

引用格式:朱永成,潘继飞,沈家煌,等.基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别[J].电光与控制,2018,25(8):78-83. ZHU Y C, PAN J F, SHEN J H, et al. Fast target recognition of key radar signals based on crystal oscillation characteristics[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(8): 78-83.

基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别

朱永成, 潘继飞, 沈家煌, 金天祥, 刘鑫

(国防科技大学电子对抗学院,合肥 230037)

摘要:针对传统的PRI分选算法难以有效识别PRI变化复杂的重点雷达信号的问题,提出基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别的方法。该方法避开常规PRI分选算法的分选流程,利用PRI之间的相关性对脉冲信号进行分选,可以对多目标同时识别。从PRI产生的原理着手考虑,PRI变化是否复杂对识别效果几乎没有影响。通过仿真与对比,验证该算法能够快速识别出重点雷达信号的脉冲序列,且对PRI变化复杂的雷达信号的识别效果较好。

关键词:晶振特征;重点雷达信号;快速靶向识别;多目标识别;相对晶振基本间隔

中图分类号:TN974 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.08.016

Fast Target Recognition of Key Radar Signals Based on Crystal Oscillation Characteristics

ZHU Yong-cheng, PAN Ji-fei, SHEN Jia-huang, JIN Tian-xiang, LIU Xin

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

Abstract: To solve the problem that the traditional PRI sorting algorithm has difficulty in effectively identifying the key radar signals with complex PRI changes, a method of fast target recognition of key radar signals based on the characteristics of crystal oscillation is proposed. This method avoids the sorting procedures of the conventional PRI sorting algorithms, and uses the correlation between the PRIs to sort the pulse signal. This method can identify multiple targets simultaneously. According to the principle of PRI generation, whether the PRI change is complex or not has little effect on the recognition result. Through simulations and comparison, it is proved that the proposed algorithm can rapidly identify the pulse sequence of the key radar signal, and get a better recognition result of the radar signal with complex PRI changes.

Key words: crystal oscillation characteristic; key radar signal; fast target recognition; multi-target recognition; basic interval between relative crystal oscillations

0 引言

目前,常规的雷达信号分选参数包括载频(RF)、到达角度(DOA)、脉宽(PW)以及脉冲重复间隔(PRI)等参数,选取合理的分选参数,才能从混叠的脉冲序列中分选出某部雷达信号的脉冲。然而,随着雷达技术的快速发展,频率捷变、重频抖动、捷变信号的应用已成为现在雷达的标配,尤其对于多功能雷达来说,参数往往是交叠的,另外,脉冲丢失现象常见以及会有几

部同型号的雷达同时工作,导致利用传统的分选参数难以快速有效分选识别出雷达信号。因此,寻找分选识别效果更佳参数以及开发新的算法,完成对雷达信号的快速识别具有一定的实际意义。对文献[1-3]进行分析,证明了晶振特征可以作为识别雷达信号的一个重要的特征参数,还需要进一步验证利用晶振特征识别重点雷达目标信号的效果。因此,提出利用雷达晶振参数重点雷达信号快速识别算法。

1 多功能雷达的PRI生成原理

1.1 脉冲信号的生成原理

多功能雷达信号的脉冲流主要是由利用频率合成技术的主振放大式发射机产生的,如图1所示。

收稿日期:2017-08-31

修回日期:2017-10-10

基金项目:国防预研基金(41101020207)

作者简介:朱永成(1992—),男,安徽五河人,硕士生,研究方向为雷达电子目标识别。

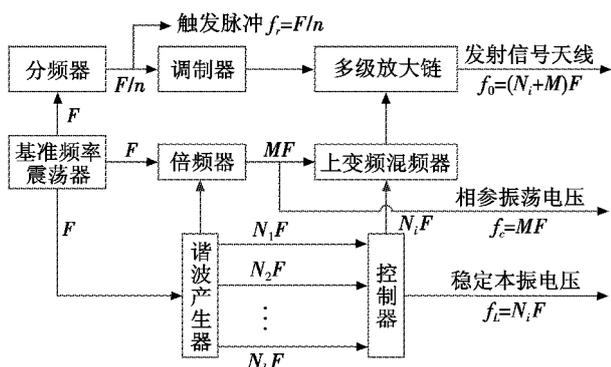


图 1 采用频率合成技术的主振放大式发射机原理图

Fig.1 Schematic diagram of the main vibrator transmitter using frequency synthesis techniques

