

## 塔康包络检测与方位估计算法研究

陈坤, 田孝华, 赵颖辉, 俞成  
(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

**摘要:** 采用中频数字化技术的塔康视频信号是离散的脉冲调幅信号, 含有大量随机填充脉冲, 占空比大。首先, 针对峰值搜索提取包络的方法在低信噪比环境下效果差, 提出一种新的数字包络检测算法, 设计与脉冲相匹配的滤波器, 通过检测匹配滤波器输出的最大相关峰值确定脉冲到达时刻, 拟合整个脉冲估计其峰值得到包络信号; 然后, 用最小二乘算法拟合包络估计方位, 通过残差分析以一定置信度剔除粗差; 最后, 对连续  $k$  个方位参数数据平滑得到最终的结果。在装备模拟器上的仿真实验表明, 所提方法在 0 dB 功率信噪比下, 能有效检测包络、估计方位信息, 估计误差小于  $0.5^\circ$ , 满足系统精度要求。

**关键词:** 塔康; 中频数字化; 匹配滤波; 最小二乘; 残差分析; 数据平滑

**中图分类号:** V271.4; TN911.72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-637X(2014)04-0091-06

## On TACAN Envelope Detection and Azimuth Estimation Algorithm

CHEN Kun, TIAN Xiao-hua, ZHAO Ying-hui, YU Cheng

(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** TACAN video signal based on Intermediate Frequency (IF) digital technique is a discrete Pulse Amplitude Modulation (PAM) signal, which contains plenty of random filling pulses with large duty ratio. Considering that the envelope extraction method through searching the pulse peaks is not effective at low SNR, a novel method of digital envelope detection was proposed. According to the definitive signal format, a matched filter was designed to determine the arrival time of pulse by detecting the maximum correlation peak. The pulse peak was estimated to get the envelop signal by fitting the whole pulse. Secondly, least square algorithm was used to estimate the bearing parameter. In order to reduce and restrain outliers, intolerable errors were eliminated on the basis of confidence through residual analysis. At last, the final result was obtained by smoothing acquired  $k$  bearing parameters. Its effectiveness was verified by the experiment results. Under the power SNR of 0 dB, the estimation error is less than  $0.5^\circ$ , which meets the requirement of TACAN system.

**Key words:** TACAN; intermediate frequency digital technique; matched filter; least square algorithm; residual analysis; data smoothing

### 0 引言

塔康(Tactical Air Navigation, TACAN)是飞机及航海最主要的导航装备之一<sup>[1-3]</sup>, 主要由地面信标和机载设备两部分组成。该系统采用脉冲调制技术<sup>[4]</sup>, 目前主要采用模拟式信号处理体制<sup>[5]</sup>, 其方位测量是机载设备通过测量主基准脉冲到信号包络正斜率过零点获得方位角度<sup>[6]</sup>。由于模拟体制存在受噪声影响

大、精度不高的不足<sup>[5-6]</sup>, 中频数字化技术逐渐在机载设备中得到运用。方位测量的精度主要取决于主基准脉冲选取和包络恢复的准确程度, 主基准脉冲是采用特定时间编码的脉冲群, 容易准确选取。模拟式信号处理体制下, 利用电容充放电特性能较好抑制噪声, 恢复出包络信号<sup>[7]</sup>。采用中频数字化技术后, 由于脉冲较窄(要求在 0.5 电平时其宽度为  $3.5 \mu\text{s}$ <sup>[7-8]</sup>), 占空比大且大部分是随机填充脉冲, 经过数字下变频技术处理后, 信号采样率依旧较高, 否则将不能采到峰值。这导致每个周期数据量大, 频率成分复杂, 文献[3]采用多级滤波器提取包络, 比相法估计方位, 计算量大,

占用内存资源多。由于脉冲占空比大,很多采样点不在包络上,文献[5]对下变频后的视频信号直接拟合包络估计方位,误差较大。峰值检测器<sup>[9]</sup>能有效检测数字包络,但在低信噪比环境下受噪声影响大,当脉冲被噪声淹没,算法将失效,不能得到包络信号。

