光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.026

基于改进 Camshift 算法的 NAO 机器人目标跟踪

王立玲[1,2*]，单忠宇[1,2]，马　东[1,2]，王洪瑞[1]

（1. 河北大学 电子信息工程学院，河北 保定 071002；
2. 河北省数字医疗工程重点实验室，河北 保定 071002）

摘　要： 针对 Camshift 算法应用于 NAO 机器人目标跟踪过程中，当目标受到相似颜色背景干扰或被物体遮挡时跟踪失败的问题，提出一种基于 ORB 特征检测和 Kalman 滤波多算法结合的目标跟踪方法。首先检测目标 ORB 特征点初始化搜索窗口，然后利用 Kalman 滤波作为目标运动状态的预测机制，以预测的位置初始化 Camshift 算法。利用 Bhattacharyya 距离判断跟踪窗口的收敛性，若受到背景干扰，则利用 ORB 算法对当前帧中的 Kalman 预测区域和目标模型进行特征点匹配，重新检测目标在视频帧中的位置。根据 Kalman 滤波预测目标被物体遮挡后可能的位置来更新预测器参数。实验结果表明，改进的算法能够在相似颜色背景干扰和目标遮挡的复杂环境下，连续稳定地跟踪运动目标。

关键词： 目标跟踪；仿人机器人 NAO；Camshift；Kalman 滤波；ORB 特征点

中图分类号： TP391.4　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0896－06

NAO Robot Target Tracking Based on Improved Camshift Algorithm

WANG Liling[1,2], SHAN Zhongyu[1,2], MA Dong[1,2], WANG Hongrui[1]

（1. College of Electronic and Information Engineering, Hebei University, Baoding 071002, CHN;
2. Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Baoding 071002, CHN）

Abstract: When Camshift algorithm is applied to target tracking of NAO robot, the tracking fails if the target is interfered by similar color background or blocked by objects. A target tracking method based on ORB feature detection and Kalman filter is proposed. Firstly, it is to detect the target ORB signature point and initialize the search window. Then Kalman filter is used as the prediction mechanism of target motion state to initialize Camshift algorithm with the predicted position. The Bhattacharyya distance is used to determine the convergence of the trace window. If background interference occurs, the ORB algorithm is used to match feature points between Kalman prediction area and target model in the current frame, and the position of the target in the video frame is redetected. According to Kalman filter, the possible position of the target after it is blocked by the object is updated. The experimental results show that the improved algorithm can continuously and stably track moving targets under the complex environment of similar color background interference and target occlusion.

Key words: target tracking; humanoid robot NAO; Camshift; Kalman filter; ORB feature points

收稿日期：2020－09－18.

基金项目：国家自然科学基金项目(61703133)；国家重点研发计划项目(2017YFB1401200).

* **通信作者：**王立玲　**E-mail:** hbuszy@163.com

0　引言

目标检测与跟踪是图像处理和计算机视觉领域的一个重要研究课题，是很多上层应用实现的基础，已经被广泛应用于机器人、人机交互、视频监控等领域[1]。Camshift(Continuous Adaptive Meanshift)是 Bradski[2]提出的一种实时目标跟踪算法，它使用颜色直方图特征作为目标模型，由于目标图像直方图是颜色概率的统计，所以算法不容易受到目标形状变化的影响，而且算法使用梯度下降法减少计算时间，可以快速实现对目标的实时跟踪。

传统 Camshift 算法需要手动初始化搜索窗口进行目标跟踪，在单一颜色背景下具有较好的实时目标跟踪效果[3]。但是 Camshift 算法在目标检测部分只使用目标颜色特征，而完全没有考虑目标的运动信息、纹理特征等其他因素，当目标和背景存在大面积相似颜色时，跟踪失败。在目标跟踪部分，虽然使用梯度下降法减少了计算时间，可以快速实现目标实时跟踪，但是 Camshift 算法本身没有对目标运动的预测机制，跟踪过程中当目标被物体遮挡而短暂消失时，跟踪会失败，即使当目标再次稳定出现在视野中，跟踪也无法恢复。

