

基于自适应差分量化的红外背景抑制新方法

汪大宝, 刘上乾, 张 峰

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对复杂背景下红外弱小目标图像的背景抑制难题, 从图像采集环节考虑, 根据自适应差分量化理论, 提出了一种基于自适应背景抑制的红外弱小目标图像采集方法。其基本思想是: 根据红外弱小目标图像背景杂波的相关性, 利用自适应预测器, 由已采集的像素信息实时估计出下一时刻背景杂波的最佳估计, 并将其反馈至原始图像信号输出端, 与实际采集图像信号相比较。通过量化残差图像信号来获得预测增益, 从而提高采集图像的信噪比。理论分析与仿真实验表明, 与传统的直接图像采集方法相比, 此方法不仅等效地提高模数转化器的性能, 而且能够很大程度地提高采集图像的信噪比(SNR), SNR可由1.43提高到4.57。

关键词: 红外图像采集; 自适应差分量化; 背景预测; 模数转换

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2009)03-0163-04

A Novel Infrared Background Suppression Method Based on Adaptive Differencing Quantization

WANG Da-bao, LIU Shang-qian, ZHANG Feng

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: Aiming at the difficulties of infrared DIM-small targets image background suppression, a novel infrared DIM-small targets image acquisition method based on background suppression is proposed according to the adaptive differencing quantization algorithm. The basic concept is to estimate the best estimation of the background according to the correlation of the background clutter with adaptive prediction filter, and the residual image signal is acquired by subtract this best estimation from original image signal, and then, the residual image signal was quantized by the acquisition system. Theoretical analysis and simulation results show that, comparing with the traditional background suppression method, this method equivalent improve the ADC's performance and can effectively increase the SNR of the image, the SNR increase to 4.57 from 1.43.

Key words: infrared image acquisition; adaptive differencing quantization; background prediction; analog to digital converter

引言

复杂背景下红外弱小目标的检测跟踪是远距离目标识别领域的研究热点和难点, 在导弹逼近告警、天文观测等领域具有广泛的应用。红外探测器远距离捕捉到的目标信号微弱、图像的信噪比很低, 目标极易被淹没在复杂背景杂波之中, 因此, 抑制背景杂波信号, 增强目标信号能量, 是提高系统在复杂背景下目标检测能力问题的关键。传统的红外背景抑制方法首先将红外焦平面器件(IRFPA)输出的模拟图像信号

经过模数转换器(ADC)量化采集后, 再采用相应的算法抑制背景、保留信号。然而, 由于背景杂波分量是IRFPA输出的模拟图像信号的主要组成部分, 因此直接量化该信号不仅会造成对ADC资源的浪费, 而且降低了系统分辨微弱目标信号的能力, 从而影响后续算法的处理效果。

为此, 本文从红外图像采集环节考虑, 将自适应差分量化理论引入红外弱小目标图像采集的研究, 提出了一种基于自适应背景抑制的红外图像采集方法。该方法利用量化、估计、比较三个部分组成闭合的反

收稿日期: 2008-12-04; 修订日期: 2009-03-05.

作者简介: 汪大宝(1982-), 男, 汉族, 安徽宿州人, 博士研究生, 主要研究工作是红外成像及实时图像信号处理。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60377034)

馈环路,在量化模拟图像信号前即实现抑制其中背景杂波分量的操作,从而压缩了信号的动态范围,不仅等效地提高了ADC性能,而且有效地改善了采集图像的信噪比。

1 自适应背景抑制图像采集方法

1.1 红外弱小目标图像采集系统性能分析

红外弱小目标图像可以表示为:

$$I = \begin{cases} t+b+n & \text{target exit} \\ b+n & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 、 b 和 n 分别表示目标、背景和噪声。为了定量地对图像采集系统性能进行分析,引入ADC无杂散动态范围(SFDR)参数:

$$\text{SFDR} \triangleq 10 \log_{10} \frac{A^2/8}{P_{ss}} \quad (2)$$

式中: A 表示ADC的满刻度量程; P_{ss} 表示图像采集系统杂散信号功率。假设IRFPA可分辨的最微弱信号的功率为 P_w , 定义微弱信号信噪比为:

$$\text{SNR}_w = 10 \log_{10}(P_w/P_{ss}) \quad (3)$$

根据(1)与(2), 可得如下关系:

$$\text{SFDR} = \text{SNR}_w + 10 \log_{10}[A^2/(8P_w)] \quad (4)$$

红外场景图像在统计学上可认为是任意的二维脉冲分布, 它的强度服从高斯分布:

$$P(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(I-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

