

基于相关法的塔康回答信号分选*

贺杰, 张斌, 来磊

(空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 针对塔康单站侦测系统中回答信号的分选问题,在询问信号分选完成的前提下,利用频闪效应,并采用相关法,完成了对应询问回答信号的分选配对。对比分析了相关法的原理及一般相关法、改进的一般相关法和平滑连贯转换法的分选算法流程,通过仿真实验比较了三种算法的分选效果,验证了相关法应用于塔康回答信号分选的有效性。

关键词: 塔康回答信号; 相关法; 信号分选; 频闪效应

中图分类号: TN971 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2018)05-1470-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.041

Response signal sorting of TACAN based on cross correlation

He Jie, Zhang Bin, Lai Lei

(School of Information & Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: For the issue of the response signal sorting in TACAN localization system with single station, the sorting is accomplished by using cross correlation based on the accomplishment of interrogate signal sorting and stroboscopic effect. The principle and structure of separation arithmetic is analyzed. Simulation results compare the separation effect of three kinds of algorithm and demonstrate the effectiveness and the practicality of cross correlation.

Key words: response signal of TACAN; cross correlation; signal sorting; stroboscopic effect

0 引言

在塔康单站侦测系统中,利用塔康信号询问—应答规律对其机载设备开展侦测时,必须完成互为对应的询问—回答信号的分选配对,从而得到询问—回答信号的到达时间差,完成侦测。侦测接收机接收的机载询问信号,可以通过干涉仪测向^[1]等技术以其波达角度等信息完成分选。而接收的地面信标脉冲信号中混合了主辅基准群脉冲、随机填充脉冲和多机应答混合脉冲。如何识别出回答脉冲信号并从多机混合回答脉冲中完成与其对应的询问脉冲的分选配对工作,是完成侦测的关键。

传统的分选方法可通过模板匹配法^[2]实现,该方法通过构建塔康信号主要参数和特征的参数库,然后将测得的接收脉冲信号的参数与模板库比较以此完成脉冲的分选,但该方法灵活性较差,在低信噪比情况下容易出现识别错误等情况;也可采用基于直方图的时差分选方法实现,但当信源是高频时,会导致在直方图中产生虚假直方峰,影响分选结果^[3]。

本文利用频闪效应产生的询问回答脉冲的相关性,在询问脉冲信号分选完成的前提下,采用相关法完成对应的回答脉冲信号的分选和配对,对比分析了一般相关法和广义相关法中平滑连贯转换法的原理及分选算法结构,并针对一般相关法中相关处理数据量大、运算时间较长的问题,借鉴计算机中流水线操作思想,提出了时域上的分段相关累加以及频域上的FFT变换的方法来进行数据流水线处理,以提高运算速度。仿真实验验证了相关法用于塔康询问信号分选有效性。

1 塔康系统工作原理^[4]

1.1 测距原理

塔康系统测距采用询问回答式双程脉冲测距技术。系统工作时,机载设备发出测距询问信号,询问信号以光速 c 经过时间 t_R 到达地面测距应答器,测距应答器经译码、固定延时 t_r 、编码、调制后发射测距应答信号,应答信号经过时间 t_R 到达机载系统,测距原理如图1所示。

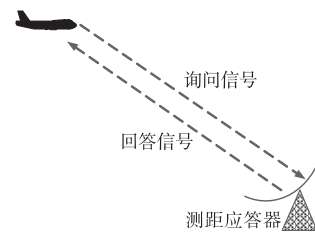


图1 塔康系统测距原理示意图

总的的时间间隔为 $T = 2t_R + t_r$,距离为 $R = c(T - t_r)/2$ 。

1.2 测角原理

塔康测角采用相位式全向信标原理,塔康信标天线在水平面内以顺时针旋转的九瓣心脏形方向性图(图2(a))向外围空间发射频率为15 Hz和135 Hz叠加的方位调制信号,当心脏形方向性图的最大值相对磁北顺时针转 90° 时,地面信标向周围空间发射基准信号。以基准信号为参考点,取正弦波的正斜率拐点为包络比相参考点,此时比相参考点滞后于主基准的相位差就是所测方位角。以正南方为观测点可以得到如图2

