光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023111401

基于高 Q 值 Si_3N_4 片上光学微腔的孤子光频梳

杜润昌*

（成都天奥电子股份有限公司 技术研发中心，成都 610037）

摘　要： 高 Q 值片上微腔已被证明是一种性能优异的克尔孤子光学频率梳产生平台。由片上多模波导构成的 Si_3N_4 微腔可以同时实现产生暗孤子所必须的高品质因子和反常色散。为了进一步降低产生单孤子光频梳的阈值功率，文章设计了一种具有欧拉弯曲的新型跑道型 Si_3N_4 微腔，与传统的圆形弯曲波导相比，跑道型微腔直波导连接处弯曲半径的突然变化被显著抑制，这抑制了高阶模式耦合并降低了传播损耗，从而获得了超过 5×10^6 的品质因子。基于该新型微腔，使用辅助激光加热方法仅用 47 mW 泵浦激光器（估计片上泵浦功率为 33 mW）就产生了重复频率在 Ka 波段且带宽超过 20 nm（对应于 129 fs 的脉冲持续时间）的单孤子微腔光频梳。

关键词： 光学微腔；孤子光频梳；欧拉弯曲；飞秒脉冲

中图分类号： O436　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0211－05

Single Soliton Microcomb Based on High-Q On-Chip Si_3N_4 Optical Microresonators

DU Runchang

（Technology Research Developing Center，Chengdu Space on Electronics Corporation Ltd.，Chengdu 610037，CHN）

Abstract： High-quality（high-Q）on-chip microresonators have been shown to be a promising platform for Kerr soliton frequency comb generation. Si_3N_4 microresonators composed of multimode waveguides can achieve high-Q factors and anomalous dispersion，which are necessary for soliton generation. To further reduce the threshold power for generating a single-soliton microcomb，a novel racetrack Si_3N_4 microresonator with Euler bends has been reported that achieves loaded Q factors greater than 5×10^6. Compared with conventional circular bends，the sudden change in the bending radius at the waveguide connection is significantly suppressed，which in turn suppresses mode interaction and reduces propagation loss. With this novel microresonator，single-soliton frequency combs with a repetition rate in the microwave Ka band and a bandwidth exceeding 20 nm（corresponding to a pulse duration of 129 fs）are generated using only a 47 mW pump laser（33 mW estimated on-chip pump power）under the auxiliary laser heating method.

Key words： optical microcavity；single-soliton frequency comb；Euler bends；femtosecond pulse

0　引言

最新研究证明，基于片上光学微腔的孤子光学频率梳从实验室研究成功转化为工业应用的潜力[1-4]。作为一种性能优异的小型化光学频率梳平台，片上微腔光学频率梳具有重复频率高、结构简单、可片上集成、成本低廉等优点，这赋予了其在超低噪声光生微波[5-6]、小型化光钟[7]、相干光通信[8-9]、双梳光谱学[10]、精密测距[11-12]和天文光谱仪校准[13-14]等前沿技术领域的应用潜力。

收稿日期：2023－11－14.

基金项目：国家自然科学基金项目(61871084)；成都市重点研发项目(2022-CP02-00035-GX).

* **通信作者：**杜润昌

包括氮化硅[15-17]、磷化铟[18]、铝镓砷[19]、氮化铝[20]、铌酸锂[21]、磷化镓[22-23]等多种光子集成材料已被证明可以用于产生克尔孤子频率梳。片上氮化硅光学微腔可以提供接近 1 dB/m[24]的超低光学损耗、高达 2.5×10^{-15} cm^2/W[25]的三阶非线性系数、5 eV 的禁带宽度，同时其制备工艺还能高度兼容成熟的 CMOS 半导体工艺，从而具备与半导体激光器、滤波器、探测器等光电器件进行片上集成的潜力[26]，是实现小型化光学频率梳大规模商业化应用的理想平台。