为提高参数估计精度,本文从时域出发,提出一种数字包络检测算法:根据脉冲确定的信号格式,设计与脉冲相匹配的匹配滤波器<sup>[10-11]</sup>,通过检测匹配滤波器输出的最大相关峰值确定脉冲出现时刻,为充分利用数据信息,拟合整个脉冲估计其峰值,得到的带噪包络信号含有毛刺,抖动剧烈,难以准确寻找正斜率过零点,传统的比相法误差大。采用多项式最小二乘算法拟合包络信号估计方位参数,可充分利用包络上每一点的信息,拟合过程中可减小噪声影响,通过残差分析以一定置信度剔除粗差,减小和抑制野值影响,对得到的  $k$  个方位参数做平滑处理求得最终的结果。

## 1 塔康系统测角基本原理<sup>[3]</sup>

塔康信标在其九瓣心脏形方向图最大值指向正东方时,旋转发送以主基准脉冲为起始点的脉冲信号,以 135 Hz 发送辅基准脉冲。天线以 15 Hz 频率旋转,脉冲幅度受 15 Hz 和 135 Hz 的正弦信号调制,如图 1 所示。

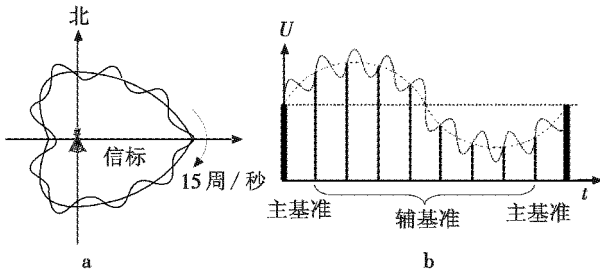


图 1 旋转的九瓣心脏形方向图及其辐射信号振幅

Fig. 1 Rotating heart-shaped directional pattern and transmitted signal amplitude

其方位角的测量就是以方位基准信号(含主、辅基准)为起始点,以包络信号(15 Hz 和 135 Hz)的正斜率拐点为包络比相参考点,测量包络比相参考点滞后于基准的相位差<sup>[4]</sup>。具体的测角流程如图 2 所示。

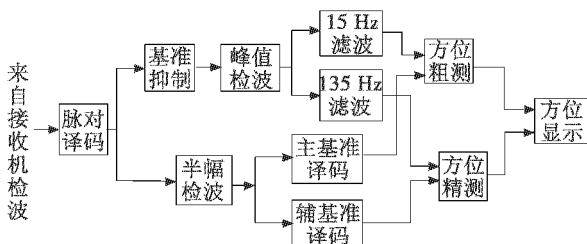


图 2 塔康机载设备经典信号处理框图

Fig. 2 Classical signal processing flow diagram on TACAN aircraft equipment

峰值检波,检出脉冲幅度调制信号。15 Hz 滤波,从峰检信号中滤出 15 Hz 正弦包络信号,供方位粗测用。135 Hz 滤波,从峰检信号中滤出 135 Hz 正弦包络信号,供方位精测用。主辅基准译码,分别选出主辅定时信号,各送往方位粗、精测电路。由粗测电路测出粗测角  $\varphi_1$ ,精测电路测出精测角  $\varphi_2$ ,则飞机方位角为

$$\varphi = 40 \times \left\lfloor \frac{\hat{\varphi}_1}{40} \right\rfloor + \frac{\hat{\varphi}_2}{9} \quad (1)$$

式中,符号“ $\lfloor \cdot \rfloor$ ”表示向下取整运算。

## 2 数学模型

以主基准为时间起点的视频脉冲信号表达式为

$$s(t) = A_0 [1 + m_{15} \sin(2\pi f_{15} t - \varphi_1) + m_{135} \sin(2\pi f_{135} t - \varphi_2)] \cdot \sum_{i=0}^{\infty} G(t, t_i) \quad (2)$$

