRI周期样本图;PRI调制类型识别

**中图分类号** TN 98

**文章编号** 2097-163X(2023)02-0075-15

**文献标志码** A

**DOI** 10.12399/j.issn.2097-163x.2023.02.007

## Research on radar PRI modulation type recognition algorithm based on periodic sequence pattern reconstruction

XUE Lei\*, HUANG Zhongrui, LIU Zhaolong

(College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract** In order to improve the performance of radar pulse repetition interval(PRI) analysis, this paper proposed a PRI modulation type recognition algorithm based on periodic sequence pattern reconstruction. Firstly, the radar PRI modulation model was established, and the characteristics of different modulation types were analyzed. Secondly, the time of arrival (TOA) multi-order difference sequence was used to estimate the radar PRI modulation period, and the PRI periodic sequence pattern was reconstructed based on the histogram algorithm. Then, based on the PRI periodic sequence pattern, five PRI modulation features were proposed to identify the PRI modulation types. This method can not only improve the recognition accuracy of PRI modulation type, but also has strong robustness to interference pulse and pulse missing. Finally, simulation results were presented to verify the efficiency of the proposed method.

**Keywords** pulse missing; pulse repetition interval(PRI) modulation period; PRI periodic sequence pattern; PRI modulation type recognition

## 0 引言

雷达脉冲重复间隔(pulse repetition interval, PRI)是指雷达发射信号相邻脉冲的到达时间差(time difference of arrival, TDOA),PRI 是雷达信号的主要参数之一,也是雷达信号最为重要、最为关键的参数<sup>[1-2]</sup>。PRI 不仅与雷达最大无模糊探测距离密切相关,而且对目标速度的测量性能也起着至关重要的作用。实际工作中,不同用途的雷达其 PRI 变化范围、调制类型各不相同。通过识别 PRI 的典型值和调制类型,能够研判雷达的基本功能、推测雷达当前的工作模式,为雷达威胁分析、对抗措施制定提供技术支撑。特殊情况,对 PRI 进行精细分析还能实现雷达型号甚至是个体的识别。然而,由于雷达 PRI 的变化范围大、调制类型多,即使同一部雷达其 PRI 也可能出现“多样并存”的现象,这给雷达 PRI 分析,特别是 PRI 调制类型识别、典型值提取等增加了很大难度。因此,雷达 PRI 分析一直是雷达侦察领域的难点和重点,也是众多学者广泛关注的热点<sup>[3-5]</sup>。

最早的雷达 PRI 调制类型识别是采用直方图方法统计各个典型值出现的数目,并依据直方图呈现的形状基于人工方法进行判决,该方法不仅分析效率低而且识别准确度也不尽人意。2004 年,王伟等<sup>[6]</sup>提出了基于 TDOA 矩阵的 PRI 调制类型识别方法,主要思路是:根据 TDOA 矩阵的逆矩阵结构推测 PRI 调制类型,该方法不仅能够实现 PRI 调制类型的自动识别,而且能够估算特定时间段少量脉冲的丢失数目和具体位置。文献[7]在文献[6]的基础上,进一步给出了基于 TDOA 矩阵识别 PRI 调制类型的理论推导。文献[6-7]的不足之处是:仅适用于 PRI 固定和 PRI 参差两种调制类型的识别;另外,该方法涉及矩阵求逆问题,在接收脉冲序列较多时,对数据存储资源和计算资源提出了很高的要求,因此无法应用于实际工作场景。

不同的 PRI 调制类型,其变化规律有着本质的区别,通过分析相互之间的差异点,基于特征提取的 PRI 调制类型识别方法受到了广泛关注<sup>[8-10]</sup>。所用特征包括 sp 曲线的最大值、等比值、连续性参数等,然而这些方法仍然存在适用 PRI 调制类型少,对脉冲丢失率的稳健性差等问

题。2018 年,朱永成等<sup>[11]</sup>研究了基于典型 PRI 序列的重点雷达信号快速靶向识别,与传统 PRI 识别方法不同的是,该方法先利用数据库中重点雷达目标的典型 PRI 序列与实际接收脉冲序列进行模板匹配处理,若达到预先设置的阈值则将匹配的脉冲抽取出来,既能实现雷达信号的识别,又完成了多源脉冲序列的分选。但该方法要求掌握待识别信号的先验信息,因此实际应用具有一定的局限性。

近年来,随着人工智能技术的不断发展,很多学者将其应用在了 PRI 调制类型识别上包括决策树<sup>[12-13]</sup>(decision tree)、卷积神经网络<sup>[14-15]</sup>(CNN)、递归神经网络<sup>[16-17]</sup>(RNN)、长短时记忆网络<sup>[18-19]</sup>(LSTM)等。相比于传统方法,人工智能技术在 PRI 调制类型识别上具有识别准确率高、对脉冲丢失率稳健性强等优势。但也存在相应的问题,比如网络模型训练需要大数据进行支撑、识别效果与样本选取质量密切相关、网络模型具有不可解释性等。2021 年,孟磊等<sup>[20]</sup>研究了基于 LSTM 的雷达 PRI 调制模式识别算法,提出了丢失脉冲重构、数据长度规整、PRI 归一化等预处理方法,设计了参数特征自动提取及 PRI 调制类型一体化识别的循环卷积网络,实现了 PRI 的高准确率识别,对脉冲丢失以及小样本数据具有良好的识别效果,因此具有较强的抗噪性和鲁棒性。但该方法对数据长度有严格要求,常用的数据长度规整处理容易破坏实际 PRI 内在的调制周期,影响网络的识别效果,同时也限制了网络应用的灵活性,而且这种缺陷是大多数深度神经网络都存在的。

总的来说,现有方法主要是采用传统的分析思维来解决 PRI 调制类型识别问题,即直接利用脉冲序列的 PRI 值或者 PRI 时序特征(有时进行一些必要的 PRI 预处理,包括:异常值删除、脉冲丢失补偿、PRI 归一化、数据长度规整)送入不同的分类器,实现 PRI 调制类型的识别,这类方法没有从 PRI 全局视野提取 PRI 变化规律的本质,因此存在对干扰脉冲、脉冲丢失不稳健,识别效果不佳等问题。为避免上述方法的不足,本文提出一种基于周期样本图重构的雷达 PRI 调制类型识别算法。首先,重构脉冲序列的周期样本图,不仅能够给出 PRI 调制周期框架信息,而且可以估算单个周期内所有 PRI 的典型值以及相

互之间的排序信息,这种精确化的周期样本图能够描述整个脉冲序列的全局信息,而且受脉冲丢失因素的影响较小;其次,基于不同调制类型PRI的物理形成机制,利用周期样本图有针对性的提取精细化时域特征信息实现PRI调制类型识别,由于识别对象为周期样本图而非整个脉冲序列,故计算复杂度低;另外,通常情况下,周期样本图对脉冲丢失现象并不敏感,因此相应的PRI调制类型识别准确率也比较高。

与传统分析方法相比,本文所提方法的优点概述如下:给出了一般化的PRI周期样本图重构方法,能够适用固定、抖动、参差、排定、滑变、正弦、驻留等常规调制类型,应用场景更加广泛;在实现PRI调制类型识别的同时,能够给出典型的

PRI信号样式(PRI周期样本图),为雷达信号参数分析结果自动生成提供了便利;能够估算脉冲序列的脉冲丢失率,为分析当前电磁环境或者评估侦察设备性能提供了一定的参考,因此更便于实际工程的应用。

## 1 PRI调制模型及特点

随着雷达技术的不断发展,其信号特征越来越复杂,对应的PRI调制类型越来越多样。目前,雷达信号PRI常见的调制类型包括:固定、抖动、参差、排定、滑变、正弦、驻留7种,如图1所示,下面针对每一类型进行简要阐述<sup>[21]</sup>。需要说明的是,在建立PRI调制类型数学模型时,不考虑干扰脉冲、脉冲丢失等非理想因素。