雷达时钟信号(基准振荡频率)由基准频率振荡器(晶体振荡器)中的石英晶体振荡频率产生,脉冲信号的载频由基准振荡频率经过倍频器和混频器产生,PRI由基准振荡频率经过分频器产生。因此,RF和PRI可以认为是由石英晶体振荡频率产生的。

1.2 PRI 建模

PRI 产生的原理如图 2 所示。

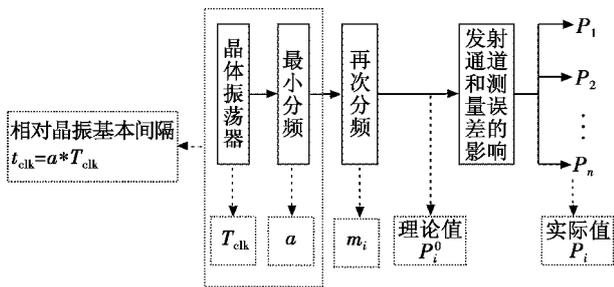


图 2 PRI 产生的原理图

Fig.2 Schematic diagram of PRI

因此 PRI 可表示为

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 a \\ m_2 a \\ \vdots \\ m_n a \end{bmatrix} \times T_{\text{clk}} + \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \Delta \varepsilon_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1^0 \\ P_2^0 \\ \vdots \\ P_n^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \Delta \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: P_i 为实际测得的PRI值; P_i^0 为分频后产生的理论值; T_{clk} 为基准晶振间隔,满足 $T_{\text{clk}} = 1/f_{\text{clk}}$,现在雷达采用的晶体振荡频率范围分布在几兆赫兹到几百兆赫兹^[2]; a 为最小分频数; m_i 是对相对晶体振荡频率的分频; $\Delta \varepsilon_i$ 是随机误差,包括信号生成链路的时间抖动(发射通道影响)以及测量误差的影响,一般是纳秒量级的,PRI是微秒量级的,一般忽略 $\Delta \varepsilon_i$ 对PRI的影响。

从式(1)可以看出,利用晶振特征完成对重点雷达信号的识别,高精度PRI测量是前提。文献[4]中的方法可以成功应用于纳秒量级精度的雷达PRI测量,文献[5]中的方法对时间间隔的测量精度可以达

到10ps量级。现有的PRI高精度测量技术满足本文的实际需求,通过以上对各参数量级的分析,对PRI的测量误差一般可以忽略不计。

2 基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别的处理流程

处理流程如图3所示,采用并行的数据处理方式,多个并行处理器同时利用不同的晶振特征对混叠的脉冲进行处理,每部重点雷达信号的快速识别与其他的雷达信号是否识别没有关系。无需对脉冲流进行大量的运算,每个支路只需运行识别与某一部重点雷达信号有关的运算。