其中:

$$G(t, t_i) = \delta(t - t_i) * G(t); \quad (3)$$

$A_0$  为信号幅度;  $m_{15}$  ( $m_{135}$ ) 为 15 Hz (135 Hz) 正弦包络信号调制度;  $f_{15} = 15$  Hz;  $f_{135} = 135$  Hz;  $\varphi_1$  ( $\varphi_2$ ) 为 15 Hz (135 Hz) 正弦包络信号初相;  $G(t)$  为钟形脉冲对;  $t_i$  为脉冲到达时刻。塔康信号标准中规定,所有塔康信号的脉冲均应该是准钟形,在 0.5 电平时其宽度为  $3.5 \mu\text{s}$ ,  $G(t)$  信号的表达式为

$$G(t) = e^{-\beta t^2} + e^{-\beta(t-\Delta T)^2} \quad (4)$$

式中:  $\beta = -\frac{\ln 0.5}{1.75^2}$ ;  $\Delta T = 12 \mu\text{s}$  为脉冲编码间隔。

本文采用机载设备中频信号数字化技术,得到中频数字信号,信号处理框图如图 3 所示,中频信号通过数字下变频得到视频脉冲信号,低通滤波器平滑视频脉冲,由匹配滤波器和峰值估计器得到包络信号,从而估计出方位信息。

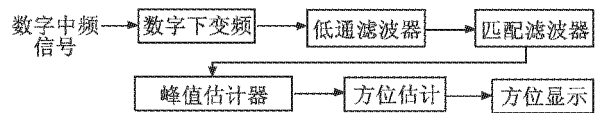


图 3 中频信号数字化的塔康测角框图

Fig. 3 TACAN angle measurement flow diagram based on IF digital technique

式(2)的视频脉冲信号离散形式为

$$s_k = A_0 [1 + m_{15} \sin(2\pi f_{15} kT - \varphi_1) + m_{135} \sin(2\pi f_{135} kT - \varphi_2)] \sum_{i=0}^{\infty} G(k, t_i), k = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

式中,  $T = 1/f_s$ ,  $f_s$  为采样率。

接收到的信号为

$$x_k = s_k + n_k \quad (6)$$

式中,  $n_k$  为方差未知的零均值高斯白噪声。

### 3 包络检测

#### 3.1 峰值检测器

峰值检测器是一种有效检测脉冲调幅信号包络的方法,其算法流程如图4所示。峰值检测器通过检测上升沿到下降沿的变化捕获峰值点,如果该峰值点幅度大于前一峰值点幅度的一半,则存储该峰值点,再对存储的峰值点通过9点长的滑窗做平均,通过滑窗做平均能有效抑制噪声的影响,使包络更加平滑。但是,在信噪比较低的环境下,脉冲被噪声淹没,峰值检测器不能准确判断上升沿和下降沿,检测出的包络误差较大,不利于方位估算。针对信噪比较低的情况,通过设计与脉冲信号匹配的匹配滤波器和峰值估计器来提取信号包络。

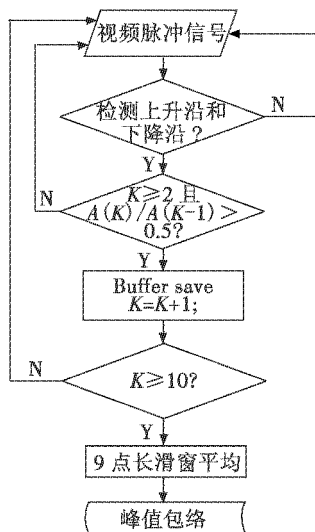


图4 峰值检测

Fig.4 Peak detection flow chart

#### 3.2 匹配滤波器

由于脉冲信号格式已知,设计与之匹配的滤波器,被噪声淹没的脉冲信号通过匹配滤波器会出现相关峰。脉冲宽度一定,通过检测相关峰峰值就能确定脉冲到达时刻。匹配滤波器是一个线性最佳滤波器<sup>[10-11]</sup>,能使输出功率信噪比达到最大,在低信噪比环境下能有效检测信号。在  $t_i$  时刻接收到的受调制脉冲信号为

$$P_k = [e^{-\beta(kT-t_i)^2} + e^{-\beta(kT-t_i-\Delta T)^2}] \cdot f(k) + n_k \quad (7)$$