针对上述问题，很多研究者对 Camshift 算法进行了改进。Huang 等[4]提出利用 Kalman 滤波算法来预测运动目标被遮挡时在当前帧中的位置。闫钧华等[5]提出利用 Kalman 预测器解决目标发生短暂丢失再次出现后 Camshift 算法不能恢复跟踪的问题。利用卡尔曼滤波改进的 Camshift 算法具有良好的实时性，但当目标长时间处于相似颜色背景干扰或光照变化较大时，算法跟踪精度会明显下降。文献[6]将 Camshift 算法与 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)算法相结合，提高了背景干扰情况下目标检测的能力。文献[7]利用 FAST-SIFT 特征点检测结合 Camshift 算法，可以有效克服相似颜色的背景干扰。在此基础上，文献[8-9]利用加速的鲁棒特征 SURF 和 Camshift 算法相结合进一步提高了算法的实时性。SURF 算法是 SIFT 算法的升级版本，但是在较大图像中进行目标跟踪时，由于自身算法的复杂性，消耗时间长，仍然无法实现实时跟踪。

本文提出一种结合 ORB 特征点检测和 Kalman 滤波的多算法融合的目标跟踪算法。ORB 算法采用 FAST 算法获取特征点位置，在对同一幅图像提取 1 000 个特征点的情况下，ORB 算法的计算速度是 SIFT 算法的 300 倍，是 SURF 算法的 14 倍，满足实时性需求[10]。ORB 特征点与颜色信息无关，可以在相似颜色背景干扰时根据 ORB 算法重新计算目标位置。当目标被遮挡时利用 Kalman 预测器获得目标的可能位置。实验结果表明，本文算法能够连续稳定地跟踪运动目标。

1　Camshift 算法

Camshift 算法可以不断调整跟踪窗口大小自适应解决目标形变的问题。算法通过提取目标颜色直方图特征作为目标模型，利用梯度下降法减少计算时间，可以快速实现实时目标跟踪。

Camshift 算法的实现步骤如下：

(1)得到一帧 RGB 图像，将其转换到 HSV 色彩空间，提取 H 通道分量；

(2)手动给定搜索窗口位置，计算感兴趣区域色彩直方图；

(3)根据目标直方图对输入图像进行反向投影计算，根据概率分布图 $I(i,j)$得到零阶矩：

$$M_{00}=\sum_x\sum_y I(x,y) \tag{1}$$

一阶矩：

$$M_{10}=\sum_x\sum_y xI(x,y) \tag{2}$$

$$M_{01}=\sum_x\sum_y yI(x,y) \tag{3}$$

然后根据

$$x_c=\frac{M_{10}}{M_{00}},\quad y_c=\frac{M_{01}}{M_{00}} \tag{4}$$

计算候选区域的目标质心点坐标(x_c,y_c)；

(4)将跟踪窗口中心点位置(x_0,y_0)，移动到目标质心点位置(x_c,y_c)，判断是否收敛。若不收敛，则返回步骤(3)根据新的搜索窗口位置重新定义零阶矩和一阶矩，再次计算质心点位置。若收敛，则将搜索窗口中心点位置移到质心点位置，并将当前候选区域作为目标区域进行更新，继续迭代直到结束。

2　改进的 Camshift 算法

改进算法由 ORB 特征点检测、Kalman 滤波和 Camshift 跟踪三部分组成，可实现在相似颜色背景干扰和遮挡场景下目标的连续稳定跟踪。

2.1　ORB 算法

Rublee 等[11]提出的 ORB 算法，根据 FAST

(Features from Accelerated Segment Test)快速特征提取算法和 BRIEE(Binary Robust Independent Elementary Features)二进制特征描述子,实现目标检测。FAST 算法[12]是一种迅速、有效的特征点检测算法,其核心是基于像素与其邻域的灰度值差值进行检测。