收稿日期: 2017-01-17; 修回日期: 2017-03-06 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61603409)

作者简介: 贺杰(1993-),男,湖南常德人,硕士,主要研究方向为军用无线电导航(hj1993214@163.com);张斌(1968-),男,河南中牟人,教授,博士,主要研究方向为军用无线电导航;来磊(1983-),青海格尔木人,讲师,博士,主要研究方向为协同导航。

(b)所示的调制波形。

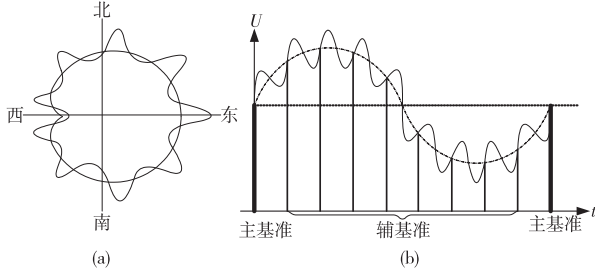


图2 旋转的九瓣心脏形及其辐射信号振幅

1.3 系统信号格式

塔康系统采用的脉冲是一种高斯钟形脉冲,具有优良的频带利用率。其脉冲序列种类包括主、辅基准群脉冲、测距询问回答脉冲、随机填充脉冲、识别和平衡脉冲。

主、辅基准群脉冲提供相位测量基准;测距询问脉冲用于距离测量;随机填充脉冲用于保证单位时间内脉冲总数基本不变,以防止包络塌陷产生失真;识别和平衡脉冲用于台识别功能,在系统处于识别模式下发射。图3为一周期的塔康信号。

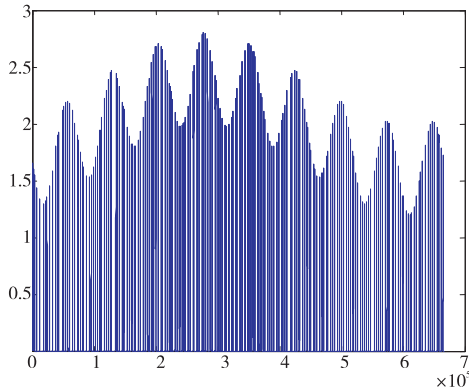


图3 一周期塔康信号

1.4 频闪效应

多个机载设备进行测距询问时,塔康地面信标会接收到多个询问脉冲并且必须作出相应的应答,所有的回答脉冲都是混合在一起发射出去的。在塔康系统作用区域内的任何机载设备都将接收到地面信标对所有机载询问的回答脉冲。所以机载设备要实现测距功能必须从混合的回答脉冲中准确地识别出属于自己的回答脉冲。

频闪效应正是为了解决上述问题而引入的,其原理如图4所示。

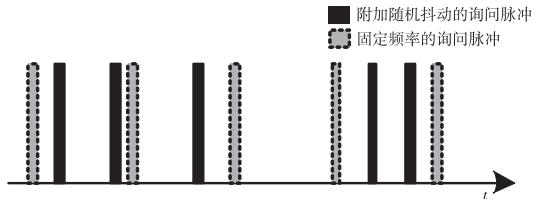


图4 频闪效应原理图

其基本思想是^[5]:在产生询问脉冲时,首先产生频率和初始时间固定的脉冲对,然后在这些脉冲对的初始发射时间上附加一个随机左右抖动的参数,抖动范围在询问频率的20%左右,对应的回答脉冲也会按同一规律抖动。由于抖动具有随机性,所以对应的回答一询问脉冲之间具有唯一的相关性,利用频闪效应的相关性识别回答脉冲。产生抖动的公式如下:

