

混合激光制导信号分选与解码研究

罗 威,王良斯,林贤斌
(空军预警学院六系,湖北 武汉 430019)

摘 要:根据激光告警实际需求,开展混合激光制导信号的分选与解码研究。分析了混合激光制导信号特征,提出了混合激光制导信号分选和解码方法,编写了混合激光制导信号分选与解码软件。对 PRF 与 PRF、PRF 与 PIM、PIM 与 PIM 等三类混合信号进行了分选和解码。结果显示,利用骨架周期分析方法,能够正确分选包含 PIM 信号的混合信号,且分选与解码总用时较短,能够满足实际需求。

关键词:激光角度欺骗干扰;混合激光制导信号;信号分选;信号解码

中图分类号:TJ765 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.07.017

Research on sorting and decoding of mixed laser-guided signals

LUO Wei, WANG Liang-si, LIN Xian-bin
(No. 6 Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Based on the actual needs of laser warning, research on sorting and decoding of mixed laser-guided signals is studied in this paper. The feature of mixed laser-guided signals was analyzed, a new method to sort the mixed signals was proposed, and the sorting and decoding software of mixed laser-guided signals was written. Three kinds of mixed signals were sorted and decoded using this software, which contain PRF (Pulsed Repetition Frequency) mixed PRF signals, PRF mixed PIM (Pulse Interval Modulate) signals, and PIM mixed PIM signals. The results showed that the mixed signals which contain PIM signal could be sorted and decoded correctly by using the method of frame cycle analysis, and the total time for sorting and decoding is short, which can meet the actual needs.

Keywords: laser angle deception jamming; mixed laser-guided signals; signals sorting; signal decoding

1 引 言

半主动激光制导武器具有制导精度高、抗干扰能力强、效费比高等优点,在现代战争中大量用于对重要目标的空地精确打击。激光角度欺骗干扰是对付激光制导武器的有效手段^[1],其前提条件是对激光制导信号的侦察告警和解码识别。目前,对单一激光制导信号的解码技术和激光告警设备发展较为成熟^[2]。然而,现代战争空对地打击行动中,如攻击机场、桥梁、坦克集群时,就涉及发射多枚激光制导导弹同时打击多个目标的情况,这时将产生在时

域、空域、频域交叠重合的混合激光制导信号。若激光告警设备不能对其进行正确分选和解码,就无法实施有效的激光角度欺骗干扰以保护重要目标免遭打击。

在混合激光制导信号分选与解码技术研究方面,基于信号脉冲间隔、脉宽等时间域特征,先后有文献提出序列差值直方图和变步长序列搜索法^[3]、加权归一自相关方法^[4]、码元周期搜索法^[5]、基于统计方法^[6]、基于频率方法^[7]、基于深度自编码网络方法^[8]等系列方法。但是,这些方法一般都是先

作者简介:罗 威(1985 -),男,讲师,博士,主要从事光电对抗,高功率激光技术及应用等研究。E-mail: luowei8786@163.com

收稿日期:2021-09-13; **修订日期:**2021-10-12

识别相对简单或具备先验知识的单路信号,而后再对混合信号进行分选。本文基于骨架周期分析方法,编写了相应 MATLAB 程序,可实现对无先验知识、相对复杂混合激光制导信号的自动分选和解码。

2 混合激光制导信号特征分析

激光编码技术,是激光半主动制导武器避免自扰和对抗转发式激光干扰的关键技术。激光脉冲编码类型包括:脉宽编码、精确频率码、二间隔码、脉冲调制码、有限位随机周期码、伪随机编码等。

目前激光制导武器中主要采用的是精确频率码和有限位随机周期码。精确频率码即脉冲重复频率(Pulsed Repetition Frequency, PRF)激光编码,是指激光脉冲的频率重复不变,相邻激光脉冲间隔为固定值。有限位随机周期码即脉冲时间间隔调制(Pulse Interval Modulate, PIM)激光编码,是指各激光脉冲时间间隔是随机无关联的,但其位数有限,具有可重复性。例如设置一个4位PIM激光编码,对应有4个脉冲间隔 $\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$,其重复周期也可称为骨架周期,为同一周期内各脉冲间隔之和,即 $T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ 。

