

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.05.004

S 模式前导脉冲过零点提取与 TOA 时间戳精确度研究

官峰勋, 曹雅茹

(中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津, 300300)

摘要: 前导脉冲信号到达时间(Time of arrival, TOA)估计精确度直接影响多点定位精确度。在差分匹配滤波器数学模型基础上,分析理想脉冲信号差分匹配滤波器 TOA 精确度与采样频率的关系。讨论非理想脉冲信号之间的时间结构关系,提出基于 S 模式前导四脉冲信号构造差分匹配滤波器校准时间戳的改进算法,实现过零点的准确估计。从信噪比、采样频率和复杂度仿真数据输出的均方根误差对比可见,通过四脉冲滤波获得的 TOA 精确度要比单脉冲和双脉冲滤波获得 TOA 精确度高。匹配滤波器和差分匹配滤波器 TOA 精确度对比分析结果表明,修正的差分匹配滤波器算法有更好的效果。在采样频率 40 MHz、信噪比为 40 dB 时,四脉冲信号差分匹配滤波器 TOA 精确度为 0.402 7 μs ,远远小于国际民航组织规定的时间误差精度最大值 25 μs 。最后实际空管运行数据验证结果证明了本文修正算法估算 TOA 的精确度和可用性。

关键词: 差分匹配滤波器;过零点;S 模式信号;时间戳

中图分类号: V351.37; TN959.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)05-0701-07

Zero-Crossing Extraction of S-mode Preamble Pulse and TOA Timestamp Accuracy

GONG Fengxun, CAO Yaru

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

Abstract: The positioning accuracy of multilateration will be directly affected by the estimation error of time of arrival (TOA) of the preamble pulse signal. First, on the basis of the mathematical model of the differential matched filter (DMF), the relationship between TOA accuracy and sampling frequency is analyzed. And the time structure relationship between non ideal pulse signals is discussed. Then the modified algorithm is presented, which is used for TOA timestamp marked by zero crossing with four-pulse preamble DMF. The results show that the root mean square error (RMSE) is changed with SNR, sampling frequency, complexity and other parameters, and the TOA accuracy of four-pulse signal detection is higher than that of single pulse and dual-pulse signal detection. Moreover, the TOA accuracy of matched filter and DMF are compared, and results show that the DMF algorithm is more effective. When the sampling frequency is 40 MHz the SNR is 40 dB, the TOA accuracy of the four-pulse signal DMF is 0.402 7 μs , which is far less than the maximum time error accuracy of 25 μs specified by International Civil Aviation Organization (ICAO). Finally, the real operation data are used to verify the accuracy improvement of TOA estimation and the availability of the algorithm.

Key words: differential matched filter; zero crossing; S-mode signal; timestamp

基金项目: 国家科技部重点研发计划(2018YFC0809500)资助项目。

收稿日期: 2019-10-19; **修订日期:** 2020-02-10

通信作者: 官峰勋, 男, 教授, E-mail: ffgong@cauc.edu.cn。

引用格式: 官峰勋, 曹雅茹. S 模式前导脉冲过零点提取与 TOA 时间戳精确度研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(5): 701-707. GONG Fengxun, CAO Yaru. Zero-crossing extraction of S-mode preamble pulse and TOA timestamp accuracy[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(5): 701-707.

S模式前导脉冲信号到达时间估计精确度是多点定位准确实现机场场面监视的基础和前提。机场区域和航路上的飞机受噪声等因素的影响,针对S模式前导脉冲信号到达时间的精确估计存在诸多难题。Torrieri等提出通过设定自适应门限检测信号到达时间的方法^[1-2],该方法可以克服脉冲幅度起伏对到达时间的影响,简单、易于硬件实现,但是在低信噪比情况下,信号容易淹没在噪声中,造成较大的测时误差。Chan等提出了自卷积算法^[3-4],通过脉冲信号的自动卷积确定卷积峰值位置,然后使用最小二乘法进一步细化,估计脉冲信号的到达时间(Time of arrival, TOA),但是该算法估计精度较低,对信噪比的要求较高。席轶敏等提出自相关检测算法^[5],采用双门限判决 TOA 的方法实时性好,但是涉及复数计算,运算过程比较复杂。胡国兵等将自相关检测算法和 Haar 小波变换相结合来估计信号的 TOA^[6],无任何先验条件下,信噪比较低时,实现对 TOA 的精度估计,但是小波变换尺度较小时,抑制噪声的能力减弱,易造成 TOA 的误判,形成较大的测时误差。文献[7-10]提出在匹配滤波后加差分的 TOA 估计方法,它的阈值为固定的零点,避免由门限带来的测量误差,但其仅讨论第1个脉冲在高信噪比时 TOA 精确度的测量。