$$q = \frac{j}{p} \pm \frac{1}{p} \times 20\% \quad (1)$$

其中: p 表示每秒发送的询问脉冲个数; j 表示发送的询问脉冲在周期内的排序。

2 相关法

2.1 一般相关法

相关法是比较信号间相似程度的一种常用方法,在实际中应用较为广泛。数学上用相关函数来衡量相关性的大小。设两路接收信号分别为

$$x(t) = s_x(t) + n_x(t) \quad (2)$$

$$v(t) = s_v(t-d) + n_v(t) \quad (3)$$

其中: d 为接收信号之间的延时; $s_x(t)$ 、 $s_v(t)$ 为信号源的发射信号; $n_x(t)$ 、 $n_v(t)$ 为服从高斯分布的平稳随机接收噪声信号。则两路接收信号的互相关函数 $R(\tau)$ 为

$$R(\tau) = E(x(t), v(t+\tau)) = R_{s_x s_v}(\tau-d) + R_{s_x n_v}(\tau) + R_{s_v n_x}(\tau-d) + R_{n_x n_v}(\tau) \quad (4)$$

其中: $R_{s_x s_v}(\cdot)$ 、 $R_{s_x n_v}(\cdot)$ 、 $R_{s_v n_x}(\cdot)$ 和 $R_{n_x n_v}(\cdot)$ 分别是 $s_x(t)$ 和 $s_v(t-d)$ 、 $s_x(t)$ 和 $n_v(t)$ 、 $s_v(t-d)$ 和 $n_x(t)$ 、 $n_x(t)$ 和 $n_v(t)$ 的互相关函数,假定信号与噪声之间相互独立,则有

$$R(\tau) = R_{s_x s_v}(\tau-d) \quad (5)$$

可根据是否出现相关峰判定两路信号相似性的大小。

2.2 平滑连贯转换法

平滑连贯转换法是广义相关法的一种,该方法首先通过对信号进行加权处理,再估算其互相关函数,以抑制相关处理时各路噪声对分选结果的影响,是对一般相关法的改进。较一般相关法,其能改善信噪比,有更大的适用范围^[6]。其原理如图5所示。

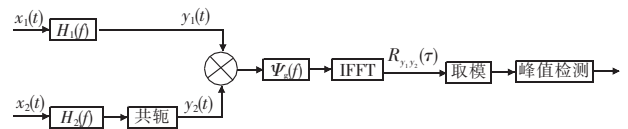


图5 平滑连贯转换法原理图

由维纳-辛钦定理^[8]可知,实平稳随机信号的互相关函数及其功率谱密度之间是傅里叶变换对的关系。则有

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} G_{x_1 x_2}(f) e^{j2\pi f \tau} df \quad (6)$$

其中: $R_{x_1 x_2}(\tau)$ 是两路信号的互相关函数; $G_{x_1 x_2}(f)$ 是其相应的互功率谱密度函数。 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 的互功率谱密度为

$$G_{y_1 y_2}(f) = G_{x_1 x_2} H_1(f) H_2^*(f) = G_{x_1 x_2} \psi_g(f) \quad (7)$$

其中: $\psi_g(f) = H_1(f) H_2^*(f)$,是加权函数。平滑连贯转换法的加权函数取为

$$\psi_g(f) = \frac{1}{\sqrt{G_{x_1 x_1}(f) G_{x_2 x_2}(f)}} \quad (8)$$

则 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 的互相关函数为

$$R_{y_1 y_2}(\tau) = \text{IFFT}[G_{y_1 y_2}(f)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_g G_{x_1 x_2}(f) e^{j2\pi f \tau} df \quad (9)$$