ORB 特征点不受颜色信息干扰,在获取目标的过程中,首先提取 Kalman 预测区域和目标模板 ORB 特征点,从而减小 ORB 算法处理的图像尺寸。然后利用 BFknn 算法根据特征描述子对目标模板和测试图像的特征点对进行匹配计算,利用 RANSAC 算法优化匹配结果。最后在测试图像上根据特征点坐标画出包含所有最优匹配点的最小轮廓,作为初始搜索窗口位置。ORB 算法跟踪效果如图 1 所示。

从图 1 可以看出,在受到相似颜色背景干扰时,利用 ORB 算法能够准确得到目标的位置。



图 1 ORB 算法跟踪效果图

2.2 Kalman 预测器

Kalman 滤波是 20 世纪 60 年代末提出的一种系统最优估计算法[13],能够根据当前帧中的目标位置预测下一帧中目标的可能位置。算法的核心是根据输入系统的观测值更新状态向量[14],将预测值作为滤波器的输出。假设系统状态向量由 $\hat{\boldsymbol{X}}_k$ 表示,那么 $\hat{\boldsymbol{X}}_k=[x_k,y_k,v_{kx},v_{ky}]^{\mathrm{T}}$,$x_k$ 和 y_k 代表运动目标质心的坐标,v_{kx} 和 v_{ky} 分别表示运动目标在 x 轴和 y 轴方向上的运动速度。定义系统的观测状态向量为 $\boldsymbol{Z}_k=[x_k,y_k]^{\mathrm{T}}$。实验过程中通过 NAO 机器人的摄像头获取视频图像,因为相邻帧之间的时间间隔 Δt 极短而且目标移动的距离很小。所以实验中近似地认为相邻两帧之间的目标是匀速直线运动的。

得到方程如下:

$$\begin{cases} x_k=x_{k-1}+\Delta t\cdot v_x \\ y_k=y_{k-1}+\Delta t\cdot v_y \\ v_x=v_{kx} \\ v_y=v_{ky} \end{cases} \tag{5}$$

定义系统状态转移矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和系统观测矩阵 $\boldsymbol{H}$:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

定义它们的协方差矩阵分别为 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

初始状态变量为 X_0,假设预测的目标位置在 x 轴和 y 轴方向上都与实际目标位置有 4 个像素的偏差,目标位置变化速度有 7 个像素的偏差。初始误差协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_0$ 为

$$\boldsymbol{P}_0=\begin{bmatrix} 4^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7^2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

2.3 Camshift 算法的改进

本文改进算法利用 ORB 特征点进行目标检测,首先对目标模型和输入视频帧进行 ORB 特征点提取,使用 BFknn 算法匹配计算运动目标在视频帧中的位置,利用 RANSAC 算法对匹配结果进行优化。将匹配获得的目标位置作为初始搜索窗口,解决 Camshift 算法手动初始化问题。ORB 算法目标检测流程如图 2 所示。

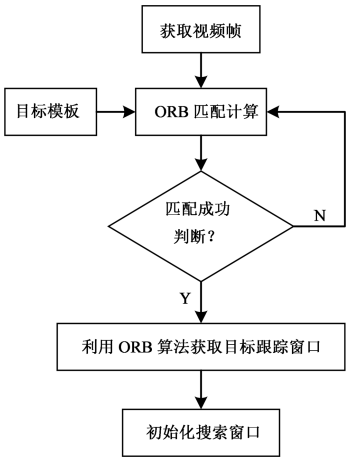


图 2 ORB 算法目标检测流程图

然后对运动目标进行跟踪，利用 Kalman 滤波作为目标运动的预测机制。根据预测位置初始化 Camshift 跟踪算法，降低计算复杂性。利用 Bhattacharyya 距离判断跟踪窗口的收敛性。如果目标受到相似颜色背景干扰导致跟踪失败，改进算法利用 ORB 算法匹配 Kalman 预测的当前帧候选区域和目标模型中运动目标的 ORB 特征点，重新在视频帧中确定运动目标位置。当目标受到物体遮挡消失后，则利用 Kalman 滤波预测目标的可能位置作为观测值，更新 Kalman 预测器参数，实现在目标重新出现在视野中时继续跟踪运动目标。改进算法流程如图 3 所示。