针对上述问题,利用前导脉冲信号之间的时间结构关系,提出用四脉冲信号差分匹配滤波器过零点来标记时间戳的改进算法,通过匹配滤波器输出信号峰值对应的采样点来限制差分匹配滤波器输出信号过零点的范围,实现较低信噪比时 TOA 的测量。对比分析双脉冲和四脉冲信号使用该算法的 TOA 精确度,与第1个脉冲的 TOA 精确度作对比,结果表明四脉冲信号的 TOA 估计精确度要优于单脉冲和双脉冲 TOA 估计精确度。

1 模型分析

S模式信号有固定的格式,如图1所示。S模式信号的数学模型为^[11]

$$b(n) = \sum_{i=1}^{128/240} b(i)p(n-iT) \quad (1)$$

式中: T 为脉冲重复周期; p 为S模式脉冲序列, $p=[1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,0]$ 。

利用前导脉冲信号上升沿所用时间和下降沿所用时间的过渡过程,展开对单脉冲、双脉冲和四脉冲信号差分匹配滤波时间戳标记精确度的讨论。机场附近和航路上飞机的S模式信号信噪比一般在15 dB以上^[11],所以文中设置的信噪比为15 dB,噪声类型为高斯白噪声。

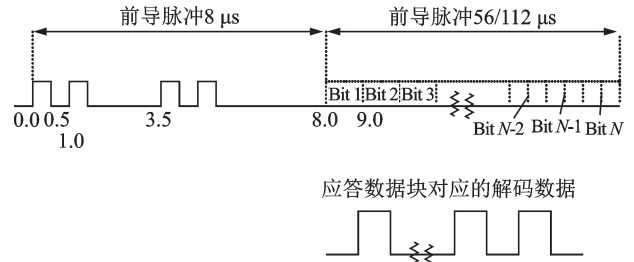


图1 S模式信号脉冲串

Fig.1 S-mode signal pulse train

1.1 时间戳标记流程图

首先将S模式前导单脉冲、双脉冲和四脉冲信号分别输入对应的匹配滤波器和差分匹配滤波器。然后提取出匹配滤波器输出函数的峰值,将峰值对应的采样点 j 保存下来。提取差分匹配滤波器输出函数的第 j 位,在第 j 位输出信号 $s_o(j)$ 和第 $j+1$ 位输出信号 $s_o(j+1)$ 间循环进行过零点检测,如果 $s_o(j) > 0, s_o(j+1) < 0$,则提取出这两个采样点 $j, j+1$ 及其对应的信号输出值 $s_o(j), s_o(j+1)$,然后在点 $(j, s_o(j))$ 和点 $(j+1, s_o(j+1))$ 间做直线方程。最后令直线方程等于零,求取过零点,标记时间戳。具体的算法流程图如图2所示。