本文主要针对 PRF 信号和 PIM 编码信号所组成的混合激光制导信号开展研究。混合信号包括 PRF 与 PRF 混合信号、PRF 与 PIM 混合信号、PIM 与 PIM 混合信号等三种类型。混合信号时序分布分别如图1、图2、图3所示。信号1重复周期为 T_1 ,信号2重复周期为 T_2 ,假设信号1先到达激光告警器,两组信号的达到时间差为 Δt 。

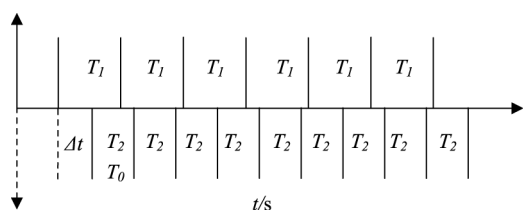


图1 PRF 与 PRF 混合信号示意图

Fig. 1 PRF mixed PRF signals

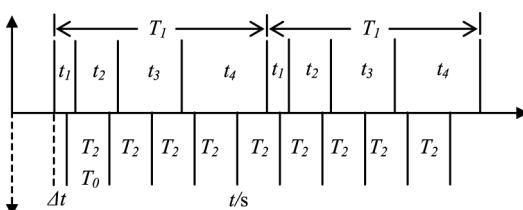


图2 PRF 与 PIM 混合信号示意图

Fig. 2 PRF mixed PIM signals

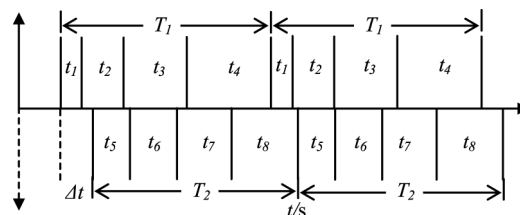


图3 PIM 与 PIM 混合信号示意图

Fig. 3 PIM mixed PIM signals

由于激光制导武器所使用的激光目标指示器性能相同,因此两组激光制导信号的频率、脉宽相同,照射方位也基本一致,故两组信号会形成一个混合信号,且很难直接进行区分。混合信号会形成一个新的骨架周期 T_m , T_m 为 T_1 和 T_2 的最小公倍数。为避免自扰影响, T_1 和 T_2 会避免设置为简单倍数关系,甚至互为质数,故大部分情况下, T_m 为一较大值,即两组信号混合后的激光脉冲间隔近似为伪随机序列,脉冲间隔值在很长时间内都不重复。

另外,当两组信号的达到时间间隔较大且满足 $|\Delta t| > 2T_1$ 时,激光告警器在信号2到达之前就可以完成对信号1的解码,对后续混合信号的分选与解码难度也会相应减小。本文中主要考虑的是 $|\Delta t| < 2T_1$ 这种更复杂的情况,上述情况也可兼容处理。

3 混合激光制导信号分选与解码方法

当混合信号中包含 PRF 信号时,即对于 PRF 与 PRF 混合信号、PRF 与 PIM 混合信号,其分选和解码相对简单,本文采用时差矩阵统计方法进行处理。对于 PIM 与 PIM 混合信号,其分选和解码相对复杂,本文针对性提出骨架周期分析方法,较好地解决了问题。

3.1 PRF 与 PRF 混合信号分选与解码

两个 PRF 信号组成混合信号,其重复周期分别为 T_1 和 T_2 ,如图1所示。假设共有 L 个脉冲,每个脉冲信号的到达时间 X_{TOA} 已知,设 ΔT_{mn} 为第 m 个脉冲和第 n 个脉冲到达时间 X_{TOAm} 、 X_{TOAn} 之差,则有:

$$\Delta T_{mn} = X_{TOAm} - X_{TOAn} (m > n) \quad (1)$$

从 L 个脉冲中选取相邻的 k 个脉冲,可以构建一个 $(k-1)$ 阶的时差矩阵 ΔT :

$$\Delta T = \begin{Bmatrix} \Delta T_{21} & \Delta T_{31} & \Delta T_{41} & \Delta T_{51} & \cdots & \Delta T_{k1} \\ & \Delta T_{32} & \Delta T_{42} & \Delta T_{52} & \cdots & \Delta T_{k2} \\ & & \Delta T_{43} & \Delta T_{53} & \cdots & \Delta T_{k3} \\ & & & \Delta T_{54} & \cdots & \Delta T_{k4} \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \Delta T_{kk-1} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