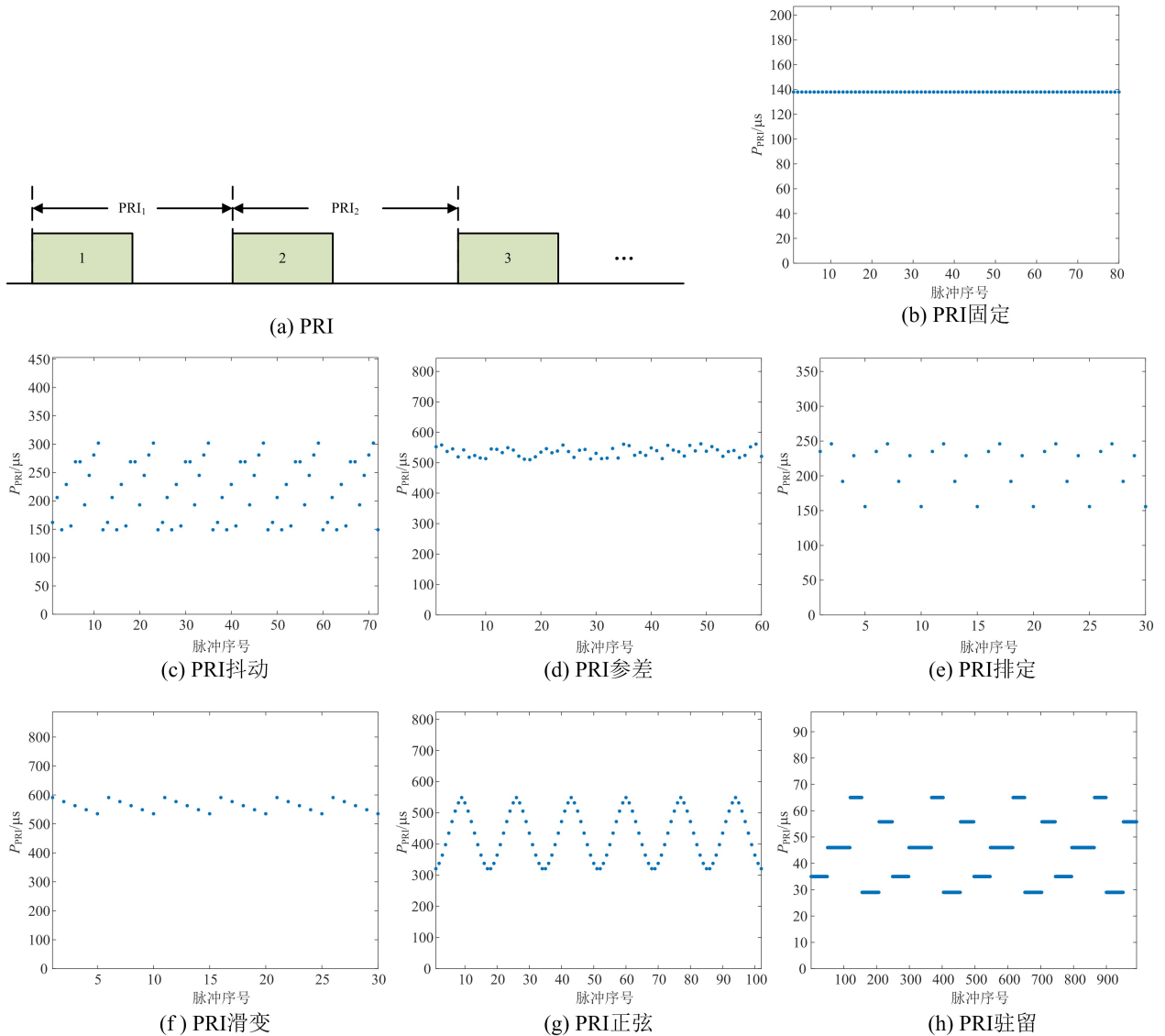


图1 PRI及PRI调制类型示意图

Fig.1 Schematic diagram of PRI and PRI modulation type

### 1.1 PRI 固定

PRI 固定是指雷达在一段时间内,信号的 PRI 保持不变,数学模型为:

$$P_{\text{PRI}_n} \triangleq c \quad (1)$$

式中,  $P_{\text{PRI}_n}$  表示第  $n$  个脉冲的 PRI 值,  $c$  为某一固定常数。PRI 固定示意图如图 1(b)所示。

PRI 固定调制类型的特点:脉冲的 PRI 值在雷达工作的某段时间内保持不变,受各种测量误差的影响, PRI 值有小范围浮动。在对其分析时应把握:1) PRI 典型值的个数为 1;2) 同一 PRI 值脉冲的标号索引具有连续性。

### 1.2 PRI 抖动

PRI 抖动是指雷达 PRI 在一个较窄的范围内快速、随机变化,变化范围通常在中心值的 5%~10%,数学模型为:

$$P_{\text{PRI}_n} \triangleq c + \Delta_n \quad (2)$$

式中,  $\Delta_n$  为第  $n$  个脉冲的抖动量,  $\Delta_n$  是一个随机值。PRI 抖动示意图如图 1(c)所示。

PRI 抖动调制类型的特点:脉冲的 PRI 值无规律变化,不同脉冲的 PRI 值没有相关性。在对其分析时应把握:PRI 变化不具有周期的框架结构,这是与其他调制类型最大的区别。

### 1.3 PRI 参差

PRI 参差是指雷达发射信号采用若干个顺序排列的 PRI( $\{c_1, c_2, \dots, c_M\}$ ),并且这些 PRI 具有周期重复性,数学模型为:

$$P_{\text{PRI}_n} \triangleq c_m, \begin{cases} m = \text{mod}(n, M), \text{mod}(n, M) \neq 0 \\ m = M, \text{mod}(n, M) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\{c_1, c_2, \dots, c_M\}$  为一个调制周期内的 PRI 典型值,  $M$  为参差数。PRI 参差示意图如图 1(d)所示。

PRI 参差调制类型的特点:脉冲的 PRI 值变化具有周期性,单个周期内不同 PRI 值的排列顺序固定不变。在对其分析时应把握:1) 单个周期内 PRI 值一般互不相同;2) 单个周期内 PRI 数目一般不超过 8;3) 单个周期内个 PRI 值变化一般不具有特定的规律,比如线性变化、正弦变化等。

### 1.4 PRI 排定

PRI 排定是指雷达信号 PRI 的多个值周期性地变化,变化规律与 PRI 参差类似。PRI 排定示意图如图 1(e)所示。

PRI 排定调制类型的特点:脉冲的 PRI 值变

化具有周期性,单个周期内不同 PRI 值的排列顺序固定不变,与 PRI 参差变化规律类似。在对其分析时应把握与 PRI 参差的区别:1) 单个周期内 PRI 值允许部分相同;2) 单个周期内 PRI 数目一般大于 8。

### 1.5 PRI 滑变

PRI 滑变是指雷达信号的 PRI 在两个极值之间周期性地连续变化,根据具体的变化规律不同, PRI 滑变包括单向单滑、单向双滑、双向单滑、双向双滑 4 种类型,本文主要以单向单滑为研究对象,数学模型为:

$$\begin{cases} P_{\text{PRI}_n} \triangleq c_m, \begin{cases} m = \text{mod}(n, M), \text{mod}(n, M) \neq 0 \\ m = M, \text{mod}(n, M) = 0 \end{cases} \\ c_m = c + (m - 1)\Delta, m = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $c$  和  $\Delta$  为某一固定值,  $\Delta$  的正负决定了单个周期内 PRI 的变化为单调递增还是单调递减,  $M$  为一个调制周期内的 PRI 数目。PRI 滑变示意图如图 1(f)所示。

PRI 滑变调制类型的特点:脉冲的 PRI 值变化具有周期性,单个周期内不同 PRI 值的排列顺序固定不变。在对其分析时应把握与 PRI 参差的区别:1) 单个周期内相邻 PRI 值的变化间隔固定;2) 单个周期内 PRI 值的变化方向不变,即  $\text{sp}$  绝对值较大;3) 单个周期内 PRI 数目没有特殊的限制。

### 1.6 PRI 正弦

PRI 正弦是指雷达信号的 PRI 在两个极值之间呈正弦周期变化,数学模型为:

$$\begin{cases} P_{\text{PRI}_n} \triangleq c_m, \begin{cases} m = \text{mod}(n, M), \text{mod}(n, M) \neq 0 \\ m = M, \text{mod}(n, M) = 0 \end{cases} \\ c_m = c + d \cos(\omega m + \varphi), m = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $c$  和  $d$  为某一固定值,  $\omega$  为正弦变化类型的角频率,  $\varphi$  为初始相位。PRI 滑变示意图如图 1(g)所示。

PRI 正弦调制类型的特点:脉冲的 PRI 值变化具有周期性,单个周期内不同 PRI 值的排列顺序固定不变。在对其分析时应把握:1) 单个周期内 PRI 值的变化具有对称性;2) 单个周期内 PRI 值的变化方向相互制衡,即  $\text{sp}$  绝对值近似为 0。

### 1.7 PRI 驻留

PRI 驻留是指雷达信号的 PRI 在某个数值



上工作一段时间后又转到另一个数值, PRI 驻留又称驻留并转换或者脉组参差, 数学模型为:

$$\begin{cases} P_{\text{PRI}_n} \triangleq c_m, & \begin{cases} m = \text{mod}(n, M), \text{mod}(n, M) \neq 0 \\ m = M, \text{mod}(n, M) = 0 \end{cases} \\ c_m = \begin{cases} c_1, m = 1, 2, \dots, M_1 \\ c_2, m = M_1 + 1, \dots, M_2 \\ \vdots \\ c_K, m = M_{K-1} + 1, \dots, M \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\{c_1, c_2, \dots, c_K\}$  和  $\{M_1, M_2, \dots, M\}$  为固定值。PRI 滑变示意图如图 1(h) 所示。

PRI 驻留调制类型的特点: 脉冲的 PRI 值变化具有周期性, 单个周期内不同 PRI 值的排列顺序固定不变。在对其分析时应把握: 1) PRI 典型值的个数为多个; 2) 同一 PRI 值脉冲的标号索引具有连续性。其中, 第二点是 PRI 驻留与其他周期性调制类型的最大区别。

## 2 PRI 周期样本图重构

由于环境干扰、装备性能、人为操作等各方面因素的影响, 实际侦收脉冲序列不可避免地会面临干扰脉冲、脉冲丢失、PRI 测量误差等问题。为提升 PRI 分析性能, 需要对接收脉冲序列进行一定的预处理。