可得到相关峰值为

$$D = \max \{ |R_{y_1 y_2}(\tau)| \} \quad (10)$$

3 基于相关法的回答脉冲分选

3.1 回答分选脉冲模型

假设侦测平台接收到多机询问一回答脉冲信号,并已进行

了相关解调预处理得到脉冲序列。如图 6 所示,设有四个空中机载设备发射询问脉冲,由于塔康信号格式固定,仅通过脉冲参数是不能将混合的回答信号加以区分的。图 6 中不同的询问—回答脉冲用不同颜色的填充表示。侦测平台接收到的回答脉冲按时间顺序排列,得到混合的回答脉冲。完成侦测的关键就是以完成分选接收询问脉冲序列为已知信息,对混合的回答脉冲序列进行分选,完成相对应的询问—回答脉冲分选配对。

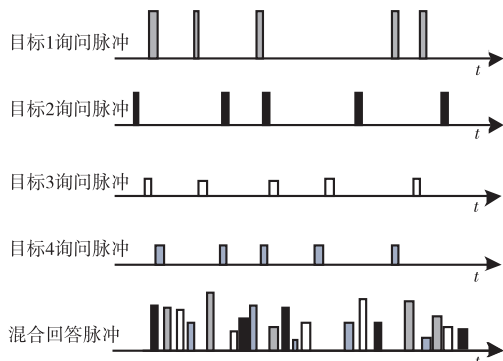


图6 多机回答脉冲示意图

3.2 基于一般相关法的回答脉冲分选算法

3.2.1 算法流程

在询问脉冲已经分选完成的前提下,利用询问—回答脉冲之间的相关性(频闪效应),将接收到的询问脉冲和混合的多机回答进行相关处理,完成互相对应询问—回答脉冲分选配对工作。其算法流程如图 7 所示。

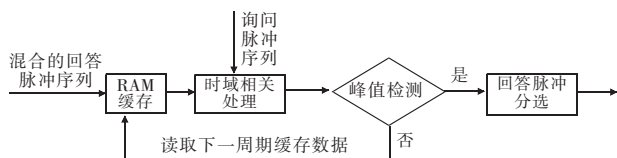


图7 一般相关法算法流程

将侦测接收机接收到的混合回答脉冲序列缓存到 RAM 中,时域相关处理模块读取 RAM 中的缓存数据与询问脉冲序列进行相关运算,如出现相关峰值,则将相关峰出现位置的回答脉冲提取出来,完成混合回答脉冲的分选配对,若未出现相关峰,则读取 RAM 中新缓存数据重复以上步骤。

3.2.2 改进的一般相关法

在实际应用中,一般相关法具有结构简单,硬件实现复杂度低、易于实现等优点,但相关过程中需进行滑动移位,在数据量较大时,出现相关峰所需时间较长,速度较慢。为提高相关运算速度,借鉴计算机中的流水线思想,提出了一种时域上的分段相关累积以及频域上的 FFT 变换的方法,其算法流程如图 8 所示。

算法具体步骤为:

- 将侦测接收机实时接收到的询问脉冲和混合回答脉冲序列存储到双口 RAM 中;
- 读取双口 RAM 中的数据,将询问脉冲序列与混合回答脉冲序列对齐并进行相关累加,每 P 个点累加出一个点来,得到 N 点相关累加值;
- 每获得一点累加值便对其进行一次 P 点 FFT 运算,并把结果存储在双口 RAM 中,在获得第二点累加值时,对其进行第二次 P 点 FFT 运算,并把结果累加到第一次的结果中,当

做完第 P 次 FFT 运算时,即获得了完整的 P 点 FFT 结果;

d)实时计算 FFT 峰值能量及平均能量,并缓冲到寄存器中;

e)判断相关是否完成,若否,则将询问脉冲序列延迟一个数据点与混合回答脉冲序列对齐并进行相关累加,获得 P 点 FFT 结果,计算 FFT 峰值能量及平均能量,这样重复直至数据遍历;若是,则记录 FFT 中峰值能量最大的一次,即可获得对于自己的回答脉冲的位置,进行脉冲分离。

