

# 基于短波红外空间频域成像的人体组织成分无标记非接触 高分辨定量成像

赵雁雨<sup>1</sup>

北京航空航天大学医学科学与工程学院 北京 100191

Email: yanyuzhao@buaa.edu.cn

**摘要:** 空间频域成像是一种新兴的光学成像方法, 可无标记、非接触、大视场、定量测量组织的  
光学吸收和散射系数, 进而计算每一像素位置的氧合血红蛋白、脱氧血红蛋白浓度及血氧。目前  
的光学成像方法难以对组织中的水和脂肪进行非接触量化测量。针对上述问题, 研究了基于空  
间频域成像的高光谱成像系统, 利用水和脂肪在短波红外波长独特的光学吸收特性, 针对光在生  
物组织中的传播建立计算模型, 首次以亚毫米分辨率实现了在短波红外波段利用结构光对生物组  
织的光学吸收和散射系数进行测量, 并实现了对组织中水和脂肪含量的无标记、非接触、大视场  
量化成像。此外, 围绕组织成分定量测量开展了系列研究: 为应对高灵敏短波红外探测器的易得  
性问题, 首次提出了基于硅基探测器的组织水和脂质定量成像方法, 将探测器成本降低了 100 倍;  
针对传统空间频域成像测量速度和数据处理速度受限的问题, 提出了半色调编码方法, 突破传统  
连续调编码方式造成的调制速度瓶颈, 将成像速度提高 80 倍; 进一步提出了基于深度学习的数  
据处理方法, 将空间频域成像数据处理速度提高超过十万倍。

**关键词:** 短波红外; 空间频域成像; 吸收系数; 定量成像

## 1、研究背景

空间频域成像是一种新兴的漫射光学成像方法, 可对生物组织等强散射介质进行无标记、非  
接触、宽场光学特征测量, 包括定量的吸收、散射系数测量等, 从而进一步定量计算组织成分  
的含量。人体的 60-80% 由水和脂肪构成, 二者与细胞及组织功能密切相关。此外, 水和脂肪在  
组织中含量和分布的改变往往对炎症、糖尿病、心血管疾病、癌症等诸多疾病及相关生理过程有  
着重要意义。目前的光学成像方法难以对组织中的水和脂肪进行非接触量化测量, 也无法对血液  
中的脂肪进行非侵入式测量。近年来, 近红外光学成像因其能够利用组织的光学吸收特征并探  
测组织成分而备受关注。然而, 由于水和脂肪在近红外 (例如 700-900nm) 波段的吸收特征远弱  
于血红蛋白, 上述方法难以对水和脂肪进行量化成像。另一方面, 在短波红外波段 (例如 1000-  
2000nm), 水和脂肪对光的吸收作用显著增强, 因此有望通过短波红外吸收系数谱量化水和脂肪  
含量。值得注意的是, 在目前的光学成像技术中, 漫反射光谱成像 (DOSI) 可以测量组织中水和  
脂肪的含量, 但空间分辨率较低, 约为 1 厘米; 光声成像 (PA) 也已被用来探测组织中的脂肪,  
但限于脂肪团块, 难以对脂肪含量进行量化测量。

## 2、研究内容

针对上述问题，我们发展了基于短波红外的高光谱空间频域成像系统<sup>[1]</sup>。我们利用水和脂肪在短波红外波长独特的光学吸收特性，针对光在生物组织中的传播建立计算模型，首次以亚毫米分辨率实现了在短波红外波段利用结构光对生物组织的光学吸收和散射系数进行测量，并实现了对组织中水和脂肪含量的无标记、非接触、大视场量化成像。在实验结果中，我们展示了对小动物模型水肿和炎症反应的实时、量化监测能力，人体血脂的无创、非接触监测，以及对皮下白色脂肪和褐色脂肪的非接触分类判别、肿瘤内部脂肪的空间分布测量等应用。除了上述临床相关的应用，本研究的成像方法还可以应用到护肤品“锁水”功能评估等日常生活场景。此外，围绕组织成分定量测量开展了系列研究：为应对高灵敏短波红外探测器的易得性问题，首次提出了基于硅基探测器的组织水和脂质定量成像方法，将探测器成本降低了100倍<sup>[2]</sup>；提出了基于深度学习的数字处理方法，将空间频域成像数据处理速度提高超过十万倍<sup>[3]</sup>；进一步地，针对传统空间频域成像测量速度和数据处理速度受限的问题，提出了半色调编码方法，突破传统连续调编码方式造成的调制速度瓶颈，将成像速度提高80倍<sup>[4-5]</sup>。

## 3、结论

可以预见，短波红外空间频域成像方法将成为测量组织在短波红外波段光学特征的关键技术，为探索与水、脂肪相关的生理、疾病过程及其机理提供新的技术手段，同时为新的应用研究提供新的平台。

（本研究系列成果近期发表在 Nature Communications、Light: Science & Applications、Optics Letters、Journal of Biomedical Optics 等期刊。）

## 参考文献

- [1] Yanyu Zhao, Anahita Pilvar, Anup Tank, et al. Shortwave-infrared meso-patterned imaging enables label-free mapping of tissue water and lipid content[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-12.
- [2] Bowen Song, Xinman Yin, Yubo Fan, Yanyu Zhao. Quantitative spatial mapping of tissue water and lipid content using spatial frequency domain imaging in the 900- to 1000-nm wavelength region[J]. Journal of Biomedical Optics, 2022, 27(10), 105005.
- [3] Yanyu Zhao, Yue Deng, Feng Bao, Hannah Peterson, Raef Istfan, Darren Roblyer. Deep learning model for ultrafast multifrequency optical property extractions for spatial frequency domain imaging[J]. Optics Letters, 2018, 43(22), 5669-5672.
- [4] Yanyu Zhao, Bowen Song, Ming Wang, Yang Zhao, Yubo Fan. Halftone spatial frequency domain

imaging enables kilohertz high-speed label-free non-contact quantitative mapping of optical properties for strongly turbid media[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10, 245.

- [5] Jiamiao Yang, Qiaozhi He, Linxian Liu, Yuan Qu, Rongjun Shao, Bowen Song, Yanyu Zhao. Anti-scattering light focusing by fast wavefront shaping based on multi-pixel encoded digital-micromirror device[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10, 149.

中国仪器仪表学会