### 2.1 脉冲序列预处理

由于 PRI 测量误差与设备性能有关系, 因此, 脉冲序列预处理主要考虑脉冲丢失和干扰脉冲 2 个方面。脉冲丢失时是指受噪声、接收机门限等因素的影响, 造成真实脉冲未被检测出来而造成的缺失, 脉冲丢失对于 PRI 值估计有着重要影响, 会造成虚假大 PRI 值的增多, 对于 PRI 分析造成困难。干扰脉冲与脉冲丢失相反, 是指在无脉冲时刻出现虚假脉冲 TOA, 会造成虚假小 PRI 值的增多, 对于 PRI 分析造成干扰。脉冲丢失和干扰脉冲的出现具有一定的随机性, 利用一定的预处理算法可减弱其对 PRI 分析的影响。比如, 可以利用多参数联合去交织的方法对原始脉冲序列进行稀释, 减小干扰脉冲形成的概率, 该方法的主要思想是: 同一时间段、同一方位区域、同一工作频段、同一脉宽范围, 不同雷达辐射源同时进入侦察设备的脉冲数目是有限的, 因此利用多参数对接收到的脉冲序列进行预分选, 从而剔除部分干扰脉冲; 对于脉冲丢失可以利用

PRI 值修正算法实现丢失脉冲的补偿。

需要说明的, 由于本文所提方法是基于脉冲序列的各阶 TDOA 实现 PRI 周期样本图重构, 并非依赖具体的 PRI 信息, 因此与传统方法不同的是, 除 PRI 驻留外, 所提方法不需要对接收脉冲序列进行过多的预处理, 相关预处理的作用只是适当减小所提方法的计算量, 而非必要的数据处理步骤。

从第 1 节的分析可知, PRI 驻留与其他调制类型有着重大区别, 主要是 PRI 驻留调制周期的重复数目远小于单个调制周期内 PRI 典型值的重复数目, 这将使单个调制周期内 PRI 的分布更易受非理想因素的干扰, 从而对 PRI 驻留调制类型的分析产生影响。主要表现是: 过多的干扰脉冲使得 PRI 调制周期的估计出现偏差, 易出现无法提取调制周期从而误判为 PRI 抖动, 本部分主要对干扰脉冲进行预处理。

干扰脉冲 TOA 与真实脉冲 TOA 有着本质的区别, 即大多数情况下真实脉冲 TOA 与前后脉冲 TOA 的一阶差分近似相等, 而干扰脉冲不具有这种性质, 因此可以利用如下准则, 排除 PRI 驻留的干扰脉冲。以第  $n$  个脉冲为例, 计算其前后的 PRI 值:

$$\begin{cases} P_{\text{PRI}_{n-1}} = T_{\text{TOA}}(n) - T_{\text{TOA}}(n-1) \\ P_{\text{PRI}_n} = T_{\text{TOA}}(n+1) - T_{\text{TOA}}(n) \\ n = 2, 3, \dots, N-1 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $T_{\text{TOA}}(n)$  表示脉冲序列的第  $n$  个脉冲的 TOA。如果  $|P_{\text{PRI}_{n-1}} - P_{\text{PRI}_n}| > 2\sigma$ , 则将  $T_{\text{TOA}}(n)$  从原始脉冲序列中删除, 否则保留, 其中  $\sigma$  为 TOA 测量误差。脉冲丢失对 PRI 驻留调制类型的影响, 主要在于 PRI 周期样本图的构建上, 本文将在第 4.1 节对此问题进行详述。

为实现对 PRI 调制类型的准确识别, 需要从全局把握脉冲序列 PRI 的变化规律, 减弱干扰脉冲、脉冲丢失等不良因素对 PRI 分析的影响。最为直观的想法就是根据接收的脉冲序列反推出雷达信号单个周期内 PRI 的具体调制规律, 这个规律不是指 PRI 的调制类型, 而是单个周期内所有 PRI 值的变化规律, 包含 PRI 典型值以及典型值的排列顺序 2 个方面, 本文将能够反映以上 2 个方面信息的单个周期 PRI 序列称为 PRI 周期样本图<sup>[22]</sup>。与传统 PRI 调制周期(有时也称周期框架)和 PRI 典型集构造不同的是, PRI 周期样

本图包含更高维的信息,能够对雷达信号的 PRI 规律进行精细化描述。PRI 周期样本图不仅在 PRI 分选、PRI 调制类型识别、雷达工作模式研判上更具优势,而且对于 PRI 测量误差、估计误差具有更高的稳健性。

2021 年,文献[22]基于频繁 TDOA 集的抽取和扩展,并结合脉宽信息实现了 PRI 周期样本图重构,主要思想是:首先,利用直方图统计等方法确定一个典型的 PRI 值;然后,以此 PRI 对应的尾部脉冲到达时间为标志,选取紧邻 TDOA 出现数目最多的值作为下一个 PRI 典型值,以此类推,便可获得所需的 PRI 周期样本图。考虑到 PRI 调制周期对脉冲丢失、干扰脉冲具有更加稳健的适应能力,本文提出一种新的 PRI 周期样本图重构方法,具体包括 PRI 调制周期估计、PRI 周期样本图构造 2 个方面。

## 2.2 PRI 调制周期估计

对于上述 7 种 PRI 调制类型而言,除了 PRI 抖动外,其余 6 种均有明显的周期特性<sup>[23-25]</sup>。因此,开展调制周期估计对于 PRI 调制类型分析具

有十分重要的作用,除了可以用作区分 PRI 抖动变化类型的特征外, PRI 调制周期相对具体的 PRI 值对脉冲丢失具有更好的稳健性,可以为 PRI 周期样本图重构提供更为有力的基础。

### 2.2.1 调制周期分析基础

为了讨论的方便性,以 PRI 参差调制类型为例,假设雷达信号 PRI 的参差数为  $M$ ,单个周期 PRI 序列重复的数目为  $N'$ ,下面对 PRI 调制周期(为了方便,将其简记为  $PRI_{total}$ )和 PRI 各典型值出现的数目进行分析。理想情况下,脉冲序列中每个 PRI 值出现的数目为  $N'$ ,而  $PRI_{total}$  出现的数目为  $M(N'-1)$ ,假设脉冲丢失数为  $P$ ,最差情况下,  $PRI_{total}$  丢失的数目为  $2P$ ,当  $P \leq \lfloor \frac{MN'-M-N'}{2} \rfloor$  时,  $PRI_{total}$  的数目大于各个 PRI 典型值出现的频次,即  $M(N'-1)-2P \geq N'$ 。其中  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整。根据上述分析可知,  $PRI_{total}$  对各种不理想因素,特别是脉冲丢失具有更好的适应性。假设  $M=4, N'=3$ ,脉冲的丢失数  $P=2$ ,部分可能出现的脉冲序列如图 2 所示。

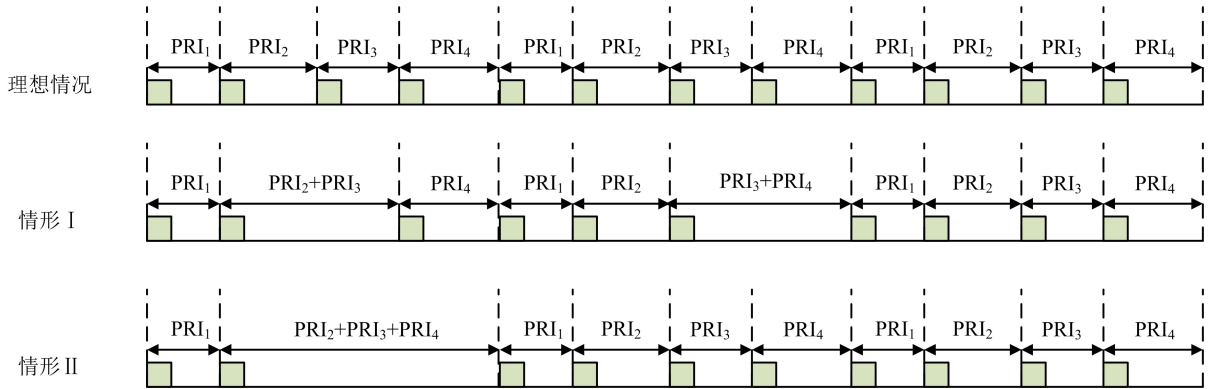


图 2 存在脉冲丢失的脉冲序列示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the pulse sequence in the existence of missing pulses

从图 2 可知,理想情况下的  $PRI_{total}$  数目为 8,情形 I 和情形 II 时  $PRI_{total}$  数目为 6,均大于最大的 PRI 典型值数目 3,说明了  $PRI_{total}$  特征的显著性,那么如何才能提取脉冲序列的具体值  $P_{PRI, total}$  呢?从图 2 可知,存在以下关系:

$$P_{PRI, total} = P_{PRI_1} + P_{PRI_2} + P_{PRI_3} + P_{PRI_4} \quad (8)$$

理想情况下,  $P_{PRI, total}$  为脉冲 TOA 的四阶差分;情形 I 时,  $P_{PRI, total}$  为脉冲 TOA 的四阶差分和三阶差分;情形 II 时,  $P_{PRI, total}$  为脉冲 TOA 的四阶差分和二阶差分;随着丢失率的增加,  $P_{PRI, total}$  也可能为脉冲 TOA 的一阶差分。考虑

到脉冲序列的实际丢失情形比较复杂, TOA 的不同阶差分(小于单个周期 PRI 典型值的数目)都有可能获取  $P_{PRI, total}$ ,同时兼顾  $P_{PRI, total}$  求解的稳健性,我们利用脉冲序列  $T_{TOA}$  的  $1 \sim (N-1)$  阶差分来估算  $P_{PRI, total}$ ,其中  $N$  为脉冲的序列长度,具体数学模型为:

$$T_{TDOA_n^{(l)}} = T_{TOA_{n+l}} - T_{TOA_n} \quad (9)$$

式中,  $n=1, 2, \dots, N-l; l=1, 2, \dots, N-1$ 。由于式(9)为 TOA 的多阶差分集合,不仅包含  $PRI_{total}$ ,而且包含  $PRI_{total}$  的各次谐波。理想情况下,第  $p$  次谐波的数目为  $M(N'-p)$ ,当  $N'$  较大