式中,

$$f(k) = A_0 [1 + m_{15} \sin(2\pi f_{15} kT - \varphi_1) + m_{135} \sin(2\pi f_{135} kT - \varphi_2)] \quad (8)$$

脉冲对的两脉冲峰值之差为

$$f\left(\frac{t_i + \Delta T}{T}\right) - f\left(\frac{t_i}{T}\right) = m_{15} [\sin(2\pi f_{15}(t_i + \Delta T) - \varphi_1) - \sin(2\pi f_{15} t_i - \varphi_1)] + m_{135} [\sin(2\pi f_{135}(t_i + \Delta T) - \varphi_2) - \sin(2\pi f_{135} t_i - \varphi_2)] =$$

$$2m_{15} \cos(2\pi f_{15} t_i - \varphi_1 + \Delta T) \sin(\pi f_{15} \Delta T) + 2m_{135} \cos(2\pi f_{135} t_i - \varphi_2 + \Delta T) \sin(\pi f_{135} \Delta T) \quad (9)$$

$$\begin{cases} |\sin(\pi f_{15} \Delta T)| \doteq 0 \\ |\sin(\pi f_{135} \Delta T)| \doteq 0 \\ |\cos(2\pi f_{15} t_i - \varphi_1 + \Delta T)| \leq 1 \\ |\cos(2\pi f_{135} t_i - \varphi_2 + \Delta T)| \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

所以  $f\left(\frac{t_i + \Delta T}{T}\right) - f\left(\frac{t_i}{T}\right) \doteq 0 \Leftrightarrow f\left(\frac{t_i + \Delta T}{T}\right) \doteq f\left(\frac{t_i}{T}\right)$ , “ $\doteq$ ”是“约等于”数学符号。式(10)说明具有特定编码间隔  $\Delta T = 12 \mu s$  的脉冲对两峰值近似相等,则可以认为机载接收机接收的是两脉冲幅度一致的脉冲对信号,则式(7)可重写为

$$P(k) = [e^{-\beta(kT-t_i)^2} + e^{-\beta(kT-t_i-\Delta T)^2}] \cdot A_{t_i} + n_k \quad (11)$$

式中,  $A_{t_i}$  是  $t_i$  时刻脉冲幅值。

将式(4)代入式(11)可得

$$P(k) = A_{t_i} \cdot G(kT - t_i) + n_k \quad (12)$$

根据匹配滤波器理论,接收到的脉冲对  $P_k$  的匹配滤波器的脉冲响应  $h(k)$  为

$$h(k) = kA_{t_i} \cdot G(t_0 + t_i - kT) \quad (13)$$

匹配滤波器对振幅和时延参量不同的信号具有适应性,取式(11)中到达时刻  $t_i = 0$ , 振幅  $kA_{t_i} = 1$ ,  $h(k)$  可写为

$$h(k) = kG(t_0 - kT) \quad (14)$$

右移时间  $t_0 = 6 \mu s$ 。  $h(k)$  对所有接收到的脉冲对匹配,故所有脉冲信号通过一个匹配滤波器即可检测出脉冲到达时刻。

#### 3.3 峰值估计器

检测出脉冲到达时刻,峰值位置及其幅值即能确定。由于直接读取峰值到达时刻对应的信号幅度确定峰值,受噪声影响误差大,为充分利用数据信息,减小误差,采用最小二乘算法拟合接收到的脉冲,估计出脉冲峰值幅度。