实现超低损耗和反常群速度色散(GVD)是基于片上氮化硅微腔产生克尔孤子频率梳的关键。光与波导表面粗糙度的相互作用是导致波导损耗的主要因素，可以通过增加波导横截面构成多模波导来减少光学损耗[27]。同时，多模波导也更有利于通过色散工程实现反常色散[28-29]。但是波导表面粗糙度和材料缺陷会在多模波导中引入空间模式相互作用。波导弯曲引起的模式失配，特别是弯曲半径突然变化引起的非绝热跃迁，也会引起模式耦合。片上氮化硅波导制备工艺已经可以有效抑制波导表面粗糙度和材料缺陷问题，因此，通过改善波导结构设计来避免非绝热跃迁是进一步降低多模波导氮化硅微腔光学损耗的关键途径。

1 基本原理

传统跑道型微腔由两个直波导和两个圆形弯曲组成，与正圆形微腔相比能够显著节省芯片面积，因此被广泛用于较低自由光谱范围 FSR(千兆赫兹量级)的片上光学微腔设计中[30-31]。跑道型光学微腔中直波导和圆波导的弯曲半径分别为无穷大和数百微米，由于光场本征模式会随波导曲率的变化而变化，造成跑道型微腔中直波导和圆形弯曲波导的本征模式不同。因此，跑道型微腔中直波导和圆形弯曲波导连接处曲率半径的突然变化将引入空间模式耦合，增加传播损耗并导致谐振本征频率偏移，从而影响光学微腔的性能。

微腔光频梳的初始过程是光学参量振荡(OPO)以及级联四波混频(FWM)效应，其主导物理机制是让光学微腔中的泵浦功率达到并超过 OPO 阈值后产生参量增益补偿微腔损耗，使得微腔内 OPO 以 FWM 边带数量不断增加、功率不断提升，直至在一定波长范围内的每一个谐振模式内都产生非线性边带。光学微腔中 OPO 功率阈值为[32]：

$$P_{\mathrm{th}}=\frac{\omega_0 n_0^2 V_{\mathrm{eff}}}{8\eta c n_2 Q^2} \tag{1}$$

式中，ω_0 为谐振频率，c 为光速，n_0 为材料折射率，n_2 为非线性系数，V_{eff} 为有效模式体积，η 为耦合强度(临界耦合时 $\eta=1/2$)。有效模式体积 V_{eff} 与微腔 FSR(对应光频梳重复频率)成反比。

由上式可知微腔 OPO 功率阈值与 Q 值平方成反比，同时与光频梳重复频率成反比。因此，特别是对于重复频率较低(在射频频段)的微腔光频梳来说，较长的微腔光波导带来的损耗和由于跑道构形带来的模式耦合都对微腔 Q 值提出了更高的要求，许多研究已经证明，在重复频率较低的跑道型微腔中很难产生单孤子光频梳[33-34]。

引入欧拉弯曲波导替代圆形弯曲波导是解决跑道型微腔模式耦合问题的有效途径。作为绝热弯曲的一种，欧拉弯曲的曲率随路径长度线性变化，欧拉弯曲已广泛应用于公路工程和集成光子学等工程技术领域[35-38]。为了抑制模式耦合并降低传播损耗，本文设计了一种具有欧拉弯曲而不是传统圆形弯曲的跑道型 Si_3N_4 片上微腔，如图 1 所示，微腔的 FSR 为 32 GHz，欧拉弯曲跨度 d 为 300 μm，微腔占用芯片面积仅为 0.6 mm^2，仅为传统正圆型微腔的 1/5。进一步将欧拉弯曲的跨度减少到 50 μm 可以将芯片占地面积减少到 0.15 mm^2，而不会造成不可忽略的额外损失。

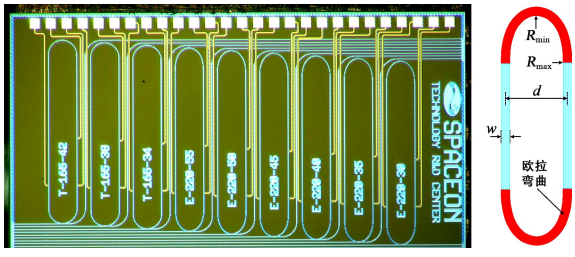


图 1 具有欧拉弯曲的多模跑道型 Si_3N_4 微腔的实物照片和结构示意图($w=2.2$ μm，$d=300$ μm)