时,不仅  $PRI_{total}$  是脉冲序列的显著特征,  $PRI_{total}$  的各次谐波也是显著特征,而且数目一般远大于PRI各典型值出现的数目。为了减小  $PRI_{total}$  谐波影响,下面给出一种稳健的  $P_{PRI, total}$  估计方法。

### 2.2.2 $PRI_{total}$ 及其谐波集构建

首先,将  $T_{TDOA_n}^{(i)}$  进行升序排列,并将重排之后的TDOA集记为  $\Theta$ ,然后利用直方图方法统计  $\Theta$  集合内各个典型值及其出现的数目,并构造特征向量  $\mathbf{X}$  (按照各个典型值出现的频次,从第一行到最后一行进行了降序排列),维数为  $R' \times 2$ ,第一列为典型值,第二列为各典型值出现的频次,  $R'$  为  $\Theta$  集中所有互异典型值的数目。从2.2.1节的分析中可知,显著特征  $PRI_{total}$  及其谐波出现的频次较多,为此利用式(10)选取  $R$  个有效典型值构建  $PRI_{total}$  及其谐波集,并将其记为  $\{t_r\}, r=1, 2, \dots, R$ 。

$$\begin{cases} t_r = \mathbf{X}(r, 1) \\ \mathbf{X}(r, 2) \geq \frac{\eta}{r-1} \sum_{r'=1}^{r-1} \mathbf{X}(r', 2) \\ r = 2, 3, \dots, R \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\eta$  为人工辅助参数,一般取值在  $1/2 \sim 2/3$  之间。如果最终  $R < 3$ , 则认为该序列不存在调制周期框架, PRI调制类型为抖动。如果  $R \geq 3$ , 则

需要估算  $P_{PRI, total}$ 。

### 2.2.3 $P_{PRI, total}$ 估计

根据2.2.1和2.2.2节的分析可知,  $\{t_r\}$  包含了  $PRI_{total}$  及其各次谐波, 特殊情况下, 可能仅仅包含  $PRI_{total}$  的各次谐波, 而不包含真实的  $PRI_{total}$ 。因此, 直接选取  $\{t_r\}$  的最小值作为  $PRI_{total}$  的估算值并不精确。这里采用差分序列最大公约数提取法估算  $P_{PRI, total}$ , 具体方法如下:

首先, 利用  $\{t_r\}$  求解差分序列  $\{t'_r\}$ , 模型为:

$$t'_r = |t_{r+1} - t_r|, r = 1, 2, \dots, R-1 \quad (11)$$

其次, 求解集合  $\{t'_r\}$  的最大公约数, 并可获得  $PRI_{total}$  的估计值:

$$P_{PRI, total} = \gcd(\{t'_r, r = 1, 2, \dots, R-1\}) \quad (12)$$

式中,  $\gcd(\cdot)$  表示计算最大公约数函数。

### 2.3 PRI周期样本图构造

在完成PRI调制周期  $P_{PRI, total}$  的估算后, 需要构造PRI周期样本图, 具体思路为: 利用2.2.3节估计的  $P_{PRI, total}$  对实际脉冲序列的TOA进行切分, 具体如图3所示的片段I至片段IV, 虽然每个切分片段都有TOA丢失现象, 但是综合来看, 这4个片段能够提供理想情况下单个PRI调制周期内所有的TOA信息, 因此可以重构PRI周期样本图, 下面给出具体求解过程。

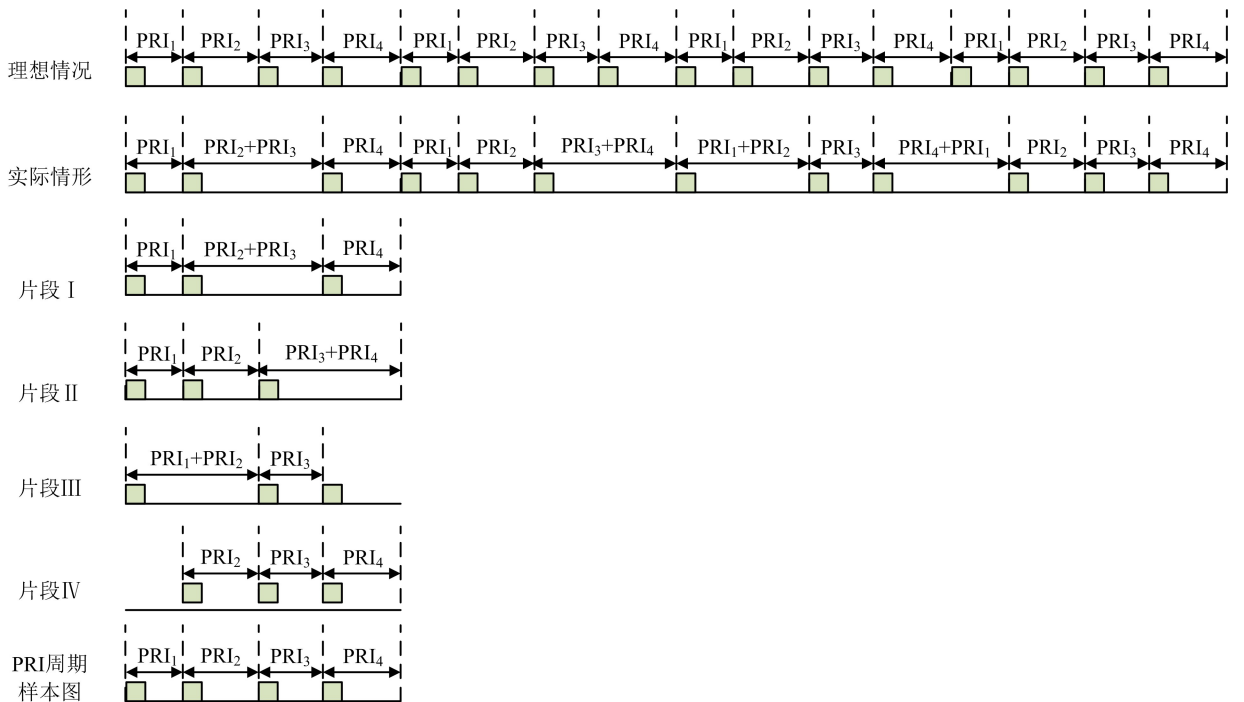


图3 PRI周期样本图构造示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the construction of PRI periodic sequence pattern

首先,将整个脉冲序列的 TOA 以  $P_{\text{PRI},\text{total}}$  为周期进行切分,构造单个周期 TOA 集合  $\{q_n\}$ 。实现这个目标可以用  $P_{\text{PRI},\text{total}}$  的整数倍对实际脉冲序列的 TOA 值进行遍历,但该方法的计算量与脉冲序列的总体持续时间  $T_{\text{TOA},\text{total}}$  有密切关系,具体需要进行的 TOA 比较次数  $S$  为:

$$S = M \frac{T_{\text{TOA},\text{total}}}{P_{\text{PRI},\text{total}}} \quad (13)$$

很显然,当雷达天线扫描或者由于其他原因造成脉冲序列长时间没有信号时,式(13)会做很多的无用比较,造成计算资源的浪费。为此,提出一种基于求余运算的单个周期 TOA 集合构造方法,具体为:

$$q_n = \text{mod}(T_n, P_{\text{PRI},\text{total}}) \quad (14)$$

式中,  $T_n$  为第  $n$  个脉冲的到达时间,很显然,式(14)的计算量仅与脉冲序列中的脉冲个数有关,与脉冲的具体持续时间无关,在脉冲大面积丢失的情形下具有更高的计算效率。

在得到单个周期 TOA 集合  $\{q_n\}$  后,可以采用 TOA 直方图统计方法给出单个周期内所有有效的 TOA 信息为  $\{T'_1, T'_2, \dots, T'_{M+1}\}$ , 其中  $T'_{M+1} = T'_1 + P_{\text{PRI},\text{total}}$ , 采用式(15)构造单个周期内所有顺序排列的 PRI 值:

$$P_{\text{PRI}_m} = T'_{m+1} - T'_m, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$

需要说明的是:1) 式(15)估计所得 PRI 周期样本图与真实样本图相比,只有起始脉冲的 PRI 值可能不同,各个 PRI 的排列顺序并未发生变化,以 PRI 参差为例,真实样本图为  $P_{\text{PRI}_1} \rightarrow P_{\text{PRI}_2} \rightarrow \dots \rightarrow P_{\text{PRI}_M}$ , 估计样本图为  $P_{\text{PRI}_1} \rightarrow P_{\text{PRI}_3} \rightarrow P_{\text{PRI}_4} \rightarrow \dots \rightarrow P_{\text{PRI}_M} \rightarrow P_{\text{PRI}_1} \rightarrow P_{\text{PRI}_2}$ ; 2) 由于在构造 PRI 周期样本图时,所提方法是先估算各个脉冲的  $T_{\text{TOA}}$ , 然后基于差分运算获取单个周期内各个  $P_{\text{PRI}}$  值,因此所提方法对于各个典型  $P_{\text{PRI}}$  值的大小、数目、排列方式均无要求,这比  $P_{\text{PRI}}$  值填充算法或者是文献[22]的方法更具优越性。