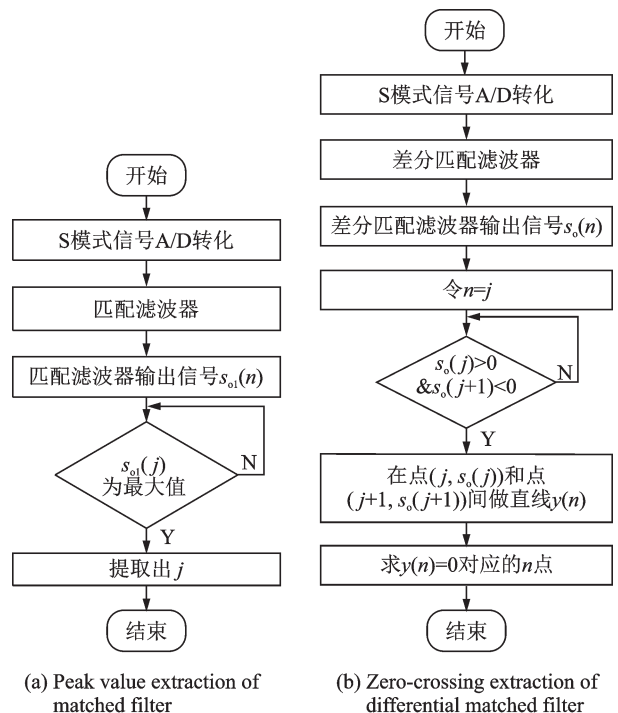


图2 差分匹配滤波器算法流程图

Fig.2 Flow chart of differential matched filter algorithm

1.2 差分匹配滤波器模型推导

如果输入脉冲信号为 $s(n)$,则 $s(n)$ 可表示为

$$s(n) = \sum_{m=0}^{N-1} a_m \delta(n-m) \quad (2)$$

式中: N 为信号长度; a_m 为信号幅值; $\delta(n)$ 表示冲

激响应序列。由匹配滤波器可知,在 n 时刻对应的传输函数可表示

$$h(n) = \sum_{m=0}^{N-1} a_m \delta(N-n-m) \quad (3)$$

在 $n-1$ 时刻对应的传输函数可表示为

$$h(n-1) = \sum_{m=0}^{N-1} a_m \delta(N+1-n-m) \quad (4)$$

则 n 时刻差分匹配滤波器的传输函数可表示为

$$h_d(n) = h(n) - h(n-1) = \sum_{m=0}^N c_m \delta(N-n-m) \quad (5)$$

式中: $c_N = a_N - 1, c_0 = a_0, c_p = a_p - 1 - a_p, 1 \leq p \leq N - 1$ 。

对应的匹配滤波器的输出信号 $s_o(n)$ 为

$$s_o(n) = s(n) \times h(n) \quad (6)$$

对应的差分匹配滤波器的输出信号 $s_{od}(n)$ 为

$$s_{od}(n) = s(n) \times h_d(n) \quad (7)$$

如果输入信号为单脉冲信号,则差分匹配滤波器的传输函数中, $c_p = a_p - 1 - a_p, 2 \leq p \leq N + 1$ 。

差分匹配滤波器是匹配滤波器的传输函数作差分运算,将输出信噪比最大的点转化为零点。根据国际民航组织标准,在无干扰条件下,滤波器的脉冲响应为理想脉冲信号的导数,此时到达时间为滤波器的过零点对应时刻^[7],即在过零点时刻标记时间戳。

仿真条件如下:无噪声,采样频率为 40 MHz,前导单脉冲的上升沿所用时间为 0.1 μ s,下降沿所用时间为当 0.125 μ s。差分匹配滤波器的传输函数波形如图 3 所示。

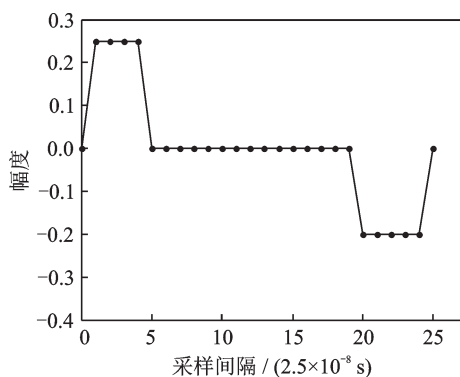


图 3 单脉冲差分匹配滤波器传输函数波形

Fig.3 Transfer function waveform of monopulse differential matched filter

1.3 时间戳精确度衡量公式

设含噪声的前导脉冲信号的采样间隔为 T , 采样点数为 N , 无噪脉冲信号经过差分匹配滤波器(匹配滤波器)的输出信号时间戳标记在第 N_0 个采样点, 含噪声的脉冲信号经过差分匹配滤波器(匹配滤波器)的输出信号时间戳标记在第 N_q 位采样

点, 则时间戳标记的均方根误差(Root mean square error, RMSE)表示为^[12]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{q=1}^n \sigma_{Tq}^2} \quad (8)$$

式中: $\sigma_{Tq} = |N_q - N_0| \times T$, 为第 q 次的 TOA 测量误差。

2 脉冲信号过零点与时间戳精确度

2.1 理想脉冲信号

假设理想脉冲信号的宽度为 τ , 采样频率为 f_s ,

采样间隔 $T_s = \frac{1}{f_s}$, 采样点数 $N = \frac{\tau}{T_s} = \tau \times f_s$ 。

匹配滤波器的输出信号为

$$s_o(n) = s(n) \times h(n) = R_s(N-n) \quad (9)$$

式中 R_s 为自相关函数。

由于自相关偶函数特性

$$s_o(n) = R_s(n-N) \quad (10)$$

差分匹配滤波的输出为

$$s_{od}(n) = s(n) \times h_d(n) = R_s(N-n) - R_s(N+1-n) \quad (11)$$

根据自相关偶函数特性

$$s_{od}(n) = R_s(n-N) - R_s(n-(N+1)) \quad (12)$$

当 $n=N$ 时, 式中的前者取最大值, 此时的差分匹配滤波输出为

$$s_{od}(N) = R_s(0) - R_s(1) \quad (13)$$

当 $n=N+1$ 时, 式(12)中的后者取最大值, 此时的差分匹配滤波输出为

$$s_{od}(N+1) = R_s(1) - R_s(0) = -s_{od}(N) \quad (14)$$

所以说差分匹配滤波器过零点的值在 N 和 $N+1$ 之间。求 $(N, R_s(0) - R_s(1))$ 与 $(N+1, R_s(1) - R_s(0))$ 间的直线方程, 该直线过零点时刻即为所求差分匹配滤波的到达时间。