对式(4)信号采样得到离散的单位幅度脉冲对数组  $G$ , 与  $t_i$  时刻接收到的脉冲对  $P_k$  的关系为

$$A_k G + N = P_k \quad (15)$$

式中:  $A_k$  为待估脉冲峰值;  $N$  为噪声。  $P$  为接收到的脉冲对  $P_k$  的数组,  $G$ 、 $P_k$ 、 $N$  均为  $L \times 1$  的数组,  $L$  由采用率  $f_s$  决定。式(15)最小二乘解为

$$\hat{A}_k = P_k G^T (GG^T)^{-1} \quad (16)$$

最小二乘估计误差为

$$J_A = (P_k - \hat{A}_k)^T (P_k - \hat{A}_k) = [I - G^T (GG^T)^{-1} G] P_k^T P_k \quad (17)$$

### 4 方位估计

通过匹配滤波器和峰值估计器能够得到峰值包络信号,由于正斜率过零点受噪声和估计误差影响较大,通过传统的寻找正斜率点比相测角误差较大。考虑

得到的峰值包络的采样间隔具有随机性,频率成分复杂,本文在时域上采用多项式最小二乘拟合算法实现方位参数的有效估计,对残差分析以一定置信度剔除粗差,减小和抑制野值影响,通过数据平滑处理进一步提高精度。

#### 4.1 多项式最小二乘算法

第  $i$  个峰值点  $x_i$  可以表示为

$$x_i = A_0 [1 + m_{15} \sin(k_i T_{15} - \varphi_1) + m_{135} \sin(k_i T_{135} - \varphi_2)] + n_i \quad (18)$$

式中:  $T_{15} = 2\pi f_{15} T$ ;  $T_{135} = 2\pi f_{135} T$ ;  $k_i$  表示第  $i$  个峰值点的位置;  $n_i$  为噪声。对每一个峰值点均可以类似表示,得到  $N$  个方程 ( $N$  是一个周期内的峰值点数) 为

$$\begin{cases} x_1 = A_0 [1 + m_{15} \sin(k_1 T_{15} - \varphi_1) + m_{135} \sin(2k_1 T_{135} - \varphi_2)] + n_1 \\ x_2 = A_0 [1 + m_{15} \sin(k_2 T_{15} - \varphi_1) + m_{135} \sin(k_2 T_{135} - \varphi_2)] + n_2 \\ \vdots \\ x_N = A_0 [1 + m_{15} \sin(k_N T_{15} - \varphi_1) + m_{135} \sin(k_N T_{135} - \varphi_2)] + n_N \end{cases} \quad (19)$$

式中,只有  $A_0$ 、 $m_{15}$ 、 $m_{135}$ 、 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  这 5 个参量未知。建立目标方程

$$\min \sum_{i=1}^N \{x_i - A_0 [1 + m_{15} \sin(2\pi f_{15} T_{hi} - \varphi_1) + m_{135} \sin(2\pi f_{135} T_{hi} - \varphi_2)]\}^2 \quad (20)$$

式(20) 是一个非线性形式,重写为

$$\min \sum_{i=1}^N \{x_i - [A_0 + A_1 \sin(k_i T_{15}) + A_2 \cos(k_i T_{15}) + A_3 \sin(k_i T_{135}) + A_4 \cos(k_i T_{135})]\}^2 \quad (21)$$

式中,

$$\begin{cases} A_1 = A_0 m_{15} \cos \varphi_1 \\ A_2 = -A_0 m_{15} \sin \varphi_1 \\ A_3 = A_0 m_{135} \cos \varphi_2 \\ A_4 = -A_0 m_{135} \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (22)$$

记  $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_N]^T$ ;  $\boldsymbol{\theta} = [A_0 \ A_1 \ A_2 \ A_3]^T$ ;

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(k_1 T_{15}) & \cos(k_1 T_{15}) & \sin(k_1 T_{135}) & \cos(k_1 T_{135}) \\ 1 & \sin(k_2 T_{15}) & \cos(k_2 T_{15}) & \sin(k_2 T_{135}) & \cos(k_2 T_{135}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \sin(k_N T_{15}) & \cos(k_N T_{15}) & \sin(k_N T_{135}) & \cos(k_N T_{135}) \end{bmatrix} \quad (23)$$