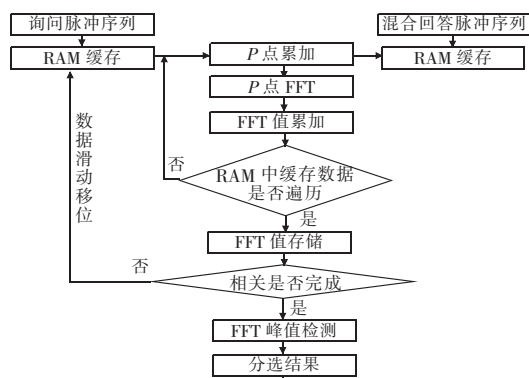


图8 改进算法流程

3.2.3 改进性能分析

一般相关法可以直接分析相关峰位置,但在具体计算过程中,处理的数据越长,其运算量越大。假设两数据序列长度都为 N ,则一般相关法计算其相关函数 $R(\tau)$ 时,每计算 $R(\tau)$ 的一个值,必须进行 N 次乘法和 $(N-1)$ 次加法, $R(\tau)$ 共有 N 个值,故共要进行 N^2 次乘法, $N \times (N-1)$ 次加法。可见乘加次数都与 N^2 成正比,随着 N 的增大,运算次数迅速增加。而改进的一般相关法需 $(N/2) \times \log_2 P$ 次乘法运算, $N \times (N \times P \times \log_2 P + N/P - 1)$ 次加法运算,乘法次数与 N 成正比,加法次数与 N^2 成正比,可见改进的算法对计算量的减少程度明显,优于原算法。

而且改进的算法结构上易于实现流水线处理(图 9),极大地减少了处理时间。

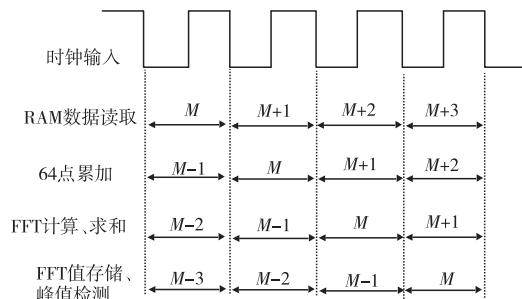


图9 四级流水线示意图

从图 9 中可以看出,在某一时刻第一条流水线在做 RAM 数据读取操作时,第二条流水线可同时进行上次读取数据的 P 点累加,第三条流水线上可同时进行再上一次读取数据的 FFT 计算、求和操作,第四条流水线可同时进行 FFT 值存储、峰值检测等操作,这种流水线操作能较大地提高程序执行速度,减少分选时间,提高实时性。

3.3 基于平滑连贯转换法的回答信号分选算法

从分析平滑连贯转换法的原理,其分选算法流程如图 10 所示。

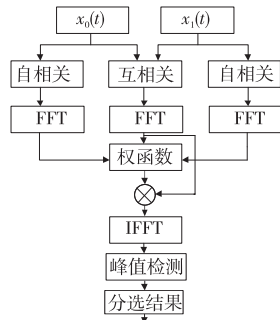


图10 算法流程

算法的具体步骤为:

- 将询问脉冲 $x_0(t)$ 和混合回答脉冲 $x_1(t)$ 分别进行自相关、互相关,分别得到 $R_0(\tau)$ 、 $R_1(\tau)$ 和 $R_{01}(\tau)$;
 - 对相关结果进行 FFT 运算,得到相应的功率谱密度;
 - 将相应三路功率谱密度送入权函数生成器,按相关算法生成权函数;
 - 对两路信号的互功率谱密度进行加权处理;
 - 对加权后的互功率谱密度进行 IFFT,对 IFFT 后的结果进行峰值检测,根据峰值出现的位置,进行回答脉冲分选配对。
- 其中两路信号分别取经过分选后的询问脉冲信号和地面信标脉冲信号。