直线方程为

$$y = 2[R_s(1) - R_s(0)]x + [R_s(0) - R_s(1)](1 + 2N) = [R_s(1) - R_s(0)][2x - (1 + 2N)] \quad (15)$$

令 $y=0$, 过零点 x

$$x = \frac{1 + 2N}{2} = \frac{1}{2} + \tau f_s \quad (16)$$

则差分匹配滤波的输出均方根误差为

$$\Delta t = (x - N) \times T_s = \frac{x - N}{f_s} = \frac{1}{2f_s} \quad (17)$$

如式(16)所示, 理想前导脉冲信号差分匹配滤波器的过零点与脉宽和采样频率有关。如式(17)所示, 差分匹配滤波器的时间戳标记精确度只与信号的采样频率有关, 成 $1/2$ 反比关系。

仿真条件如下: 信噪比 15 dB, 不同频率, 理想前导脉冲信号通过差分匹配滤波器的输出均方根误差

如图4所示,理想脉冲信号通过差分匹配滤波器的输出均方根误差只与采样频率有关,成1/2反比关系。

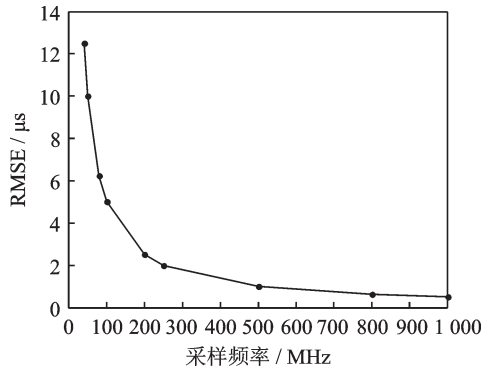


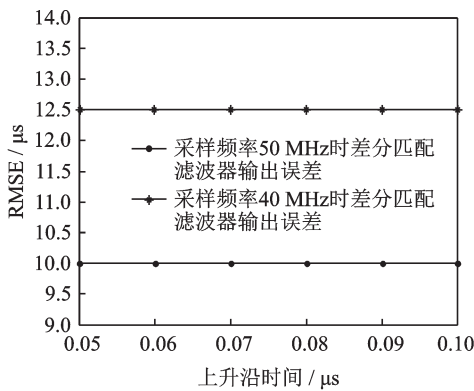
图4 理想前导脉冲差分匹配滤波输出均方根误差

Fig.4 RMSE of ideal preamble pulse differential matched filter

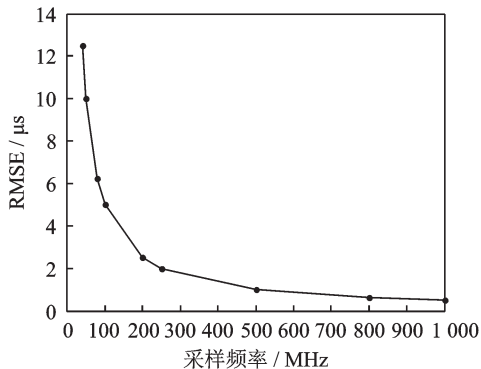
2.2 非理想脉冲信号过渡过程分析

2.2.1 过渡时间相等

仿真条件如下:信噪比 15 dB,采样频率 40 MHz 和 50 MHz,脉冲的上升沿所用时间为 t_1 ,脉冲的下降沿所用时间为 t_2 , $t_1=t_2$ 的脉冲信号通过各自对应的差分匹配滤波器均方根误差如图 5(a)所示, $t_1=t_2$ 的脉冲信号在不同频率下的差分匹配滤波器均方根误差如图 5(b)所示。过渡时间相等的脉冲信号通过差分匹配滤波器的输出误差只与



(a) Error of differential matched filter with same transition time



(b) Error curve of differential matched filter with sampling frequency

图5 $t_1=t_2$ 的脉冲信号差分匹配滤波的均方根误差

Fig.5 RMSE of pulse signal differential matched filtering at $t_1=t_2$

采样频率有关,且成反比关系。随着采样频率的增加,输出均方根误差逐渐减小,TOA 测量精确度逐渐提高。

2.2.2 过渡时间不等

仿真条件如下:脉冲宽度为 T ,采样频率为 f_{s1} ,离散化后脉冲信号的采样个数为 $N_n=T \times f_{s1}$,上升沿采样个数为 $N_1=t_1 \times f_{s1}$,下降沿采样个数为 $N_2=t_2 \times f_{s1}$ 。无噪声,采样频率为 40 MHz 和 50 MHz, $t_1=0.05 \mu\text{s}$ 、 t_2 不定, $t_1=0.1 \mu\text{s}$ 、 t_2 不定的脉冲信号,通过各自匹配滤波器和差分匹配滤波器的输出均方根误差如图 6 所示。