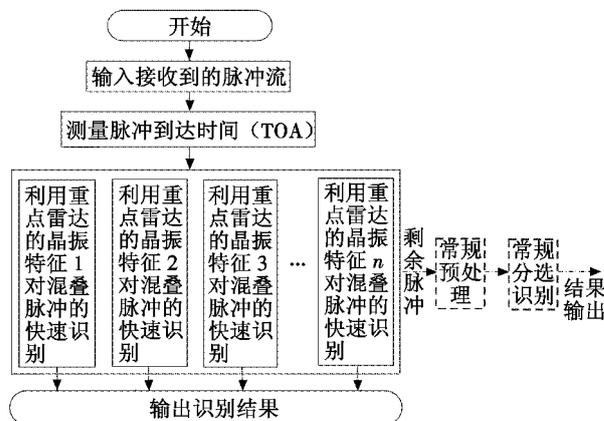


图 3 快速靶向识别的处理流程

Fig.3 Rapid targeting recognition process

2.1 基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别算法的基本原理

依据多功能雷达PRI生成的原理分析可知,PRI是由晶振基本间隔经过分频产生的,则式(1)可简要表示为

$$P_i = m_i a \times T_{\text{clk}} + \Delta \varepsilon_i = (m_i + \Delta \varepsilon_i / a T_{\text{clk}}) \times a T_{\text{clk}} = (m_i + b_i) \times a T_{\text{clk}} \quad (2)$$

$$b_i = \Delta \varepsilon_i / a T_{\text{clk}} \quad (3)$$

式中: m_i 是由分频电路产生的,为整数; $\Delta \varepsilon_i$ 的数量级远小于 $a T_{\text{clk}}$; b_i 的值接近于零。经过以上分析可知,对接收信号的脉冲流进行处理,若该脉冲流中含有某重点雷达信号,则脉冲流中将有一定数量的PRI和该雷达的相对晶振基本间隔接近整除;若全脉冲中不含有该雷达信号,则不具有该性质。

2.2 基于相对晶振基本间隔的重点雷达信号快速识别算法

将脉冲流中两个脉冲的到达时间相减,并以此间隔除以重点雷达信号的相对晶振基本间隔,记录连续整除的脉冲数。若连续整除的次数达不到设定的要求,则以其他的时间间隔继续进行以上步骤,直到满足

条件的时间间隔都进行了相关处理为止;若没有脉冲符合条件,则认为脉冲流中没有重点雷达信号。具体算法如图4所示。

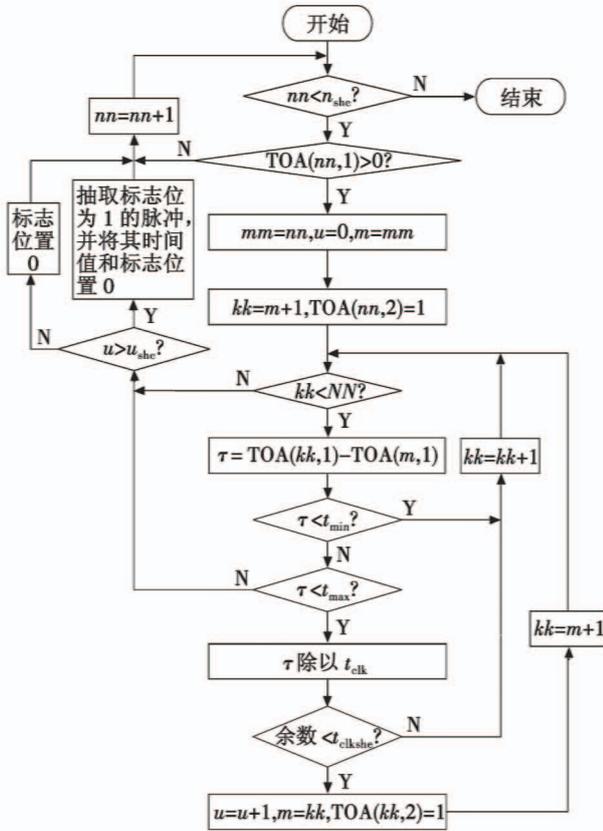


图4 基于相对脉冲基本间隔的重点雷达信号快速识别

Fig.4 Rapid identification of key radar signals based on the basic interval of the relative pulse