### 3 PRI 调制类型识别

在得到 PRI 周期样本图后,便可利用样本图信息完成 PRI 调制类型的识别,相比于利用整体的脉冲序列, PRI 周期样本图可以很好地减弱脉冲丢失、干扰脉冲等方面的影响,周期样本图内各个 PRI 之间的相对关系更为准确, PRI 调制特

征更为稳健,因此 PRI 调制类型识别效果也会更好。下面分别讨论特征提取和类型识别。

#### 3.1 PRI 调制特征提取

有效的特征提取是实现 PRI 调制类型识别的重要基础<sup>[26-28]</sup>, 本文根据第 1 节各个 PRI 调制类型的特点分析, 提出以下 5 个基本特征, 用其实现 7 种 PRI 调制类型的识别。

##### 3.1.1 典型值数目 $C_1$

将 PRI 周期样本图中典型值的数目定义为特征  $C_1$ , 具体模型为:

$$C_1 = \text{Num}(T_{\text{pattern}}) \quad (16)$$

式中,  $\text{Num}(\cdot)$  表示提取集合长度的函数,  $T_{\text{pattern}} = \{P_{\text{PRI}_1}, P_{\text{PRI}_2}, \dots, P_{\text{PRI}_M}\}$  表示 PRI 周期样本图的顺序脉冲集合。利用特征  $C_1 = 1$  可以将 PRI 固定类型识别出来; 另外, 当  $C_1 = 2$  时, 可以将 PRI 参差识别出来。

##### 3.1.2 典型值重复性参数 $C_2$

首先, 将  $T_{\text{pattern}} = \{P_{\text{PRI}_1}, P_{\text{PRI}_2}, \dots, P_{\text{PRI}_M}\}$  按照 PRI 值的大小进行升序排列, 获得集合  $T'_{\text{pattern}} = \{P_{\text{PRI}'_1}, P_{\text{PRI}'_2}, \dots, P_{\text{PRI}'_{M'}}\}$ ; 然后, 采用直方图对  $T'_{\text{pattern}}$  的典型值进行统计, 并给出各个典型值出现频次的特征向量  $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_{M'}]^T$ , 其中  $M'$  表示  $T'_{\text{pattern}}$  中互异典型值的数目,  $(\cdot)^T$  表示矩阵或者向量的转置操作。典型值重复性参数  $C_2$  定义为:

$$C_2 = \frac{1}{M'} \sum_{i=1}^{M'} d_i \quad (17)$$

PRI 驻留是指雷达信号的 PRI 在某个数值上工作一段时间后又转到另一个数值, 通常情况下  $C_2 \geq 4$ ; PRI 正弦具有一定的对称性, 因此  $d$  的大多数元素为 2, 少部分数值为 1, 故典型值重复性参数  $C_2 \geq 1.5$ ; 其他 PRI 调制类型的  $C_2$  接近为 1。利用典型值重复性参数  $C_2$  可以很好地将 PRI 驻留和 PRI 正弦识别出来。

##### 3.1.3 二阶差分均值 $C_3$

首先, 对  $T_{\text{pattern}} = \{P_{\text{PRI}_1}, P_{\text{PRI}_2}, \dots, P_{\text{PRI}_M}\}$  进行两次差分运算, 可以获得二阶差分序列为:  $\mathbf{e} = [e_1, e_2, \dots, e_{M-2}]^T$ , 然后求解序列  $\mathbf{e}$  的均值获得特征  $C_3$ :

$$C_3 = \frac{1}{M-2} \sum_{i=1}^{M-2} |e_i| \quad (18)$$

PRI 滑变的是指雷达信号的 PRI 等间隔变化, 因此  $C_3$  近似为 0, 而其他调制类型的  $C_3$  一般



远大于 0, 利用二阶差分均值  $C_3 \leq 5\sigma$  可以将 PRI 滑变识别出来, 其中  $\sigma$  为 TOA 测量误差。

### 3.1.4 sp 曲线特征 $C_4$ 和 $C_5$

为了消除 PRI 周期样本图起始脉冲不确定性对 sp 曲线特征的影响, 首先, 将  $T_{\text{pattern}} = \{P_{\text{PRI}_1}, P_{\text{PRI}_2}, \dots, P_{\text{PRI}_M}\}$  扩充为  $T''_{\text{pattern}} = \{P_{\text{PRI}_1}, P_{\text{PRI}_2}, \dots, P_{\text{PRI}_M}, P_{\text{PRI}_1}, P_{\text{PRI}_2}, \dots, P_{\text{PRI}_{M-1}}\}$ ; 然后, 引入序列  $\{v_i\}$ , 第  $i$  个元素定义为:

$$v_i = \begin{cases} -1, & T''_{\text{pattern}}(i+1) - T''_{\text{pattern}}(i) < -\eta \\ 0, & |T''_{\text{pattern}}(i+1) - T''_{\text{pattern}}(i)| \leq \eta \\ 1, & T''_{\text{pattern}}(i+1) - T''_{\text{pattern}}(i) > \eta \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $T''_{\text{pattern}}(i)$  表示集合  $T''_{\text{pattern}}$  的第  $i$  个元素,  $\eta$  为人工辅助参数, 一般取 PRI 统计直方图离散化间隔和 TOA 测量误差的最大值,  $i = 1, 2, \dots, 2M-2$ 。

根据式(19)可以定义 sp 曲线特征的最小值  $C_4$  为:

$$C_4 = \min_{i'=0,1,\dots,M-1} \left| \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} v_{i+i'} \right| \quad (20)$$

sp 曲线特征的最大值  $C_5$  为:

$$C_5 = \max_{i'=0,1,\dots,M-1} \left| \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} v_{i+i'} \right| \quad (21)$$

利用 sp 曲线特征最值  $C_4$  和  $C_5$ , 能够更好地将正弦与参差、排定区分开, 可进一步提升 PRI 调制类型的准确率; 对于参差和排定可以利用  $C_1$  进行区分,  $C_1 \leq 8$  为参差, 否则为排定。

### 3.2 PRI 调制类型识别实现

利用 3.1 节提出的特征参数对 PRI 调制类型进行识别, 具体的分类器可以采用决策树、朴素贝叶斯、支持向量机、随机森林等, 本文主要采用决策树分类器, 实施步骤如图 4 所示。

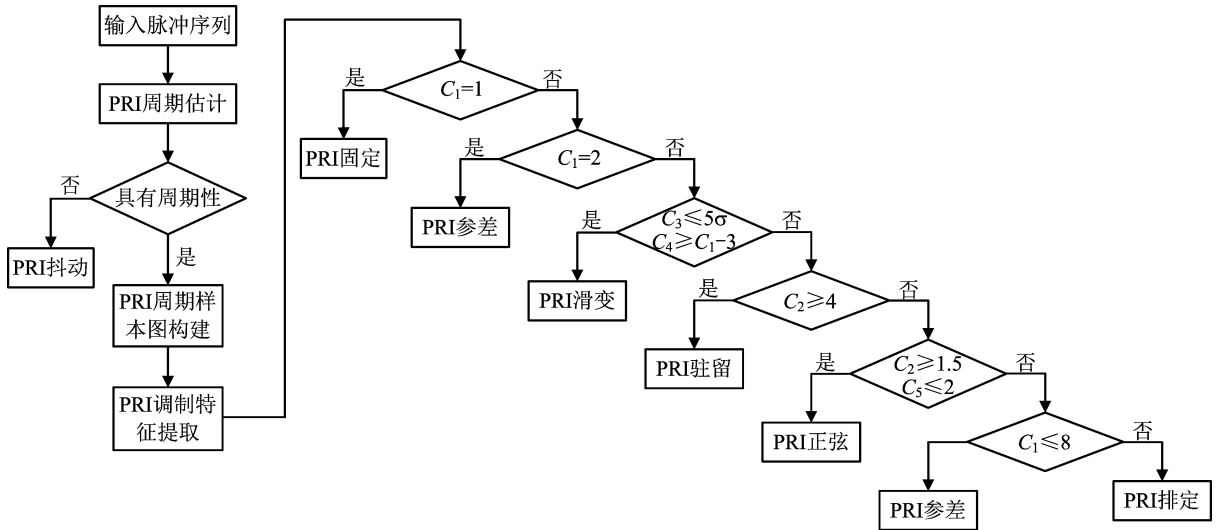


图 4 PRI 调制类型识别示意图

Fig. 4 Schematic diagram of PRI modulation type recognition

## 4 扩展讨论

为了进一步提升所提方法的性能, 本节重点讨论 PRI 驻留的周期样本图修正方法和具有周期调制特性的脉冲丢失率估算两个问题。

### 4.1 PRI 驻留的周期样本图修正

从第 1 节的分析可知, PRI 驻留与其他调制类型有着明显的不同, 主要区别是: PRI 驻留在一个调制周期内含有的 PRI 数目比较多, 通常为数百个。在脉冲序列接收时间一定时, 获取的脉冲序列中, PRI 调制周期重复的次数并不多, 因此脉冲丢失主要体现在单个周期内的 PRI 样本上, 而

且脉冲丢失率越大这种现象越严重。其在 PRI 周期样本图构建上的影响是: 1) 估计 PRI 的数目减少; 2) 脉冲丢失造成的虚假 PRI 值增多。这不仅会制约 PRI 调制类型识别的准确率, 还会影响脉冲丢失率的估算, 为此需要对 PRI 驻留的周期样本图进行修正处理, 详述如下:

首先, 对原始样本图  $T_{\text{pattern}} = \{P_{\text{PRI}_1}, P_{\text{PRI}_2}, \dots, P_{\text{PRI}_M}\}$  中各个元素进行直方图统计, 构建集合  $\bar{T}_{\text{pattern}} = \{u_1, u_2, \dots, u_M\}$ , 并假设  $\bar{T}_{\text{pattern}}$  的元素已按照升序进行了重排; 其次, 研判  $T_{\text{pattern}}$  中的元素是否为虚假脉冲, 以  $T_{\text{pattern}}$  中第  $i$  个元素和  $\bar{T}_{\text{pattern}}$  第  $j$  个元素为例, 具体方法为:

$$\begin{cases} a_{i,j} = \lfloor \frac{P_{\text{PRI}_i}}{u_j} \rfloor \\ b_{i,j} = \text{mod}(P_{\text{PRI}_i}, u_j) \end{cases} \quad (22)$$

如果  $b_{i,j} \leq 3\sigma$ , 则令  $f_{i,j} = a_{i,j}$ ; 如果  $|b_{i,j} - u_{i,j}| \leq 3\sigma$ , 则令  $f_{i,j} = a_{i,j} + 1$ ; 反之, 则令  $f_{i,j} = 0$ ; 然后, 需要根据  $f_{i,j}$  的值对  $T_{\text{pattern}}$  中的  $P_{\text{PRI}}$  值进行修正, 如果  $f_{i,j}$  不为 0, 则删除  $T_{\text{pattern}}$  中第  $i$  个元素  $P_{\text{PRI}_i}$ , 并在此位置补充  $f_{i,j}$  个  $\bar{T}_{\text{pattern}}$  中第  $j$  个元素  $u_j$ , 如果  $f_{i,j}$  为 0, 不进行修正处理; 最后, 遍历  $T_{\text{pattern}}$  和  $\bar{T}_{\text{pattern}}$  中所有的元素即可。需要说明的是: 该方法只能处理同一 PRI 值的脉冲丢失问题, 无法处理不同 PRI 值的脉冲丢失问题。

#### 4.2 脉冲丢失率估算

如果能够根据接收脉冲的数目和总体到达时间估算出相应的脉冲丢失率, 不仅可以评判当前的电磁环境复杂性, 而且对于评估侦察设备的性能有着很好的支撑作用。首先, 基于获得的 PRI 周期样本图, 计算理想情况下脉冲序列应该含有的脉冲数  $\bar{N}$  为:

$$\bar{N} = C_1 \frac{T_{\text{TOA}}(N) - T_{\text{TOA}}(1)}{P_{\text{PRI, total}}} \quad (23)$$

式中,  $T_{\text{TOA}}(N)$  和  $T_{\text{TOA}}(1)$  分别表示脉冲序列的最后一个和第一个脉冲的 TOA。根据式(23)可以估算脉冲序列的丢失率为:

$$\gamma = 1 - \frac{N}{\bar{N}} \quad (24)$$

式(23)~(24)仅仅适用于具备周期性的调制类型, 并不适用于 PRI 抖动的脉冲丢失率估算。对于 PRI 抖动的脉冲丢失率估算, 需要利用抖动中心  $P_{\text{PRI, ave}}$  这一先验信息, 随着脉冲的不断丢

失, 虚假脉冲不断增多, 而且这些脉冲通常为真实  $P_{\text{PRI}}$  值的整数倍, 从而造成实测  $P_{\text{PRI}}$  均值的不断增大, 为此对于 PRI 抖动的丢失率估算, 可以近似表达为:

$$\gamma = 1 - \frac{P_{\text{PRI, ave}}}{P_{\text{PRI}', \text{ave}}} \quad (25)$$

式中,  $P_{\text{PRI}', \text{ave}}$  为实测 PRI 的均值。

需要说明的是: 对所提方法进行适当的改进, 便可运用于多源信号的分选问题<sup>[29-30]</sup>; 具体改进方法是在 2.2 节中改变 PRI 调制周期的提取策略, 考虑到篇幅的限制, 这里就不做过多的赘述。

## 5 仿真分析

为说明所提方法的有效性, 本节从 PRI 调制周期估计、PRI 周期样本图重构、PRI 调制类型识别以及脉冲丢失率估算等方面开展试验分析。考虑的 PRI 调制类型为: 固定、抖动、参差、排定、滑变、正弦、驻留 7 种类型, 文中进行 PRI 周期样本图构造时的直方图统计参数设置为: 离散化间隔为  $6 \mu\text{s}$ , 统计直方图合并门限为  $8.4 \mu\text{s}$ , 其他部分的直方图统计参数设置为: 离散化间隔为  $2 \mu\text{s}$ , 统计直方图合并门限为  $1.4 \mu\text{s}$ 。直方图统计时异常值删除门限为当前区间典型值数目小于所有区间典型值数目最大值的 0.3 倍。所有仿真中 TOA 测量误差在  $\pm 100 \text{ ns}$  以内。

### 5.1 有效性验证

假设脉冲序列中存在的干扰脉冲数目占比为 10%, 脉冲丢失率为 55%, 蒙特卡洛实验次数为 100, 7 种 PRI 调制类型模拟仿真的参数设置如表 1 所列。

表 1 PRI 调制参数  
Tab. 1 Parameters of PRI modulation

类型	PRI 周期样本图(对于 PRI 抖动为中心值和抖动范围)/ $\mu\text{s}$	重复周期数目
PRI 固定	138	180
PRI 抖动	中心值 536, 抖动范围 $\pm 5\%$	160
PRI 参差	235/246/192/229/155.8	60
PRI 排定	162/206/149/229/155.8/269/269/193/245/281/302/149	60
PRI 滑变	591/577/563/549/535	60
PRI 驻留	35(50) # 46(69) # 65(36) # 29(52) 55.8(41)	10
PRI 正弦	$\left[435 + 120\cos\left(\frac{\pi}{2}(1.8; -0.2; 0.2)\right), 435 + 120\cos\left(\frac{\pi}{2}(0.4; 0.2; 1.8)\right)\right]$	60

表 2 列出了 6 种 PRI 调制类型(PRI 抖动除外)的周期估计结果,表 3 列出了 PRI 调制类型的识别结果,图 5 给出了 PRI 周期样本图的重构结果。从表 2、表 3 和图 5 可以看出,原始脉冲序列虽然受到了干扰脉冲、脉冲丢失等非理想因素的影响,所提方法仍能精确估计 PRI 调制周期,估计结果的平均误差小于  $1\ \mu\text{s}$ 。另外,本文所提方法在 PRI 调制周期估算的基础上,还能实现不同调制类型的 PRI 周期样本图重构;除了 PRI 驻留外,其他调制类型的周期样本图与真实值基本

一致(除了起始脉冲的不同外);PRI 驻留受脉冲丢失影响较大,重构的 PRI 周期样本图出现了虚假脉冲,通过采用 4.1 节的修正算法,能够显著削弱脉冲丢失的影响,减少虚假脉冲的数目,具体如图 5(e)所示。另外,从表 3 可以看出,在脉冲丢失一半以上时,所提方法仍能实现 PRI 调制类型的准确识别,除了 PRI 抖动出了 1 次识别错误外,其他 PRI 调制类型的识别完全正确。综上可知,所提方法在 PRI 周期估计、周期样本图重构、调制类型识别方面均具有优越的性能。

表 2 PRI 调制周期估计结果

Tab. 2 Estimation result of PRI modulation period

	PRI 固定	PRI 参差	PRI 排定	PRI 滑变	PRI 驻留	PRI 正弦
真实值/ $\mu\text{s}$	138	1 057.80	2 609.80	2 815	11 059.80	7 280.87
估计值/ $\mu\text{s}$	137.98	1 057.78	2 609.79	2 814.97	11 059.80	7 280.86

表 3 PRI 调制类型识别结果

Tab. 3 Recognition result of PRI modulation type

	估算 PRI 调制类型						
	PRI 固定	PRI 参差	PRI 排定	PRI 滑变	PRI 驻留	PRI 正弦	PRI 抖动
真实 PRI 调制类型	PRI 固定	100					
	PRI 参差		100				
	PRI 排定			100			
	PRI 滑变				100		
	PRI 驻留					100	
	PRI 正弦						100
	PRI 抖动	1					99

## 5.2 稳健性验证

为了进一步说明本文方法的稳健性,分析 PRI 随脉冲丢失率的变化,脉冲丢失率范围为 $[0, 0.9]$ ,离散化间隔为 0.05,共计 19 个点,其余仿真条件不变,在 PRI 调制类型识别准确率的性能分析方面,将文献[26]作为比较对象。

图 6 给出了 PRI 调制周期随脉冲丢失率的变化,可以看出在脉冲丢失率小于 75% 时,  $P_{\text{PRI, total}}$  的估计值接近为 0,基本上可以实现调制周期的准确估计。图 7 为 PRI 调制类型识别准确率随脉冲丢失率的变化,在脉冲丢失率小于 65% 时,所有 PRI 调制类型的识别准确率均在 90% 以上。在脉冲丢失率为 70% 时, PRI 调制类型的平均识别准确率为 94.86%,在脉冲丢失率

为 80% 时, PRI 调制类型的平均识别准确率为 75%,具体如图 7 中带有  $\times$  号标记的线条。图 8 为文献[26] PRI 调制类型识别准确率随脉冲丢失率的变化图,在脉冲丢失率小于 25% 的情况下(PRI 驻留除外,驻留在低脉冲丢失率情况下,受干扰脉冲的影响比较大。),所有 PRI 调制类型的识别准确率在 90% 以上;随着脉冲丢失率的增加, PRI 调制类型的识别准确率快速下降,当脉冲丢失率为 35% 时, PRI 调制类型的平均识别准确率为 84.20%,与所提算法相比性能相差较大。另外,所提方法适用于 7 种 PRI 调制类型的识别,而文献[26]仅适用于 5 种 PRI 调制类型的识别;综上分析,所提方法在 PRI 调制类型识别上具有综合的性能最优。