图 6 中, Da 代表采样频率 50 MHz,上升沿所用时间 $0.05 \mu\text{s}$ 的单脉冲差分匹配滤波均方根误差; Ma 代表采样频率 50 MHz,上升沿所用时间 $0.05 \mu\text{s}$ 的单脉冲匹配滤波均方根误差。Db 代表采样频率 40 MHz,上升沿所用时间 $0.05 \mu\text{s}$ 的单脉冲差分匹配滤波均方根误差; Mb 代表采样频率 40 MHz,上升沿所用时间 $0.05 \mu\text{s}$ 的单脉冲匹配滤波均方根误差。Dc 代表采样频率 50 MHz,上升沿所用时间 $0.1 \mu\text{s}$ 的单脉冲差分匹配滤波均方根误差; Mc 代表采样频率 50 MHz,上升沿所用时间 $0.1 \mu\text{s}$ 的单脉冲匹配滤波均方根误差。Dd 代表采样频率 40 MHz,上升沿所用时间 $0.1 \mu\text{s}$ 的单脉冲差分匹配滤波均方根误差; Md 代表采样频率 40 MHz,上升沿所用时间 $0.1 \mu\text{s}$ 的单脉冲匹配滤波均方根误差。

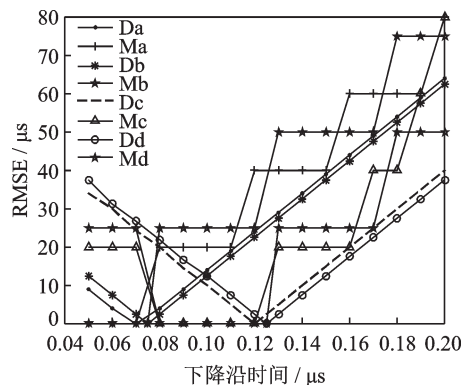


图6 不同频率不同时间脉冲信号 TOA 测量精确度对比图

Fig.6 Comparison of TOA measurement accuracy of pulse signals at different frequencies and different time

由图 6 可看出,在不含噪声,过渡时间不等的情况下,当 $t_2 = t_1 + \frac{1}{f_{s1}}$,即 $N_2 = N_1 + 1$ 时,过零点恰好为 N_n ,差分匹配滤波的输出均方根误差为 0。以采样频率为 50 MHz, $t_1=0.1 \mu\text{s}$ 的信号为例,当 $t_2=0.12 \mu\text{s}$ 时,滤波器的输出均方根误差为 0。

3 过零点提取性能分析

首先对模型性能进行仿真分析,本节将从 TOA 测量均方根误差的角度分析单脉冲、双脉冲和四脉冲信号的时间戳测量精确度。

脉冲积累是信号处理中有效的能量积累方法,随着脉冲个数的增加,相较于单脉冲,四脉冲信号积累的能量更多,又因脉冲信号的噪声之间互不相关,所以四脉冲信号的信噪比比单脉冲的信噪比大,四脉冲匹配滤波输出的峰值点和差分匹配滤波输出的过零点比单脉冲的精确,进而可以降低输出均方根误差,提高 TOA 精确度。

仿真条件如下:信噪比 15 dB,采样频率 40 MHz, $t_1=0.1 \mu\text{s}$, $t_2=0.125 \mu\text{s}$ 的脉冲信号,采用本文设计的差分匹配滤波器和匹配滤波模型,经过 1 000 次仿真,得到单、双和四脉冲的匹配滤波和差分匹配滤波均方根误差对比关系,如表 1 所示。由单脉冲、双脉冲和四脉冲的顺序来看,信号的能量逐渐增强,滤波器的输出误差逐渐减小,四脉冲信号的输出均方根误差最小,时间戳的标记精确度最高。不管是单脉冲、双脉冲还是四脉冲信号,差分匹配滤波输出误差相较于匹配滤波更小,时间戳标记精确度更高。

表 1 匹配滤波器和差分匹配滤波器均方根误差

Table 1 RMSE of matched filter and differential matched filter

| 脉冲类型 | 差分匹配滤波 RMSE/ μs | | 匹配滤波 RMSE/ μs | |
|------|----------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| | SNR=10 dB | SNR=15 dB | SNR=10 dB | SNR=15 dB |
| 单脉冲 | 19.672 7 | 14.598 9 | 37.864 9 | 23.887 8 |
| 双脉冲 | 19.078 3 | 12.240 4 | 30.669 6 | 20.811 7 |
| 四脉冲 | 18.673 3 | 10.002 3 | 25.775 5 | 19.397 2 |