4 仿真分析

4.1 相关法分选结果分析

统一的仿真条件:设被侦测目标数为4,询问脉冲与回答脉冲传播路程差分别为60 km、180 km、240 km、300 km,采样频率为1 MHz。

4.1.1 一般相关法和改进的一般相关法分选

采用一般相关法进行处理脉冲分选,得到的各目标相关峰值如图11所示。

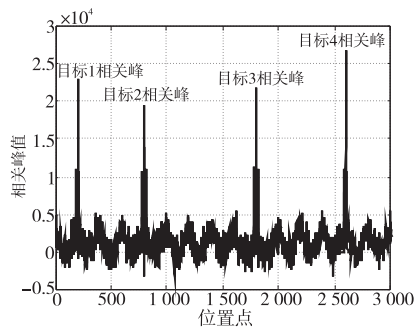


图11 一般相关法相关峰值示意图

从图11可以看出,当询问脉冲与混合地面信标中自己的回答脉冲对齐时,将出现尖锐的相关峰,回答脉冲分选结果如图12所示。图中的塔康混合脉冲信号以不同的颜色对基准群脉冲、回答脉冲、随机填充脉冲进行标志,根据相关峰出现的位置信息,将对应位置的回答脉冲提取出来,完成信号的分选。

由于改进的一般相关法只是在数据处理方法上由原来的串行处理改进为分块并行处理,以提高数据处理速度,但并不会影响相关峰的出现位置和分选结果,改进的一般相关法和一般相关法分选结果一致,不再赘述。