欧拉弯曲在数学上可以表示为[39]：

$$\begin{cases} x(s)=\int_0^s \cos\left(\left(2\sqrt{2}\int_0^{\sqrt{\pi p/2}}\sin t^2\,\mathrm{d}t+\dfrac{\sin(\pi(1-p))}{\sqrt{\pi p}}\right)^2/2d^2u^2\right)\mathrm{d}u \\ y(s)=\int_0^s \sin\left(\left(2\sqrt{2}\int_0^{\sqrt{\pi p/2}}\sin t^2\,\mathrm{d}t+\dfrac{\sin(\pi(1-p))}{\sqrt{\pi p}}\right)^2/2d^2u^2\right)\mathrm{d}u \end{cases} \tag{2}$$

式中，s 为径向长度，d 为欧拉弯曲跨度，p 为欧拉比例因子（p 取值范围为 0～1，当 $p=0$ 时为正圆曲线，$p=1$ 时为完全欧拉曲线）。总长度 L 和最小弯曲半径 R_{min} 可以表示为：

$$L=\frac{d}{\sqrt{\pi p}\left(2\sqrt{2}\int_0^{\sqrt{\pi p}/2}\sin t^2\,\mathrm{d}t+\sin(\pi(1-p))/\sqrt{\pi p}\right)} \tag{3}$$

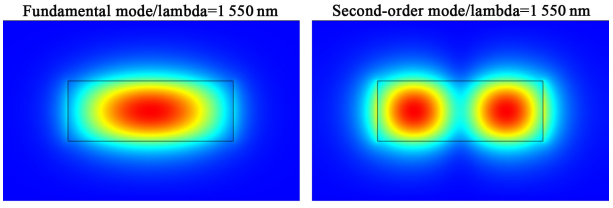
$$R_{min}=\sqrt{\pi p d^2}\Big/\left(2\sqrt{2}\int_0^{\sqrt{\pi p}/2}\sin t^2\,\mathrm{d}t+\sin(\pi(1-p))\sqrt{\pi p}\right)^2 \tag{4}$$

欧拉弯曲的线性曲率变化率 a 可以表示为：

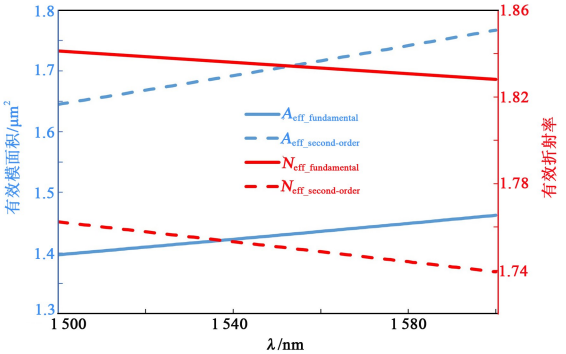
$$a=\left(2\sqrt{2}\int_0^{\sqrt{\pi p}/2}\sin t^2\,\mathrm{d}t+2\sin(\pi(1-p)/2)/\sqrt{\pi p}\right)^2/d^2 \tag{5}$$

跑道型微腔由两个直波导和两个欧拉弯曲组成。欧拉弯曲的弯曲半径从 R_{max} 逐渐减小到 R_{min}，然后从 R_{min} 逐渐增大到 R_{max}。最大弯曲半径 R_{max} 可以是圆形弯曲半径的几百倍，因此，与传统的圆形弯曲相比，波导连接处弯曲半径的突变被显著抑制。

本文设计制备的片上氮化硅微腔波导截面尺寸为 2.2 μm×0.8 μm，欧拉弯曲的最大和最小弯曲半径分别为 400 000 μm 和 109 μm。较宽的波导降低了波导侧壁处的场强度，可以有效降低传播损耗。但是较宽的波导也会导致基本模式之外的高阶模式存在。利用相关软件仿真得出的基本模和高阶模在 1 550 nm 下的模场分布，以及在不同波长下的有效模面积和有效折射率如图 2 所示。