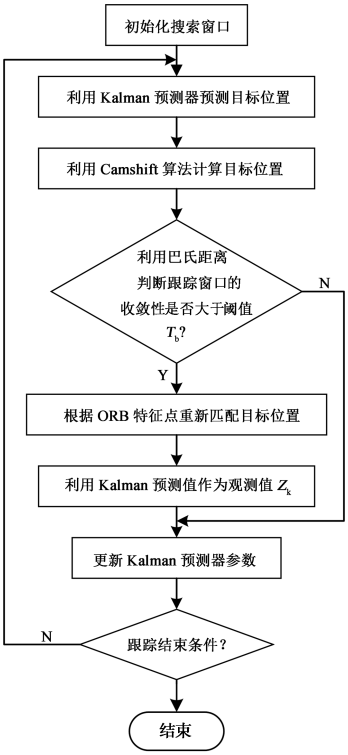


图 3　改进 Camshift 算法流程图

改进算法具体实现步骤如下：

(1)输入目标模型；

(2)根据 ORB 特征点检测视频帧中目标的位置；

(3)将匹配成功的目标位置作为初始搜索窗口；

(4)初始化 Kalman 滤波；

(5)利用 Kalman 滤波预测运动目标在下一帧图像中可能出现的位置；

(6)根据 Kalman 预测位置初始化 Camshift 目标跟踪算法，计算运动目标的质心位置；

(7)将搜索窗口几何中心位置移动到目标质心位置；

(8)根据 Bhattacharyya 距离[15]判断搜索窗口的收敛性。Bhattacharyya 距离用来比较两个色彩直方图间的相似性，该值越小说明两个直方图越匹配。判断条件如下：

Bhattacharyya 系数 λ_b：

$$\lambda_b = \sum_{i=1}^{m} \sqrt{h_i \cdot q_i} \tag{11}$$

其中，h_i 是运动目标的色彩直方图，q_i 是当前帧中候选区域的色彩直方图。

Bhattacharyya 距离 d_b：

$$d_b = \sqrt{1 - \sum_{i=1}^{m} \sqrt{h_i \cdot q_i}} \tag{12}$$

首先设定一个阈值 T_b，本文中取值为 $T_b = 0.4$。如果满足 $d_b < T_b$，则说明跟踪结果收敛，否则说明不收敛；

(9)如果收敛，则利用跟踪结果更新 Kalman 参数，然后判断跟踪结束条件，如果没结束则继续对下一帧进行跟踪计算；

(10)如果不收敛，则利用 ORB 特征点重新检测运动目标在当前帧中的位置，然后更新目标模型。用 Kalman 预测的结果更新 Kalman 预测器参数，然后判断跟踪结束条件，如果没结束则继续对下一帧进行跟踪计算。

3　实验结果和分析

3.1　实验操作环境

实验硬件平台为仿人机器人 NAO，选用额头单目摄像头确保目标出现在视野中。以 Python 为开发语言在 OpenCV-python2.4 环境下开发。调用 NAOqi 系统 ALVideoDevice 视频管理模块，将实时视频数据发送到远程电脑端进行处理。NAO 机器人平台如图 4 所示。

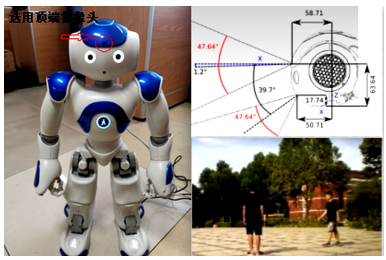


图 4　NAO 机器人平台图

3.2　结果和分析

为验证本文改进算法跟踪目标的有效性，设计

两种实验场景：相似颜色背景干扰实验和目标遮挡实验，图像中用绿色矩形框选定目标。通过与传统Camshift算法进行对比实验，从定性和定量两个方面进行分析。

场景一：相似颜色背景干扰实验。图5和6分别选择视频序列中的第31帧、42帧、48帧、53帧、65帧作为对比帧。传统Camshift算法的跟踪结果如图5所示：当运动目标接近相似颜色干扰物体时，发现跟踪窗口跟踪区域扩大，包含大面积的干扰背景部分，并一直干扰跟踪过程，导致跟踪不准确。