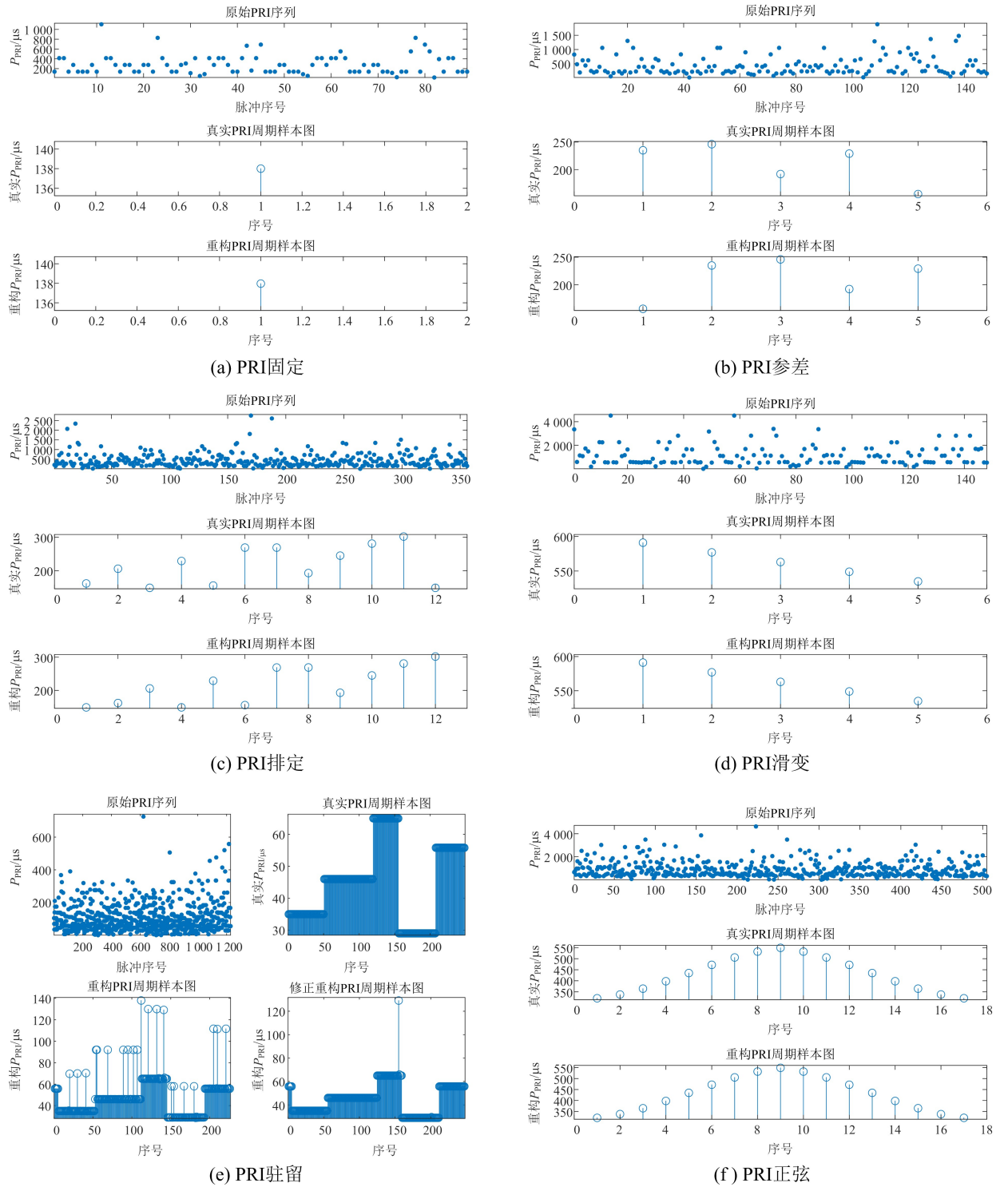


图5 重构的PRI周期样本图

Fig. 5 Reconstruction of the PRI periodic sequence pattern

图9为脉冲丢失率估计值随真实值的变化,从中可知,所有调制类型脉冲丢失率的估算值与真实值的变化趋势相同,只不过两者之间存在固定的误差,大约为0.1,这是因为原始脉冲序列混合了10%左右干扰脉冲的缘故,当不存在干扰脉冲,脉冲丢失率的估算值与真实值的误差将会接

近为0;另外,从图9可以看出,随着脉冲丢失率的增加,PRI驻留的脉冲丢失率估算值将会出现较大的偏差,这是因为脉冲丢失率越大,PRI驻留的样本周期图估算精度越低,具体表现为单个周期内脉冲PRI的序列构造不准确。包括PRI值和PRI数目。



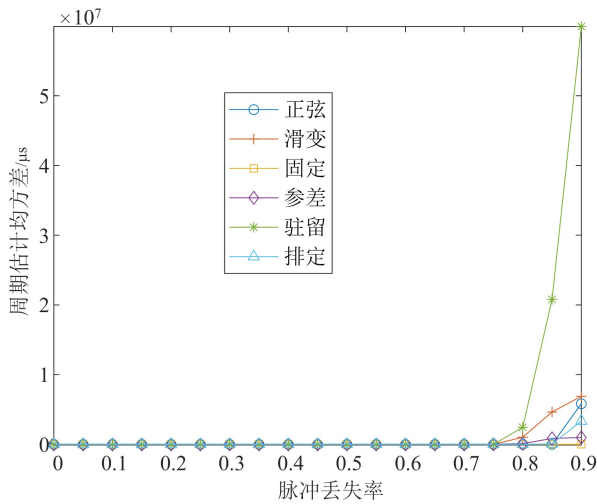


图6 PRI调制周期估计误差随脉冲丢失率的变化

Fig. 6 Estimation error of PRI modulation period versus pulse missing rate

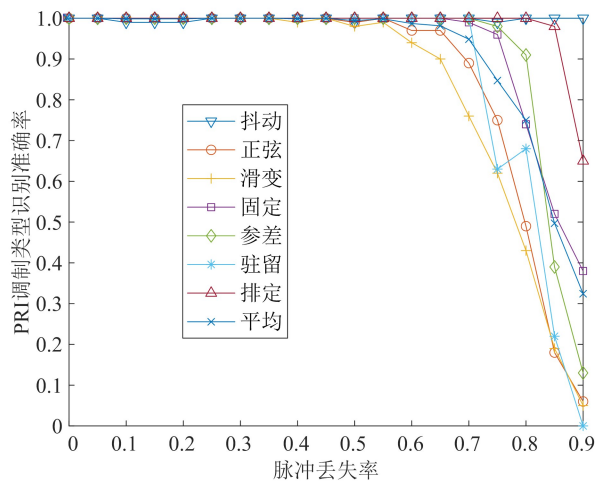


图7 本文方法PRI调制类型识别准确率随脉冲丢失率的变化

Fig. 7 Recognition accuracy of PRI modulation type versus pulse missing rate by using the proposed method

## 6 结束语

雷达PRI分析对于识别雷达型号和个体具有非常重要的作用,特别是雷达的PRI调制类型分析与雷达工作模式判别更是密切相关,为提升雷达PRI调制类型分析的准确性,本文提出了一种基于周期样本图重构的雷达PRI调制类型识别算法。首先,建立了雷达PRI调制模型,分析了相应的信号特点;其次,基于PRI调制周期估计重构了PRI周期样本图;然后,提出了5个PRI调制特征,并基于决策树算法实现了PRI调制类型的识别;最后,仿真实验表明,本文方法对干扰脉冲特别是脉冲丢失具有更强的稳健性,在干扰

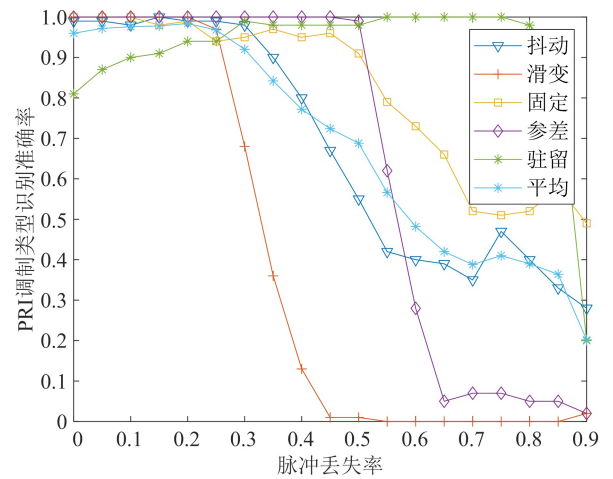


图8 文献[26]PRI调制类型识别准确率随脉冲丢失率的变化

Fig. 8 Recognition accuracy of PRI modulation type versus pulse missing rate by using the reference method