（a）基模模场分布　　（b）高阶模模场分布

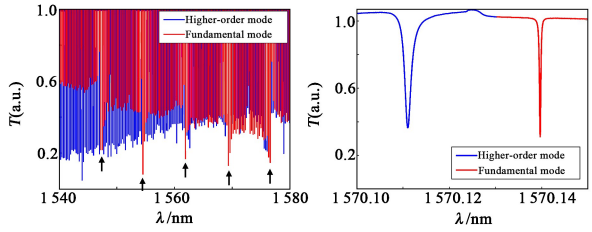


（c）不同波长处的有效折射率和模场体积

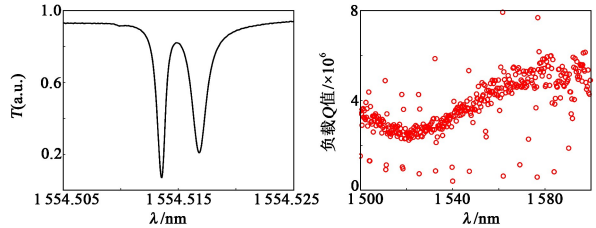
图 2　基模和高阶模的模场分布（a，b）、不同波长处的有效折射率和模场体积（c）

可见高阶模的有效模式面积大于基模的有效模式面积，在波导侧壁处的场强更强，泄漏到波导包层中的能量更多，因此高阶模式的 Q 值显著小于基模的 Q 值。

图 3（a）为使用扫描激光器测得的微腔归一化透射谱，可以同时观察到基模和高阶模，以及基模与高阶模之间周期性的模式耦合（图中黑色箭头所示）。图 3（b）显示高阶模的模式线宽约为基模的 5 倍。在 1 580 nm 附近的基模模式族具有高于 5×10^6 的负载 Q 值，波导中残留的 N—H 吸收使得其在 C 波段的 Q 值有所降低。



（a）Si_3N_4 微腔的归一化透射光谱　（b）1 570 nm 附近的基模和高阶模式



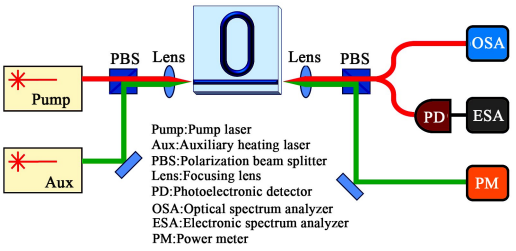
（c）1 554 nm 附近基模和高阶模之间的模式耦合　（d）不同波长处 Si_3N_4 微腔基模的负载 Q 值

图 3　具有欧拉弯曲的跑道型 Si_3N_4 微腔的归一化透射谱和 Q 值

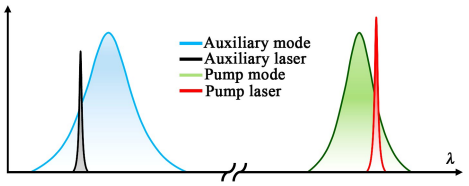
2　实验方法

本文基于自主设计制备的具有欧拉弯曲的跑道型 Si_3N_4 片上微腔，使用辅助激光加热方法[40]产生了孤子光学频率梳，实验如图 4 所示。首先，将波长为 1 550.4 nm、功率为 57 mW（在 PBS 之前测量）的 TM 偏振辅助激光耦合到微腔中，然后将频率调谐到蓝色失谐区域。然后，将波长为 1 570.7 nm、功率为 47 mW（在 PBS 之前测量）的 TE 偏振泵浦激光耦合到微腔中，并调谐到另一个基模模式中。当泵浦激光器从蓝失谐一侧调谐到微腔模式中时，所有谐振峰都会由于热效应被推向长波长方向，但同时谐振峰热位移也会使得微腔模式相对于辅助激光往蓝失谐方向移动，降低微腔内热效应，从而抵消泵浦激光带来的微腔加热效果。当泵浦激光越过零失