式中: I 表示IRFPA像元输出信号功率; μ 为 I 的均值; σ 表示均方差。为了避免红外场景信号强度在统计学的观点上出现“饱和”的现象, A 与 $P(I)$ 应该满足: $A \geq 6P_1^{1/2}$ 。将其代入(5)可得:

$$\text{SFDR} \geq \text{SNR}_w + 10 \log_{10}[9P_1/(2P_w)] =$$

$$6.5 + \text{SNR}_w + \text{DR}_I \quad (6)$$

式中: $\text{DR}_I = 10 \log_{10}(P_I/P_w)$, 为红外场景动态范围。

对于复杂的红外场景, 其动态范围 DR_I 很高, 相应的SFDR也很高, 而目标的能量非常微弱, 由于SFDR每增加6dB, 需要相应提高ADC位数1bit^[1], 且ADC存在固有的1.5bit非线性误差。可见, 为了保证系统能够从微小温差中分辨目标, 系统对ADC的量化宽度和速度均有很高的要求。

1.2 基于自适应背景预测的图像采集方法

本文提出了一种基于自适应背景抑制的红外弱小目标图像采集方法。该方法结构框图如图1所示。

光学系统与IRFPA将红外场景转化为电信号, 经预处理与放大后得到模拟图像信号 $I(x, y)$ 。其中, 背景杂波功率 P_b 远大于目标信号功率 P_t 。若能抑制 P_b 而保留 P_t 则可提高采集图像的信噪比。

统计学研究表明, 目标信号强度与周围背景信号强度不相关, 表现为图像中孤立的亮斑。噪声可视为高斯白噪声, 它与背景图像也不相关。而背景杂波在空间上呈大面积的连续分布, 像素之间具有较强的相关性, 在图像上表现为具有渐变过渡状态。

背景杂波的空间相关性表现在IRFPA读出电路上为时间上的相关性。因此, 可以利用这种相关性, 由已采集的 m 个像素信息 $\{I(k), k \in (n-m+1, n)\}$ 实时估计出下一时刻像素值的最佳估计 $s_d(k+1)$, 并将其进行数模转换后, 从下一时刻的原始图像信号 $I(k+1)$ 中减除该最佳估计, 得到残差图像 $e(k+1) = I(k+1) - s(k+1)$ 。由于信号与背景的统计不相关性, $e(k+1)$ 中的目标被尽可能地保留, 而背景杂波则受到抑制。可见, 相对于原始的图像信号, 残差信号的信噪比和动态范围均有所改善。将残差图像 $e(k+1)$ 送入ADC进行量化采集, 相应地, 红外弱小目标图像采集系统所采集的图像信噪比也较高。完整的红外场景图像可表示为:

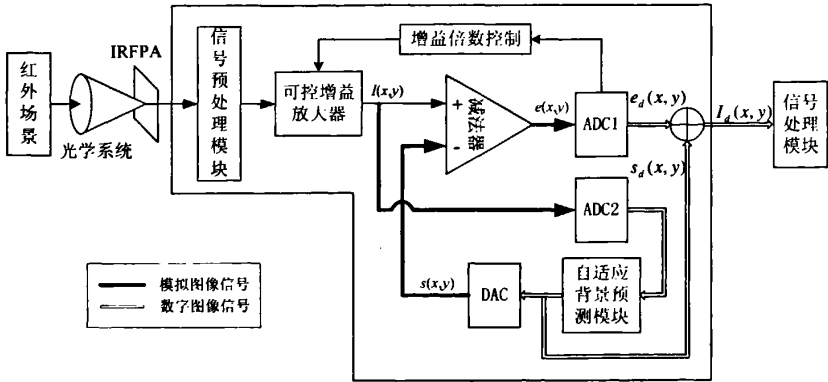


图1 基于自适应背景抑制的图像采集系统

Fig.1 Image acquisition system based on adaptive background suppression

$$I_d(k+1)=e_d(k+1)+s_d(k+1) \quad (7)$$

自适应背景抑制模块是该图像采集方法的核心部分,它运用自适应滤波原理,由 k 时刻已采集的 m 个像素信息预测第 $k+1$ 个像素值。自适应滤波器的参数可以自动地跟踪输入图像信号的统计特性变化,并将参数调整至最佳。