4.1.2 平滑连贯转换法分选

采用平滑连贯转换法进行处理脉冲分选,得到的各目标相

关峰值如图13所示。

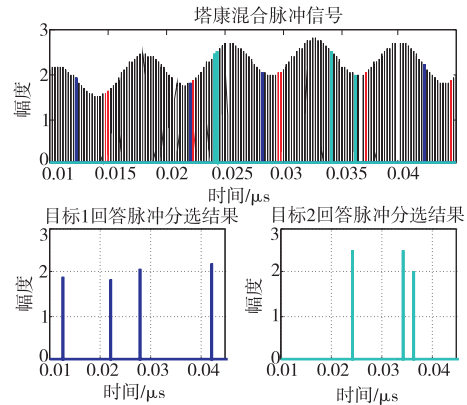


图12 目标分选结果示意图

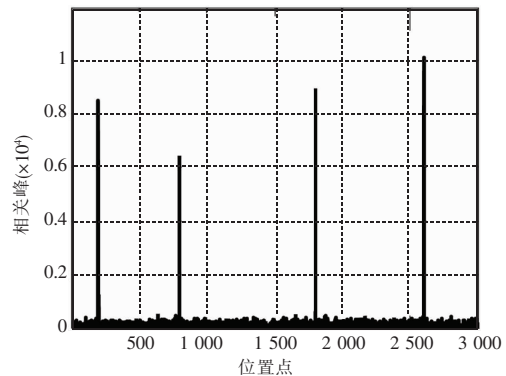


图13 平滑连贯转换法相关峰值示意图

对比图11、13可知,一般相关法和平滑连贯转换法都能得到正确的峰值位置信息,峰值信息尖锐。但在相同信噪比下一般相关法波动程度明显,平滑连贯转换法则更加平稳。

4.2 算法分选性能比较

4.2.1 不同信噪比下分选结果

如图14所示,不同信噪比下一般相关法(改进的一般相关法与一般相关法抗噪性能一致)和平滑连贯转换法的分选峰值示意图。

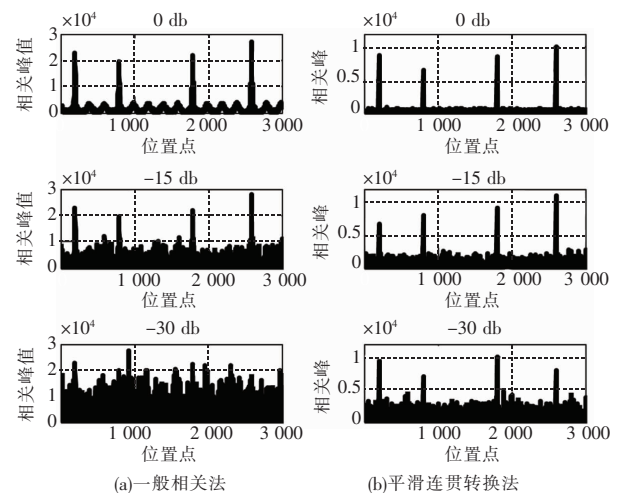


图14 不同信噪比下分选峰值示意图

从峰度的锐化来说,相关法的峰值位置估计的准确性随着信噪比的降低而恶化,相关函数峰值的尖锐程度随信噪比的降低而降低。一般相关法虽然有一定的抗噪能力,但随着信噪比的降低,其波动程度明显加强,特别是对外围的噪声、反射和有限观测数据很敏感,会造成峰值不明显;平滑连贯转换法,则表

现出了波动小、峰值尖锐的特性,在降低信噪比时,也表现出了较强的抗干扰性。

4.2.2 分选算法计算复杂度分析

设一次进行处理的数据为 N 点长,由 3.2.3 节可知一般相关法及其改进算法所需的乘加次数;平滑连贯转换法需 $2 \times N \times (\log_2 N + 1) + 3N^2$ 次乘法运算, $4 \times N \times \log_2 N + (N - 1) \times (3 \times N + 1)$ 次加法运算。图 15 为 N 取不同值时,三种算法计算量大小对比。

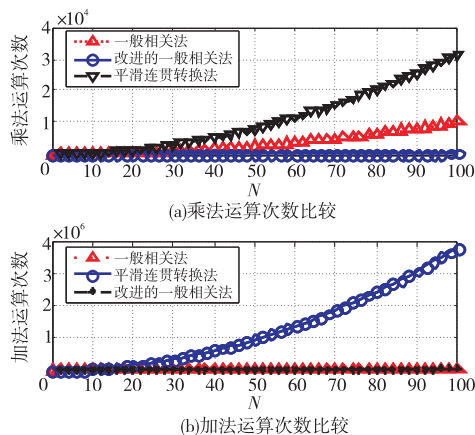


图15 乘、加法运算次数比较示意图

可以看出,由于要进行 FFT 及 IFFT 运算,平滑连贯转换法的乘加量随处理数据的长度显著增加,一般相关法则增加较为平缓,改进的一般相关法对处理的数据量较为不敏感,计算量增加缓慢。可见改进的算法可在一定程度上减少计算复杂度,但引进了 FFT 运算,硬件实现复杂度会相应提高。

由于改进的一般相关法引入了流水线结构处理数据,其数据处理时间大为降低。仿真结果如图 16 所示。

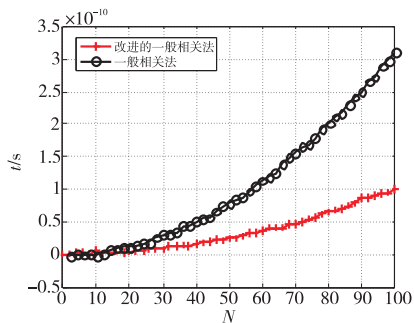


图16 数据处理时间示意图

由此上述分析可知,改进的一般相关法在计算量和数据处理时间上都有较大改善,但较之于平滑连贯转换法,其对信噪比较为敏感,当信噪比变化时,其波动较为剧烈,会对分选结果造成一定影响。

5 结束语

本文针对塔康回答脉冲信号的分选问题,在询问脉冲已知的前提下,利用塔康的频闪效应,采用相关法完成的询问回答信号之间的分选配对,分析了算法的分选效果、计算复杂度和数据处理时间,仿真验证了算法的可行性和有效性,且便于结合工程实用。但该方法的前提是基于询问脉冲已知,所以询问脉冲的分选问题是下一步研究的方向。

参考文献:

[1] 毛虎,杨建波,刘鹏.干涉仪测向技术现状及发展研究[J].电子信

息对抗技术,2010,25(6):1-6.