谐点继续调谐到红失谐状态时，其造成的微腔加热效应将显著减弱，所有谐振峰都会被推向短波长方向，同时使得微腔模式相对于辅助激光往红失谐方向移动，此时辅助激光又会重新加热微腔，以此平衡泵浦激光造成的热效应。在整个过程中辅助激光有效平衡了泵浦激光造成的热流，使得微腔内由于热效应引起的模式位移显著降低，因此该辅助激光加热方法是产生并稳定微腔光频梳的有效途径[41]。



(a) 实验装置示意图



(b) 辅助激光加热方法原理示意图

图 4 实验装置和辅助激光加热方法原理示意图

3 结果和分析

基于辅助激光即热方法产生稳定的单孤子微腔光频梳光谱如图 5 所示，其光谱包络经双曲正割平方函数(sech^2)拟合后如图中蓝色曲线所示，证明了该光谱对应的时域脉冲为单孤子状态。图 6 为单孤子光梳的 RF 幅度噪声，表明该单孤子光频梳处于低噪声锁模状态。sech^2 函数拟合结果显示该光谱 3 dB 带宽为 20.1 nm，这表明在微腔中形成了孤子脉冲，其傅里叶变换极限脉宽为 τ_p：

$$\tau_p = \frac{k}{\Delta v} \approx k \cdot \frac{\lambda_0^2}{c \cdot \Delta\lambda} \tag{6}$$

式中，$\Delta\lambda$ 为光谱 3 dB 带宽，λ_0 为光谱中心波长，常数 k 为时间带宽积，对于 sech^2 函数而言 $k=0.315$。因此可得该光谱对应的单孤子脉冲时域宽度为 129 fs。光谱中出现的周期性尖峰是由于基模与高阶模之间的模式耦合造成的，其在光谱中出现的位置与图 3(a)中黑色箭头标识的波长位置相吻合。产生该单孤子光频梳的片上泵浦功率约为 33 mW。此外，泵浦激光波长在从 1 550 nm 扫描至 1 580 nm 的过程中，除了位于模式耦合处的谐振峰外的几乎每个谐振峰都能产生单孤子光频梳。

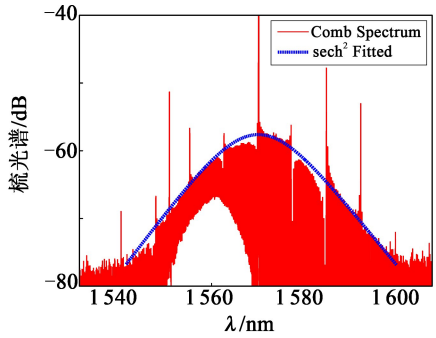


图 5 重复频率为 Ka 波段的单孤子微腔光频梳光谱

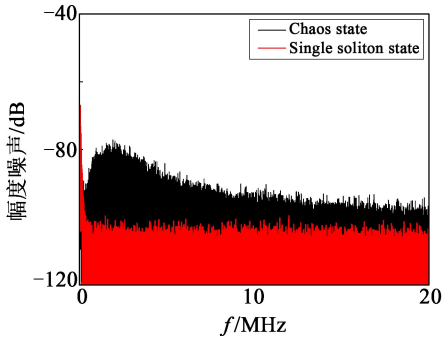


图 6 单孤子状态和混沌状态的 RF 幅度噪声对比

4 结论

本文设计制备的具有欧拉弯曲的多模跑道型 Si_3N_4 微腔实现了大于 5×10^6 的负载 Q 值，将产生 Ka 波段重复频率的单孤子微腔光频梳的功率阈值降低到 50 mW 以下，这使得常见的商用半导体激光器(如 DFB 激光器、DBR 激光器)就可以用作泵浦源，而不需要依赖于光学放大器，这显著降低了系统功耗、成本和体积。此外，较宽的波导宽度将同时支持基模和高阶模式，并产生不可控的模式耦合。抑制多模波导中的高阶模式及其引发的模式耦合对于生成稳定可靠的单孤子微腔光频梳至关重要。制作一种具有绝热锥形欧拉弯曲波导的新型跑道型微腔可能是抑制高阶模式激发的有效途径，有望同时获得单模传输、超低传播损耗和反常色散。

参考文献：

[1] Kues M, Reimer C, Roztocki P, et al. On-chip generation of high-dimensional entangled quantum states and their coherent control[J]. Nature, 2017, 546: 622-626.