(a) 第31帧 (b) 第42帧 (c) 第48帧 (d) 第53帧 (e) 第65帧

图5 传统Camshift算法跟踪结果图

本文改进算法的跟踪结果如图6所示：当运动目标接近相似颜色干扰物体时，通过判断跟踪窗口的收敛性，改进算法对Kalman预测的位置区域进行ORB特征点检测，重新确定目标位置，很好地限制跟踪窗口的位置，解决相似颜色背景干扰，实现稳定的目标跟踪。



(a) 第31帧 (b) 第42帧 (c) 第48帧 (d) 第53帧 (e) 第65帧

图6 本文改进算法跟踪结果图

场景二：目标遮挡实验。图7和图8分别选择视频序列中的第37帧、42帧、48帧、54帧、68帧作为对比帧。传统Camshift算法的跟踪结果如图7所示：在运动目标跟踪过程中，当目标靠近白色上衣黑色短裤的遮挡物体时，跟踪窗口发生漂移，当目标被完全遮挡后跟踪窗口拾取了遮挡物体并固定在一个很小的区域，即使目标重新出现也不能恢复跟踪。

本文改进算法的跟踪结果如图8所示：当目标靠近白色上衣黑色短裤遮挡物体时，跟踪窗口能够继续跟踪目标，当目标被完全遮挡后，虽然此时得不到Camshift算法返回的质心位置，但是可以利用Kalman预测器来预测目标位置，实现目标再次出现后对目标的继续稳定跟踪。



(a) 第37帧 (b) 第42帧 (c) 第48帧 (d) 第54帧 (e) 第68帧

图7 传统Camshift算法跟踪结果图



(a) 第37帧 (b) 第42帧 (c) 第48帧 (d) 第54帧 (e) 第68帧

图8 本文改进算法跟踪结果图

为了对两种算法的跟踪效果进行定量分析，实验中通过获取图像帧中目标真实的中心点位置值(I)和目标中心点测量值(I')，并比较两者的位置误差 $d=\sqrt{(I_x-I'_x)^2+(I_y-I'_y)^2}$，来表示跟踪效果。$d$ 的值越小，表示跟踪精度越高，反之精度越低。

场景一相似颜色背景干扰情况下中心点误差如图 9 所示。场景二目标遮挡情况下中心点误差如图 10 所示。实验结果表明，在发生相似颜色背景干扰或目标遮挡情况时，本文改进的 Camshift 算法的中心点位置误差始终保持在一个较小水平，保证搜索窗口较好地收敛于目标区域。两种场景下跟踪结果均优于传统 Camshift 算法。