3.1 信噪比

仿真条件如下:采样频率 40 MHz, $t_1=0.1 \mu\text{s}$, $t_2=0.125 \mu\text{s}$ 的脉冲信号,采用本文设计的差分匹配滤波器和匹配滤波模型,经过 1 000 次仿真,得到单脉冲、双脉冲和四脉冲信号的均方根误差随信噪比变化的曲线,如图 7 所示。图 7 中,Done 代表单脉冲差分匹配滤波均方根误差随信噪比变化曲线, Mone 代表单脉冲匹配滤波均方根误差随信噪比变化曲线。Dtwo 代表双脉冲差分匹配滤波均方根误差随信噪比变化曲线, Mtwo 代表双脉冲匹配滤波均方根误差随信噪比变化曲线。Dfour 代表四脉冲差分匹配滤波均方根误差随信噪比变化曲线, Mfour 代表四脉冲匹配滤波均方根误差随信噪比变化曲线。由图 7 可见,输入信噪比越高,滤波器输出信号的均方根误差越小,时间戳的标记精确度

就越高;但是在输入信噪比大于 20 dB 时,匹配滤波器输出均方根误差基本不发生变化,而差分匹配滤波器输出误差仍一直呈减小趋势,时间戳标记精确度也更高。同一信噪比时,与单脉冲、双脉冲信号相比,四脉冲信号滤波器的输出均方根误差最小,时间戳标记精确度最高,如表 2 所示。

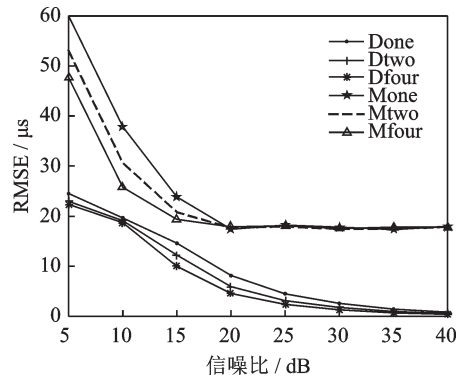


图 7 差分匹配滤波器与匹配滤波器输出误差随信噪比变化的曲线

Fig.7 Error curves of differential matched filter and matched filter with SNR

表 2 信噪比 40 dB 时输出均方根误差

Table 2 Output RMSE at SNR of 40 dB

| 脉冲类型 | 差分匹配滤波 RMSE/ μs | | 匹配滤波 RMSE/ μs |
|------|----------------------------|---------------------|--------------------------|
| | RMSE/ μs | RMSE/ μs | |
| 单脉冲 | 0.813 1 | | 17.958 3 |
| 双脉冲 | 0.539 4 | | 17.871 1 |
| 四脉冲 | 0.402 7 | | 17.871 0 |

3.2 采样频率

仿真条件如下:信噪比 15 dB, $t_1=0.1 \mu\text{s}$, $t_2=0.125 \mu\text{s}$ 的脉冲信号,采用本文设计的差分匹配滤波器和匹配滤波器模型,经过 1 000 次仿真,得到单脉冲、双脉冲和四脉冲信号均方根误差随采样频率变化的曲线,如图 8 所示。图 8 中,Do 代表单脉冲差分匹配滤波输出误差随频率变化曲线, Mo 代表单脉冲匹配滤波输出误差随频率变化曲线。Dt 代表双脉冲差分匹配滤波输出误差随频率变化曲线, Mt 代表双脉冲匹配滤波输出误差随频率变化曲线。Df 代表四脉冲差分匹配滤波输出误差随频率变化曲线, Mf 代表四脉冲匹配滤波输出误差随频率变化曲线。由图 8 可见,脉冲信号采样频率越高,滤波器输出的均方根误差越小,时间戳标记精确度就越高。同一采样频率时,与单脉冲、双脉冲信号相比,四脉冲信号滤波输出的均方根误差最小,时间戳标记精确度最高。同一采样频率时,差分匹配滤波的均方根误差相较于匹配滤波更小,时间戳标记精确度更高。虽然匹配滤波的输出均方根误差在减小,但是减小的速度远低于差分匹配滤

波,在采样频率大于125 MHz时,单、双和四脉冲差分匹配滤波的输出均方根误差变化已经不太明显,但是明显优于匹配滤波,如表3所示。

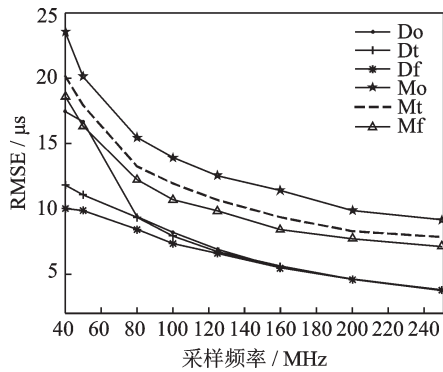


图8 差分匹配滤波与匹配滤波输出误差随频率变化曲线
Fig.8 Output error curves of differential matched filter and matched filter with frequency