[2] Kippenberg T J, Gaeta A L, Lipson M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators[J]. Science, 2018, 361(6402): eaan8083.

[3] Yang Q F, Shen B, Wang H, et al. Vernier spectrometer using counterpropagating soliton microcombs[J]. Science,

2019，363(6430)：965-968.

[4] Stern B，Ji X，Okawachi Y，et al. Battery-operated integrated frequency comb generator[J]. Nature，2018，562：401-405.

[5] Spencer D T，Drake T，Briles T C，et al. An optical-frequency synthesizer using integrated photonics[J]. Nature，2018，557：81-85.

[6] Tetsumoto T，Nagatsuma T，Fermann M E，et al. Optically referenced 300 GHz millimetre-wave oscillator[J]. Nature Photon.，2021，15：516-522.

[7] Newman Z，Maurice V，Drake T，et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock[J]. Optica，2019，6(5)：680-685.

[8] Geng Y，Xiao Y L，Bai Q S，et al. Wavelength-division multiplexing communications using integrated soliton microcomb laser source[J]. Opt. Lett.，2022，47(23)：6129-6132.

[9] Geng Y，Zhou H，Han X，et al. Coherent optical communications using coherence-cloned Kerr soliton microcombs[J]. Nature Commun.，2022，13：1070.

[10] Geng Y，Han X J，Zhang X X，et al. Phase noise of Kerr soliton dual microcombs[J]. Opt. Lett.，2022，47(18)：4838-4841.

[11] Suh M G，Vahala K J. Soliton microcomb range measurement[J]. Science，2018，359(6378)：884-887.

[12] Trocha P，Karpov M，Ganin D，et al. Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs[J]. Science，2018，359(6378)：887-891.

[13] Obrzud E，Rainer M，Harutyunyan A，et al. A microphotonic astrocomb[J]. Nature Photon.，2019，13：31-35.

[14] Suh M G，Yi X，Lai Y H，et al. Searching for exoplanets using a microresonator astrocomb[J]. Nature Photon.，2019，13：25-30.

[15] Spencer D T，Bauters J F，Heck M J R，et al. Integrated waveguide coupled Si_3N_4 resonators in the ultrahigh-Q regime[J]. Optica，2014，1(3)：153-157.

[16] Geng Y，Xiao Y L，Han X J，et al. Polarization multiplexed dissipative Kerr solitons in an on-chip micro-resonator[J]. Opt. Lett.，2022，47(15)：3644-3647.

[17] Liu J，Huang G，Wang R N，et al. High-yield，wafer-scale fabrication of ultralow-loss，dispersion-engineered silicon nitride photonic circuits[J]. Nature Commun.，2021，12：2236.

[18] Ciminelli C，Dell'Olio F，Armenise M N，et al. High performance InP ring resonator for new generation monolithically integrated optical gyroscopes[J]. Opt. Express，2013，21(1)：556-564.

[19] Chang L，Xie W Q，Shu H W，et al. Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators[J]. Nature Commun.，2020，11：1331.

[20] Gong Z，Bruch A，Shen M，et al. High-fidelity cavity soliton generation in crystalline AlN micro-ring resonators[J]. Opt. Lett.，2018，43(18)：4366-4369.

[21] Zhang M，Wang C，Cheng R，et al. Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator[J]. Optica，2017，4(12)：1536-1537.

[22] Wilson D J，Schneider K，Hönl S，et al. Integrated gallium phosphide nonlinear photonics[J]. Nature Photon.，2020，14：57-62.

[23] Xu X，Tan M，Wu J，et al. High performance RF filters via bandwidth scaling with Kerr micro-combs[J]. APL Photon.，2019，4(2)：026102.