图中: τ 表示两个脉冲的时间差值; n_{she} 为预先设

表1 基于晶振特征的雷达基本参数设置

Table 1 Basic radar parameter setting based on crystal characteristics

雷达编号	晶振编号	振荡频率/MHz	晶振基本间隔/ μs	最小分频数	相对晶振基本间隔/ μs
多功能雷达1	晶振1	1.25	0.8	10	8
多功能雷达2	晶振2	10	0.1	100	10

表2 多功能雷达的工作参数设置

Table 2 Multi-function radar operating parameters setting

雷达编号	工作模式类型	周期内脉冲数	PRI变化类型	PRI参数设置/ μs	载频/MHz
多功能雷达1	工作模式1	2	固定	2000	1250
	工作模式2	4	参差	848,904,952,1000	3750
	工作模式3	4	抖动	1304~1600(共37个值)	2500
	工作模式4	12	三组变,组内脉冲数为4	640,672,704	1375
多功能雷达2	工作模式5	3	固定	1550	1000
	工作模式6	5	参差	960,1050,1160,1100,1290	1500
	工作模式7	4	抖动	1300~1500(共20个值)	1850
	工作模式8	5	重频联合变化	630,630,810,950,650	1300

PRI搜索法采用文献[6]中的算法,PRI搜索范围为600~2100 μs ,图5为PRI分选算法的分选结果,从中分选出32个不同的PRI值,实际只有两部雷达信号,

置的一个数。相对脉冲时间间隔在 t_{\min} 和 t_{\max} 之间,有大于 u_{she} 个连续脉冲时间间隔可以整除 t_{clk} ,则认为脉冲流中有重点雷达信号, t_{clk} 为相对晶振基本间隔,若余数小于门限值 t_{clk_she} ,则认为 τ 可以整除 t_{clk} 。

2.3 进一步识别重点雷达信号的工作状态

随着雷达技术的快速发展,多功能雷达的发展已然成为趋势,且符合实际需求。多功能雷达是可以同时执行搜索、多目标跟踪、导弹制导等多种工作任务的雷达。对多功能雷达的工作任务进行分析,每种工作任务需要相应的工作模式来完成。在不同的工作模式中参数是捷变的,多部同型号雷达的工作参数是相互交叉的。例如载频,同一个区域多部同型号多功能雷达的载频变化范围出现重叠,为避免雷达之间的相互干扰,某雷达在某工作模式下,采用的具体载频点是不同的。

3 计算机仿真分析

本文利用基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别,与常规的方法相比,该方法针对性更强,所需参数更少,算法简单,易于实现。为对比算法的识别效果,分别利用PRI搜索法和改进PRI变换法对脉冲流进行处理。

3.1 算法优越性

同一部多功能雷达有很多种工作模式,因工作任务不同,该雷达的工作模式随着工作任务进行切换,每种工作模式下,各种工作参数也不相同。表1和表2是对两部多功能雷达的参数设置。为方便讨论,将多功能雷达的工作模式简化,每个工作模式完整执行一个周期,就执行下一个工作模式,如此循环执行。

分选出来的PRI值是搜索范围内的一部雷达信号的一个PRI值或者连续几个PRI值的叠加;图6是改进的PRI变换算法对脉冲流的处理结果,采用文献[7]中的

算法,对算法中的参数设置如下: $\alpha=0.38, \beta=0.25, \gamma=3, \tau_{\min}=600, \tau_{\max}=21\ 400, K=5000, \xi_0=0.03$,该算法对于参差、组变或者抖动的雷达信号无能为力,当要识别的雷达信号中含有 PRI 抖动的雷达信号,没有固定的自重复周期,该算法对于这种复杂的雷达信号基本失去作用。经过分析,对于 PRI 变化复杂,且包含一定量的 PRI 抖动信号的情况,传统的 PRI 分选算法无法准确地对该雷达信号进行分选。