如果第 m 个脉冲和第 n 个脉冲是同一个重频信号相邻脉冲,则此时的 $\Delta T_{mn} = T_1$ 或 T_2 。如果不是,则 ΔT_{mn} 为非相关值,且基本不重复。对该时差矩阵进行统计分析,在统计结果中出现次数最多的值即为 T_1 或 T_2 。

k 的取值会直接影响信号分选准确度和分选时间。当 k 取值较小时,时差中相关值可能偏少,影响信号分选准确度,一般取 $k > 5$ 。 k 取值也不宜过大,否则运算量会大大增加,分选时间也相应增大。在时差矩阵中还会出现很多 T_1 和 T_2 的倍频值,在时差矩阵基础上,还需要对时差矩阵的统计结果进一步处理,将统计结果作为第二个矩阵,称为统计矩阵,对统计矩阵进行相关运算,可以更加准确提取 T_1 或 T_2 。

3.2 PRF 与 PIM 混合信号分选与解码

对于 PRF 与 PIM 混合信号,同样可利用上述矩阵统计方法,建立时差矩阵对混合信号进行分选,从中分选出重频信号,剩下的信号就是编码信号,在此不再详述。也可用下文即将介绍的动态自相关算法对混合信号进行分选,从中分选出编码信号,剩下的信号就是重频信号。

3.3 PIM 与 PIM 混合信号分选与解码

假设 PIM 与 PIM 混合信号如图 3 所示,其中一组为 4 位编码信号,脉冲间隔为 t_1, t_2, t_3, t_4 ,骨架周期为 $T_1 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$,另一组同样为 4 位编码信号,脉冲间隔为 t_5, t_6, t_7, t_8 ,骨架周期为 $T_2 = t_5 + t_6 + t_7 + t_8$ 。如前文所述,混合信号形成的新的骨架周期很长,相邻激光脉冲间隔近似为伪随机序列,即脉冲间隔值基本不重复。若同样建立时差矩阵并进行统计分析,相比包含 PRF 信号的混合信号,分选出 t_1, t_2, t_3, t_4 这 4 个值要困难很多,原因一是要分析的脉冲数量大大增加,二是统计结果差距不显著。

因此,本文将骨架周期作为 PIM 与 PIM 混合信号分选的主要参数。其流程描述如下:(1)确定分选脉冲数动态范围 (x, y) 。以 4 位编码信号为例,其骨架周期最少需要 5 个脉冲序列构成,即最小值 x 取值 5 即可。根据实际情况,激光指示器无论是 PRF 信号还是 PIM 信号,其脉冲间隔大小一般不会有数量级的差异,因此 y 取值为 x 的 2 倍或略大即可,就可以保证 (x, y) 内存在一个完整的骨架周期。(2)建立时差矩阵。从第 n 个脉冲开始,在 (x, y) 的脉冲长度范围内,构建时差序列,注意此时时差并非相邻脉冲的时差,而是相距 x 个以上、 y 个以下脉

冲的时差,再从 $(n+1)$ 个脉冲开始,重复上述流程,形成时差矩阵。(3)统计分析获取骨架周期。对时差矩阵进行统计分析,可以得到编码信号的骨架周期 T_1 和 T_2 。(4)根据骨架周期进行信号分选。从第 1 个脉冲序列开始分析,其到达时间加上 T_1 ,如果在混合信号脉冲序列中存在相应脉冲,则说明这 2 个脉冲均属于信号 1 的脉冲;如果不存在,则该脉冲属于信号 2。遍历完整混合信号脉冲序列,就可以完成混合信号的分选。(5)信号解码。对分选后得到的信号进行解码,得出其位数和脉冲间隔。