式(21)写成矩阵形式为

$$\min (\mathbf{X} - \mathbf{H}\boldsymbol{\theta})^T (\mathbf{X} - \mathbf{H}\boldsymbol{\theta}) \quad (23)$$

对  $\boldsymbol{\theta}$  求偏导,并令结果等于零,得  $-2\mathbf{H}^T (\mathbf{X} - \mathbf{H}\boldsymbol{\theta})|_{\boldsymbol{\theta}=\hat{\boldsymbol{\theta}}} = 0$ ,解得最小二乘解为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{X} \quad (24)$$

通过象限关系和反正切关系可以求得  $\hat{\varphi}_1$  和  $\hat{\varphi}_2$ , 由式

(1) 估计出方位参数。

#### 4.2 粗差处理

由于噪声的影响,搜索出的峰值中存在不服从包络分布趋势的点(野值),野值严重影响 LS 算法的性能,制约估计精度。通过对残差的分析,以一定概率剔除原观测数据,抑制野值的影响。多项式最小二乘曲线拟合求得的一组拟合数据  $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{H} \hat{\boldsymbol{\theta}}$ , 残差  $\mathbf{v} = |\mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}|$ 。残差  $\mathbf{v}$  越小,表示拟合的数据与峰值越接近,反之,残差  $\mathbf{v}$  越大,误差越大。选择适当的粗大误差判决门限  $T$ , 当  $\mathbf{v} > T$  时,判定残差  $\mathbf{v}$  为粗大误差,所对应的峰值为野值,予以剔除。门限  $T$  的选取方法是:将残差数组  $\mathbf{v}$  由小到大升序排列得到数组  $\mathbf{v}'$ ,  $T = \mathbf{v}'(\lfloor \text{length}(\mathbf{v}) * 95\% \rfloor)$ , 表示取数组  $\mathbf{v}'$  的第  $\lfloor \text{length}(\mathbf{v}) * 95\% \rfloor$  个数据为粗差门限,即以 95% 的置信度剔除粗差。剔除粗差后再重新估计  $\boldsymbol{\theta}$ , 重复 2~3 次即可达到稳定。

#### 4.3 数据平滑处理

飞机在 1/3 s(5 个周期) 移动距离相对塔康台站的距离极小,方位信息几乎不变。故可采用连续估计出的 5 个方位信息做平滑处理,以得到一个最终的方位信息送给显示器。如式(1)所示,当  $\varphi_1$  是  $40^\circ$  的整数倍时,估计值  $\hat{\varphi}_1$  因为很小的误差(例如  $\hat{\varphi}_1 = 39.9^\circ$ ),方位参数  $\varphi$  将会出现  $40^\circ$  的跳变。为减小跳变的影响,在连续估计出的 5 个方位信息中去除最大值和最小值,对中间 3 个方位信息做算术平均得最终方位参数,送上位机显示。总结以上测角步骤如下:

1) 对视频信号采用式(12)的匹配滤波器滤波,检测脉冲到达时刻,由式(15)峰值估计器估计脉冲峰值,得到调制包络信号;

2) 在时域采用多项式最小二乘算法拟合包络估计  $\boldsymbol{\theta}$ , 以 95% 的置信度剔除粗差,对剔除粗差的数据重新拟合估计  $\boldsymbol{\theta}$ , 重复 2~3 次即可;