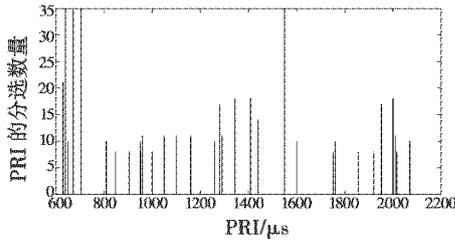


图 5 PRI 分选算法的分选结果

Fig. 5 Sorting results of PRI sorting algorithm

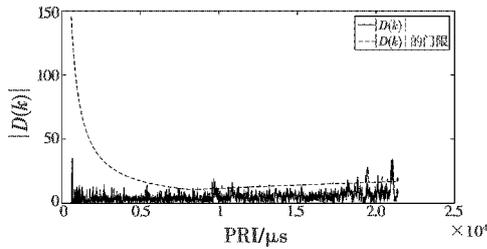


图 6 改进的 PRI 变换法的分选结果

Fig. 6 Results of the improved PRI transformation

图 7 为全脉冲的识别,从中可以看出,当脉冲流中的脉冲为理想值时,基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别算法对复杂的 PRI 雷达信号可以准确地识别。图 8 为利用载频对脉冲流进行一个预分选,再利用重点雷达信号的相对脉冲基本间隔对重点雷达信号的脉冲进行识别。