[24] Ji X R，Liu J Q，He J J，et al. Compact，spatial-mode-interaction-free，ultralow-loss，nonlinear photonic integrated circuits[C]// 2022 European Conference on Optical Communication，2022：1-4.

[25] Moss D J，Morandotti R，Gaeta A L，et al. New CMOS compatible platforms based on silicon nitride and Hydex for nonlinear optics[J]. Nature Photon.，2013，7：597-607.

[26] Yang K Y，Oh D Y，Lee S H，et al. Bridging ultrahigh-Q devices and photonic circuits[J]. Nature Photon.，2018，12：297-302.

[27] Zhang L，Jie L L，Zhang M，et al. Ultrahigh-Q silicon racetrack resonators[J]. Photon. Res.，2020，8：684-689.

[28] Okawachi Y，Lamont M R E，Luke K，et al. Bandwidth shaping of microresonator-based frequency combs via dispersion engineering[J]. Opt. Lett.，2014，39(12)：3535-3538.

[29] Ji X C，Jang J K，Dave U D，et al. Exploiting ultralow loss multimode waveguides for broadband frequency combs[J]. Laser Photon. Rev.，2021，15(1)：2000353.

[30] Liu J，Lucas E，Raja A S，et al. Photonic microwave generation in the X- and K-band using integrated soliton microcombs[J]. Nature Photon.，2020，14：486-491.

[31] Zhang M，Buscaino B，Wang C，et al. Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator[J]. Nature，2019，568：373-377.

[32] Herr T，Hartinger K，Riemensberger J，et al. Universal formation dynamics and noise of Kerr-frequency combs in microresonators[J]. Nature Photon.，2012，6：480-487.

[33] Johnson A R，Okawachi Y，Levy J S，et al. Chip-based frequency combs with sub-100 GHz repetition rates[J]. Opt. Lett.，2012，37(5)：875-877.

[34] Kim S，Han K，Wang C，et al. Dispersion engineering and frequency comb generation in thin silicon nitride concentric microresonators[J]. Nature Commun.，2017，8：372.

[35] Chen T，Lee H，Li J，et al. A general design algorithm for low optical loss adiabatic connections in waveguides[J]. Opt. Express，2012，20(20)：22819-22829.

[36] Lee H，Chen T，Li J，et al. Ultra-low-loss optical delay line on a silicon chip[J]. Nature Commun.，2012，3：867.

（下转第 318 页）

利用了气压传感器解算的高度数据对行人的状态进行判别，并利用该状态来对高度数据进行修正。实验结果表明：利用现有的低成本微气压传感器，该算法能够有效分辨楼层高度和中间平台的高度，获得较高精度的行人室内高度信息，并且该算法对平走状态的高度漂移具有一定抑制作用，适用于低速运动载体的高度测量。

参考文献：

[1] 高宇航，向政蓉，黄庆南，等. 基于物联网的无人机仿真与测试系统设计[J]. 物联网技术，2023，13(12)：60-63，66.
Gao Yuhang，Xiang Zhengrong，Huang Qingnan，et al. Design of unmanned aerial vehicle simulation and testing system based on the Internet of Things[J]. J. IoT Technol.，2023，13(12)：60-63，66.

[2] 吕 品，朱静漪，赖际舟，等. 基于行为概率分析的室内行人导航方法[J]. 中国惯性技术学报，2023，31(11)：1122-1131.
Lv Pin，Zhu Jingyi，Lai Jizhou，et al. Indoor pedestrian navigation method based on behavioral probability analysis[J]. J. Chin. Inert. Technol.，2023，31(11)：1122-1131.

[3] Wen S，Ge Z，Yuan D，et al. Enhanced pedestrian navigation on smartphones with VLP-assisted PDR integration[J]. IEEE Sens. J.，2023，23(14)：15952-15962.