3) 对连续 5 个周期估计出的方位做平滑处理,得到最终的方位信息送上位机显示。

### 5 算法性能验证

根据图 3 信号处理流程,搭建如图 5 所示硬件测试环境。

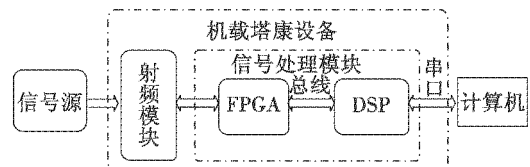


图 5 硬件实验平台

Fig. 5 Experiment hardware platform

在验证平台中,信号源发射混有噪声的塔康模拟

信号。塔康模拟信号经过射频模块处理后变为中频调制信号输入到信号处理模块。信号处理模块采用“FPGA + DSP”架构, FPGA 主要实现数字下变频, 低通滤波以及搜索主群定时脉冲, 通过定时脉冲上升沿外部中断 DSP, DSP 响应中断, 通过总线读取视频脉冲信号, 采用文中算法检测调制包络, 实现方位有效估计, 通过串口送计算机显示。

根据塔康系统要求<sup>[6]</sup>, 验证过程中信号源参数设置如表 1 所示。DSP 中断读取视频脉冲信号, 在功率信噪比为 0 dB 下, 接收的信号如图 6 所示。经过匹配滤波, 在脉冲结束时刻会出现最大相关峰, 通过峰值搜索算法确定最大相关峰值, 如图 7 所示。峰值对应时刻即脉冲结束时刻, 采用式 (15) 的峰值估计器分别估计脉冲峰值, 每个脉冲对均如此操作, 可得到调制包络信号。峰值检测器和文中方法在 0 dB 功率信噪比环境下检测的包络如图 8 所示, 图中为一个周期的 15 Hz、135 Hz 的复合正弦调制信号, 可以看出, 本文方法检测出的波形失真度较小。

表 1 塔康信号参数设置

Table 1 TACAN signal parameter settings

直流分量	$A_0 = 2v$
15 Hz 信号初相/rad	$\varphi_1 = \pi/4$
15 Hz 信号调制度	$m_{15} = 0.2$
135 Hz 信号初相/rad	$\varphi_2 = \pi$
135 Hz 信号调制度	$m_{135} = 0.2$

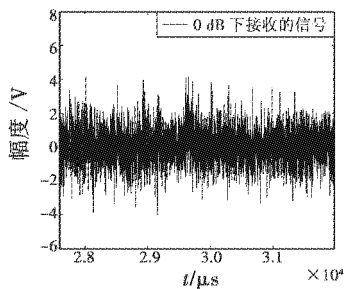


图 6 0 dB 信噪比下接收的脉冲调幅信号  
Fig. 6 Received PAM signal at SNR of 0 dB

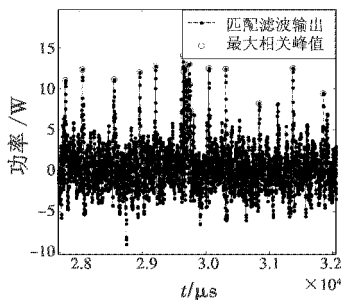


图 7 滤波输出

Fig. 7 Matched filter outputs

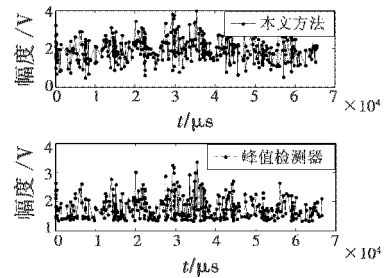


图 8 检测的包络

Fig. 8 Detected envelope

为验证不同功率信噪比的环境下方位估计精度, 采用 500 次 Monte Carlo 仿真, 并用相同方法估计峰值检测器检测出的包络的方位, 与之对比, 如图 9 所示。图 9 表示在 0 ~ 10 dB 功率信噪比的环境下方位估计的偏差, 可以看出, 在 0 dB 功率信噪比下估计误差能抑制在 0.5° 范围内, 满足塔康系统的要求, 远小于峰值检测器提取的数字包络的估计误差; 数据平滑处理能有效改善估计精度; 粗差处理能剔除包络中的野值, 使精度进一步提高, 在实际工程中能增强算法稳健性。同时可以看到, 随着信噪比的增加, 到 3 dB 时, 峰值检测器提取的包络方位估计误差小于本文方法, 这是由于本文中估计脉冲峰值带来了误差。