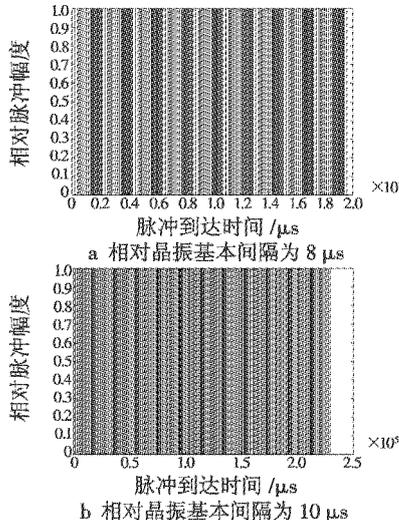


图 7 全脉冲的识别

Fig. 7 Recognition of overall pulses

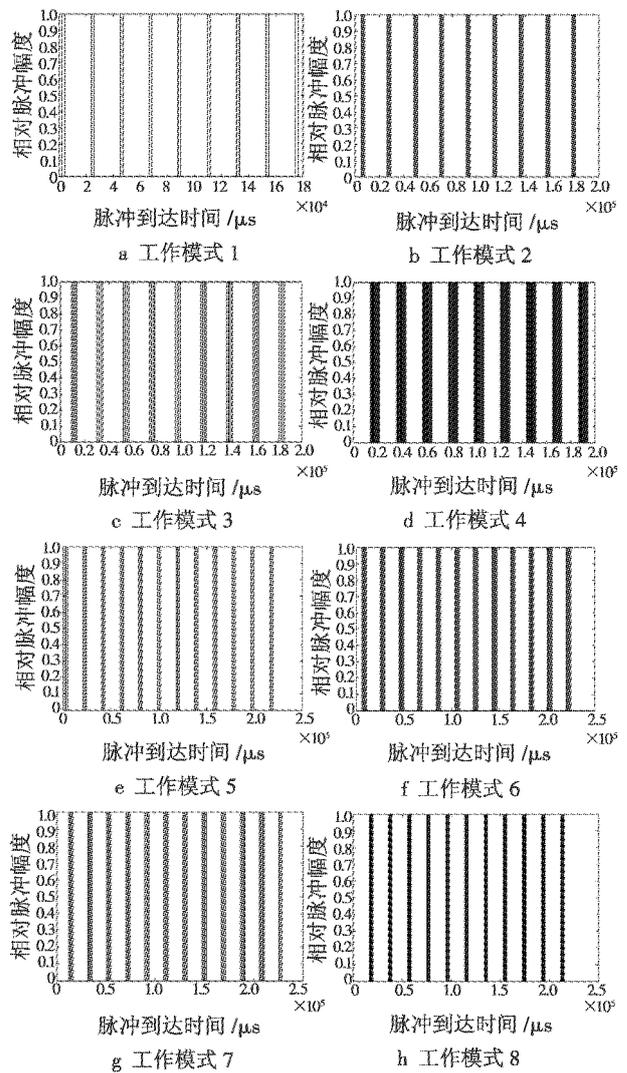


图 8 工作模式的识别

Fig. 8 Identification of working modes

根据以上分析可知,基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别算法可以对 PRI 参差、组变、抖动等脉冲进行准确分选识别,这是常规 PRI 分选算法难以克服的困难。尤其对 PRI 在一个较大范围内抖动的雷达信号,本身的 PRI 变化规律难以寻找,只有从 PRI 的产生原理着手,才能对该系列的脉冲进行识别。该算法可以准确识别出同一部多功能雷达的所有工作模式的脉冲,且可以做到分别对不同的工作模式进行识别,这是常规的分选算法难以做到的。

3.2 适用情况

以上得到的结果是理想情况下各种算法的处理情况。由前文分析可知,随机误差是纳秒量级,为模拟实际接收到脉冲流的情况,本文对理想的脉冲流中的脉冲到达时间添加随机误差,随机误差服从均值为零的正态分布,且标准差设置为 σ 。在不同的频率容差条件下,基于晶振特征的重点雷达信号快速识别算法的

适用情况如表 3 所示。

表 3 改变频率容差情况下的 1000 次 Monte Carlo 实验
Table 3 1000 Monte Carlo experiments under changes of frequency tolerance

u_{she}	$\sigma/\mu s$	$t_{clk}/\mu s$	$t_{clkshc}/\mu s$	振荡频率/MHz	频率容差/Hz	识别正确率
4	0.039	8.000 8	0.09	1.249 875 01	124.99	0.060 525 00
4	0.039	8.000 08	0.09	1.249 987 50	12.50	0.883 405 00
4	0.039	8	0.09	1.250 000 00	0	0.893 905 00
4	0.003 9	8.000 08	0.009	1.249 987 50	12.50	0.061 100 51
4	0.003 9	8.000 008	0.009	1.249 998 75	1.25	0.883 105 00
4	0.003 9	8	0.009	1.25	0	0.896 600 00
4	0.000 39	8.000 008	0.000 9	1.249 998 75	1.25	0.061 090 00
4	0.000 39	8.000 000 8	0.000 9	1.249 999 88	0.12	0.880 890 00
4	0.000 39	8	0.000 9	1.250 000 00	0	0.896 065 00
4	0.039	10.001	0.09	9.999 000 10	999.90	0.006 100 00
4	0.039	10.000 1	0.09	9.999 900 00	100.00	0.874 970 00
4	0.039	10	0.09	10	0	0.895 920 00
4	0.003 9	10.000 1	0.009	9.999 900 00	100.00	0.005 805 00
4	0.003 9	10.000 01	0.009	9.999 990 00	10.00	0.877 470 00
4	0.003 9	10	0.009	10	0	0.089 392 50
4	0.000 39	10.000 01	0.000 9	9.999 990 00	10.00	0.006 105 00
4	0.000 39	10.000 001	0.000 9	9.999 999 00	1.00	0.875 285 00
4	0.000 39	10	0.000 9	10	0	0.894 760 00

表 3 中 u_{she} 取值为 4, 取值过小, 很容易将其他雷达脉冲也判断为要识别的雷达脉冲信号, 取 u_{she} 大于 4 来降低其他雷达脉冲的影响, 提高识别正确率。在相对晶振基本间隔取值一定的条件下, 为使对雷达脉冲的识别正确率满足一定的条件, 门限 t_{clkshc} 值的设置是由标准差 σ 决定的。