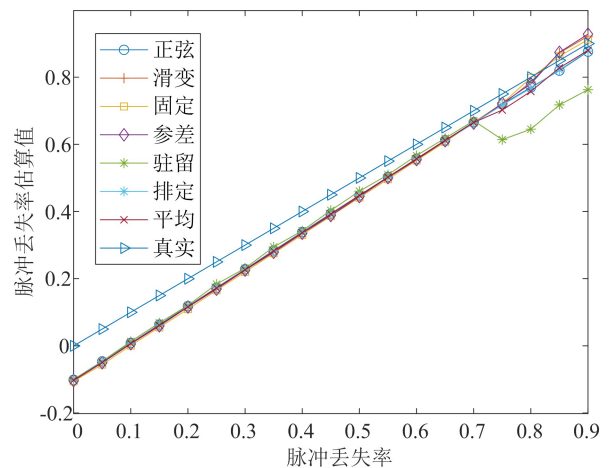


图9 脉冲丢失率的估算值随脉冲丢失率的变化

Fig. 9 Estimation of pulse missing rate versus pulse missing rate

脉冲为10%,脉冲丢失率在65%以内时,所有调制类型的识别准确率均在90%,当脉冲丢失率为70%以内时,PRI调制类型的平均识别准确率约为95%;另外,该方法还能估算脉冲序列的脉冲丢失率,为分析当前电磁环境或者评估侦察设备性能提供了一定的参考,在不考虑干扰脉冲的情况下,70%以内脉冲丢失率的估算误差接近为0。综上可知,理论分析和仿真实验表明了所提算法的优越性。

然而,现实的侦察环境并非仅仅包含单一的雷达辐射源,对于多源信号的PRI分选和分析仍是一个具有非常重要意义的课题。值得庆幸的是,所提方法经过适当的改进便可应用于多源信

号的环境,同时实现 PRI 分选和分析双重功能,但如何有效提升 PRI 分选的准确性和 PRI 分析的精确性仍然是后续要重点攻关的关键问题。

### 参 考 文 献

- [1] QU Q Z, WEI S J, WU Y, et al. ACSE networks and autocorrelation features for PRI modulation recognition[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24 (8): 1729-1733.
- [2] WEI S J, QU Q Z, WU Y, et al. PRI modulation recognition based on squeeze-and-excitation networks[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24 (5): 1047-1051.
- [3] 郭立民, 聂新文, 陈涛, 等. 基于注意力机制的雷达信号分选算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(7): 690-700.  
GUO Limin, NIE Xinwen, CHEN Tao, et al. Radar signal sorting algorithms based on attention mechanisms[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(7): 690-700. (in Chinese)
- [4] 杨翔, 顾洪宇. 基于到达时间差直方图的信号分选算法研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37 (11): 2762-2768.  
YANG Xiang, GU Hongyu. A signal sorting algorithm based on time difference of arrival histogram [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(11): 2762-2768. (in Chinese)
- [5] 郝云飞, 刘章孟, 郭福成, 等. 基于生成对抗网络的信号调制方式的开集识别[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2619-2624.  
HAO Yunfei, LIU Zhangmeng, GUO Fucheng, et al. Open-set recognition of signal modulation based on generative adversarial networks [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41 (11): 2619-2624. (in Chinese)
- [6] 王伟, 杨晓玲. 一种基于 TOA 差值矩阵的辐射源识别方法[J]. 航天电子对抗, 2004, 20(1): 48-51.  
WANG Wei, YANG Xiaoling. A method of radar emitter recognition based on TOA difference matrix [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2004, 20(1): 48-51. (in Chinese)
- [7] 张西托, 饶伟, 李长文. 基于 TOA 差值矩阵的雷达脉冲序列 PRI 识别方法[J]. 指挥控制与仿真, 2009, 31 (1): 33-37.  
ZHANG Xituo, RAO Wei, LI Changwen. PRI recognition methods of radar pulse sequences based on TOA difference matrix [J]. Command Control & Simulation, 2009, 31 (1): 33-37. (in Chinese)
- [8] GENCOL K, AT N, KARA A. A wavelet-based feature set for recognizing pulse repetition interval modulation patterns[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2016, 24 (4): 3078-3090.
- [9] 吴振强, 张国毅, 常硕. 雷达 PRI 调制样式特性曲线的识别[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(8): 127-132.  
WU Zhenqiang, ZHANG Guoyi, CHANG Shuo. Identification of radar PRI modulation style characteristic curve [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36 (8): 127-132. (in Chinese)
- [10] RYOO Y J, SONG K H, KIM W W. Recognition of PRI modulation types of radar signals using the autocorrelation [J]. IEICE Transactions on Communications, 2007(5): 1290-1294.
- [11] 朱永成, 潘继飞, 金天祥, 等. 基于典型 PRI 序列的重点雷达信号快速靶向识别[J]. 弹箭与制导学报, 2018, 38(2): 105-110.  
ZHU Yongcheng, PAN Jifei, JIN Tianxiang, et al. Fast target recognition of important radar signals based on PRI typical sequences [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2018, 38(2): 105-110. (in Chinese)
- [12] CHIROV D S, KANDAUROVA E O. Synthesis of informative features for recognition of the type of pulse repetition interval modulation of signals from radars [C]//Proceedings of the Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. [S.l.: s. n.], 2019: 1-6.
- [13] TANG Y W, HE M H, TANG X J, et al. Method for automatically identifying PRI patterns of complex radar signals [J]. The Journal of Engineering, 2019 (20): 6975-6978.
- [14] LI X Q, HUANG Z T, WANG F H, et al. Toward convolutional neural networks on pulse repetition interval modulation recognition [J]. IEEE Communications Letters, 2018(11): 2286-2289.
- [15] 张景云, 苏世游, 何新乐, 等. 一种基于全卷积神经网络的雷达 PRI 调制样式识别方法[J]. 电子信息对抗技术, 2020, 35(3): 40-45.  
ZHANG Jingyun, SU Shiyou, HE Xinle, et al. A method for the modulation pattern recognition of radar PRI based on fully convolutional neural network [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2020, 35 (3): 40-45. (in Chinese)
- [16] LI X Q, LIU Z M, HUANG Z T. Attention-based radar PRI modulation recognition with recurrent neural networks [J]. IEEE Access, 2020, 8: 57426-57436.
- [17] LI X Q, LIU Z M, HUANG Z T, et al. Radar emitter classification with attention-based multi-RNNs [J].

- IEEE Communications Letters, 2020(9): 2000-2004.
- [18] BIN Y, YANG Y, SHEN F M, et al. Describing video with attention-based bidirectional LSTM[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(7): 2631-2641.
- [19] ZHANG C J, LIU Y C, SI W J. PRI modulation recognition and sequence search under small sample prerequisite[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2023(99): 1-8.
- [20] 孟磊, 曲卫, 马爽, 等. 基于 LSTM 的雷达脉冲重复间隔调制模式识别[J]. 现代雷达, 2021, 43(1): 50-57.
- MENG Lei, QU Wei, MA Shuang, et al. Radar PRI modulation pattern recognition method based on LSTM[J]. Modern Radar, 2021, 43(1): 50-57. (in Chinese)
- [21] 王海, 唐波, 黄中瑞, 等. 雷达辐射源分析[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- WANG Hai, TANG Bo, HUANG Zhongrui, et al. Analysis of radar emitter[M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)
- [22] LIU Z M, KANG S Q, CHAI X M. Automatic pulse repetition pattern reconstruction of conventional radars[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2021, 15(5): 500-509.
- [23] 孟祥豪, 罗景青, 吴世龙. 一种小样本数脉冲信号的样本子图分选算法[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(5): 34-39.
- MENG Xianghao, LUO Jingqing, WU Shilong. A deinterleaving method of pulse signals with insufficient samples based on pulse sequence subpattern[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(5): 34-39. (in Chinese)
- [24] 许琪, 吴琳. 一种基于脉冲样本图的周期信号序列自提取方法[J]. 舰船电子对抗, 2018, 41(1): 66-70.
- XU Qi, WU Lin. A kind of periodic signal sequence self-extraction method based on pulse sample figure[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2018, 41(1): 66-70. (in Chinese)
- [25] LIU Z M. Online pulse deinterleaving with finite automata[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2020, 56(2): 1139-1147.
- [26] 陈晟, 姜秋喜, 潘继飞. 雷达 PRI 调制样式识别新方法[J]. 航天电子对抗, 2012, 28(1): 31-34.
- CHEN Sheng, JIANG Qiuxi, PAN Jifei. A novel method for the modulation type recognition of radar PRI[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2012, 28(1): 31-34. (in Chinese)
- [27] SHI Z Y, WU H, SHEN W D, et al. Feature extraction for complicated radar PRI modulation modes based on auto-correlation function[C]//Proceedings of IEEE Advanced Information Management, Communications, Electronic and Automation Control Conference. [S.l.: s. n.], 2016: 1617-1620.
- [28] GUO S Z, WHITE R E, LOW M. A comparison study of radar emitter identification based on signal transients[C]//Proceedings of IEEE Radar Conference. [S.l.: s. n.], 2018: 286-291.
- [29] AHMED M G S, TANG B. Sorting radar signal from symmetry clustering perspective[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(4): 690-696.
- [30] JIANG W, FU X J, CHANG J Y. Improved deinterleaving algorithm of radar pulses based on dual fuzzy vigilance ART[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020, 31(2): 303-311.

## 作者简介

### 薛磊

男, 1963 年生, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为信号处理、数据分析  
E-mail: eeixuelei@163.com



### 黄中瑞

男, 1988 年生, 博士, 讲师, 研究方向为阵列信号处理、MIMO 雷达信号处理、数据分析  
E-mail: 18756073857@163.com



### 刘照龙

男, 2001 年生, 本科生, 专业为侦察情报  
E-mail: 1502872325@qq.com



责任编辑 安蓓