[4] 李 楠，梁 冰. 基于UWB的三维定位和优化滤波方法[J]. 河北大学学报(自然科学版)，2021，41(3)：329-336.
Li Nan，Liang Bing. Three dimensional positioning and optimized filtering method based on UWB[J]. J. Hebei Uni. (Natural Science Edition)，2021，41(3)：329-336.

[5] Cao H J，Wang Y J，Bi J X. Smartphones：3D indoor location using WiFi RTT[J]. IEEE Commun. Lett.，2021，25(4)：1201-1205.

[6] Lv Y Y，Liu W J，Wang Z，et al. WSN location technology based on hybrid GA-PSO-BP algorithm for indoor three-dimensional space[J]. Wireless Pers. Commun.，2020，114(1)：167-184.

[7] 吴习芊，江小平，丁 昊，等. 基于WiFi信号的多维参数估计与三维轨迹跟踪算法[J]. 信号处理，2020，36(8)：1352-1362.
Wu Xiqian，Jiang Xiaopin，Ding Hao，et al. Multidimensional parameter estimation and three-dimensional trajectory tracking algorithm based on WiFi signals[J]. J. Signal Process.，2020，36(8)：1352-1362.

[8] 李国元，唐新明，周晓青，等. 高分七号卫星激光测高仪无场几何定标法[J]. 测绘学报，2022，51(3)：401-412.
Li Guoyuan，Tang Xinming，Zhou Xiaoqing，et al. The method of GF-7 satellite laser altimeter on-orbit geometric calibration without field site[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica，2022，51(3)：401-412.

[9] 王 洁，王娜子，徐天河，等. 组合GNSS观测值反演海面高度[J]. 测绘学报，2022，51(2)：201-211.
Wang Jie，Wang Nazi，Xu Tianhe，et al. Sea level estimation using the combination of GNSS observations [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica，2022，51(2)：201-211.

[10] 黄 鹤，谢飞宇，王 珺，等. 基于自适应高斯-牛顿迭代三步延迟时空融合的无人机测高[J]. 南京大学学报(自然科学)，2022，58(4)：689-698.
Huang He，Xie Feiyu，Wang Jun，et al. Altitude measurement of UAV based on adaptive Gauss-Newton iterative three-step delay space-time fusion[J]. J. Nanjing Uni. (Natural Science)，2022，58(4)：689-698.

[11] Dong Y，Arslan T. Real-time NLOS/LOS identification for smartphone-based indoor positioning system using WiFi RTT and RSS[J]. IEEE Sens. J.，2021，22(6)：5199-5209.

[12] Xu Y，Cao J，Sshmaliy Y，et al. Distributed Kalman filter for UWB/INS integrated pedestrian localization under colored measurement noise[J]. Satell. Navig.，2021(1)：2.

作者简介：

余 豪(1996—)，男，四川省成都市人，硕士研究生，主要从事惯性传感器与自主定位研究；

陈燕苹(1990—)，女，重庆市人，博士，讲师，主要从事惯性传感器与自主定位研究。

(上接第215页)

[37] Jiang X，Wu H，Dai D. Low-loss and low-crosstalk multimode waveguide bend on silicon[J]. Opt. Express，2018，26(13)：17680-17689.

[38] Morrison B，Bedoya A C，Ren G，et al. Compact Brillouin devices through hybrid integration on silicon[J]. Optica，2017，4(8)：847-854.

[39] Vogelbacher F，Nevlacsil S，Sagmeister M，et al. Analysis of silicon nitride partial euler waveguide bends[J]. Opt. Express，2019，27(22)：31394-31406.

[40] Zhou H，Geng Y，Cui W，et al. Soliton bursts and deterministic dissipative Kerr soliton generation in auxiliary-assisted microcavities[J]. Light：Sci. and Appl.，2019，8：50.

[41] Zhang S Y，Silver J M，Bino L D，et al. Sub-milliwatt-level microresonator solitons with extended access range using an auxiliary laser[J]. Optica，2019，6(2)：206-212.

作者简介：

杜润昌(1982—)，男，湖北省十堰市人，博士，高级工程师，主要从事原子分子物理、现代原子钟、微腔光学频率梳、半导体激光器等方面的研究。