4 混合激光制导信号分选与解码分析

根据上述混合激光制导信号分选与解码方法,基于 MATLAB 软件平台编写了混合激光制导信号分选与解码软件,软件界面如图 4 所示。其功能包括:模拟产生 PRF 与 PRF、PRF 与 PIM、PIM 与 PIM 等三种类型混合信号,对混合信号进行自动分选和解码,分选与解码结果的图文可视化显示。

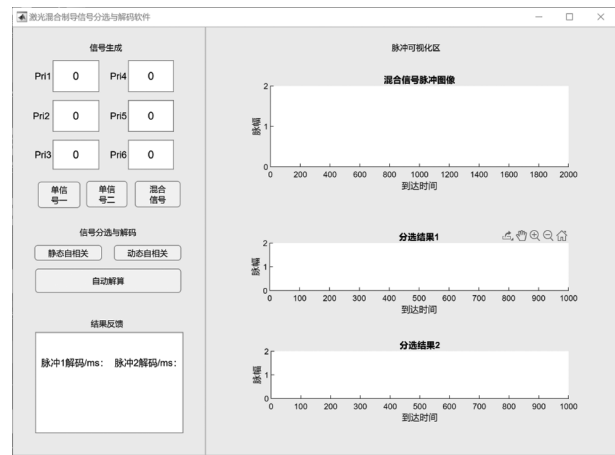


图 4 混合激光制导信号分选与解码软件界面图

Fig. 4 Interface of the sorting and decoding software

以相对最复杂的 PIM 与 PIM 混合信号为例介绍混合信号产生操作,其信号设置和产生的混合信号如图 5 所示。其中 PIM 信号 1 的骨架周期是 $T_1 = 69 \text{ ms} + 85 \text{ ms} + 67 \text{ ms}$,PIM 信号 2 的骨架周期是 $T_2 = 42 \text{ ms} + 65 \text{ ms} + 81 \text{ ms}$ 。

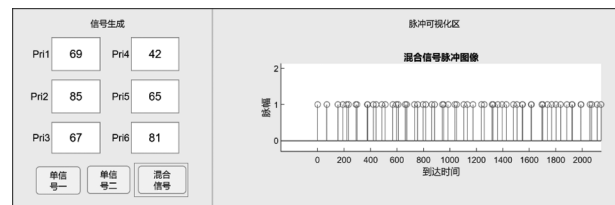


图 5 PIM 与 PIM 混合信号生成及可视化

Fig. 5 PIM mixed PIM signals generation and visualization

模拟产生 PRF 与 PRF、PRF 与 PIM、PIM 与 PIM 等三种类型混合信号,每种类型各 100 组,并利用混合激光制导信号分选与解码软件分别对其进行分选与解码,其中信号 1 和信号 2 达到时间间隔随机生成。对 100 组 PRF 与 PRF 混合信号的典型分选与解码结果如图 6 所示,平均分选用时 0.453 s。对 100 组 PRF 与 PIM 混合信号的典型分选与解码结果如图 7 所示,其中 PIM 信号为 3 位编码信号,平均分选用时 1.190 s。对 100 组 PIM 与 PIM 混合信号的典型分选与解码结果如图 8 所示,PIM 信号均为 3 位编码信号,平均分选用时 2.206 s。