增益控制器与可控增益放大器组成反馈环路,其作用是将减法器输出的模拟残差图像信号放大至ADC的转换范围,以减少模数转换过程中的量化误差,提高残差图像量化信噪比。

1.3 自适应背景抑制图像采集方法性能分析

图像目标信号与杂波背景能量之比为:

$$\text{SNR}_{bs}=10\lg\frac{E[I^2]}{E[e^2]}=10\lg\left(\frac{E[I^2]}{E[I^2]}\times\frac{E[I^2]}{E[e^2]}\right)=\text{SNR}_q+G_p \quad (8)$$

式中: $E[\cdot]$ 表示信号的均值; $\text{SNR}_q=10\lg\frac{E[I^2]}{E[I^2]}$,为原始图像中目标信号与杂波背景能量之比; $G_p=10\lg\frac{E[I^2]}{E[e^2]}$,称为预测增益,是指通过自适应背景抑制后,系统相对于直接采集信噪比的提高程度。可见,基于自适应背景预测的红外图像采集方法能够很大程度上提高图像采集系统的信噪比。另外,由于压缩了信号的动态范围,相当于等效的提高了ADC的性能。

本文方法的另外一个特点是结构简单,实时性强。自适应背景预测模块是主要的耗时单元,本文采

用结构简单的二维最小均方误差(TDLMS)算法预测背景,更利于硬件实时完成。对于标准的PAL图像信号,其具有27 MHz的像素时钟,经过实验测定,本文算法可以实时实现背景杂波抑制和图像采集。

2 仿真结果与分析

针对实际的红外场景,分别采用本文介绍方法以及直通方法采集图像,结果示于图2。为了显示方便,对图像进行了增强处理。其中图2(a)和图2(c)分别为直通采集图像和使用本文方法采集图像,图2(b)和图2(d)为它们的三维显示。对比图2(a)与图2(c)可以发现,直通方法采集图像背景的起伏较大,小目标被淹没在强烈的背景杂波之中,本文方法采集图像整体上呈现平面化,并且可以较好的保持目标信号的尖峰信息,这说明本文方法能有效的抑制红外场景的背景杂波成分,从而起到提高图像信噪比和对比度的作用,小目标信号得到极大的增强,同时抑制了背景杂波信号。

为了进一步说明本文方法的有效性,针对具体红外弱小目标图像,定义图像方差信噪比 $\text{SNR}_\sigma=(s-m)/v$,其中 s 、 m 和 v 分别为局部窗口内图像灰度的最大值、均值和均方差。针对某一包含弱小目标的红外场景信号分别计算采用直接采集和采用本文方法采集所得图像序列的信噪比,结果如表1所示。由表1可见,针对不同的红外场景,本文算法均较大程度的提高了采集图像的信噪比,从而为后续的目标检测、跟踪等算法奠定了良好的基础。