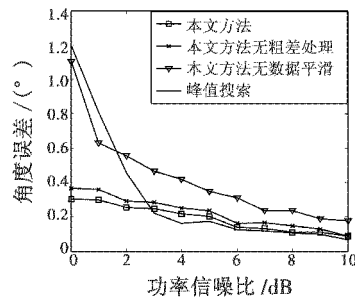


图 9 方位估计算法对比

Fig. 9 Comparison of azimuth estimation algorithms

## 6 结论

当功率信噪比在 3 dB 以上时, 峰值检测器提取的包络精确, 且计算量相对较小。本文提出的数字包络检测算法在 0 dB 功率信噪比环境下能有效检测包络, 在 3 dB 以上时精度略低于峰值检测器提取的包络, 但方位误差均在 0.5° 以下, 满足塔康系统的要求。与传统方案相比, 大大减少中间处理环节, 峰值包络的数据量远小于整个周期数据量, 对包络信号处理能节约内存空间, 提高计算速度。

## 参考文献

[1] CHRISTOPHER E J. Electronically scanned TACAN antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation,

- 1974, 22(1):12-16.
- [2] SHESTAG L N. A cylindrical array for the TACAN system [J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1974, 22(1):17-25.
- [3] 龚成, 郭英, 齐子森. 塔康导航系统机载中频信号数字化技术[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2008, 19(5):29-32.  
GONG C, GUO Y, QI Z S. Digital implement technology of TACAN IF signal [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 19(5):29-32.
- [4] 王树彬, 周正, 邹卫霞, 等. 超宽带对塔康系统的干扰分析[J]. 高技术通讯, 2009, 19(7):680-685.  
WANG S B, ZHOU Z, ZOU W X, et al. Analysis of the interference caused by UWB with TACAN [J]. High Technology Letters, 2009, 19(7):680-685.
- [5] 张浩杰, 李晓明, 裴文林. 基于中频数字化技术的塔康测角方法研究[J]. 现代防御技术, 2012, 40(3):67-71.  
ZHANG H J, LI X M, PEI W L. Angle measuring of TACAN based on IF digital technique [J]. Modern Defence Technology, 2012, 40(3):67-71.
- [6] 张忠心, 李晓明, 张景伟, 等. 无线电导航理论与系统 [M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1998:220-270.  
ZHANG Z X, LI X M, ZHANG J W, et al. Radio navigation theory and system [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1998:220-270.
- [7] 王维康, 张斌, 李睿, 等. 塔康系统输出参数的精确测量方法研究[J]. 电光与控制, 2010, 17(7):78-82, 91.  
WANG W K, ZHANG B, LI R, et al. Accurate measurement of TACAN output parameters [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(7):78-82, 91.
- [8] 田孝华, 李睿, 王维康. 有效估计塔康测距信号多径时延的方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9):2273-2276.  
TIAN X H, LI R, WANG W K. An efficient time delay estimation algorithm for multipath signal of distance signal in TACAN system [J]. Electronics & Information Technology, 2010, 32(9):2273-2276.
- [9] LEE J Y, KIM J K, YOON G. A digital envelope detection for blood pressure measure [C]//Proceeding of the 23rd Annual EMBS International Conference, October 25-28, Istanbul, Turkey, 2001:226-228.
- [10] WANG P, SAHINOGLU Z, PUN M O, et al. Persymmetric parametric adaptive matched filter for multichannel adaptive signal detection [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(6):3322-3328.
- [11] JIANG C S, LI H B, RANGASWAMY M. On the conjugate gradient matched filter [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(5):2660-2666.
- (上接第 55 页)
- QIN F J, LI A, XU J N, et al. Horizontal inner damping method with continuously adjustable parameter for inertial navigation system [J]. Journal of Chinese Technology, 2011, 11(6):290-292.
- [10] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 北京:科学出版社, 2006.  
HU S S. Principle of automatic control [M]. Beijing: Science Press, 2006.

欢 迎 投 稿      欢 迎 刊 登 广 告