表3 采样频率125 MHz时输出均方根误差

Table 3 Output RMSE at sampling frequency of 125 MHz

| 脉冲类型 | 差分匹配滤波 RMSE/ μs | 匹配滤波 RMSE/ μs |
|------|-------------------------------|--------------------------|
| 单脉冲 | 6.906 5 | 12.529 6 |
| 双脉冲 | 6.713 3 | 10.670 3 |
| 四脉冲 | 6.595 6 | 9.840 3 |

3.3 复杂度

仿真条件如下:信噪比20 dB,采样频率40 MHz, $t_1=0.1 \mu\text{s}$, $t_2=0.125 \mu\text{s}$ 的单脉冲、双脉冲和四脉冲信号,采用本文设计的差分匹配滤波器,1000次运行后仿真所需时间如表4所示。由单脉冲、双脉冲和四脉冲的顺序来看,差分匹配滤波输出的均方根误差逐渐减小,时间戳的标记精确度逐渐提高,但是运行的时间却逐渐增加,加大了运算的复杂度,如四脉冲信号差分匹配滤波的精确度约是单脉冲的1.78倍,但四脉冲运行千次的时间却是单脉冲的8.52倍,增加了运算量。

表4 程序运行时间和精确度对比

Table 4 Comparison of program running time and accuracy

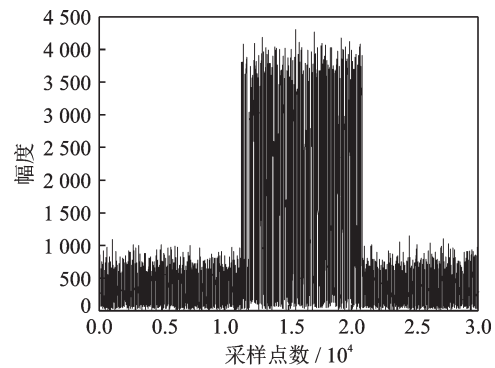
| 脉冲类型 | 运行千次的时间/s | 输出 RMSE/ μs |
|------|-------------|------------------------|
| 单脉冲 | 95.143 441 | 8.152 1 |
| 双脉冲 | 270.855 339 | 5.910 4 |
| 四脉冲 | 810.148 857 | 4.571 2 |

3.4 真实数据测试

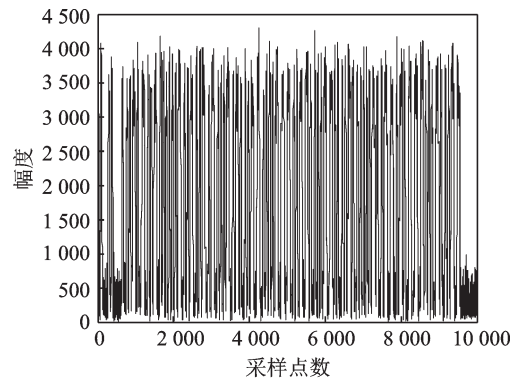
在天津机场终端区设置1个广播式自动相关监视接收机,实时接收的真实数据如图9所示。接收机自身信号采样频率为80 MHz,信噪比约为15.12 dB,为对比分析方便,仿真信号的采样频率

为80 MHz,信噪比为15.12 dB,其单、双和四脉冲信号差分匹配滤波器 TOA 估算精确度结果如表5所示。

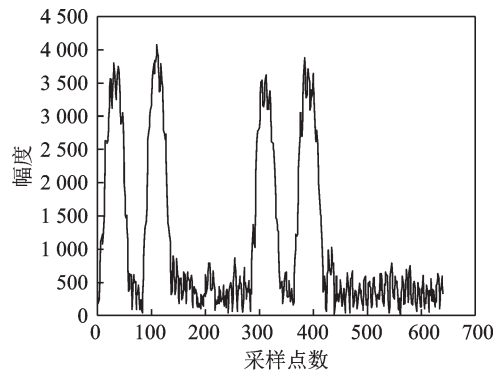
如表5所示,在采样频率80 MHz、信噪比15.12 dB时,仿真数据的双脉冲较单脉冲 TOA 估算准确度提升了5.05%,四脉冲较单脉冲 TOA 估算准确度提升了12.5%。真实数据的双脉冲较单



(a) Received real data



(b) Selected S-mode signal



(c) Extracted preamble signal

图9 真实数据

Fig.9 Real data

表5 仿真数据与真实数据均方根误差对比及变化率

Table 5 RMSE comparison between simulation data and real data and their change rates

| 脉冲类型 | 仿真数据 | | 真实数据 | |
|------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| | RMSE/ μs | 相对单脉冲 变化率/% | RMSE/ μs | 相对单脉冲 变化率/% |
| 单脉冲 | 9.396 1 | | 11.793 45 | |
| 双脉冲 | 8.921 9 | 5.05 | 10.602 50 | 10.10 |
| 四脉冲 | 8.224 7 | 12.5 | 8.948 75 | 24.12 |