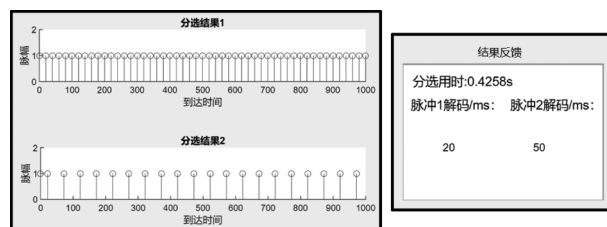


图6 PRF 与 PRF 混合信号分选与解码结果

Fig. 6 Sorting and decoding result of PRF mixed PRF signals

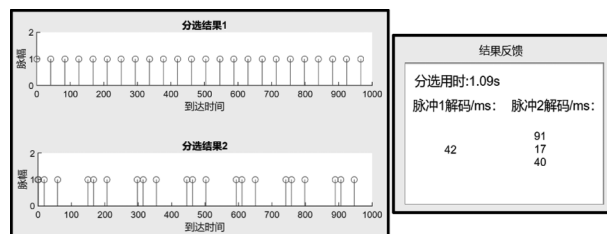


图7 PRF 与 PIM 混合信号分选与解码结果

Fig. 7 Sorting and decoding result of PRF mixed PIM signals

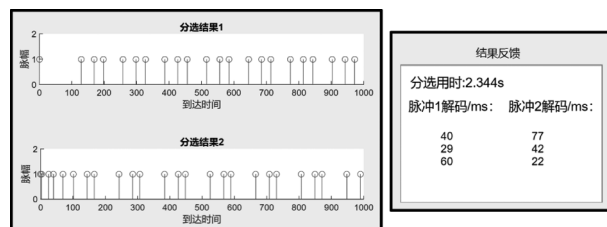


图8 PIM 与 PIM 混合信号分选与解码结果

Fig. 8 Sorting and decoding result of PIM mixed PIM signals

5 结 论

本文主要研究混合激光制导信号分选和解码方法,并编写了混合激光制导信号分选与解码软件,对 PRF 与 PRF、PRF 与 PIM、PIM 与 PIM 等三类混合信号进行了分选和解码。其中,PIM 信号由于包含编码位数和脉冲间隔值等多重未知参数,分选难度较大,本文利用骨架周期分析方法,能够正确分选包含 PIM 信号的混合信号,且分选和解码总用时较短,能够较好满足实际需求。研究工作为下一步在实际环境下对混合激光制导信号进行分选与解码打下了良好基础。

参考文献:

- [1] Sun Chunsheng, Zhagn Xiaohui, Zhang Shuang. Guarded angle of laser decoy in laser trick jamming[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(3): 347-351. (in Chinese)
孙春生, 张晓晖, 张爽. 激光引偏干扰中假目标的防护角与应用[J]. 激光与红外, 2017, 47(3): 347-351.
- [2] Zhou Zhongliang, He Yongqiang, Zhou Bing, et al. Study on identification technique of guiding laser code information[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(5): 660-663. (in Chinese)
周中亮, 何永强, 周冰童, 等. 制导激光编码信息识别技术研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 660-663.
- [3] Ye Qing, Sun Xiaoquan, Cheng Yubao. An algorithm for the sorting and code identification of mixed laser-guided signals[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(10): 70-74. (in Chinese)
叶庆, 孙晓泉, 程玉宝. 混合激光制导信号的批次分选与码型识别研究[J]. 电光与控制, 2009, 16(10): 70-74.
- [4] Wang Jinfeng, Chu Zhenfeng, Song Dongsheng, et al. Research on a new method to solving multi-laser signal period by autocorrelation[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(6): 625-627. (in Chinese)
王金峰, 楚振峰, 宋东升, 等. 基于自相关的多路激光威胁信号周期解算方法研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(6): 625-627.
- [5] Shao Xiaodong, Yao Longhai, Zhang Shaokun, et al. Research of laser guided signal sorting and code recognition technique[J]. Laser Technology, 2011, 35(5): 27-29. (in Chinese)
邵晓东, 姚龙海, 张少坤, 等. 激光制导混合信号分选及编码识别技术研究[J]. 激光技术, 2011, 35(5): 27-29.
- [6] Li Hao, Liang Jing. A new method to de-interleave and decode multi-laser threats[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(3): 342-343. (in Chinese)
李浩, 梁璟. 一种新的多激光威胁信号分选和编码解算方法[J]. 激光与红外, 2009, 39(3): 342-343.
- [7] Wang Jinfeng, Song Dongsheng, Chu Zhenfeng, et al. New method to classify the mixed guidance signal based on the frequency[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(10): 1165-1167. (in Chinese)
王金峰, 宋东升, 楚振峰, 等. 一种基于频率的混合激光制导信号分选方法[J]. 激光与红外, 2012, 42(10): 1165-1167.
- [8] Xie Zhenglong, Yi Gaizhen. Design of laser guidance mixed signal sorting system based on deep self-encoding network[J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(12): 93-96. (in Chinese)
解争龙, 弋改珍. 基于深度自编码网络的激光制导混合信号分选系统设计[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(12): 93-96.