表 3 中对不同随机误差取值, 改变相对晶振基本间隔值进行多次仿真, 得出每个相对晶振基本间隔值对重点雷达信号的识别正确率, 利用识别正确率判断该相对晶振基本间隔对重点雷达信号的识别的可靠性。若脉冲的识别正确率小于 10%, 则认为此时的相对晶振基本间隔偏离理想值较大, 不能完成对重点雷达信号的识别; 若重点雷达的脉冲的识别正确率在 85% 以上, 则认为这个误差范围内, 都能对重点雷达信号的脉冲进行很好的识别。如果有两部雷达的相对晶振振荡频率都在这个区间范围内, 则认为该方法无法对两部雷达中的某部雷达信号进行准确的识别。

如表 3 所示, 进行了 3 个标准差值的仿真, 有 2 个

表 4 改变随机误差情况下的 1000 次 Monte Carlo 实验

Table 4 1000 Monte Carlo experiments with changes of random errors

u_{she}	$\sigma/\mu s$	$t_{clk}/\mu s$	$t_{clkshc}/\mu s$	振荡频率/MHz	频率容差/Hz	识别正确率
4	0.039	8.000 008	0.009	1.249 998 75	1.25	0.006 745 00
4	0.003 9	8.000 008	0.009	1.249 998 75	1.25	0.883 105 00
4	0.000 39	8.000 008	0.009	1.249 998 75	1.25	0.998 970 00
4	0.039	10.000 01	0.009	9.999 990 00	10.00	0.001 365 00
4	0.003 9	10.000 01	0.009	9.999 990 00	10.00	0.877 470 00
4	0.000 39	10.000 01	0.009	9.999 990 00	10.00	0.998 825 05

可以看出, 当其他参数设置合理, 识别正确率能满

值是为了对实际情况进行拓展。脉冲流中脉冲到达时间的实际值偏离理想值的随机误差取值是在纳秒量级, 在理想值上添加标准差 σ 为 $0.003 9 \mu s$, 基本符合实际情况。例如对晶振的振荡频率是 1.25 MHz , 相对晶振基本间隔是 $8 \mu s$ 进行分析, 频率容差在 1.25 Hz 之内对该雷达信号的识别效果都很好, 频率容差在 $1.25 \sim 12.5 \text{ Hz}$ 对该雷达信号的识别效果较差, 当频率容差大于 12.5 Hz 就无法对该雷达信号进行识别。因此, 基于晶振特征的算法对该雷达的晶振频率的容差分辨率的分布范围是在 $1.25 \sim 12.5 \text{ Hz}$ 。同理, 对于晶振频率为 10 MHz 的雷达, 该算法的频率容差分辨率的分布范围在 $10 \sim 100 \text{ Hz}$ 。

综上所述, 对于不同雷达的晶振特征, 基于晶振特征的算法对晶振容差的分辨率最小值在几赫兹到上百赫兹之间, 符合实际需求。

在一定仿真分析的基础上改变随机误差, 保证其他参数不变的情况下, 进一步验证随机误差对识别正确率的影响, 具体的识别正确率如表 4 所示。

足实际需求。当随机误差增大时, 不改变其他参数的

设置,识别情况难以满足需求。当随机误差减小时,识别正确率较高。

3.3 基于晶振特征识别的快速性

如表 5 所示,对比了几种算法处理同一脉冲流所

需要的时间,明显可以看出,基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别算法所消耗的时间更少,且完成了对重点雷达信号的识别。PRI 搜索法和改进 PRI 变化法只完成了对脉冲的分选。

表 5 1000 次 Monte Carlo 实验的时间统计
Table 5 Time statistics of 1000 Monte Carlo experiments

	基于晶振特征的重点雷达信号快速靶向识别								PRI 搜索 算法	改进 PRI 算法		
	相对晶振基本间隔为 8 μs				相对晶振基本间隔为 10 μs							
脉冲流范围	全脉冲	1250 MHz	3750 MHz	2500 MHz	1375 MHz	全脉冲	1000 MHz	1500 MHz	1850 MHz	1300 MHz	全脉冲	全脉冲
共用时/s	1.513 138	0.545 683	0.540 107	0.539 081	0.545 882	0.958 624	0.547 911	0.542 004	0.541 724	0.544 558	2.497 625	5 774.819 985