脉冲 TOA 估算准确度提升了 10.1%, 四脉冲较单脉冲 TOA 估算准确度提升了 24.12%, 说明四脉冲信号差分匹配滤波器的 TOA 估算精确度更高, 验证了算法的实用性。由于各种因素的限制, 真实数据与仿真数据不可能完全一样, 真实数据的差分匹配滤波均方根误差比仿真数据的大, 但真实数据 TOA 估算精确度提升速度更快。

4 结 论

本文研究了 S 模式前导脉冲信号的过渡过程与时间戳测量精确度问题。在匹配滤波和差分匹配滤波基本原理的基础上, 利用脉冲间的时间结构关系, 提出用四脉冲信号差分匹配滤波过零点来标记信号 TOA 时间戳的改进算法, 实验结果表明四脉冲信号的时间戳标记精确度优于单脉冲信号。与匹配滤波的时间戳标记精确度作对比, 差分匹配滤波的时间戳标记精确度高于匹配滤波。在采样频率 40 MHz、信噪比 40 dB 时, 四脉冲信号差分匹配滤波器的时间戳标记精确度达到 0.402 7 μs 。在天津机场终端区接收实时信号的采样频率为 80 MHz, 信噪比约为 15.12 dB, 四脉冲信号差分匹配滤波器的时间戳标记精确度达到了 8.948 75 μs , 远小于国际民航组织规定的时间误差精度最大值 25 μs ^[13-14], 仿真数据和真实接收数据均验证算法的实用性。

参考文献:

- [1] TORRIERI D J. Adaptive thresholding systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1977, AES-13(3): 273-280.
- [2] ZEHAVI E. Estimation of time of arrival for rectangular pulses[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, AES-20(6): 742-747.
- [3] CHAN Y T, LEE B H, INKOL R, et al. Estimation of pulse parameters by convolution[C]//Proceedings of Electrical and Computer Engineering, CCECE'06 Canadian Conference on.[S.l.]: IEEE, 2006: 17-20.
- [4] CHAN Y T, LEE B H, INKOL R, et al. Estimation of pulse parameters by autoconvolution and least squares[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(1): 363-374.
- [5] 席轶敏, 刘渝, 靖晟. 电子侦察信号实时检测算法及性能分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(3): 277-281.
- XI Yimin, LIU Yu, JING Sheng. Analysis on probability of false alarm and detection[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33(3): 277-281.
- [6] 胡国兵, 刘渝, 邓振森. 基于 Haar 小波变换的信号到达时间估计[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(7): 1615-1619.
- HU Guobing, LIU Yu, DENG Zhenmiao. Arrival time estimation of signals based on Haar wavelets transform[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(7): 1615-1619.
- [7] GASPARE G, MAURO L, PATRIZIO D M, et al. New time of arrival estimation method for multilateration target location[C]//Proceedings of Joint International Symposium on Sensors and Systems for Airport Surveillance. Paris, France:[s.n.], 2005: 116-119.
- [8] LIN W C, LIU K C, WANG C K. Differential matched filter architecture for spread spectrum communication systems[J]. Electronics Letters, 1996, 32(17): 1539.
- [9] PETROCHILOS N, GALATI G, PIRACCIE. Separation of SSR signals by array processing in multilateration systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 965-982.
- [10] GALATI G, LEONARDI M, TOSTI M. Multilateration (local and wide area) as a distributed sensor system: Lower bounds of accuracy[C]//Proceedings of European Radar Conference.[S.l.]: IEEE, 2008.
- [11] 王洪, 金尔文, 刘昌忠, 等. 多点定位 TOA 精确估计及同步误差校正算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(4): 835-839.
- WANG Hong, JIN Erwen, LIU Changzhong, et al. Accurate estimation of TOA and calibration of synchronization error for multilateration[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(4): 835-839.
- [12] 徐江, 李艳, 纪晶华. 统计学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- XU Jiang, LI Yan, JI Jinghua. Statistical basis[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2015.
- [13] Eurocae. Minimum operational performance specification for mode S multilateration system for use in advanced surface movement guidance and control system (A-SMCGS): ED-117[S]. [S.l.]: Eurocae, 2003: 36-46.
- [14] GALATI G, LEONARDI M, MAGARO P, et al. Wide area surveillance using SSR mode S multilateration: Advantages and limitations[C]//Proceedings of European Radar Conference, EURAD 2005. Paris: [s.n.], 2005: 225-229.