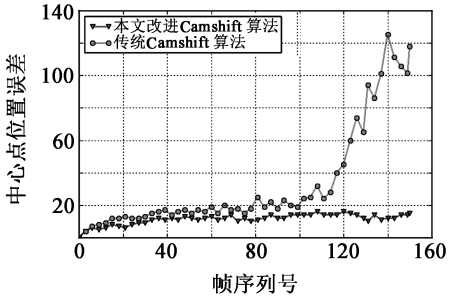


图 9　相似颜色背景干扰误差图

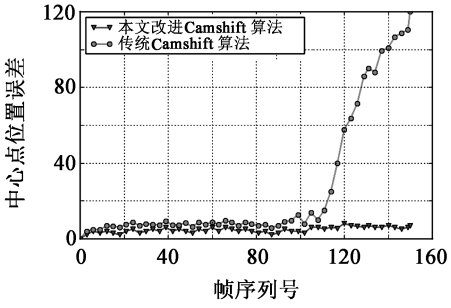


图 10　目标遮挡误差图

4　总结

目标检测与跟踪技术已经广泛应用于机器人家庭服务、监测等领域。单一颜色背景下 Camshift 算法具有较好的实时跟踪效果。在此基础上，本文提出结合 ORB 特征点检测和 Kalman 预测的改进算法，并将其应用于机器人运动目标跟踪。首先利用 ORB 特征点检测目标在视频帧中的位置初始化搜索窗口，当发生相似颜色背景干扰导致跟踪失败时，利用 ORB 算法重新确定运动目标的位置，有效降低了相似颜色背景的干扰。当目标被物体遮挡消失后，利用 Kalman 滤波预测目标的可能位置，实现在目标重新出现在视野中时继续对其跟踪。实验结果表明，本文改进算法在相似颜色背景干扰和目标遮挡等复杂环境下，能够连续稳定地跟踪运动目标位置，实验结果优于传统 Camshift 算法。

参考文献：

[1] 孟　琭，杨　旭. 目标跟踪算法综述[J]. 自动化学报，2019，45(7)：1245-1260.
Meng L，Yang X. Overview of target tracking algorithms[J]. J. of Automation，2019，45(7)：1245-1260.

[2] Bradski G R. Computer vision face tracking for use in a perceptual user interface[J]. Intel Technol. J.，1998，2(2)：1-15.

[3] Chen Xin，Wu Hefeng，Li Xiang，et al. Real-time visual object tracking via Camshift-based robust framework [J]. Intern. J. of Fuzzy Systems，2012，14(2)：262-269.

[4] Huang Shengluan，Hong Jingxin. Moving object tracking system based on Camshift and Kalman filter[C]// Proc. of Inter. Conf. on Consumer Electronics，Communications and Networks，2011：1423-1426.

[5] 闫钧华，陈少华，艾淑芳. 基于 Kalman 预测器改进的 Camshift 目标跟踪[J]. 中国惯性技术学报，2014，22(4)：537-542.
Yan J H，Chen S H，Ai S F. Improved Camshift target tracking based on Kalman predictor[J]. Chinese J. of Inertial Technol.，2014，22(4)：537-542.

[6] Qiu Xuena，Lu Qiang. Target tracking and localization of binocular mobile robot using Camshift and SIFT[C]// Proc. of Genetic and Evolutionary Computation Conf.，2009：483-488.

[7] Xiao Xuzhang，Wang Jing，Shen Qiwei，et al. An improved Camshift algorithm based on FAST-SIFT feature detection matching [C]// Proc. of Inter. Conf. on Information Communication and Signal Proc.，2018：64-68.

[8] Li Jianhong，Zhang Ji，Zhou Zhenhuan，et al. Object tracking using improved Camshift with SURF method[C]// Proc. of Inter. Workshop on Open-source Software for Scientific Computation，2011：136-141.

[9] 陈杏源，郑烈心，裴海龙. 基于 Camshift 和 SURF 的目标跟踪系统[J]. 计算机工程与设计，2016，37(4)：902-905.
Chan X Y，Zheng L X，Pei H L. Object tracking system based on Camshift and SURF[J]. Computer Engineering and Design，2016，37(4)：902-905.

[10] 高　翔，张　涛. 视觉 SLAM 十四讲：从理论到实践[M]. 北京：电子工业出版社，2017：132-138.
Gao Xiang，Zhang Tao. Visual SLAM 14：From Theory to Practice [M]. Beijing：Electronic Industry Press，2017：132-138.

[11] Rublee E，Rabaud V，Konolige K，et al. ORB：an efficient alternative to SIFT or SURF[C]// Proc. of IEEE Inter. Conf. on Computer Vision，2011：2564-2571.