4 结束语

本文提出利用重点雷达信号的晶振特征对脉冲流进行识别处理,该算法从 PRI 的生成原理着手考虑, PRI 的变化复杂与否对该算法的识别情况影响很小,相对于传统算法, PRI 变化越复杂,该算法的优越性越强,通过与 PRI 搜索法与改进 PRI 变化法进行对比,验证了该算法对复杂雷达信号的处理速度和识别效果都是优于传统方法的,通过增加随机误差亦验证了该算法在实际环境下的可行性。传统的 PRI 处理方法可以实现信号的盲源分离,但实时性和针对性较差。基于前期的雷达对抗情报侦察,能够对给我方产生威胁的雷达信号有一定的了解,能得到想要的雷达晶振特征,满足该算法对脉冲流处理前需要重点雷达信号的晶振特征这个条件。在紧急情况下,需要对重点雷达信号进行快速识别,因此本文具有一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] 潘继飞,姜秋喜,毕大平. 雷达“指纹”参数选取[J]. 现代防御技术,2007,35(1):71-75.
- [2] 陈晟,姜秋喜,潘继飞. 基于脉间指纹特征的雷达个体识别可行性分析[J]. 电子信息对抗技术,2012,27(3):6-9,77.
- [3] 尹亮,姜秋喜,潘继飞,等. 一种相控阵雷达指纹特征提取技术[J]. 航天电子对抗,2012,28(5):47-49.
- [4] 潘继飞,姜秋喜,毕大平. 恒比触发法在高精度雷达 PRI 测量中的应用[J]. 现代雷达,2007,29(1):64-67.
- [5] 潘继飞,姜秋喜,毕大平. 基于内插采样技术的高精度时间间隔测量方法[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(11):1633-1636.
- [6] 孟祥豪,罗景青,马贤同. 新体制雷达信号 PRI 样本子图周期搜索提取方法[J]. 信号处理,2015,31(4):399-406.
- [7] 曹阳. 基于 PRI 的高密度脉冲信号分选算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

(上接第 73 页)

文分析了战术数据链基于往返校时(RTT)的网络时间同步机制,针对大规模网络情况下 RTT 时隙资源受限的问题,设计了一种基于 Kalman 滤波的时差数据处理算法和一种自适应的 RTT 消息发送策略,可有效降低自主时间同步功能对时隙资源的需求。此外,本文还提出了一种时间同步策略,可以避免 NTR 角色转移时网络各成员 Kalman 滤波器需重启的问题,提高时间同步功能的稳定性。

参考文献

- [1] WILSON C. Network centric warfare: background and oversight issues for congress[R]. Washington DC: Congressional Research Service Reports for Congress, 2005.
- [2] 李跃,邱致和. 导航与定位 - 信息化战争的北斗星[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2008.
- [3] 梅文华,蔡善法. JTIDS/Link16 数据链[M]. 北京:国防

- 工业出版社,2007.
- [4] FALCHETTI C R, NATHANS D, JONES T E, et al. Enhanced Link-16/GPS/INS navigation robust tactical navigation resource for the military[C]//ION GPS, 2000: 1683-1693.
- [5] 花江. 基于差分 GPS 的战术数据链高精度时间同步[J]. 电讯技术,2016,56(4):389-393.
- [6] 郭强. 协同数据链的高精度时间同步设计[J]. 航空电子技术,2016,47(1):6-10,30.
- [7] 刘继业,陈西宏,刘强,等. 一种双基地雷达时间同步的新方法[J]. 电光与控制,2014,21(4):10-14.
- [8] WU N, WANG H, KUANG J M. Performance analysis and simulation of JTIDS network time synchronization[C]// Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2005:836-839.
- [9] 庄晓燕,王厚军. 基于卡尔曼滤波的网络精确时钟同步研究[J]. 测控技术,2013,32(9):107-110.