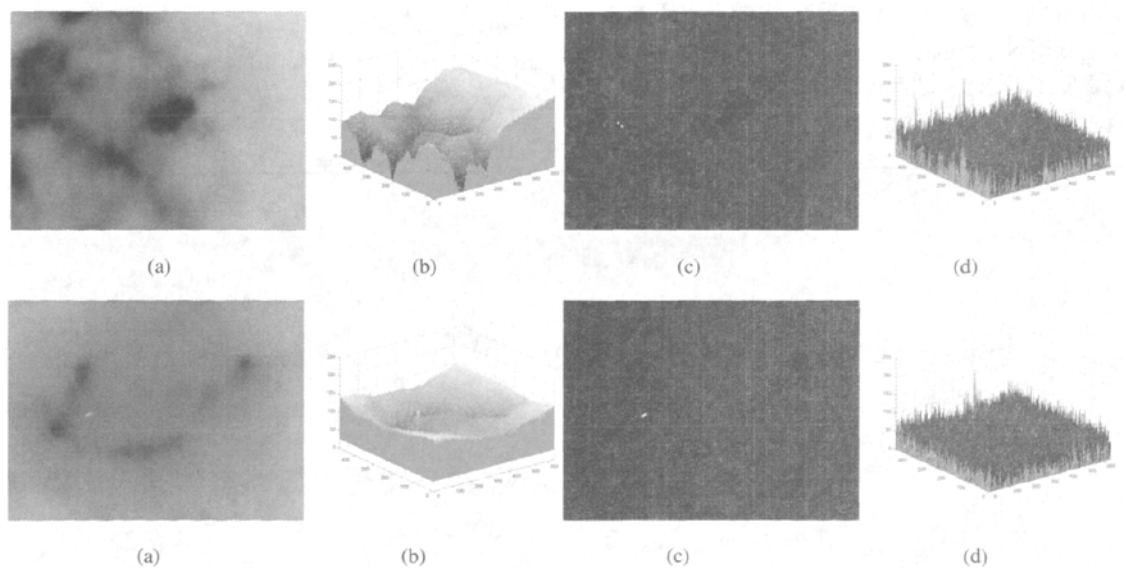


图2 采集图像仿真结果

Fig.2 Simulate result of the images

表 1 采集图像信噪比的比较
Table 1 The comparison of image SNR

	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5
直通采集图像	1.7472	1.8721	1.6318	1.4297	1.2451
本文方法采集图像	5.2572	5.4341	4.0623	4.5744	3.1290

预测增益 G_p 是衡量本系统性能的重要参数, 表示对图像信噪比和动态范围的改善情况。对某一运动的红外场景连续采集 270 帧图像, 其预测增益曲线如图 3 所示。

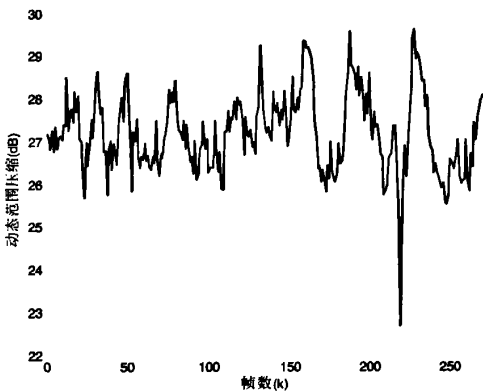


图 3 本文方法对动态范围压缩量
Fig.3 The compression of dynamic range

由图 3 可见, 对于该组图像序列能够获得约 24 dB 以上的预测增益, 表示本文方法等效地提高了 ADC 量化宽度 4 bit 以上, 从而提高了红外告警系统在微小温度差别中, 分辨目标的能力。

3 结论

本文提出了一种基于自适应背景抑制的红外弱小目标图像采集方法。该方法将自适应差分量化技术应用到红外告警系统的图像采集环节, 是抑制背景杂波, 提高图像信噪比的一个新颖的思路。理论分析与仿真实验表明: 本文算法具有以下优越性: 1) 有效地提高了采集的红外弱小目标图像的信噪比, 为后续的图像处理过程奠定了良好的基础。2) 较大程度地压缩了红外场景的动态范围, 提高图像采集的精度。3) 等效地提高了 ADC 的性能, 保证了系统对微弱目标的分辨能力。4) 软硬件结构简单, 实时性强。

参考文献:

[1] R H Walden. Performance trends for analog-to-digital converters[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1999, 37(2): 96-101.

[2] Caefer C E, Silverman J, Mooney J M. Optimization of point target tracking filters[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(1): 15-25.

[3] 董维科, 张建奇, 刘得连, 等. 基于各向异性背景预测模型的弱小目标检测算法[J]. *红外技术*, 2008, 30(7): 387-390.

[4] Hong Nie, P. Takis. Adaptive Prediction and Cancellation Digitization Method for Wideband Multistandard Software Radio Base-Station Receivers[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, 55(3): 887-902.

[5] Bradley S Denney, Rui J de Figueiredo. Optimal point target detection using adaptive auto regressive background prediction[C]//*SPIE*, 2000, 4048: 46-57.

[6] 孙小炜, 李言俊, 陈义. 复杂背景条件下的红外运动小目标检测算法[J]. *红外技术*, 2007, 29(8): 439-442.

[7] 周冰, 王永仲, 应家驹. 弱小目标检测技术浅析[J]. *红外技术*, 2007, 29(1): 30-33.