- [2] 庞育才. TACAN 信号处理仿真分析及硬件系统方案设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [3] 马爽,吴海斌,柳征,等.基于递归扩展直方图的辐射源时差分选方法[J].国防科技大学学报,2012,34(5):83-89.
- [4] 吴德伟.无线电导航系统[M].北京:电子工业出版社,2015.
- [5] 曾定坤.无线电导航设备外场检测仪设计与实现[D].西安:空军工程大学,2015.
- [6] 罗进文,胡正伟,蒋占军,等.窄带音频信号时差估计算法[J].计算机应用,2011,31(3):636-650.
- [7] 汪荣鑫.随机过程[M].西安:西安交通大学出版社,2006.
- [8] 刘海波.基于无线传感器网络的无源定位技术研究及实现[D].西安:西安电子科技大学,2012.
- [9] 马贤同,罗景青,孟祥豪.基于时差的同类辐射源信号分选定位方法[J].电子与信息学报,2015,37(10):2363-2368.
- [10] 邢滕,茅玉龙,胡进.塔康信号时差估计方法研究[J].现代防御技术,2013,41(6):134-138.
- [11] 任文娟,胡东辉,丁亦飏.一种新的利用时差相关性的时差分选配对方法[J].西安电子科技大学学报:自然科学版,2011,38(6):89-96.
- [12] 崔凯,楼才义.一种基于 GO-CFAR 的塔康信号检测技术[J].通信对抗,2009(2):14-17.
- [13] 李英达,肖立志.一种脉冲重复间隔复杂调制辐射源信号分选方法[J].电子信息学报,2013,35(10):2493-2497.

下期要目

- ❖ 磁声断层成像逆问题的研究进展
- ❖ 用于虚拟现实的 360 度视频编码技术新进展
- ❖ 基于发内容的微博用户兴趣挖掘方法研究
- ❖ 基于时序模型和矩阵分解的推荐算法
- ❖ 基于二分图网络的总体多样性增强推荐算法
- ❖ 结合矩阵分解的混合型社会化推荐算法
- ❖ 一种基于多类型情景信息的兴趣点推荐模型
- ❖ 基于独立成分分析功能连接的抑郁症分类研究
- ❖ 基于文本块密度和标签路径覆盖率网页正文抽取
- ❖ 改进的并行随机森林算法及其包外估计
- ❖ 基于轨迹信息熵分布的异常轨迹检测方法
- ❖ 基于类别和改进的 CHI 相结合的特征选择方法
- ❖ 复杂网络半监督的社区发现算法研究
- ❖ 基于区域划分的 DBSCAN 多密度聚类算法
- ❖ 基于稀疏图的鲁棒谱聚类算法
- ❖ 符号序列的概率向量聚类方法
- ❖ 基于路网相似性的路段行程时间估计
- ❖ 一种基于自相关函数特征的行为识别方法
- ❖ 基于共识与 Choquet 积分的模糊 Petri 网可信度确定方法
- ❖ 基于可信性和连续性的流形降维效果评价方法
- ❖ 基于动态集成决策树的多类别时间序列分类模型
- ❖ 利用傅里叶谐波分析法的时序数据周期迭代辨识算法
- ❖ 离散多智能体切换系统的二阶分组一致性研究
- ❖ 一种适用于激光 SLAM 大尺度地图的闭环检测方法
- ❖ 基于 BBO-ELM 方法的网络视频流量预测仿真研究
- ❖ 多层网络节点重要性排序研究