(下转第 906 页)

存在上限，SFDR 随着 RF 的增大逐渐减小。对于 500 MHz 的锁相带宽，在工作频率为 200 MHz 时，动态范围可以达到 123 dB·$Hz^{2/3}$。

4 结论

本文针对相位调制微波光链路线性解调困难的问题，提出了一种基于锁相环的高线性解调方法并建立了详细的链路模型。在充分考虑噪声与非线性畸变的影响下，推导得到链路关键参数的变化趋势。结合实际链路器件参数，完成了链路总体参数仿真，结果显示在工作频率为 200 MHz 的情况下，动态范围可达到 127 dB·$Hz^{2/3}$，较传统强度调制方法提高了近 20 dB。可见基于锁相环相位解调的光链路具有大动态范围的潜力，同时通过减小反馈延时，工作频率可拓展到吉赫兹量级，适合于大动态范围、低频本振信号的传输应用。后续将基于本模型进一步开展大动态微波光链路的实验研究。

参考文献：

[1] Marpaung D, Roeloffzen C. Integrated microwave photonics [J]. Laser & Photon. Rev., 2012, 10(1): 1-30.

[2] Roeloffzen C G H, Zhuang L M, Taddei C. Silicon nitride microwave photonic circuits [J]. Opt. Express, 2013, 21 (19): 22937-22961.

[3] 陈小龙，关 键，黄 勇，等. 雷达低可观测目标探测技术 [J]. 科技导报，2017，35(11)：30-38.
Chen Xiaolong, Guan Jian, Huang Yong, et al. Radar low-observable target detection [J]. Science & Technology Rev., 2017, 35(11): 30-38.

[4] Yao Jianping. Microwave photonics [J]. J. of Lightwave Technol., 2009, 27(3): 314-335.

[5] Xu Kun, Li Jianqiang, Yin Jie, et al. Microwave photonic signal processing techniques and radio-over-fiber transmission demonstration [J]. The J. of China Universities of Posts and Telecommun., 2009, 16(1): 6-9.

[6] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nature Photon., 2007, 1(6): 319-330.

[7] Vincent J U, Frank B, Jason D M, et al. Long-haul analog photonics [J]. J. of Lightwave Technol., 2011, 22(8): 1182-1205.

[8] Marpaung D, Roeloffzen C. Integrated microwave photonics [J]. Laser & Photon. Rev., 2012, 10(1): 1-30.

[9] Haas B, Urick V, Mckinney J, et al. Dual-wavelength linearization of optically phase-modulated analog microwave signals [J]. IEEE J. Lightwave Technol., 2008, 26(15): 2748-2753.

[10] Xu Longtao, Jin Shilei, Li Yifei. ACP-OPLL performance in presence of out-of-band interference [J]. J. of Lightwave Technol., 2014, 32(15): 2636-2642.

[11] Chi Hao, Zou Xihua, Yao Jianping. Analytical models for phase-modulation-based microwave photonic systems with phase modulation to intensity modulation conversion using a dispersive device [J]. J. of Lightwave Technol., 2009, 27 (5): 511-521.

[12] Fandino S J, Domenech D J, Munoz P, et al. Integrated InP frequency discriminator for phase-modulated microwave photonic links [J]. Opt. Express, 2013, 21(3): 3726-3736.

[13] Li Yifei, Herczfeld P. Coherent PM optical link employing ACP-PPLL [J]. J. of Lightwave Technol., 2009, 27(9): 1086-1094.

作者简介：

王 超(1990—)，男，重庆垫江人，2013 年毕业于华中科技大学光信息科学与技术专业，获学士学位，2018 年毕业于华东师范大学光学专业，获理学博士学位，高级工程师，主要从事微波光子学、光学频率梳以及超快光纤激光器等方面的研究。

(上接第 901 页)

[12] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection [C]// Proc. of European Conf. on Computer Vision, 2006: 430-433.

[13] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. J. of Fluids Engin., 1960, 82: 35-45.

[14] Guo Lie, Li Linhui, Zhao Yibing. Pedestrian tracking based on Camshift with Kalman prediction for autonomous vehicles [J]. Inter. J. of Adv. Robotic Systems, 2016, 13(3): 13-20.

[15] Kailath T. The divergence and Bhattacharyya distance measures in signal selection [J]. IEEE Trans. on Communication Technol., 1967, 15(1): 52-60.

作者简介：

王立玲(1979—)，女，博士，副教授，主要从事机器人建模与控制方面的研究。